

智浪教育--普惠英才文库

前 言

百年大计，教育为本。建设有中国特色的社会主义，要靠我国有知识的各类人才。发展教育事业，把教育事业放到突出的战略地位，切实提高全民族的文化素质，为科技的发展、经济的振兴、社会的进步，培养合格的人才，是我国面临的重大而迫切的任务，也是我们中华民族自立于世界民族之林的重要问题。

随着我国四化建设和教育事业的发展，教师队伍不断壮大。他们可能由于教学经验不足，在教学中会遇到一些困难，急需增强基础知识，提高自身教学水平的工具书。因此，我们组织了有多年教学经验的老教师，编写了一套《中小学教师实用各科辞典》。这套辞典的出版，若能对教师的教学有帮助，从而为促进我国教育事业的发展做出微薄贡献，我们和辞典的编写者就得到了最大的满足。

参加《中学教师实用物理辞典》编写的有孙旭初，王文勋，童恒珞，叶九成，由尚世铉、刘锡龙、高尚惠教授分别审定。

《中小学教师实用各科辞典》编委会

1988年8月

凡 例

一、本辞典共分为力学、热学、电磁学、光学、原子和原子核、单位和其他以及附录七个部分。前五部分基本上与现行教科书学科顺序相同。

二、本辞典主要是为中学物理教学而编写的。旨在作为中学物理教师在教学中的参考用书。所收集的词目均是现行中学教材中出现的物理学名词、定律、定理、定则以及重要的物理现象和仪器设备等。

三、为了体现其实用性，在有些辞目中解释较为详细。对必要的公式推导和定理证明以及重要定律的说明作了一些数学上的处理。便于教师在教学中参考。全书共收集词条 1206 条。

四、对教材中出现的有些物理学家也作为词条加以简单的介绍。科学家原名的书写均参照 1986 年 12 月出版的科学技术史词典的拼法。

五、词目出现的顺序，基本按其在教科书中出现的前后顺序编排。对一词多义的条目，均保留词目并指出见词目 × ×。

六、对于单位、物理量方面的词目以及与教学内容有关（或学生应知道的物理常识的条目）但教科书中未出现的词目，专门收集在单位与其他一章中。

七、对于常用的物理单位及物理常数。收集在附录中。附录均是物理量、物理常数的表格。以便需要时查找。

八、为查找方便起见，本书前有按词目出现顺序排列的目录。书后附有按笔画顺序而编排的词目笔画索引。

一、力学

【力学】

物理学的一个分支学科。它是研究物体的机械运动和平衡规律及其应用的。力学可分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学是以讨论物体在外力作用下保持平衡状态的条件为主。运动学是撇开物体间的相互作用来研究物体机械运动的描述方法，而不涉及引起运动的原因。动力学是讨论质点系统所受的力和压力作用下发生的运动两者之间的关系。力学也可按所研究物体的性质分为质点力学、刚体力学和连续介质力学。连续介质通常分为固体和流体，固体包括弹性体和塑性体，而流体则包括液体和气体。

16 世纪到 17 世纪间，力学开始发展为一门独立的、系统的学科。伽利略通过对抛体和落体的研究，提出惯性定律并用以解释地面上的物体和天体的运动。17 世纪末牛顿提出力学运动的三条基本定律，使经典力学形成系统的理论。根据牛顿三定律和万有引力定律成功地解释了地球上的落体运动规律和行星的运动轨道。此后两个世纪中在很多科学家的研究与推广下，终于成为一门具有完善理论的经典力学。1905 年，爱因斯坦提出狭义相对论，对于高速运动物体，必须用相对力学来代替经典力学，因为经典力学不过是物体速度远小于光速的近似理论。20 世纪 20 年代量子力学得到发展，它根据实物粒子和光子具有粒子和波动的双重性解释了经典力学不能解释的微观现象，并且在微观领域给经典力学限定了适用范围。

【经典力学】

经典力学的基本定律是牛顿运动定律或与牛顿定律有关且等价的其它力学原理，它是 20 世纪以前的力学，有两个基本假定：其一是假定时间和空间是绝对的，长度和时间间隔的测量与观测者的运动无关，物质间相互作用的传递是瞬时到达的；其二是一切可观测的物理量在原则上可以无限精确地加以测定。20 世纪以来，由于物理学的发展，经典力学的局限性暴露出来。如第一个假定，实际上只适用于与光速相比的低速运动情况。在高速运动情况下，时间和长度不能再认为与观测者的运动无关。第二个假定只适用于宏观物体。在微观系统中，所有物理量在原则上不可能同时被精确测定。因此经典力学的定律一般只是宏观物体低速运动时的近似定律。

【牛顿力学】

它是以牛顿运动定律为基础，在 17 世纪以后发展起来的。直接以牛顿运动定律为出发点来研究质点系统的运动，这就是牛顿力学。它以质点为对象，着眼于力的概念，在处理质点系统问题时，须分别考虑各个质点所受的力，然后来推断整个质点系统的运动。牛顿力学认为质量和能量各自独立存在，且各自守恒，它只适用于物体运动速度远小于光速的范围。牛顿力学较多采用直观的几何方法，在解决简单的力学问题时，比分析力学方便简单。

【分析力学】

经典力学按历史发展阶段的先后与研究方法的不同而分为牛顿力学及分析力学。1788年拉格朗日发展了欧勒·达朗伯等人的工作，发表了“分析力学”。分析力学处理问题时以整个力学系统作为对象，用广义坐标来描述整个力学系统的位形，着眼于能量概念。在力学系统受到理想约束时，可在不考虑约束力的情况下来解决系统的运动问题。分析力学较多采用抽象的分析方法，在解决复杂的力学问题时显出其优越性。

【理论力学】

是力学与数学的结合。理论力学是数学物理的一个组成部分，也是各种应用力学的基础。它一般应用微积分、微分方程、矢量分析等数学工具对牛顿力学作深入的阐述并对分析力学作系统的介绍。由于数学更深入地应用于力学这个领域，使力学更加理论化。

【运动学】

用纯粹的解析和几何方法描述物体的运动，对物体作这种运动的物理原因可不考虑。亦即从几何方面来研究物体间的相对位置随时间的变化，而不涉及运动的原因。

【动力学】

讨论质点系统所受的力和在力作用下发生的运动两者之间的关系。以牛顿定律为基础，根据不同的需要提出了各种形式的动力学基本原理，如达朗伯原理、拉格朗日方程、哈密顿原理，正则方程等。根据系统现时状态以及内部各部分间的相互作用和系统与它周围环境之间的相互作用可预言将要发生的运动。

【弹性力学】

它是研究弹性体内由于受到外力的作用或温度改变等原因而发生的应力，形变和位移的一门学科，故又称弹性理论。弹性力学通常所讨论的是理想弹性体的线性问题。它的基本假定是：物体是连续、均匀和各向同性的；物体是完全弹性体；在施加负载前，体内没有初应力；物体的形变十分微小。根据上述假定，对应力和形变关系而作的数学推演常称为数学弹性力学。此外还有应用弹性力学。如物体形变不是十分微小，可用非线性弹性理论来研究。若物体内部应力超过了弹性极限，物体将进入非完全弹性状态。此时则必须用塑性理论来研究。

【连续介质力学】

它是研究质量连续分布的可变形物体的运动规律，主要讨论一切连续介质普遍遵从的力学规律。例如，质量守恒、动量和角动量定理、能量守恒等。弹性体力学和流体力学有时综合讨论称为连续介质力学。

【力】

物体之间的相互作用称为“力”。当物体受其他物体的作用后，能使物体获得加速度（速度或动量发生变化）或者发生形变的都称为“力”。它是物理学中重要的基本概念。在力学的范围内，所谓形变是指物体的形状和体积的变化。所谓运动状态的变化指的是物体的速度变化，包括速度大小或方向的变化，即产生加速度。力是物体（或物质）之间的相互作用。一个物体受到力的作用，一定有另一个物体对它施加这种作用，前者是受力物体，后者是施力物体。只要有力的作用，就一定有受力物体和施力物体。平常所说，物体受到了力，而没指明施力物体，但施力物体一定是存在的。不管是直接接触物体间的力，还是间接接触的物体间的力作用；也不管是宏观物体间的力作用，还是微观物体间的力作用，都不能离开物体而单独存在的。力的作用与物质的运动一样要通过时间和空间来实现。而且，物体的运动状态的变化量或物体形态的变化量，取决于力对时间和空间的累积效应。根据力的定义，对任何一个物体，力与它产生的加速度方向相同，它的大小与物体所产生的加速度成正比。且两力作用于同一物体所产生的加速度，是该两力分别作用于该物体所产生的加速度的矢量和。

力是一个矢量，力的大小、方向和作用点是表示力作用效果的重要特征，称它为力的三要素。力的合成与分解遵守平行四边形法则。在国际单位制（SI）中，规定使质量为一千克的物体，产生加速度为1米/秒²的力为1牛顿，符号是N。（1千克力=9.80665牛顿。1牛顿=10⁵达因）

力的种类很多。根据力的效果来分的有压力、张力、支持力、浮力、表面张力、斥力、引力、阻力、动力、向心力等等。根据力的性质来分的有重力、弹力、弹力、摩擦力、分子力、电磁力、核力等等。在中学阶段，一般分为场力（包括重力、电场力、磁场力等），弹力（压力、张力、拉力等），摩擦力（静摩擦力、滑动摩擦力等）。

【力的三要素】

力的大小、方向和作用点合称为“力的三要素”。常用有向线段来表示力。线段的长度跟力的大小成正比，箭头表示力的方向，线段的起点表示力的作用点。用上述方式表示力叫“力的图式法”。当考虑有关力的问题时，必须考虑这三个要素。

【物性】

是物理学的内容之一，是研究有关物质的气、液、固三态的力学和热学性质的科学。物性学原指研究物质三态的机械性质和热性质的学科。随着对物质性质的研究，逐渐由力学和热学扩展到电磁学、光学等方面，物性学所涉及的范围太广，现已不再作为一门单独的学科，而将其内容分别纳入有关的部门。

【物理变化】

指物质的状态虽然发生了变化，但一般说来物质本身的组成成分却没有改变。例如：位置、体积、形状、温度、压强的变化，以及气态、液态、固态间相互转化等。还有物质与电磁场的相互作用，光与物质的相互作用，以及微观粒子（电子、原子核、基本粒子等）间的相互作用与转化，都是物理变化。

【物质】

物质为构成宇宙间一切物体的实物和场。例如空气和水，食物和棉布，煤炭和石油，钢铁和铜、铝，以及人工合成的各种纤维、塑料等等，都是物质。世界上，我们周围所有的客观存在都是物质。人体本身也是物质。除这些实物之外，光、电磁场等也是物质，它们是以场的形式出现的物质。

物质的种类形态万千，物质的性质多种多样。气体状态的物质，液体状态的物质或固体状态的物质；单质、化合物或混合物；金属和非金属；矿物与合金；无机物和有机物；天然存在的物质和人工合成的物质；无生命的物质与生命物质以及实体物质和场物质等等。物质的种类虽多，但它们有其特性，那就是客观存在，并能够被观测，以及都具有质量和能量。

【物体】

由物质构成的，占有空间的个体都称为物体。通过人类感觉器官可感觉到它存在的客观现实。

【张力】

被拉伸的弦、绳等柔性物体对拉伸它的其他物体的作用力或被拉伸的柔性物体内部各部分之间的作用力。例如，某绳 AB 可以看成是 AC 和 CB 两段组成，其中 C 为绳 AB 中的任一横截面，AC 段和 CB 段的相互作用力就是张力。在绳的截面上单位面积所受的张力称为张应力。

【力的单位】

在 $m \cdot k \cdot s$ 制中力的单位是“牛顿”。力的大小，习惯上用重量的单位。若在弹簧秤上挂 500 克的砝码时的伸长长度与用手拉弹簧秤的伸长长度相同时，手的拉力便与 500 克砝码的重力大小相同。因此，与 500 克的重量同样作用的力，就用 500 克的力来表示。但实际上，克、千克都是质量的单位，克重或千克重等重量单位是属于力的一种重力单位，不能代表全部，而且在计算上数值不同，故有力之绝对单位。依牛顿力学的定义：力 = 质量 \times 加速度。质量为 1 千克的质点，在力的方向产生 1 米 / 秒² 的加速度时，则称该力为 1 千克 \cdot 米 / 秒² = 1 牛顿。因质点受地球引力作用，下落时的重力加速度为 $g = 9.8$ 米 / 秒²，故质量为 1 千克的质点的重量 $W = mg = 1 \times 9.8$ 千克 \cdot 米 / 秒² = 9.8 牛顿。

【牛顿】

它是国际单位制中力的单位。使质量是 1 千克的物体获得 $1 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-2}$ 加速度的力叫作 1 “牛顿”。符号用 N 表示。（1 牛顿 = 10^5 达因）。

【重力】

地球对物体的引力称为“重力”。关于重力有各种不同的解释，如，是一个物体在宇宙中受到其他物体万有引力作用的总合；重力即地球对物体的吸引力；重力是由于地球的吸引而使物体受到的力；宇宙中的每个质点与其它质点之间，都存在着一种引力性的相互作用，与两质点质量的乘积成正比，与其间距离的平方成反比，这种相互作用称为“重力”。

上述几种讲法虽略有区别，但强调了它们的本质是引力。因为处于引力场的物体都受到重力，重力的本质是引力相互作用。地面附近的物体，由于其它天体距离它很远，地球上其它物体对它的万有引力很小，所以该物体的重力是指地球对它的万有引力，其方向指向地心。离地面愈远，重力愈小。同一物体在地球上不同地点重力也稍有不同，从赤道到两极重力是逐渐增加的，因为地球是一个扁球体，其赤道处半径大于两极半径。地球上的物体随地球的自转而作匀速圆周运动，作匀速圆周运动的物体所需的向心力，来源于地球对物体的引力。向心力与重力同为引力的分力。由于地球上各地的地形与地质构造不同，物体在地球上不同的地点引力将有所变化，而物体的重力也随之而变化。利用这种重力的变化可以探矿（可探测煤、铁、铜矿及石油的蕴藏量等）。

【重量】

在地球表面附近，物体所受重力的大小，称为“重量”。地球表面上的物体，除受地球对它的重力作用外，由于地球的自转，还将受到惯性离心力的作用，这两个力的合力的大小称为该物体的重量。习惯上人们认为：物体所受到的重力就是它本身的重量。对重量的解释有许多说法，例如，重量就是重力；物体的重量就是地球对该物体的万有引力；重量即物体所受重力的大小；重量是物体静止时，拉紧竖直悬绳的力或压在水平支持物上的力。

上述几种讲法，有的强调重量即重力，是矢量，它们的本质是引力。有的强调重力不是矢量，重量是重力的大小，是标量。还有的是以测量法则作为重量的定义。这些不同的定义只是解释的不同而已，谈不到对与错。

质量为 1 千克的物体，在纬度 45° 的海平面上所受的重力即重量称为 1 千克力。不同的物体重量不同，同一物体在地球上的位置不同，它的重量也有差异。1 千克的物体，在赤道上称得重量是 0.9973 千克力，而在北极称之则是 1.0026 千克力。同一物体所处位置不同，其质量不变，而重量则愈近两极和愈近地面则愈大。

【重心】

物体各部分所受重力的合力的作用点。在物体内部各部分所受重力可看作是一组平行力，不管该物体在重力场中如何放置，这些平行力的合力永远通过物体上的某一固定点，该点就是物体的“重心”。均匀物体的重心，只跟物体的形状有关。有规则形状均匀物体，它的重心就在几何中心上。例如，均匀直棒的重心在棒之中央；均匀球体的重心在球心，三角板的重心在三角形三条中线的交点；正方形的重心在两对角线的交点；立方体的重心在中心。不均匀物体的重心的位置，除跟物体的形状有关外，还跟物体内部质量的分布有关。例如，载货汽车的重心随载货的多少，以装车的位置而不同；起重机的重心是随着提升物体的重量和高度而变化。对一般物体求重心可用悬线法，用线悬挂物体，在平衡时，合力的作用点（重心）一定在悬挂线的延长线上，然后把悬挂点换到物体上的另一点，再使它平衡，则重心一定也在新的悬挂线的延长线上，前后两线的交点就是重心的位置。

【质量】

物理学中基本概念之一，在牛顿定律中质量的概念是作为物体的惯性的量度而提出的。在牛顿第二定律中，关于“质量”的阐述是：若作用力不变，那么物体获得的加速度与它的质量成反比。这一质量是物体惯性大小的量度，称之为“惯性质量”。物体A和B的惯性质量 m_A 和 m_B 之比，定义为在同一作用力下它们所获得的加速度 a_A 和 a_B 的反比，即

$$m_A \cdot m_B = a_B \cdot a_A$$

用一选定的标准体为惯性质量的标准，其它物体的惯性质量的大小，可根据上述关系式，用测量加速度的办法与标准体的惯性质量加以比较来求出。

物体都是引力场的源泉，都能产生引力场，也都受引力场的作用。通过万有引力定律将物体的这一属性表现出来：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

其中 m_1 和 m_2 代表两个物体各自产生引力场和受引力场作用的本领，也叫做两物体各自的“引力质量”。 r 代表两物体间的距离， F 是作用于两个物体间的万有引力， G 是一个常数，其大小由选择 F 、 r 、 m_1 和 m_2 的单位而定。由万有引力定律公式知，物体A和B的引力质量 m'_A 和 m'_B 之比，定义为它们各自与另一物体的万有引力 F_A 和 F_B 之比，即

$$m'_A \cdot m'_B = F_A \cdot F_B$$

所以用测得引力的方法，可把一待测物体的引力质量与一标准体的引力质量加以比较的方法来测量引力质量。这就是用天平来测物体质量的办法。所以说，天平测的是引力质量的大小。

同种物质质量的大小和该物质的多少成正比，有时亦可将质量定义为：物体所含物质的多少。后来质量的值一般用物体所受外力和由此得到的加速度之比来表示。在同样外力作用下，惯性较大的物体得到的加速度较小，也就是它的质量较大。当物体作高速（即其速度接近光在真空中的速度 c ）运动时，物体的质量 m 与其速度有关，其关系为 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ，

式中 m_0 为物体在静止状态（ $v = 0$ ）时的质量，称为“静止质量”。根据这一关系式，质量随速度的增大而增加，但只有接近光速 c 时才显著，通常 v 比 c 小得多， m 和 m_0 相差很微小，故质量可看做是一个不变的恒量。由于惯性质量同它的引力质量在数值上相等，故在物理学中，惯性质量和引力质量统称为质量。

【质量和重量】

质量和重量是完全不同的两个物理量，绝不能混淆，现比较如下：

1. 定义不同。质量是物体惯性的量度，它是任何物体都固有的一种属性。重量则反映了物体所受重力的大小，它是受地球的吸引而引起的。

2. 质量是标量。重量是矢量。

3. 牛顿力学中的质量是一个恒量，重量则随物体所处的纬度和高度的不同而变化。质量为 1 千克的物体，只有在纬度 45° 的海平面上重量才是 1 千克，这个千克后面加个“力”字，与质量的千克加以区别。若将这个物体放在赤道，它的重量为 0.9973 千克力，放在北极，它的重量则是 1.0026 千克力。

物体无论是否受到重力的作用，它总是具有质量的。例如，宇宙飞船远离地球，摆脱了地球的引力，就无所谓重量了，但物体的质量仍然存在。当关掉发动机之后。宇宙飞船，仍能凭借惯性继续飞行，这说明物体的质量仍在起作用。

4. 质量用天平测定。重量则用弹簧秤测之。其原因是：天平是等臂杠杆。设臂长为 L ，被测物体的重量是 W_1 ，砝码的重量是 W_2 。当天平平衡时，根据杠杆平衡原理得到

$$W_1 L = W_2 L$$

$$W_1 = W_2$$

所以，当天平平衡时，物体与砝码的重量是相等的。由于物体和砝码在地球上的同一地点，设此地的重力加速度为 g ，则 $W_1 = m_1 g$ ， $W_2 = m_2 g$ 。

因此， $m_1 g = m_2 g$

$$m_1 = m_2$$

从上式知，一个物体无论在地球上任何地方，用天平来称量，物体的质量总是等于跟它平衡的砝码的质量。由砝码的质量数，就能知道物体的质量数。在地球表面，用天平测出物体质量数，就可近似认为与重量数相等。但要知重量的精确数，就必须知道该地的重力加速度，而后根据天平所测知的物体质量 m 。算出物体的重量 ($P = mg$)。

用弹簧秤来称量物体，由于弹簧的伸长与作用力成正比，所以从弹簧秤的刻度上就可读出物体的重量数值。我国历来所用的杆秤实际上是不等臂的天平，因此用它测物体时，是质量而不是重量。

5. 质量和重量的单位

在国际单位制里，质量的单位是千克，重量的单位是牛顿。实用时，重量的单位常用千克力或克力。

综上所述，质量和重量的本质是两个不同的物理量，但它们又有密切的联系，是通过牛顿第二定律公式 $F = ma$ 建立起来的。物体自由下落，其重力加速度由物体所受的重力产生。若物体质量为 m ，受到的重力为 P ，重力加速度为 g ，根据 $F = ma$ ，得 $P = mg$ ，这就是质量和重量的关系式。由此

可看出：在地球上同一地点， g 为常量，重量与质量成正比。在地球上不同地点，重力加速度稍有不同，因此重量也稍有差异。利用公式 $P = mg$ 算出的重量，在国际单位制中是以牛顿为单位的。

【密度】

某种物质的质量和其体积的比值，即单位体积的某种物质的质量，叫作这种物质的“密度”。其数学表达式为 $\rho = \frac{m}{V}$ ，在国际单位制中，质量的主单位是千克，体积的主单位是立方米，于是取 1 立方米物质的质量作为物质的密度。对于非均匀物质则称为“平均密度”。地球的平均密度为 5.5×10^3 千克 / 米³，标准状况下干燥空气的平均密度为 0.001293×10^3 千克 / 米³。常见的非金属固体、金属、液体、气体的密度见附表。

密度在生产技术上的应用，可从以下几个方面反映出来：

1. 可鉴别组成物体的材料。
2. 可计算物体中所含各种物质的成分。
3. 可计算某些很难称量的物体的质量。
4. 可计算形状比较复杂的物体的体积。
5. 可判定物体是实心还是空心。
6. 可计算液体内部压强以及浮力等。

综上所述，可见密度在科学研究和生产生活中有着广泛的应用。对于鉴别未知物质，密度是一个重要的依据。“氩”就是通过计算未知气体的密度发现的。经多次实验后又经光谱分析，确认空气中含有一种以前不知道的新气体，把它命名为氩。在农业上可用来判断土壤的肥力，含腐殖质多的土壤肥沃，其密度一般为 2.3×10^3 千克 / 米³。根据密度即可判断土壤的肥力。在选种时可根据种子在水中的沉、浮情况进行选种：饱满健壮的种子因密度大而下沉；瘪壳和其它杂草种子由于密度小而浮在水面。在工业生产上如淀粉的生产以土豆为原料，一般来说含淀粉多的土豆密度较大，故通过测定土豆的密度可估计淀粉的产量。又如，工厂在铸造金属物之前，需估计熔化多少金属，可根据模子的容积和金属的密度算出需要的金属量。

【比重】

物体的重量和它的体积的比值，即单位体积的某种物质的重量，称作该物体的“比重”。用 γ 表示比重， G 表示重量， V 表示体积，则其数学表达式为： $\gamma = \frac{G}{V}$ 。国际单位制的单位为牛顿 / 米³。

除气体外，任何物质某体积的重量，和 4℃ 时同体积的水的重量相比，即称为该物质的比重。物质的重量和其质量成正比，则其单位体积的重量，必和其密度成正比，所以任何物质的比重，又等于该物质和水在 4℃ 的密度相比。列式如下：

$$\begin{aligned} \text{物质的比重} &= \frac{\text{物质某体积的重量}}{\text{水在 } 4^\circ\text{C 时同体积的重量}} \\ &= \frac{\text{物质的密度}}{\text{水在 } 4^\circ\text{C 时的密度}} \end{aligned}$$

气体以外各种物质的比重皆以水为共同标准，而用 C·G·S 单位制时，水的密度在 4℃ 时适等于 1 克 / 厘米³，故物质的比重常和其密度的数值相等。唯密度须以 1 克 / 厘米³ 为单位，比重则仅为纯数字，所以意义上绝不相同。简言之，即比重是一单位容积物质和同一单位水的相对密度。根据 1978 年国际纯粹应用物理学协会所属符号单位和术语委员会的文件建议，我国已取消比重的概念，而以密度的概念代替。

【弹力】

亦称“弹性力”。物体受外力作用发生形变后，若撤去外力，物体能回复原来形状的力，叫作“弹力”。它的方向跟使物体产生形变的外力的方向相反。因物体的形变有多种多样，所以产生的弹力也有各种不同的形式。例如，一重物放在塑料板上，被压弯的塑料要恢复原状，产生向上的弹力，这就是它对重物的支持力。将一物体挂在弹簧上，物体把弹簧拉长，被拉长的弹簧要恢复原状，产生向上的弹力，这就是它对物体的拉力。不仅塑料、弹簧等能够发生形变，任何物体都能够发生形变，不发生形变的物体是不存在的。不过有的形变比较明显，能直接见到；有的形变相当微小，必须用仪器才能觉察出来。

【形变】

凡物体受到外力而发生形状变化谓之“形变”。物体由于外因或内在缺陷，物质微粒的相对位置发生改变，也可引起形态的变化。形变的种类有：

- 1．纵向形变：杆的两端受到压力或拉力时，长度发生改变；
 - 2．体积形变：物体体积大小的改变；
 - 3．切变：物体两相对的表面受到在表面内的（切向）力偶作用时，两表面发生相对位移，称为切变；
 - 4．扭转：一圆柱状物体，两端各受方向相反的力矩作用而扭转。称扭转形变；
 - 5．弯曲：两端固定的钢筋，因负荷而弯曲，称弯曲形变。
- 无论产生什么形变，都可归结为长变与切变。

【测力计】

利用金属的弹性体制成标有刻度用以测量力的大小的仪器，谓之“测力计”。测力计有各种不同的构造形式，但它们的主要部分都是弯曲有弹性的钢片或螺旋形弹簧。当外力使弹性钢片或弹簧发生形变时，通过杠杆等传动机构带动指针转动，指针停在刻度盘上的位置，即为外力的数值。有握力计等种类，而弹簧秤则是测力计的最简单的一种。

【弹簧秤】

弹簧秤又叫弹簧测力计，是利用弹簧的形变与外力成正比的关系制成的测量作用力大小的装置。

弹簧秤分压力和拉力两种类型，压力弹簧秤的托盘承受的压力等于物体的重量，秤盘指针旋转的角度指示所受压力的数值。拉力弹簧秤的下端和一个钩子连在一起（这个钩子是与弹簧下端连在一起的），弹簧的上端固定在壳顶的环上。将被测物挂在钩上，弹簧即将伸长，而固定在弹簧上的指针随着下降。由于在弹性限度内，弹簧的伸长与所受之外力成正比，因此作用力的大小或物体重量可从弹簧秤的指针和外壳上的标度直接读出力的大小数值。

在使用时应注意所测的重量或力不要超过弹簧秤的量度范围，还应检查，在弹簧秤未挂物体时指针是否指在零刻度，若不在零刻度可进行修正。此外还应注意勿使弹簧和指针跟外壳摩擦，以免误差过大。

【胡克定律】

力学基本定律之一。适用于一切固体材料的弹性定律，它指出：在弹性限度内，物体的形变跟引起形变的外力成正比。这个规律是英国科学家胡克发现的，故叫作“胡克定律”。该定律对拉伸（或压缩）形变的具体表述为：在弹性限度内，物体的相对长变 $(\frac{L-L_0}{L_0})$ 跟所受的压强 $(\frac{F}{S})$ 成正比。其数学表达式为： $\frac{L-L_0}{L_0} = a \frac{F}{S}$ 。式中L为形变后的长度， L_0 为原长， $L - L_0$ 为绝对伸长度，P为物体所受的外力，S为物体横截面的面积，a为物体的伸长系数。在计算时，常用它的倒数 $\frac{1}{a} = E$ ——弹性模量（或杨氏模量）。公式可改成： $\frac{L-L_0}{L_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}$ 。中学教科书中表达为： $f = kx$ 。其中k是常数，叫做弹簧的倔强系数。它是一个有单位的量。在国际单位制中，f的单位是牛，x的单位是米，它是形变量（弹性形变），k的单位是牛/米。倔强系数在数值上等于弹簧伸长（或缩短）单位长度时的弹力。

【弹性力】

物体发生弹性形变后，内部产生企图恢复形变的力称为“弹性力”，或“弹力”。见弹力条。

【弹性】

物体在外力作用下产生形变，撤去外力，形变立即消失而恢复其原来形状和大小的性质谓之“弹性”。

【弹性限度】

亦称“弹性极限”。物体受到外力作用，在内部所产生的抵抗外力的相互作用力不超过某一极限值时，若外力作用停止，其形变可全部消失而恢复原状，这个极限值称为“弹性限度”。使物体发生形变的力若超过该值即使外力撤消，物体也不能完全恢复原状。例如，用力拉一弹簧，若拉力不太大时，在拉力撤消时，弹簧即能恢复原来状态；若拉力超过某一数值，弹簧就不能恢复原来状态。这个数值（最大极限）即为弹性限度。

【弹性形变】

固体受外力作用而使各点间相对位置的改变，当外力撤消后，固体又恢复原状谓之“弹性形变”。若撤去外力后，不能恢复原状，则称为“范性形变”。因物体受力情况不同，在弹性限度内，弹性形变有四种基本类型：即拉伸和压缩形变；切变；弯曲形变和扭转型变。

【弯曲形变】

物体发生弯曲时产生的形变叫做“弯曲形变”。物体变曲得越厉害，产生的弹力就越大。例如，将弓拉得越满，箭就射得越远。把一个物体放在支持物上，物体越重，支持物被压弯曲得越厉害，支持力就越大。

【扭转形变】

在金属丝的下面挂一个横杆，用力扭转这个横杆，金属丝就发生扭转形变，手放开，发生扭转形变的金属丝产生的弹力会把横杆扭回来。金属丝的扭转角度越大，弹力就越大。这种由于物体发生扭转时产生的形变叫做“扭转形变”。

【倔强系数】

它是一个有单位的量。用 k 来表示，单位是牛 / 米。倔强系数在数值上等于弹簧伸长（或缩短）单位长度时的弹力。倔强系数跟弹簧的长度、弹簧的材料、弹簧丝的粗细等等都有关系。弹簧丝粗的硬弹簧比弹簧丝细的软弹簧倔强系数大。

【摩擦】

当物体与另一物体沿接触面的切线方向运动或有相对运动的趋势时，在两物体的接触面之间有阻碍它们相对运动的作用力，这种力叫摩擦力。接触面之间的这种现象或特性叫“摩擦”。摩擦有利也有害，但在多数情况下是不利的，例如，机器运转时的摩擦，造成能量的无益损耗和机器寿命的缩短，并降低了机械效率。因此常用各种方法减少摩擦，如在机器中加润滑油等。但摩擦又是不可缺少的，例如，人的行走，汽车的行驶都必须依靠地面与脚和车轮的摩擦。在泥泞的道路上，因摩擦太小走路就很困难，且易滑倒，汽车的车轮也会出现空转，即车轮转动而车厢并不前进。所以，在某些情况下又必须设法增大摩擦，如在太滑的路上撒上一些炉灰或沙土，车轮上加挂防滑链等。

【摩擦力】

相互接触的两物体在接触面上发生的阻碍该两物体相对运动的力，谓之“摩擦力”。另有两种说法是：一个物体沿着另一个物体表面有运动趋势时，或一个物体在另一个物体表面滑动时，都会在两物体的接触面上产生一种力，这种力叫做摩擦力；相互接触的两个物体，如果有相对运动或相对运动的趋势，则两物体的接触表面上就会产生阻碍相对运动趋势的力，这种力叫做摩擦力。

按上述定义，产生摩擦力的条件，可分为静摩擦力、滑动摩擦力。两个接触着的物体，有相对滑动的趋势时，物体之间就会出现一种阻碍起动的力，这种力叫静摩擦力。两个接触着的物体，有了沿接触面的相对滑动，在接触面上就会产生阻碍相对滑动的力，这种力叫做滑动摩擦力。因此不能把摩擦力只看作是一种阻力。有时可以是动力。例如，放在卡车上的货物，是随卡车一起加速运动时，货物受到的静摩擦力，是阻碍它和卡车相对滑动趋势的，但却是它获得加速度的动力。若卡车有足够大的加速度，货物与卡车之间就出现了相对滑动，这时货物受到的滑动摩擦力，就是阻碍它和卡车做相对滑动的，但摩擦力仍是货物作加速运动的动力。

滑动摩擦力总是与物体滑动的方向相反。但是，静摩擦力是阻碍两个物体发生相对滑动的力，到底与物体相对运动的方向（以地球作参照物）是相同还是相反，应看问题的性质来定。例如，货物在传送带上随皮带一起以一定速度作匀速直线运动。货物与皮带的速度相同，没有相对运动趋势，所以货物与皮带之间没有产生静摩擦力。当皮带作加速运动时，货物所受的静摩擦力的方向（以地球作参照系）与运动的方向是相同的。若皮带作减速运动，皮带对货物的静摩擦力方向与运动方向相反。

摩擦力的大小，跟相互接触物体的性质，及其表面的光滑程度有关，和物体间的正压力有关，一般地说，和接触面积无关。一般情况下，当两物体相接触挤压时，两者实际接触部分，远小于两者的表观接触面积。经研究表明：两者实际接触部分的面积越大，其摩擦力也越大。而两者的实际接触面积只跟正压力的大小、物体表面的粗糙程度和材料的性质有关，跟它们的表观接触面积无关。在物体表面粗糙程度和材料性质不变的情况下，正压力越大，实际接触面积也越大，摩擦力也越大；正压力相同时，改变物体间的表观接触面积，例如，将平面上的砖从竖放改变为平放，并不改变实际的压力，摩擦力保持不变。因此，在一般情况下，摩擦力跟物体的表观接触面积无关。

【静摩擦】

置于固定平面上的物体由于受沿它们接触表面切向的外力作用有相对滑动的趋势但还没有发生相对滑动的时候，存在于接触表面的阻碍这种滑动趋势的现象，谓之“静摩擦”。这里应注意两点：一是两个紧密接触而又相对静止的物体；另一点是具有相对滑动的趋势，但又还没有发生相对的滑动。

【静摩擦力】

当物体与另一物体沿接触面的切线方向运动或有相对运动的趋势时，在两物体的接触面之间有阻碍它们相对运动的作用力，这个力叫摩擦力。若两相互接触，而又相对静止的物体，在外力作用下如只具有相对滑动趋势，而又未发生相对滑动，则它们接触面之间出现的阻碍发生相对滑动的力，谓之“静摩擦力”。当切向外力逐渐增大但两物体仍保持相对静止时，静摩擦力随着切向外力的增大而增大，但静摩擦力的增大只能到达某一最大值。静摩擦力 f 在达到最大值以前，总跟物体所受沿着接触面切向方向的外力大小相等，方向相反。

【最大静摩擦力】

在静摩擦中出现的摩擦力称为静摩擦力。当切向外力逐渐增大但两物体仍保持相对静止时，静摩擦力随着切向外力的增大而增大，但静摩擦力的增大只能到达某一最大值。当切向外力的大小大于这个最大值时，两物体将由相对静止进入相对滑动。静摩擦力的这个最大值称为“最大静摩擦力”。这个极限摩擦力，以 $f_{\text{最大}}$ 表示。最大静摩擦力的大小与两物体接触面之间的正压力 N 成正比，即

$$f_{0\text{max}} = \mu_0 N$$

用 $f_{0\text{max}}$ 表示最大静摩擦力， N 表示正压力，其中比例常数 μ_0 叫做静摩擦系数，是一个没有单位的数值。 μ_0 和接触面的材料、光滑粗糙程度、干湿情况等因素有关，而与接触面的大小无关。

【静摩擦系数】
见最大静摩擦力。

【动摩擦】

两个相接触的物体做相对运动时发生的阻碍它们相对运动的现象，称为“动摩擦”。

【动摩擦力】

在动摩擦中出现的摩擦力称为“动摩擦力”。对物体所施之力大于最大静摩擦力时，物体就开始运动。在运动起来之后，若将所施加之力减小，物体便又停止运动。这一情况表明，物体运动之后，还有阻止物体运动的力，即还有摩擦阻力。这种物体运动时所产生的摩擦力即称动摩擦力。

【动摩擦系数】

动摩擦力的大小与正压力大小之比称为“动摩擦系数”。公式中 μ 是比例系数，其值与相接触两物体的材料和表面粗糙程度有关。

【滑动摩擦】

当一物体在另一物体表面上滑动或有滑动趋势时，在两物体接触面上产生的阻碍它们之间相对滑动的现象，谓之“滑动摩擦”。当物体间有相对滑动时的滑动摩擦称动摩擦。当物体间有滑动趋势而尚未滑动时的滑动摩擦称为静摩擦。滑动摩擦产生的原因很复杂，目前还没有定论。近代摩擦理论认为，产生滑动摩擦的主要原因有二，一是关于摩擦的凹凸啮合说，认为摩擦的产生是由于物体表面粗糙不平。当两个物体接触时，在接触面上的凹凸不平部分就互相啮合，而使物体运动受到阻碍而引起摩擦；二是分子粘合说，认为当相接触两物体的分子间距离小到分子引力的作用范围内时，在两个物体紧压着的接触面上的分子引力便引起吸附作用。关于摩擦的本质，还待进一步研究。

【滑动摩擦力】

物体沿着接触面作相对滑动时，两物体的接触面上相互作用，阻碍滑动的力叫“滑动摩擦力”。它的方向总是和物体相对滑动的方向相反。滑动摩擦力的大小和彼此接触物体的相互间的正压力成正比，在相对运动速度较低时几乎与速度的变化无关，且小于最大静摩擦力。

【滑动摩擦系数】

滑动摩擦力的大小和彼此接触物体的相互间的正压力成正比：即 $f = \mu N$ ，其中 μ 为比例常数叫“滑动摩擦系数”，它是一个没有单位的数值。滑动摩擦系数与接触物体的材料、表面光滑程度、干湿程度、表面温度、相对运动速度等都有关系。

【滚动摩擦】

一物体在另一物体表面作无滑动的滚动或有滚动的趋势时，由于两物体在接触部分受压发生形变而产生的对滚动的阻碍作用，叫“滚动摩擦”。滚动摩擦一般用阻力矩来量度，其力的大小与物体的性质、表面的形状以及滚动物体的重量有关。滚动摩擦实际上是一种阻碍滚动的力矩。当一个物体在粗糙的平面上滚动时，如果不再受动力或动力矩作用，它的运动将会逐渐地慢下来，直到静止。这个过程，滚动的物体除了受到重力、弹力外，一般在接触部分受到静摩擦力。由于物体和平面接触处产生形变，物体受重力作用而陷入支承面，同时物体本身也受压缩而变形，当物体向前滚动时，接触处前方的支承面隆起，而使支承面作用于物体的合弹力 N 的作用点从最低点向前移。正是这个弹力，相对于物体的质心产生一个阻碍物体滚动的力矩，这就是滚动摩擦。对于初中学生来说，他们还未掌握力矩的概念，就不要把滚动摩擦讲成是一种摩擦力，只能讲一个物体在另一个物体上滚动时所受到对滚动的阻碍作用。

【滚动摩擦力】

物体滚动时，接触面一直在变化着，物体所受的摩擦力，称为“滚动摩擦力”它实质是静摩擦力。接触面愈软，形状变化愈大，则滚动摩擦力就愈大。一般情况下物体之间的滚动摩擦力远小于滑动摩擦力。在交通运输以及机械制造工业上广泛应用滚动轴承，就是为了减少摩擦力。例如，火车的主动轮的摩擦力是推动火车前进的动力。而被动轮所受之静摩擦则是阻碍火车前进的滚动摩擦力。

【滚动摩擦系数】

物体在另一物体上滚动（或有滚动趋势）时受到的阻碍作用是由物体和支承面接触处的形变而产生的。一般用滚动摩擦力矩来量度。滚动摩擦力矩的大小和支承力 N 成正比。即 $M = KN$ 。 K 为比例系数，称为“滚动摩擦系数”。如火车轮与铁轨间的 K 值约为 $0.09 \sim 0.03$ 厘米。圆轮和支持面愈坚硬，则滚动摩擦愈小。若两者为绝对刚体，则滚动摩擦就为零，此时，轮与支持面间只接触一条线，支承力 N 通过圆轮的轴心。滚动摩擦系数具有长度的量纲，且有力臂的意义，常以厘米计算。其大小主要取决于相互接触物体的材料性质和表面状况（粗糙程度，湿度等）有关。

【牛顿第一定律】

任何物体，在不受外力作用时，总保持静止状态或匀速直线运动状态，直到其他物体对它施加作用力迫使它改变这种状态为止，这就是“牛顿第一定律”。该定律说明力并不是维持物体运动的条件，而是改变物体运动状态的原因。牛顿第一定律亦称“惯性定律”。它科学地阐明了力和惯性这两个物理概念，正确地解释了力和运动状态的关系，并指出了一切物体都具有保持其运动状态不变的性质——惯性，它是物理学中一条基本定律。上述定律主要是从天文观察中，间接推导而来，是抽象概括的结论。不能单纯按字面定义而用实验直接验证。和实际情况较接近的说法是：任何物体在所受外力的合力为零时，都保持原有的运动状态不变。即原来静止的继续静止，原来运动的继续作匀速直线运动。物体的惯性实质是物体相对于平动运动的惯性，其大小即为惯性质量。物体相对于转动也有惯性，但它跟第一定律所说的惯性不是一回事，它的大小为转动惯量。惯性质量和转动惯量都用来表示惯性，但它们是不同的物理量，中学物理不出现转动惯量的名词，可不必提两者的区别。物体在没有受到外力作用或所受合外力为零的情况下，究竟是静止还是作匀速直线运动，这除了和参考系有关外，还要看初始时的运动状态。

【牛顿第二定律】

物体运动的加速度 a 的大小与其所受合力的大小成正比，与其质量 m 成反比，加速度 a 的方向与所受合力 F 的方向相同。其表示式为

$$F = kma$$

式中 k 是比例系数，其数值决定于力、质量和加速度的单位。在米·千克·秒制中的 k 为 1。上式成为

$$F = ma$$

即作用于该物体上各力的合力 F 等于物体的质量 m 与在该力作用下所产生的加速度 a 的乘积。这里所指的物体是质点。

合外力的方向决定了物体加速度的方向，加速度的方向反映了物体所受的合外力的方向。加速度和合外力是即时相对应的。物体在每一时刻的即时加速度，是跟那一时刻所受的合外力成正比。恒力产生恒定的加速度，变力产生变加速度，当力的作用消失，则加速度也即消失。物体在合外力作用下如何运动，则视合外力是恒力还是变力，以及初始运动状态而定。

牛顿第二定律只适用于解决物体的低速运动问题，不能用以处理高速运动问题；只适用于宏观物体，一般不适用于微观粒子。应用牛顿第二定律时，一般选用地球或太阳作参照系，且认为地球或太阳本身在作匀速直线运动。

【牛顿第三定律】

它是力学中重要的基本定律之一。亦称“作用与反作用定律”。任何物体间的作用力和反作用力同时存在，同时消失，它们的大小相等，方向相反，作用在同一条直线上，但分别作用在两个不同物体上。

作用力与反作用力没有本质的区别，不能认为一个力是起因，而另一个力是结果。两个力中的任何一个力都可以被认为是作用力，而另一个力相对于它就成为反作用力。正确理解作用力和反作用力跟平衡力是有区别的。在低速运动范围，不论是运动物体间还是静止物体间的相互作用；不论是加速运动物体间还是匀速运动物体间的相互作用；不论是短暂的还是持续的相互作用，都遵循牛顿第三定律。

【惯性】

物体保持静止或匀速直线运动状态的性质，称为惯性。惯性是物体的一种固有属性，表现为物体对其运动状态变化的一种阻抗程度，质量是对物体惯性大小的量度。当作用在物体上的外力为零时，惯性表现为物体保持其运动状态不变，即保持静止或匀速直线运动；当作用在物体上的外力不为零时，惯性表现为外力改变物体运动状态的难易程度。在同样的外力作用下，加速度较小的物体惯性较大，加速度较大的物体惯性较小。所以物体的惯性，在任何时候（受外力作用或不受外力作用），任何情况下（静止或运动），都不会改变，更不会消失。

【惯性定律】

即“牛顿第一运动定律”。

【惯性力】

牛顿运动定律只适用于惯性系。在非惯性系中，为使牛顿运动定律仍然有效，常引入一个假想的力，用以解释物体在非惯性系中的运动。这个由于物体的惯性而引入的假想力称为“惯性力”。它是物体的惯性在非惯性系中的一种表现，并不反映物体间的相互作用。它也不服从牛顿第三定律，于是惯性力没有施力物，也没有反作用力。例如，前进的汽车突然刹车时，车内乘客就感觉到自己受到一个向前的力，使自己向前倾倒，这个力就是惯性力。又如，汽车在转弯时，乘客也会感到有一个使他离开弯道中心的力，这个力即称“惯性离心力”。

【惯性系】

即惯性参照系的简称。凡牛顿惯性定律能成立的参照系，称“惯性参照系”。对惯性系相对静止或作匀速直线运动的一切参照系都是惯性系。太阳是一个惯性系，若以太阳作参照系时牛顿运动定律总是精确成立的。但太阳系里的所有行星，由于它们的自转与公转，都在作变速运动，所以都不是惯性系。地球是行星之一，当然也不例外，若以地球为参照系，将与牛顿定律不符。由于地球相对太阳运动的加速度很小，故在一些物理问题的讨论中，可近似地把地球看作是一个相当好的惯性系。

【合力】

如果几个力同时作用于一个物体，它们对物体运动产生的效果与另一个力单独对物体运动产生的效果相同，则这个力就是它们的“合力”。

【分力】

如果一个力作用于某一物体，对物体运动产生的效果相当于另外的几个力同时作用于该物体时产生的效果，则这几个力就是原先那个作用力的分力。例如，拉一置于水平面上的小车前进时，向斜上方所用的拉力可分解为两个分力：一个水平向前使小车前进，另一个垂直向上减少重物对水平面的压力。

【惯性质量】

量度物体惯性的物理量。实验发现，在惯性系中，若在两不同物体上施加相同的力，则两物体加速度之比 a_1/a_2 是一个常数，与力的大小无关。此结果表明， a_1/a_2 之值仅由该两物体本身的惯性所决定，与其他因素无关。物理学中规定各物体的惯性质量与它们在相同的力作用下获得的加速度数值成反比。若用 m_1 及 m_2 分别表示两物体的惯性质量，则 $m_2/m_1 = a_1/a_2$ 。选定其中一物体的惯性质量作为惯性质量的单位后，另一物体的惯性质量可通过实验由上式确定。在国际单位制中，把保存在国际计量局中的国际千克原器的惯性质量作为单位，称为“千克”（其他常用的单位有“吨”、“克”等）。

【引力质量】

任何物体都具有吸引其他物体的性质，引力质量是物体这种性质的量度。选定两质点 A 和 B，先后测量它们各自与质点 C 的引力 F_{AC} 和 F_{BC} 。实验发现，只要距离 AC 和 BC 相等，则不论这距离的大小如何，也不论质点 C 是什么物体，力 F_{AC} 和 F_{BC} 的比值 F_{AC}/F_{BC} 是一个常数。该结果表明 F_{AC}/F_{BC} 之值仅由质点 A 和 B 本身的性质决定。物理学中规定 A、B 两质点引力质量之比等于力 F_{AC} 与 F_{BC} 之比。若用 m_A 及 m_B 分别表示 A、B

两质点的引力质量，则 $\frac{m_A}{m_B} = \frac{F_{AC}}{F_{BC}}$ 。选定其中一质点的引力质量作为引力

质量的单位后，另一质点的引力质量可通过实验由上式确定。通常取保存在国际计量局中的国际千克原器的引力质量为单位，称为“千克”。

【质量守恒】

自然界的基本定律之一。在任何与周围隔绝的物质系统（孤立系统）中，不论发生何种变化或过程，其总质量保持不变。18世纪时法国化学家拉瓦锡从实验上推翻了燃素说之后，这一定律始得公认。20世纪初以来，发现高速运动物体的质量随其运动速度而变化，又发现实物和场可以互相转化，因而应按质能关系考虑场的质量。质量概念的发展使质量守恒原理也有了新的发展，质量守恒和能量守恒两条定律通过质能关系合并为一条守恒定律，即质量和能量守恒定律。

质量守恒定律在19世纪末作了最后一次检验，那时候的精密测量技术已经高度发达。结果表明，在任何化学反应中质量都不会发生变化（哪怕是最微小的）。例如，把糖溶解在水里，则溶液的质量将严格地等于糖的质量和水的质量之和。实验证明，物体的质量具有不变性。不论如何分割或溶解，质量始终不变。

在任何化学反应中质量也保持不变。燃烧前炭的质量与燃烧时空气中消耗的氧的质量之和准确地等于燃烧后所生成物质的质量。

【质量守恒定律】

即“质量守恒”。见质量守恒条。

【力的合成】

一个力，如果它的作用效果跟几个力共同作用时的效果相同，这个力叫做那几个力的合力。求几个力的合力，叫力的合成。在高中物理中，将重点讲力的合成——共点力。实验证明。两共点力的合成跟速度、加速度的合成一样，服从平行四边形法则。

【共点力】

几个力都作用在物体的同一点，或它们的作用线相交于同一点，这几个力便叫做“共点力”。

【平行四边形法则】

求两个互成角度的共点力的合力，可以用表示这两个力的线段为邻边作平行四边形，这两个邻边之间的对角线就表示合力的大小和方向，这种方法就叫做“力的平行四边形法则”。

我们知道加、减、乘、除的算术运算，是用来计算两个以上的标量的，如质量、面积、时间等。例如，求密度就要用体积去除质量。标量之间的运算不需要特别的手续，只有一个要求，那就是单位要一致。

但是，矢量相加就要用特别的方法，因为被加的量既有一定数值，又有一定的方向，相加时两者要同时考虑。在力学中经常遇到的矢量有位移、力、速度、加速度、动量、冲量、力矩、角速度和角动量等。

矢量的加法有两种：其一即所谓三角形法则；另一方法即平行四边形法则，它们本质是一样的。若用三角形法则求总位移似乎直观些，而用平行四边形法则求力的合成好象更便于理解。

若用3毫米代表1公里。如图1-1所示的那样，以纸面上某点A作为出发点，作矢量 \overline{AB} ，长3厘米，代表向东10公里；然后在A点再作 \overline{AD} 同 \overline{AB} 成 45° 角，长1.5厘米，代表向东北5公里。然后，过B作BC平行AD，过D作DC平行AB，由此便得到平行四边形ABCD。从A向C作射线 \overline{AC} ，这就是总位移矢量。

应注意物体A点不是受 \overline{AD} 、 \overline{AB} 、 \overline{AC} 三个力的作用。因为 \overline{AC} 是 \overline{AD} 和 \overline{AB} 的合力，表示 \overline{AC} 的作用效果与 \overline{AD} 、 \overline{AB} 的共同作用效果是一样的。因此可以用 \overline{AC} 代替 \overline{AD} 和 \overline{AB} 的共同作用，但绝不能把 \overline{AC} 当成作用在物体上的第三个力。在分析物体受力情况时，不能同时考虑合力与分子对物体的作用。例如，当物体沿光滑斜面下滑时，不能说物体除受到重力和斜面的弹力作用外，还受到一个下滑力的作用。因为下滑力是重力沿斜面平行方向的分力，所以，只能说“在光滑斜面上下滑的物体，受到重力和斜面弹力的作用”。有的人认为：“合力总比分力大”。我们可利用求合力的平行四边形法则，通过作图可看到，合力的大小是随两分力夹角而变化的，绝不能说“合力一定要比分力大”。

一个矢量，只要遵守平行四边形法则，可以分解为两个，或无穷个。但是和矢量的合成不同，两个矢量只能合成为一个矢量。

【三角形法则】

矢量相加的法则，如图1-2。矢量 \vec{A} 和 \vec{B} 的和是将 \vec{A} 、 \vec{B} 头尾相接，例如，将矢量 \vec{B} 的起点与矢量 \vec{A} 的终点相接，此时以 \vec{A} 的起点为起点，以 \vec{B} 的终点为终点的矢量 \vec{C} 就是矢量 \vec{A} 和 \vec{B} 的矢量和。根据矢量相加的三角形法则求得的矢量和与相加的两矢量的求和次序无关。

例如，有一艘船，如图1-3所示。由湖中A点先向正北方向航行6公里到了B点，然后航向转了90度，向东再航行了4公里到达C点。航行的总距离是6+4公里，但是出发点到终点的距离（位移的大小）显然小于10公里。

如果要问船在什么地方，离出发点有多远，方位如何，也就是说，我们要求船的总位移，而不是关心船走了多远距离，那么就不能用简单的标量加法去计算了。矢量加法就要用几何作图法，其详细步骤如下：

在纸上先画一条纵向直线AB，长度为6厘米，在B端加一箭头，代表向北走了6公里，即向北的位移为6公里。接着，再由B向右画一横线BC垂直于AB，长度为4厘米，在C端加箭头以表示向东的位移为4公里。最后，把始点A和终点C连起来，加箭头于C端，这就是总的位移矢量AC。用尺量出它的长度，是7.2厘米，按我们上述的比例，它相当于7.2公里。

我们说，向北的位移 \vec{AB} 加上向东的位移 \vec{BC} 等于总位移 \vec{AC} ，用矢量形式写出为

$$\vec{AB} + \vec{BC} = \vec{AC}$$

或用黑体字母记为

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{R}$$

再用一个量角器量出 \vec{AC} 和 \vec{AB} 的夹角为 33.7° ，于是知道合成矢量R偏东与正北成 33.7° 角。

在矢量加法中，所有的矢量都用一些带箭头的线段表示，具有一定的长度和方向。不论用多么长的线段来代表单位矢量，都不影响最后结果。

我们也可用几何学和三角学的定理来计算上例船的总位移的大小和方向。

【力的分解】

几个力，如果它们产生的效果跟原来一个力产生的效果相同，这几个力就叫做原来那个力的分力。求一个力的分力叫做“力的分解”。分力与合力是矛盾的两个方面，如图 1—1 所示，相对于 AB、AD 来说，AC 是合力；但是相对于 AC 来说，AB，AD 又是分力。所以，力的分解跟力的合成互为逆运算，在求分力的时候也必须应用平行四边形法则。

下面几个是经常碰到的力的分解问题：

1. 斜面上物体重力的分解：如图 1—4 所示，物体放在倾角为 θ 的斜面上，将重力 P 分解为相互垂直的两个分力：一个跟斜面平行的力 F_1 ；一个跟斜面垂直的力 F_2 。其中 $F_1 = P \sin \theta$ ， $F_2 = P \cos \theta$ 。因斜面上的物体可能静止在斜面上，可能下滑，也可能在外力作用下沿斜面向上运动。无论哪种情况，物体沿斜面运动总跟物体的重力 P 沿斜面平行的分力 F_1 有关。另外，斜面受到的物体对斜面的正压力又跟物体的重力 P 沿斜面垂直方向的分力 F_2 有关。故把物体所受的重力分解为跟斜面平行和跟斜面垂直的两个分力。

2. 支架受力的分析：如图 1-5 所示，物体通过绳子挂在 O 点。物体所受重力产生两个效果，一个是拉斜梁的力 F_1 ，一个是压横梁的力 F_2 。已知合力 P 的大小和方向，以及两分力 F_1 、 F_2 的方向，按平行四边形作图，即可解得 F_1 和 F_2 。

3. 帆船逆风行驶的问题：帆船可逆风行驶，船头时而偏左，时而偏右，沿“S”形路线前进。如图 1-6a 所示，MN 表示帆面，当逆风吹向 MN 时，风对帆产生作用力 R 。因帆对风来说是光滑的，所以作用力 R 的方向与帆面垂直。把 R 分解为两个力：一个为与船身垂直的 F_1 ，一个为沿船前进方向 F_2 。显然，分力 F_1 的作用是使船横向移动，但由于船身的侧面积比较大，水的阻力很大，因而船横向移动并不显著。分力 F_2 与船前进的方向是一致的，靠着它，船逆着风斜行。当船到达 B 点后，船头改为偏右，风帆也要相应反转至新的位置。如图 1-6b 所示，船在逆风下将获得一个前进的推力 F_2 。如此反复下去，船将沿“S”形路线逆风前进。

【隔离体法】

即“隔离法”。在解力学问题时，若有几个物体一起运动，或一个物体上同时有几个力作用着，为了便于分析物体受力情况，求它们之间的相互作用力，往往把需要的那部分物体从整体中抽出来，单独分析周围物体对它的作用，用力的图示法把作用在物体上的几个力，形象地表示出来，先将所研究的物体与其相联系的物体中“隔离”出来，再把作用在此物体上的力依次画出，并标明力的大小和方向。这种分析物体受力的方法，叫“隔离体法”。应用隔离体法时，应根据题目的内容确定隔离体。着重考虑周围物体对隔离体的作用力，将研究对象的物体隔离出来。要正确运用牛顿第三运动定律，仔细考虑物体之间的相互作用，分析隔离体的受力情况，作出该物体的受力图。应注意不要把力的概念搞乱，例如，正压力、下滑力、张力、支承力、离心力、向心力、浮力、拉力、制动力、牵引力等等，这些力都是重力、弹力、摩擦力这三种基本形式力的不同表现形式。对各被隔离物体，根据牛顿第二运动定律确立力和加速度的关系，分别列出各物体的运动方程。根据题意解联立方程，求出未知量。

【矢量】

亦称“向量”。有些物理量，是由数值大小和方向才能完全确定的物理量，这些量之间的运算并不遵循一般的代数法则，在相加减时它们遵从几何运算法则的量。这样的量叫“物理矢量”。如速度、加速度、位移、力、冲量、动量、电场强度、磁场强度等都是矢量。可用黑体字（例如 \mathbf{F} ）或带箭头的字母（例如 \vec{F} ）来表示矢量。

【矢量的合成】

即矢量相加。矢量之间的运算要遵循特殊的法则。矢量加法一般用平行四边形法则。可推广至三角形法则、多边形法则或正交分解法等。合成的矢量称为矢量和或合矢量。例如，共点力的合成、速度的合成、加速度的合成、位移的合成等等。两个以上矢量相加，可先求出其中两个矢量的合矢量，然后将该合矢量与第三个矢量相加，若求多个矢量的合矢量，可按上述方式类推。另一种简便方法，是将这些矢量的箭尾与箭头依次相连接，然后将第一个矢量的箭尾连到最末一个矢量的箭头的矢量，就是所要求的合矢量。这种矢量合成法叫多边形法。其大小和方向与相加次序无关。矢量减法是矢量加法的逆运算，一个矢量减去另一个矢量，等于加上那个矢量的负矢量。 $\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$

【矢量的分解】

它是矢量合成的逆运算，也遵从几何运算法则。若无其它限制，同一个矢量可分解为无数对大小、方向不同的分矢量。因此，把一个矢量分解为两个分矢量时，应根据具体情况，考虑分矢量产生的效果来分解。一般情况下，常将一个矢量 \vec{F} 分解为互相垂直的两个分矢量 \vec{F}_1 和 \vec{F}_2 。如图1-7所示，则 $\vec{F}_1 = F\cos\theta$ ； $\vec{F}_2 = F\sin\theta$ 。物理学中常用的有：力的分解、速度的分解、位移的分解、加速度的分解等等。

【标量】

亦称“无向量”。有些物理量，只具有数值大小，而没有方向的量。这些量之间的运算遵循一般的代数法则。这样的量叫做“标量”。如质量、密度、温度、功、能量、路程、速率、体积、时间、热量、电阻等物理量。无论选取什么坐标系，标量的数值恒保持不变。矢量和标量的乘积仍为矢量。矢量和矢量的乘积，可构成新的标量，也可构成新的矢量，构成标量的乘积叫标积；构成矢量的乘积叫矢积。如功、功率等的计算是采用两个矢量的标积。 $A=F \cdot S$ ， $P=F \cdot V$ ，力矩、洛仑兹力等的计算是采用两个矢量的矢积。 $M=r \times F$ ， $F=qv+B$ 。

【平衡】

指物体或系统的一种状态。处于平衡状态的物体或系统、除非受到外界的影响，它本身不能有任何自发的变化。在不同的科学领域，它有不同的涵义。

在力学系统里，平衡是指惯性参照系内，物体受到几个力的作用，仍保持静止状态，或匀速直线运动状态，或绕轴匀速转动的状态，叫做物体处于平衡状态，简称物体的“平衡”。因稳度的不同，物体的平衡分为：稳定平衡、随遇平衡、不稳定平衡三种情况。

【物体的平衡条件】

要使物体保持平衡状态，作用在物体上的力或力矩必须满足一定的条件，这叫做“物体平衡条件”。使物体保持平衡的条件是：(1)使物体处于平动平衡的条件是，作用在物体上的合外力为零，即 $\vec{F} = 0$ ；(2)使物体处于转动平衡的条件是，作用在物体上的所有力的合力矩为零，即 $\vec{M} = 0$ 。当上述两个条件同时满足时，物体处于完全的平衡。中学阶段只讨论平面力系的平衡条件。处于平衡状态的物体，可以是静态平衡，即物体既无平动又无转动，保持静止状态；也可以是动态平衡，即物体作匀速直线运动或匀角速转动。无论物体处于静态平衡还是动态平衡，物体受力状况并无区别，区别在于物体的初始运动状态，即物体开始处于力平衡的即时，它是静止的还是作平动或转动。处于平衡状态的物体，由于某种外界微小的作用而偏离了平衡状态时，可能有四种情形。见平衡状态条。

【平衡状态】

处于平衡状态的物体，由于外界某种微小的作用而偏离了平衡状态时，因稳度的不同，物体的平衡状态可分为四种情形：稳定平衡；不稳定平衡；亚稳平衡；随遇平衡。这些平衡状态的区分，应视我们放置该物体的平衡位置而定。

1. 稳定平衡：凡能在被移动离开它的平衡位置后，仍试图回复其原来位置（此时其重心比较低）从而恢复到原来的平衡状态的物体，它原来的平衡状态叫“稳定平衡”。例如，圆球体在一个凹进的圆盘中心时；一圆锥体以其底面竖立时，都属于稳定平衡状态。

2. 不稳定平衡：处于平衡状态的物体，由于受到某种外界微小的作用，如果物体稍有偏离就不能恢复到原来的平衡状态，这种情况叫“不稳定平衡”。例如，当一个圆球体放在一个凸起的圆盘上，或是一个圆锥体，以其尖端竖立在一个平面上，这些物体都处于不稳定平衡状态。翻倒后，一直要等到它们的重心相对地取得最低位置时，这些物体才会静止不动。即任何微小的运动都能使其重心降低的物体，一定处于不稳定平衡状态之下。

3. 亚稳平衡：如果物体在外力作用下，稍有偏离尚可恢复，而偏离稍大就失掉平衡的状态，称为“亚稳平衡”。

4. 随遇平衡：如果物体在外界作用下，它的平衡状态下随时间和坐标的变化而改变，这种状态叫“随遇平衡”。例如，当一个圆球体停在一个水平平面上的时候，或是一个圆锥体以其外壳的一条边线与平面相接触，即横向放在一个水平平面上时，都会出现随遇平衡状态。这些物体如被移置到一个新的位置时，虽然它们不能自动地恢复其原来的位置，但它们在新的位置上，却仍能停住不动，其重心之高度，亦保持不变。一般说来，任何微小之运动，既不能将其重心提高，亦不能使其重心降低之物体，一定处于随遇平衡状态之下。

上述几种平衡状态，是处于重力场以及其他有势场的物体在场作用下的平衡情况。处于有势场的物体和场一起具有势能，而物体都有向势能较小位置运动的趋势。稳定平衡是指物体处于势能最小位置，当稍有微小扰动，令其离开平衡位置，外界必须对它做功，势能增加，在扰动后物体将自动回到原来势能最小的位置。所谓不稳定平衡是指物体处于势能最大时的平衡。任何微小的扰动即能引起重力对它做功，势能继续减小，不能再自动恢复原状。而随遇平衡的物体，受到扰动，势能将保持不变，在任意位置可继续保持平衡。在日常生活中对具体问题应具体分析，例如，放在桌上的鸡蛋，对旋转运动来说，是处于随遇平衡状态下；对倾倒运动而言，开始是不稳定平衡，接着则为稳定平衡。

【二力的平衡】

对一个物体施加两个力，而这两个力同时作用在一条直线上，其力的大小相等方向相反，此物体运动状态不发生变化。这时二力的作用互相抵消，这就是二力的平衡。

【力学平衡】

物体相对于惯性系处于静止或匀速直线运动的状态。

【平衡力】

平衡力系中的任一力称为该力系中其余力的平衡力。

【平衡力系】

作用于刚体并使它保持力学平衡状态的力系，谓之平衡力系。一个力系为平衡力系的必要且充分条件其一是：力系中各力的矢量和为零，即该力系的主矢为零。其二是：力系中各力对任一点力矩的矢量和为零，即该力系对任一点的主矩为零。

【受力分析】

解力学题，重要的一环就是对物体进行正确的受力分析。由于各物体间的作用是交互的，任何一个力学问题都不可能只涉及一个物体，力是不能离开物体而独立存在的。所以在解题时，应根据题目的要求，画一简图，运用“隔离法”，进行受力分析。由于物质分为实体与场，所以，力的作用方式也分为两类，一类是实物对研究对象的作用，其特点是施力物与研究对象直接接触（如摩擦力、空气阻力、弹性力等）；另一类是物体通过它所激发的场对研究对象的作用，其特点是激发场的物体与研究对象不直接接触（如重力、静电力等）。在力学中，以场方式作用于研究对象的力经常是重力。由此，得出进行受力分析的规则：在研究物体受哪些力时，除重力外，就只看该物体与之相触的物体，凡与研究对象接触的物体对研究对象都可能有力作用。

1. 水平面上的物体—木块静置于桌面上，木块受两个力作用。一是受地球的吸引而受到重力 G ，方向竖直向下；另一个是木块压在桌面使桌面发生极微小的形变，桌面对木块产生支持力 N ，方向竖直向上。如图 1-8 所示，因木块是静止的，所以 G 和 N 是作用在木块上的相互平衡的力，它们大小相等方向相反。在水平面上运动的木块，除受重力 G 和支持力 N 的作用外，还受到滑动摩擦力 f 的作用。滑动摩擦力 f 的方向与木块运动方向相反。木块受力图如图 1-9 所示。木块受空气阻力的方向跟木块运动方向相反。空气阻力的大小跟物体的运动速度，以及物体的横截面大小有关。如果用水平的绳拉木块前进，木块除受重力 G ，支持力 N 和滑动摩擦力 f 的作用外，还受到绳的拉力 F ，木块共受四个力，如图 1-10 所示。

2. 在斜面上运动的物体：如图 1-11 所示，一木块沿斜面下滑，木块受到竖直向下的重力 G 。木块压斜面，斜面发生形变而对木块产生支持力 N ，方向垂直于斜面并指向被支持的木块。木块还受到与其运动方向相反，沿斜面向上的滑动摩擦力 f 。重力沿斜面的分力使物体沿斜面加速下滑而不存在一个独立于重力之外的所谓“下滑力”。

3. 一轻绳通过定滑轮，用一水平力 F 拉物体 A 使之向右运动， B 落于 A 上，其间的摩擦系数为 μ_1 ， A 与桌面间摩擦系数为 μ_1 ，不计空气阻力，分析 A 、 B 所受的力。如图 1-12 所示。

先研究物体A。如图1-13所示。A受地球吸引力 $m_1\vec{g}$ （向下），与A接触的有人、物体B、绳、桌面、空气。分析得：人对A的拉力 \vec{F} （向右），B对A的正压力 \vec{N}_1 （向下），B给A的摩擦力 \vec{f}_1 （向左），绳的拉力 \vec{T}_1 （向左），桌面对A的正压力 \vec{N}_2 （向上，也叫支持力），桌面施于A的摩擦力 \vec{f}_1 （向左）。其次，以物体B为研究对象。如图1-14所示。B受地球的引力 $m_2\vec{g}$ （向下），与B接触的有物体A、绳和空气。A对B的正压力 \vec{N}_1' （向上），A对B的摩擦力 \vec{f}_1' （向右），绳子的拉力 \vec{T}_2 （向左）。

注意： \vec{N}_1 与 \vec{N}_1' 是一对作用力和反作用力。 \vec{f}_1 与 \vec{f}_1' 是一对作用力和反作用力。而 $f_1 = \mu_1 N_1$ ， $f_2 = \mu_2 N_2$ 。

在教学中应该注意，尽管物体静止在水平地面上时，重物对地面的压力与物体的重力在数值上相等，但在某些场合下，压力并不等于重力。产生重力作用不一定要两物接触，而压力则必须要两物接触才能产生。还应讲明的是，物体对斜面的压力就不等于物体的重力。当斜面上的物体下滑时，重力G分解为沿斜面平行的分力 F_1 和沿斜面垂直的分力 F_2 。 F_1 可称为下滑力， F_2 称为正压力。

【三力平衡条件】

任意两个力的合力与第三个力大小相等方向相反，且在一条直线上。
故三个力平衡时，必在同一平面内，且作用线必交于一点，此即刚体受三个力作用而平衡的条件。

【质点】

不考虑物体本身的形状和大小，并把质量看作集中在一点时，就将这种物体看成“质点”。研究问题时用质点代替物体，可不考虑物体上各点之间运动状态的差别。它是力学中经过科学抽象得到的概念，是一个理想模型。可看成质点的物体往往并不很小，因此不能把它和微观粒子如电子等混同起来。若研究的问题不涉及转动或物体的大小跟问题中所涉及到的距离相比较很微小时，即可将这个实际的物体抽象为质点。例如，在研究地球公转时，地球半径比日、地间的距离小得多，就可把地球看作质点，但研究地球自转时就不能把它当成质点。又如物体在平动时，内部各处的运动情况都相同，就可把它看成质点。所以物体是否被视为质点，完全决定于所研究问题的性质。

【刚体】

在任何力的作用下，体积和形状都不发生改变的物体叫做“刚体”。它是力学中的一个科学抽象概念，即理想模型。事实上任何物体受到外力，不可能不改变形状。实际物体都不是真正的刚体。若物体本身的变化不影响整个运动过程，为使被研究的问题简化，可将该物体当作刚体来处理而忽略物体的体积和形状，这样所得结果仍与实际情况相当符合。例如，物理天平的横梁处于平衡状态，横梁在力的作用下产生的形变很小，各力矩的大小都几乎不变。对于形变，实际是存在的，但可不予考虑。为此在研究天平横梁平衡的问题时，可将横梁当作刚体。

【机械运动】

物体之间或同一物体各部分之间相对位置随时间的变化叫做机械运动。它是物质的各种运动形态中最简单，最普遍的一种。例如，地球的运动、弹簧的伸长和压缩等都是机械运动。而其他较复杂的运动形式，例如，热运动、化学运动、电磁运动。生命现象中都含有位置的变化，但不能把它们简单地归结为机械运动。

【参照系】

又称“参考系”，“参照物”。为了确定物体的位置和描述物体的运动而被选作参考的物体或物体系。如果物体相对于参照系的位置在变化，则表明物体相对于该参照系在运动；如果物体相对于参照系的位置不变，则表明物体相对于该参照系是静止的。同一物体相对于不同的参照系，运动状态可以不同。在运动学中，参照系的选择可以是任意的。研究和描述物体运动，只有在选定参照系后才能进行。如何选择参照系，必须从具体情况来考虑。例如，一个星际火箭在刚发射时，主要研究它相对于地面的运动，所以把地球选作参照物。但是，当火箭进入绕太阳运行的轨道时，为研究方便，便将太阳选作参照系。为研究物体在地面上的运动，选地球作参照系最方便，例如，观察坐在飞机里的乘客，若以飞机为参照系来看，乘客是静止的；如以地面为参照系来看，乘客是在运动。因此，选择参照系是研究问题的关键之一。

【坐标系】

为了说明质点的位置，运动的快慢、方向等，必须选取坐标系。在参照系中，为确定空间一点的位置，按规定方法选取的有次序的一组数，叫做“坐标”。在某一问题中规定坐标的方法，就是该问题所用的坐标系。坐标系的种类很多，常用的坐标系有：笛卡儿直角坐标系、平面极坐标系、柱面坐标系和球面坐标系等。

【平动】

也称平移，平行移动。是机械运动的一种特殊形式，是刚体的一种最基本的运动。运动物体上任意两点所连成的直线，在整个运动过程中，始终保持平行，这种运动叫做“平动”。在同一时刻，运动物体上各点的速度和加速度都相同。因此在研究物体的平动时，可不考虑物体的大小和形状，而把它作为质点来处理。

【转动】

机械运动的一种最基本的形式。运动物体上，除转动轴上各点外，其它各点都绕同一转动轴线作大小不同的圆周运动，这种运动叫做“转动”。物体上各点的运动轨迹是以转轴为中心的同心圆。在同一时刻，转动物体上各点的线速度和线加速度不尽相同。距转轴较近的点，其线速度和线加速度都较小，但角速度和角加速度都相同。当刚体绕一固定轴线转动时，称为“定轴转动”，如门、窗、机器上飞轮的运动等。当刚体绕一固定点转动时，称为“定点转动”，如回转仪的转子的运动等。有时，当一点以另一固定点为中心作圆周运动时，也称为“该点绕中心点的转动”，如行星绕恒星的运动。电子绕原子核的运动等。

【位置】

指物体某一时刻在空间的所在处，物体沿一条直线运动时，可取这一直线作为坐标轴，在轴上任意取一原点 O ，物体所处的位置由它的位置坐标（即一个带有正负号的数值）确定。

【位移】

质点从空间的一个位置运动到另一个位置。它的位置变化叫做质点在这一运动过程中的位移。它是一个有大小和方向的物理量。位移是矢量。物体在某一段时间内，如果由初位置移到末位置，则由初位置到末位置的有向线段叫做位移。它的大小是运动物体初位置到末位置的直线距离；方向是从初位置指向末位置。位移只与物体运动的始末位置有关，而与运动的轨迹无关。如果质点在运动过程中经过一段时间后回到原处，那么，路程不为零而位移则为零。在国际单位制中，位移的单位为：米。此外还有：厘米、千米等。

【路程】

质点从空间的一个位置运动到另一个位置，运动轨迹的长度叫做质点在这一运动过程所通过的路程。路程是标量，即没有方向的量。位移与路程是两个不同的物理量。在直线运动中，路程是直线轨迹的长度；在曲线运动中，路程是曲线轨迹的长度。当物体在运动过程中经过一段时间后回到原处，路程不为零，位移则等于零。

【运动】

在力学中所讲的运动指的是机械运动。物质的质点或质点组与参照系之间的位置随时间而改变的过程叫机械运动。同一物体的运动以不同参照系看来并不相同。乘车的旅客，以车厢作参照系是静止的，而以地面作参照系则是运动的。因此在具体描述物体的运动时必须先选定一个参照系，通常都以地球作为参照系。有时在一个力学问题中同时采用几个参照系时，把相对于非基本参照系的运动称为相对运动。

【时间】

量度两个时刻之间的间隔长短的物理量叫做“时间”。它表征物质运动过程的持续性和顺序性。任何一种周期运动的周期都可作为时间标准，如中国古代的水漏，十二地支（子，丑，寅，卯）都是利用周期性的计时方法。时间是物理学中的一个基本物理量。一段时间在时间坐标轴上用一线段表示。为了用具体数字说明时间，必须选择某一时刻作为计时起点，这是人为的。计时起点不一定是物体开始运动的时刻。在物理学中，将太阳每连续两次经过观察者所在的子午线的时间称为一个太阳日，即一昼夜。因太阳日略有差异，取一年中所有太阳日的平均值作为时间的标准，称为一个平均太阳日，简称1日。1日分为24小时，1小时分为60分，1分又分为60秒，于是规定1日的 $\frac{1}{86400}$ 为1秒作时间标准。但是这样规定的秒是不精确的。1967年在第13届国际计量大会上，规定以基态铯133原子的两超精细结构能级之间的辐射周期的9192 631 7700倍为1标准秒。时间常跟位移或平均速度相对应，例如：“五秒钟内所发生的位移”或“头两秒内的平均速度”。

【时刻】

把短暂到几乎接近于零的时间叫即时，即时表示时刻。时刻与时间不同。例如，事件发生在什么时刻？事件持续了多长时间？这是两个不同的概念，应区别前几秒末后几秒初、第几秒末、第几秒初等等时刻的概念，和前几秒、后几秒、几秒内、第几秒等等时间的概念。用一根无限长的只表示先后次序不表示方向的带箭头的线来描述时间和时刻，这条带箭头的线叫做时间轴。时间轴上的每一个点表示一个时刻。时刻是衡量一切物质运动先后顺序，它没有长短，只有先后，它是一个序数。时间轴上相应两个时刻之间的间隔长短，表示一段时间，时间是一个只有长短，而没有方向的物理量。时间具有连续性、单向性、序列性，并且总是不断向前流逝。

【速度】

描述物体运动的方向和位置变化快慢的物理量。它是矢量。速度的量值表示位置变化的快慢，它的方向是位移的方向。在国际单位制中，速度的单位是：米/秒。此外还有厘米/秒、千米/时。

【匀速度】

即匀速直线运动的速度。物体作匀速直线运动时的速度叫做“匀速度”。所以匀速度的量值是以运动物体所通过的路程（S）和通过这段路程所需的时间（t）的比值来量度，设v表示匀速度，则其数学表达式为

$$v = \frac{S}{t}$$

【匀变速直线运动的速度】

当物体做匀变速运动时，在相等的时间里发生的位移都相等。若已知位移和时间的比值，即知道了速度，就可以确定位移和时间的关系；如已知初位置，就可以知道任一时刻的位置。在匀变速运动中，在相等的时间里速度的变化都相等，若知道速度的变化和时间的比值，即知道了加速度，就可以确定速度的变化和时间的关系；如果还知道初速度，就可以知道任一时刻的速度。将匀变速运动的加速度公

式 $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ 变形，就可得到匀变速直线运动的速度公式

$$v_t = v_0 + at$$

这一公式表示出匀变速运动的即时速度是如何随着时间而变化的。根据这个公式，如果已经知道做匀变速运动的物体的初速度和加速度，就可以求出物体在任一时刻的即时速度。如果匀变速运动的初速度为零，即 $v_0 = 0$ ，上式就可简化成下式： $v_t = at$ 。当物体受到一个与 v_0 同方向或反方向的恒力的作用时，或者物体受到几个力的作用，这些力的合力的方向与 v_0 的方向相同或相反，合力的大小保持不变时，物体就做匀变速直线运动。

【平均速度】

平均速度是描述作变速运动物体之位置改变的平均快慢程度的物理量，是以作变速运动的物体所通过的路程（S）跟通过这段路程所需的时间（t）的比值来量度，即

$$\bar{v} = \frac{S}{t}$$

在运用平均速度的公式时，应注意：在变速运动中， $\bar{v} = \frac{S}{t}$ 不是恒量，在不同段路程上的平均速度 \bar{v} 是不同的，在应用 \bar{v} 时应明确是哪一段路程上的 \bar{v} 。因此，在某段路程的 \bar{v} 只能用于该段路程的计算上。同样，在不同时间间隔的平均速度也各不相同，必须指明在哪一段时间间隔内， \bar{v} 就只能应用在所指定的时间间隔的有关问题上。由于物体在作变速直线运动时，它在选取的一段时间间隔内，运动的快慢程度也是在不断变化着的，所以平均速度不是运动物体的真实速度，它只能粗略地描述变速运动的情况，用 $\bar{v} = \frac{S}{t}$ 实质上是把变速运动当作匀速直线运动来处理。

【即时速度】

即时速度是指运动物体在某一时刻或通过路程上某一位置时的速度，也叫“瞬时速度”。即时速度是力学中的一个重要概念，学生难于理解，而教师讲授也感困难，因此对此概念必须有清晰的认识。“即时”是时间不断流逝中的一刹，它不能脱离一段时间。因此即时速度与一段时间的平均速度有联系。要研究 t 时刻的即时速度，首先研究一下 t 附近，在 $t - \Delta t$ 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内的平均速度 \bar{v} 。若 Δt 越短，物体的运动快慢在这段时间 Δt 内的变化也就越小，计算所得的平均速度就越能精细地描写物体在该时刻 t 附近的运动快慢。因此，运动物体在某一时刻的即时速度就等于在这一时刻前后某一趋近于零的时间间隔内的平均速度的极限。即时速度能准确地表示变速运动中各个时刻的运动情况。汽车上的速度计就是测量汽车即时速度的仪器，由于本身结构和机件的惯性，读数也只是近似的。初速度、某秒末的速度、线速度等都是指即时速度。变速运动每一时刻的即时速度都不同。因此谈到即时速度必须指出是哪一时刻或哪一位置的即时速度。而在匀速运动中，每一时刻的即时速度不变。必须注意：“即时速度就是很短时间内的平均速度”这句话是错误的。因为很短时间，总是指一段有限的确定时间，它与“趋近于零”的概念是不同的，与即时速度定义中的要求不符。变速运动的即时速度，描述物体在某时刻运动的快慢和运动的方向。一般说，物体在不同时刻具有不同的即时速度，它随时间而变。变速直线运动（指沿一个方向的），速度的方向不变，而速度大小随时间变化；曲线运动，速度的大小和速度的方向皆可变化。所以，严格来讲速度与速度的大小是有区别的，前者是矢量，包含大小和方向两方面的涵义；后者仅指数值而无方向，往往称之为速率。不能理解即时速度的大小为“单位时间内通过的路程”。

【速率】

描述物体运动快慢，而不表示运动的方向，是一个标量。速率有时表示物体单位时间所走的路程。在国际单位制中它的单位是米/秒，此外还有：厘米/秒、千米/时。

【平均速率】

质量运动的路程 S 与相应的时间 t 的比，称为运动质点在时间 t 内的平均速率，常用符号 \bar{v} 表示。即

$$\bar{v} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

【瞬时速率】

当时间 Δt 趋于零时,质点运动的平均速率的极限值称为质点在时刻 t 的瞬时速率,又称质点在时刻 t 的即时速率,简称质点在时刻 t 的速率,常用符号 v 表示。即

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} = \dot{S}(t)$$

【加速度】

描述运动物体的速度变化快慢程度的物理量。它是矢量，用 \vec{a} 表示。它的合成与分解遵从平行四边形法则。加速度是以速度的变化量跟发生这种变化所经过的时间的比值来量度。物体在作直线运动时，如果在某一时刻 t_0 的速度是 v_0 （初速度）到时刻 t 的速度变为 v_t （末速度），那么 $v_t - v_0$ 就称为在 $t - t_0$ 这段时间内的速度变化量，用 a 代表加速度，其表达式为

$$a = \frac{v_t - v_0}{t - t_0}。$$

如果 $t_0=0$ ，则上式可写成

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}。$$

其国际单位应为米/秒²，常用的还有厘米/秒²等。加速度的产生是由于物体间的相互作用，它的方向和运动物体所受合外力的方向一致。但它和运动的方向不一定相同。在直线运动中，加速度的方向总是沿一直线，因此可用正、负号来表示它的方向。由加速度公式知：当 a 为正值时， $v_t > v_0$ ，表示速度在不断增加，物体作加速运动，如图 1-15 甲所示加速度 a 的方向是沿着坐标 Ox 的正方向；当 a 为负值时， $v_t < v_0$ ，表示速度在不断减少，物体作减速运动，如图 1-15 乙所示，加速度 a 的方向是沿着 XO 方向（即 Ox 的反方向）。在变速运动中速度小时加速度不一定小；速度大时加速度不一定大。例如，当火车从车站驶出时，虽然速度不大，但速度变化较大；当火车高速行驶时，在平直轨道上保持匀速前进，行车速度很大，但是速度却无变化，加速度为零。因此说，在加速运动中，加速度取正值，叫正加速度；在减速运动中，加速度取负值，叫负加速度。

【匀加速度】

在匀变速运动中，速度的变化量跟发生这种变化所经过的时间的比是一个恒量，用 a 代表这段时间内运动物体的加速度，则

$$a = \frac{v_t - v_0}{t - t_0} = \text{恒星。}$$

具有这种性质的加速度叫做匀加速度，或称匀变速直线运动的加速度。在匀速运动中 $v_t - v_0 = 0$ ，所以 $a = 0$ ，即没有加速度。在匀变速运动中， a 是一个恒量。应注意的是，在各种不同的匀变速直线运动中，相等时间内速度的变化量不同，因此加速度也不同，上式的恒量也不会是相同的。

【平均加速度】

质点速度改变的平均快慢程度，称为“平均加速度”。它描述作变速直线运动物体之速度的方向和速度大小改变的快慢程度的物理量。其数学表达式为：

$$\bar{v}_{\text{平}} = \frac{\bar{v}_t - \bar{v}_0}{t - t_0}$$

物体作一般变速运动时，平均加速度也因所取时间的不同而有差别，所以在讲平均加速度时，一定要指出是哪一段时间内的平均加速度。平均加速度只能表明某一段路程中（或某一段时间内）速度改变快慢程度的近似情况，在这段路程中，各个分段中的加速度，跟全段路程中的平均加速度可能有所不同。所以，平均加速度不是物体运动的真实加速度。

【即时加速度】

亦称“瞬时加速度”。是指运动物体在某一时刻或通过路程上某一位置时的加速度谓之“即时加速度”。平均加速度是以速度的变化量和发生这种变化所经过的时间的比值来量度的，如果我们选

取的时间间隔极短，即 t 至 $t + \Delta t$ 时间内，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均加速度 $\bar{a}_{\text{平}} = \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t}$

的极限，称时刻 t 的即时加速度。可表示为： $\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ 。它是这一时刻运

动物体的真实加速度，作为变速运动的物体在某瞬间的即时速度可能为零，但经过时间间隔 Δt ，其速度的变化 $\Delta \vec{v} = \vec{v}_t - \vec{v}$ ，不一定为零，所以 t 时刻的

即时加速度 $\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ 不一定等于零。例如，竖直上抛的物体在到达最高点的

瞬间，即时速度是等于零的，但其加速度仍为竖直向下的重力加速度，其值为 9.8米/秒^2 。

【重力加速度】

在地球表面上方不太高的范围内，质点因受地球引力作用而产生的加速度，称为“重力加速度”。也可以说：物体由于重力作用而获得的加速度叫做“重力加速度”。地面附近的物体，由于其它天体距离它很远，地球上其他物体对它的万有引力很小，所以读物体的重力皆指地球对它的万有引力，其方向指向地心。在地面附近，任何物体的重力加速度在同一地点都相同，但在不同地点，物体的重力加速度稍有不同。这种加速度用字母 g 表示。经测定，在赤道附近， $g = 9.78$ 米 / 秒²；在地球北极 $g = 9.83$ 米 / 秒²；在北京 $g = 9.80$ 米 / 秒²；在上海 $g = 9.79$ 米 / 秒²。在一般要求不须太精确的计算中，可近似地取 $g = 9.8$ 米 / 秒²。竖直上抛物体的运动是一种匀减速直线运动，在运动过程中只受到重力作用（空气阻力忽略不计），这时它的加速度也就是重力加速度。但是加速度的方向和物体开始竖直上抛时的初速度方向相反。如果取运动物体竖直向上的方向为正，则加速度的方向应取负值，即 $a = -g = -9.8$ 米 / 秒²。以上各地的重力加速度，都是就平均海平面处而言。在离地面极高处，重力加速度就显著减小。又因地球是椭圆球，其极半径比赤道半径约小 0.3%，所以同一物体在不同的地域所受重力略有不同。地面附近的物体随地球一起转动，万有引力还必须提供其向心力，所以同一物体在不同的地域所受的重力不仅数值略有不同，而且方向也并不指向地心。因此在不同地域的重力加速度也略有不同，方向也并不指向地心。世界主要地区的重力加速度数值见附表。

【图象表示法】

亦称“坐标图解法”。利用平面坐标来表明两个物理量的函数关系，它能形象地描述机械运动的基本规律以及其它很多的规律。例如，机器的性能、晶体管的特性曲线、物质的物理性质及物质的热运动等。通过坐标图上的函数图线，可以直接读出待求量的大小，或用一些简单的计算，将要求的量找出来。图象中的纵、横两坐标轴上的标度，代表互为函数关系的两个不同的物理量。常用的有： $v-t$ 图象、 $P-v$ 图象、 $S-t$ 图象、 $P-T$ 图象、 $v-T$ 图象、振动图象、波动图象、温度-时间 $(T) - (t)$ 图象、伏安图象等。

【位移—时间图象】

简称“位移图象”，它是用图象表示物体位移和时间的关系。匀速直线运动的位移 S 是时间 t 的正比函数 $S=vt$ 。在物体的直线运动中以横轴表示运动物体运动的时间 t ，纵轴表示物体运动的位移 S 。S-t 图象的用途有：已知 S 求相应的时间 t ；已知 t 求相应的位移 S ；还可从直线的斜率的数值得出速度的大小，在同一坐标平面上，斜率越大，则直线越陡，表示速度越大，故可由图线求速度。

【速度—时间图象】

简称“速度图象”。它是用图象表示匀速直线运动的速度和时间的关系。当物体作直线运动时，在平面直角坐标系中，用横轴表示时间，纵轴表示物体运动的速度。借助速度—时间图线可以找到运动物体在任何时刻的即时速度。它的用途较多，例如，已知时刻 t 可求相应的速度 v_t ；已知即时速度 v_t ，可求相应的时刻 t ；图象斜率的大小表示加速度的大小，斜率的正负表示加速度的方向，故可由图线求加速度；用速度图象求质点在任何时间内的位移，位移的数值相当于速度图象曲线下的“面积”的数值。这个“面积”的单位是米/秒 \times 秒=米，而不是米²；可在同一坐标上比较几个物体的运动状况；并可判断某一运动过程的几个阶段的运动性质与状况。

【直线运动】

质点在一条确定直线上的运动，称为“直线运动”。质点的位置，以离原点的距离，或坐标 x 表示。它是研究复杂运动的基础。按其受力的不同可分：匀速直线运动；匀变速直线运动（包括匀加速或匀减速直线运动，以及自由落体；竖直上、下抛运动）；变速直线运动。

【匀速直线运动】

物体沿一直线运动且在任何相等的的时间里位移都相等。或者说速度的大小和方向都不改变的运动，谓之“匀速直线运动”。它的特征是：它的速度是一个恒量，即任一时刻速度（ v ）都相同。它的

数学表达式是 $v = \frac{S}{t}$ ，或 $S = vt$ 。式中 S 是位移、 t 是发生这段位移所经过的

时间。产生匀速直线运动的条件是：当运动物体所受外力的合力等于零时，物体做匀速直线运动。所以，真正的匀速直线运动实际上是很难出现的。为简化问题，不妨碍结果的准确性，而把近似的匀速直线运动当作真正的匀速直线运动来处理。

【变速运动】

亦称“非匀速运动”。物体的速度随时间而变化，可能是快慢程度，也可能是运动方向发生变化，还可能是快慢和方向同时都发生改变。它是最常见的一种机械运动。按其运动的轨迹来分有直线运动和曲线运动。例如，火车、汽车和轮船从车站或码头开出的运动。又如转弯的车辆和钟的摆锤的摆动等。在中学阶段，一般是讨论匀变速直线运动、抛体运动和匀速圆周运动。

【变速直线运动】

在相等的时间里，位移并不都是相等的直线运动。它是物体运动最常见的形式之一。由于物体运动的快慢经常改变，所以常用平均速度和即时速度这两个物理量来描述物体运动的快慢程度。

【匀变速直线运动】

加速度的大小和方向保持不变的直线运动。匀变速直线运动的基本特点是：在任何相等的时间内其速度的增量相等。质点在作匀变速直线运动时，其速度图线 $v-t$ 图是一条倾斜的直线，而直线的斜率就等于其加速度的大小。即

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta v}{t} = \frac{v_t - v_0}{t} = a$$

式中 v_0 、 v_t 依次为作匀变速直线运动的初速度和末速度。它的运动规律可通过几个公式反映出来：速度(v_t)与时间(t)的关系是 $v_t = v_0 + at$ ；位移(S)

与时间(t)的关系是 $S = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ ；速度(v_t)与位移(S)的关系是 $v_t^2 = v_0^2 + 2aS$ 。

当加速度是一个正恒量时，物体的运动叫匀加速直线运动；当加速度是一个负恒量时，物体的运动叫匀减速直线运动。当物体受到一个与 v_0 同方向或反方向的恒力的作用时，或者物体受到几个力的作用，这些力的合力的方向与 v_0 的方向相同或相反，合力的大小保持不变时，物体就做匀变速直线运动。

【匀变速直线运动的基本公式】

匀变速直线运动的规律可以通过下列公式反映出来，即

速度公式 $v_t = v_0 + at$

路程公式 $S = v_0t + \frac{1}{2}at^2$

速度路程公式 $v_t^2 = v_0^2 + 2aS$

公式中共有 v_0 、 v_t 、 S 、 a 、 t 五个物理量，除 t 之外，其余四个都是矢量，但必须注意它们的方向。由于物体是作直线运动，故只须用正、负号即可表示它们的方向。通常规定初速度 v_0 的方向为正方向。当加速度 a 与 v_0 反向时， a 为负，物体作减速运动。速度路程公式是由速度公式和路程公式联立消去 t 以后得到的。可见，上述三个公式中只有两个独立，在 v_0 、 v_t 、 a 、 S 、 t 这五个量中必须给出三个，才能通过公式找出另外两个来。

【自由落体】

不受任何阻力，只在重力作用下而降落的物体，叫“自由落体”。如在地球引力作用下由静止状态开始下落的物体。地球表面附近的天空可看作是恒定的重力场。如不考虑大气阻力，在该区域内的自由落体运动是匀加速直线运动。其加速度恒等于重力加速度 g 虽然地球的引力和物体到地球中心距离的平方成反比，但地球的半径远大于自由落体所经过的路程，所以引力在地面附近可看作是不变的，自由落体的加速度即是一个不变的常量，它是初速为零的匀加速直线运动。

自由落体运动的特点，体现在“自由”二字上，其含意为：物体开始下落时是静止的即 $v_0 = 0$ 。如果给物体一个初速度竖直下落，不能算自由落体。物体在下落过程中，除受重力作用外，不再受其他任何作用力（包括空气阻力）。以 $v_0 = 0$ ， $a = g$ 代入匀变速直线运动的三个公式，可以得到关于自由落体运动的三个公式：

$$v_t = gt。 \quad S = \frac{1}{2}gt^2。 \quad v_t = \sqrt{2gS}。$$

通常在空气中，随着自由落体运动速度的增加，空气对落体的阻力也逐渐增加。当物体受到的重力等于它所受到的阻力时，落体将匀速降落，此时它所达到的最高速度称为终端速度。例如伞兵从飞机上跳下时，若不张伞其终端速度约为 50 米 / 秒，张伞时的终端速度约为 6 米 / 秒。

【自由落体运动】
见“自由落体”。

【抛体】

凡同时参与匀速运动和自由降落的物体都叫“抛体”。在重力作用下，具有初速度 v_0 的物体所做的运动，谓之“抛体运动”。抛体在运动过程中，恒力跟速度的夹角是变化的。当匀速运动的初速度 v_0 和自由落体的加速度 g 方向相同时，物体作下抛运动；方向相反时作上抛运动。物体作下抛或上抛运动的位移公式是

$$S = v_0 t \pm \frac{1}{2} g t^2。$$

当抛体的初速度与重力加速度的方向有一夹角时，物体作斜抛运动；方向垂直时物体作平抛运动，平抛和斜抛运动可根据运动的叠加原理，将其分解为垂直方向的加速运动与水平方向的匀速运动而分别予以讨论。当空气阻力可略去不计时，任何一种轨迹是曲线的抛体运动，都可以看成是由水平方向上的匀速直线运动和铅直方向上的匀变速直线运动所组成的合运动。因此匀速直线运动和匀变速直线运动的规律，以及运动的合成与分解，都是解决抛体运动问题的基础。

【抛体运动】
见“抛体”。

【竖直上抛运动】

仅受重力作用的质点，以初速 v_0 垂直向上抛出的运动称为垂直上抛运动。上抛运动是初速不为零的匀减速直线运动。它是匀变速运动的一种。可看成竖直向上的初速度为 v_0 的匀速直线运动和竖直向下的自由落体运动的合运动。如果规定 $\overrightarrow{v_0}$ 方向为正方向，则加速度 $a = -g$ 。任一时刻的合速度 $v_t = v_0 - gt$ ，经过一段时间 t ，合位移 $h = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$ ， $v_t^2 = v_0^2 - 2gh$ 。在竖直上抛运动里，应注意下列几点：物体上升到最高位置时的速度为零，所以它上升到最大高度的时间 $t = \frac{v_0}{g}$ 。物体所达最大高度 $h_m = \frac{v_0^2}{2g}$ 。物体上升到最高位置的时间与物体回落到原处的时间相等，所以物体在这段空中的时间是 $2t = \frac{2v_0}{g}$ 。物体经过同一点时速度的量值相等，方向相反。竖直上抛运动公式，不但在物体到达最高位置前一段时间任何时刻适用，而且当到达最高位移又返回原来位置，乃至返回原位置后又继续向下运动时的任何时刻也都适用。当抛体在原处上方，则 h 为正号，表示 h 为抛体上升的高度；如果抛体已返回原处继续下落一段距离，则 h 为负号，表示 h 为抛体落至原处以下的距离。

在教学中，为取得较好的教学效果，应该强调：了解物体被抛出后运动的过程。物体以初速度 v_t ，加速度 $a = -g$ ，竖直向上作匀减速运动，速度逐渐减少，最后为零，这时物体到达最高点。在达到最高点瞬间，物体的即时速度虽然为零，但加速度仍为竖直向下的重力加速度 g 。物体从最高点自由下落，速度逐渐增加，回到原处，其速度与上抛速度相等，但方向正好相反。物体如果继续下落，则位移成为负值。搞清用正负号表示矢量的意义。在处理竖直上抛运动中，我们把竖直向上的初速度 v_t 的方向定为正方向，所以加速度 $a = -g$ ，其负号表示加速度 a 的方向竖直向下。物体在抛出点以上，位移为正；物体运动到抛出点以下，位移为负。末速度 v_t 为正，表示物体仍然继续在竖直向上运动； v_t 为负表示速度的方向竖直向下，物体已从最高点竖直下落。按照这样的规定，竖直上抛运动的公式为

$$v_t = v_0 - gt, \quad h = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2, \quad v_t^2 = v_0^2 - 2gh. \quad \text{注意：上列}$$

三个公式中的 $g = 9.8 \text{米/秒}^2$ ，不要再认为 $g = -9.8 \text{米/秒}^2$ 。竖直上抛运动与自由落体运动间的二个关系：其一，竖直上抛运动到最高点需要的时间，等于从最高点自由落体回原地的时间， $t_{\text{竖}} = t_{\text{自}} = \frac{v_0}{g}$ 。其二，竖直上抛运动对物体的初速度在数值上等于从最高点自由落体回原地的末速度，但是它的方向相反。

【竖直下抛运动】

以某一初速，将物体铅直下抛之运动。空气阻力不计时，设抛出时之初速度为 \vec{v}_0 ，重力加速度为 g ，经时间 t 后，其末速度 \vec{v} 与所经之位移 \vec{S} 分别为

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$$

$$\vec{S} = \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{g} t^2$$

$$v^2 = v_0^2 + 2gS$$

【平抛运动】

质点以初速 v_0 沿水平方向抛出后，不计空气阻力，仅受重力作用作曲线运动，这种运动叫“平抛运动”。平抛运动是水平方向的匀速直线运动和铅直方向的自由落体运动的合运动。这两个运动是互相独立的。因此，物体在任何时刻的位置由下列两式确定： $x = v_0 t$ ，

$y = \frac{1}{2}gt^2$ 。式中： x 表示水平距离， y 表示竖直方向位移， v_0 表示初

速， g 为重力加速度， t 为运动时间。由上述两式可得 $y = \frac{g}{2v_0^2} \cdot x^2$ 。确

定物体在作平抛运动过程中，它的位移和时间的关系，以及速度跟时间的关系，如图 1-16 所示。当物体由 O 点沿水平方向抛出，初速度为 v_0 ， y 为物体在时间 t 内竖直下落的距离， x 为物体在该时间内水平方向通过的路程。数据运动独立性原理：“物体在一个方向的运动不会因为物体在其它方向的运动而有所改变”。则平抛运动可以分解为以速度为 v_0 的水平方向匀速直线运动和自由落体运动，这两个运动是互相独立的。因此，物体在任何时刻的位置由上述两公式确定。

设平抛物体在运动过程中沿水平方向的速度为 v_x ，竖直向下的速度为 v_y ，在任何时刻 t 的速度为 v_t ，即平抛物体在时刻 t 的瞬时速度，则从图 1-16 所示可得：

$$v_x = v_0, v_y = gt。$$

所以
$$v_t = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}。$$

设 v_t 与水平方向之间的夹角为 θ ，则

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \frac{v_y}{v_x} = \frac{gt}{v_0} = \frac{gx}{v_0^2}, \\ &= \operatorname{arctg} \frac{gt}{v_0} = \operatorname{arctg} \frac{gx}{v_0^2}。 \end{aligned}$$

如果已知物体沿水平方向抛出时的高度为 h ，就可将 h 代入 $y = \frac{1}{2}gt^2$ 式

中的 y ，得 $h = \frac{1}{2}gt^2$ ，从而求出抛体在空中的总时间 $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ 。再由 $x = v_0 t$ ，

可以计算出抛体到达地面时离开出发点的水平距离 $S = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$ 。

【斜抛运动】

将物体斜向射出，在重力作用下，物体作曲线运动，它的运动轨迹是抛物线，这种运动叫做“斜抛运动”。根据运动独立性原理，可以把斜抛运动看成是作水平方向的匀速直线运动和竖直上抛运动的合运动来处理。取水平方向和铅直向上方向为 x 轴和 y 轴，则这两个方向的初速度分别是

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha, \quad v_{0y} = v_0 \sin \alpha$$

t 时刻质点分速度是

$$v_x = v_0 \cos \alpha, \quad v_y = v_0 \sin \alpha - gt$$

速度是

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad \text{tga} = \frac{v_y}{v_x}$$

t 时刻质点的坐标 (x, y) 是

$$x(t) = v_0 \cos \alpha \cdot t, \quad y(t) = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2}gt^2$$

从上两式消去 t ，便得质点运动的轨迹方程

$$y = \text{tg} \alpha \cdot x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2$$

抛射体所能到达的最大高度为

$$H = \frac{1}{2} \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g}$$

其到达最高点所需的时间

$$T = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

抛射体的最大射程为

$$X = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

由于空气阻力的影响，物体在空中实际上是沿弹道曲线飞行的，它与抛物线不同，它的升弧和降弧不对称。

【运动迭加原理】

亦称“运动的独立性原理，是物体运动的一个重要特性，是物理学中普遍原理之一。一个物体同时参与几种运动，各分运动都可看作是独立进行的，它们互不影响。而物体的合运动是由物体同时参与的几个互相独立的分运动迭加的结果。例如，初速不为零的匀变速直线运动是由物体同时参与的速度为 v_0 的匀速直线运动，和初速为零的匀变速直线运动迭加的结果。又如，平抛物体运动，由竖直方向的自由落体运动和水平方向的匀速直线运动迭加而成，而这两个运动是彼此独立的。

【曲线运动】

物体运动轨迹是曲线的运动，故称“曲线运动”。当物体所受的力和它运动的方向不在同一直线上，物体的运动就是曲线运动。在曲线运动中：当力矢量与速度矢量间的夹角等于 90° 时，作用力仅改变物体速度的方向，不改变速度的量值；当夹角小于 90° 时，作用力不仅改变物体运动速度的方向，并且增大速度的量值；当夹角大于 90° 时，同样改变物体运动速度的方向，但是却减小速度的量值。曲线运动中速度的方向时刻在变，因为是个矢量，既有大小，又有方向。不论速度的大小是否改变，只要速度的方向发生改变，就表示速度矢量发生变化，也就具有了加速度，所以曲线运动是变速运动。常见的曲线运动有：平抛物体运动、斜抛物体运动，匀速圆周运动三种。

【运动的合成】

已知物体的几个分运动求其合运动谓之“运动的合成”。由于一个物体常常在同时作几种运动，其中任何一个运动，不影响其它运动。为研究起来方便，将这个物体的整体运动看作是由几个分运动所组成的合运动。运动的合成是指位移的合成，速度的合成或加速度的合成，运动的合成遵从矢量的合成。当物体同时做两个匀速直线运动时，则其合运动也是匀速直线运动。当物体同时一个做匀速直线运动，一个做初速度为零的匀加速直线运动时，若两者在一直线上，则其合运动也是直线运动；若两者不在一直线上，则其合运动是曲线运动。

【运动的分解】

已知合运动求各个分运动谓之“运动的分解”。它是研究复杂运动的重要方法。在研究比较复杂的运动时，常常把这个运动看作是两个或几个比较简单的运动组成的，使问题容易得到解决。例如对抛体运动通常利用正交分解法将它看成水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀变速直线运动的合运动。

【射高】

在斜抛运动中，轨迹最高点的高度叫做“射高”。它是由竖直方向的分运动决定的，求出初速度为 v_y 的竖直上抛运动的最大高度，即可得到斜抛运动的射高。

【射程】在斜抛运动中，物体从被抛出的地点到落地点的水平距离叫做“射程”。它跟初速度 v_0 和抛射角 θ 有关。利用射程的表达式，即可理解射程跟初速度 v_0 和抛射角 θ 有关系。从这个式子 $x = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$ 可看出，在抛射角 θ 不变的情况下，射程 x 与 v 成正比，所以射程随初速度增大。在初速度 v_0 不变的情况下，随抛射角 θ 的增大， $\sin 2\theta$ 增大，射程也增大。当 $\theta = 45^\circ$ 时， $\sin 2\theta = 1$ ，射程达到最大值，以后抛射角再增大时， $\sin 2\theta$ 减小，射程也减小。

【弹道曲线】

弹头飞行时其重心所经过的路线谓之“弹道曲线”。由于重力作用和空气阻力的影响，使弹道形成不均等的弧形。升弧较长而直伸，降弧则较短而弯曲。膛外弹道学专门研究弹头在空中运动的规律，例如弹头的重心运动、稳定性等也都会影响到弹道曲线。斜抛射出的炮弹的射程和射高都没有按抛体计算得到的值那么大，当然路线也不会是理想曲线。物体在空气中运动受到的阻力，与物体运动速度的大小有密切关系：物体的速度低于 200 米/秒时，可认为阻力与物体速度大小的平方成正比；速度达到 400 ~ 600 米/秒时，空气阻力和速度大小的三次方成正比；在速度很大的情况下，阻力与速度大小的高次方成正比。总之，物体运动的速度越小，空气阻力的影响就越小。抛体的运动越接近理想情况。例如，不计空气阻力，某低速迫击炮的理想射程是 360 米，实际上能达到 350 米，空气阻力的作用处于次要地位。加农炮弹的速度很大，在不计阻力时计算的理想射程能达 46 公里，而实际只能达到 13 公里，空气的阻力是不能忽视的。

【圆周运动】

质点在以原点为圆心半径为 r 的圆周上运动时，即其轨迹是圆周的运动叫“圆周运动”。它是一种最常见的曲线运动。例如电动机转子、车轮、皮带轮等都作圆周运动。在圆周运动中，最常见和最简单的是匀速圆周运动。

【匀速圆周运动】

质点沿圆周运动，如果在相等的时间里通过的圆弧长度都相等，这种运动就叫做“匀速圆周运动”，亦称“匀速率圆周运动”。物体作圆周运动的条件：具有初速度；受到一个大小不变、方向与速度垂直因而是指向圆心的力（向心力）。物体作匀速圆周运动时，速度的大小虽然不变，但速度的方向时刻改变，所以匀速圆周运动是变速运动。又由于作匀速圆周运动时，它的向心加速度的大小不变，但方向时刻改变，故匀速圆周运动是变加速运动。“匀速圆周运动”一词中的“匀速”仅是速率不变的意思。

【线速度】

刚体上任一点对定轴作圆运动时其速度称为“线速度”。它的一般定义是质点（或物体上各点）作曲线运动（包括圆周运动）时所具有的即时速度。它的方向沿运动轨道的切线方向，故又称切向速度。它是描述作曲线运动的质点运动快慢和方向的物理量。物体上各点作曲线运动时所具有的即时速度，其方向沿运动轨道的切线方向。在匀速圆周运动中，线速度的大小等于运动质点通过的弧长（S）和通过这段弧长所用的

时间（ Δt ）的比值。即 $v = \frac{S}{\Delta t}$ ，在匀速圆周运动中线速度的大小虽不改变，但它的方向时刻在改变。它和角速度的关系是 $v = R\omega$ 。线速度的单位是米/秒。

【角速度】

连接运动质点和圆心的半径在单位时间内转过的弧度叫做“角速度”。角速度的单位是弧度/秒，读作弧度每秒。它是描述物体转动或一质点绕另一质点转动的快慢和转动方向的物理量。物体运动角位移的时间变化率叫瞬时角速度（亦称即时角速度）单位是弧度·秒⁻¹，方向用右手螺旋定则决定。对于匀速圆周运动，角速度是一个恒量，可用运动物体与圆心连线所转过的角位移 $\Delta\theta$ 和所对应的时间 Δt 之比表示

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}。$$

【向心力】

物体在作圆周运动时，必须有一个方向跟速度方向垂直指向圆心的力作用于作圆周运动的物体上，这种力叫做“向心力”。此力的数值等于质点质量 m 和其运动速率 v 平方的乘积除以曲率半径 r ，即 F

$$= \frac{mv^2}{r}。若质点沿曲线运动的速率为常数，则向心力即为该质点所受的合力；$$

若质点沿曲线运动的速率不是常数，则质点所受合力不再指向曲率中心，向心力为质点所受合力沿曲线主法线方向的分量（另一分量沿切线方向）。当质点作圆周运动时，向心力指向圆心，曲率半径即为圆的半径。向心力不是什么“特殊的力”，更不是质点“作圆周运动时产生的力”。它是弹力、摩擦力、重力、电场力、磁场力或这些力的合力沿法线方向的力，是由于它的作用产生加速度的方向始终指向曲率中心而得名。作匀速圆周运动的物体向心力就是物体所受的合力，作非匀速圆周运动物体向心力是物体所受的合力在径向的分力。在解答有关圆周运动向心力的问题时，应注意下列几点：

1. 向心力的作用只是使物体不断改变运动方向，而不改变力的大小；
2. 在一般情况下，作用于作圆周运动的物体的力不止一个，当有 n 个力同时作用时，向心力就是 n 个力的合力；
3. 向心力和离心力是一对作用力和反作用力，作用于两个不同的物体上，因而不能平衡；
4. 在不同情况下，各种力都可以作为向心力来使物体作圆周运动，也就是说，向心力可以是重力，也可以是弹力、摩擦力、电磁力等。
5. $F_n = m \frac{v^2}{r}$ 说明了维持同一物体作匀速圆周运动所需的向心力 F_n ，当 v 相同时， F_n 跟 r 成反比； $F_n = m\omega^2 r$ 说明，当 ω 相同时， F_n 跟 r 成正比，这两个公式并不矛盾。

计算向心力的大小，可用上述两个公式。向心力 F 跟圆半径 r 的关系是：在线速度 v 一定的条件下， F 与 r 成反比；当角速度 ω 一定时， F 与 r 成正比。两者并不矛盾，不能脱离线速度或角速度来讨论向心力 F 跟圆半径 r 的关系。

【离心力】

它是向心力的反作用力。向心力是外界作用于作圆周运动物体上的力，它的反作用力是作圆周运动的物体施于外部物体上的力，其方向背向圆心，所以叫“离心力”。向心力和离心力是作用力与反作用力，它们大小相等、方向相反，作用于两个不同的物体上。它和向心力同时产生、同时消失、离心力与惯性离心力有区别。（见惯性离心力）

【惯性离心力】

在相对于地面作匀速转动的圆盘（非惯性系）上，用弹簧将一个质量为 m 的小球与圆盘的中心相连，如图 1 - 17 所示。当圆盘以角速度 ω 转动时，盘上的观察者将发现小球 m 受一个力的作用向外运动从而把弹簧拉展，即小球受到一个方向背离旋转中心的作用力，此力是小球的惯性引起的，故称“惯性离心力”。它的大小为

$$f_{\text{惯}} = m \omega^2 r。$$

惯性离心力是转动参照系（圆盘）中的观察者，在不知道系统作圆周运动的情况下，为解释他所观察到的现象而引入的一个假想力，而不是惯性系中的观察者看到的作圆周运动的小球施于弹簧上的离心力。人们对向心力、离心力、惯性离心力很容易混淆。如图 1—17 所示。绳子给予小球的拉力 $F = m \omega^2 r$ ，给小球提供了作匀速圆周运动所必需的向心力。根据牛顿第三定律，小球也以 $F = m \omega^2 r$ 的力拉绳子，这个力与向心力的方向相反，背离圆心，称为离心力。这个向心力和离心力是从惯性参照系来看圆周运动时所引入的两种不同概念的力。上图所示的装置，一旦绳子断掉，维持小球作圆周运动的向心力消失（离心力也同时消失），小球由于惯性，将保持原有的运动速度，沿圆周的切线方向飞去。可见，惯性离心力是从非惯性系来看力学现象而引入的一个概念，它和上述离心力的概念是完全不同的。

【圆锥摆】

圆锥摆是用于研究向心力的装置。细绳长为 L ，在细绳的下端拴一个质量为 m 的小物体，手握绳子的上端，使小物体在水平面内做圆周运动，细绳沿圆锥而旋转，这就是一个圆锥摆。当物体绕圆周运动时，细绳即在沿圆锥面旋转。增大小物体绕圆心 O 匀速旋转的角速度为 ω ，可看到绳跟竖直方向的夹角 θ 随着增大。做匀速圆周运动的小物体 m 受到地球对它的重力 G 和绳对它的拉力 T 的作用， G 和 T 的合力 F 就是使 m 产生向心加速度的向心力。圆锥摆细绳跟竖直方向的夹角 θ 与物体旋转的角

速度 ω 的关系： $\cos \theta = \frac{g}{\omega^2 l}$ 。即： ω 的值越大， $\cos \theta$ 的值越小，从而在

$0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ 范围内 θ 的值就越大。

【超重】

当物体向上作加速度运动时，它对支持物的压力（或拉力）大于物体所受重力的现象，谓之“超重”。人造地球卫星在发射时，有一个向上的加速度，使舱内一切物体对支持物的压力增大（超过物体所受的重力），又如电梯加速上升，或减速下降都有这种现象。公式表示为 $T = G + ma$ 。

【失重】

当物体存在向下的加速度时，它对支持物的压力（或拉力）小于物体所受重力的现象，谓之“失重”。当人造地球卫星进入轨道后，绕地球做圆周运动，在地球引力作用下产生一个指向地球中心的向心加速度，大小等于重力加速度 g ，此时卫星上的一切物体对支持物的压力为零，并处于完全失重状态。应该明确，无论物体处于何种状态（超重或失重），地球对物体的重力作用始终存在，且大小亦无变化，只是物体对支持物的压力或拉力发生了变化。

【离心运动】

做匀速圆周运动的物体，在合外力突然消失或者合外力不足以提供所需的向心力时，将做逐渐远离圆心的运动，此种运动叫“离心运动”。在半径不变时物体作圆周运动所需的向心力，是与角速度的平方（或线速度的平方）成正比的。若物体的角速度增加了，而向心力没有相应地增大，物体到圆心的距离就不能维持不变，而要逐渐增大使物体沿螺线远离圆心。若物体所受的向心力突然消失，即将沿着切线方向远离圆心而去。人们利用离心运动的原理制成的机械，称为离心机械。例如离心分液器、离心节速器、离心式水泵、离心球磨机等都是利用离心运动的原理。当然离心运动也是有害的，应设法防止。例如砂轮的转速若超过规定的最大转速，砂轮的各部分将因离心运动而破碎。又如火车转弯时，若速度太大会因倾斜的路面和铁轨提供给它的向心力不足以维持它作圆周运动，就会因离心运动而造成出轨事故。

【弧度】

平面角单位。它是国际单位制的两种辅助单位之一，是测量角度所用的单位，是圆内两条半径间的平面角，这两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等。符号为 rad。

【开普勒三定律】

第一定律（轨道定律）：所有行星都沿各自的椭圆轨道运动，太阳在该椭圆的一个焦点上。

第二定律（面积定律）：太阳和运动着的行星之间的连线，在相等的时间内扫过的面积总相等。

第三定律（周期定律）：各个行星绕太阳公转周期的平方和它们的椭圆轨道的半长轴的立方成正比。

开普勒总结了第谷对天体精确观测的记录，经过辛勤地整理和计算，归纳出行星绕太阳运行的三条基本规律。开普勒定律只涉及运动学、几何学方面的内容。开普勒定律为万有引力定律的提出奠定了基础，此三定律也是星球之间万有引力作用的必然结果。

【万有引力】

自然界存在的四种基本力之一。它是物质的一种基本属性。宇宙间任何两个质点之间存在的相互吸引力；称为“万有引力”。牛顿在开普勒行星运动三定律的基础上，首先肯定了这种引力的存在，地球对地面上附近的物体有吸引力（即重力）。将地球近似地看作各层质量

均匀分布的球体，则地面上物体所受地球的引力可用公式 $F = G \frac{M_{\text{地}} m}{r_{\text{地}}^2}$ 来计算，

其中 $M_{\text{地}}$ ， $r_{\text{地}}$ 分别为地球的质量和半径。

【万有引力定律】

任何两物体间都存在相互作用的引力，引力的大小(F)与两物体质量 m_1 、 m_2 的乘积成正比，与两物体间的距离(r)的平方成反比；引力的方向是沿两个物体的连线方向。数学表达式为：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}。$$

其中G是对所有质点都有相同数值的普适常数，称为万有引力常数或万有引力恒量，简称引力常数或引力恒量。在国际单位制中，G的公认值是 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ 牛顿·米²/千克²。牛顿运用开普勒定律提供的实验数据，以及其自己在力学上的成就，进行了长期的观察、分析、研究于1687年正式发表了这一著名的万有引力定律。这一定律中的物体指的是质点。如物体不能被看作是质点时，可看作是质点组，构成两物体的所有质点间引力的合力，才是两物体相互吸引的力。只有在这种情况下，定律中的两物体的“连线方向”。“两者之间的距离”等才有确定的意义。如果两物体是质量均匀分布或者各层的质量是均匀分布的球体时，可将此物体的质量看成集中于球心。

20世纪以来发现在微观世界或高速运动的物体之间牛顿万有引力定律将出现微小的差异，因此，爱因斯坦提出广义相对论，对牛顿万有引力理论进行了修正。

【万有引力恒量】

又叫重力恒量。用 G 表示这一常数。它是在牛顿发现万有引力定律一百多年以后,由英国物理学家卡文迪许于 1798 年用扭秤测定的万有引力常数,从而算出地球的质量和密度。卡文迪许扭秤的主要部分是一个倒挂在石英丝下端的 T 形架, T 形架水平杆的两端各装一个质量为 m 的小球, T 形架的竖直杆上装一块小平面镜,用它将射来的光线反射到一根刻度尺上。再将两个大球分别放在小球附近,并且跟小球的距离相等。由于小球受大球的吸引,石英丝被扭转。扭转的角度,可从小镜反射光在刻度尺上移动的距离求出,即可对两球的引力进行计算。为防止气流的影响而将扭秤置于密闭室内,用望远镜在室外进行观测。

多次实验证明牛顿的万有引力定律不但正确,而且测出了万有引力恒量是 6.754×10^{-11} 牛·米²/千克²,它同现在国际上公认的 G 值等于 6.67×10^{-11} 牛·米²/千克² 很接近。这一数值等于两个质量各为 1 千克的物体,相距 1 米时的相互吸引力。

【地球上物体重量的变化】

物体的重量是受地球引力的作用所致，但重量并不等于地球对物体的万有引力。其原因是因为地球在不断地自转，如以太阳作参照系来观察（太阳是惯性参照系），地球自转的角速度

$$\omega = \frac{2\pi}{24 \times 60 \times 60} \text{ 弧度 / 秒} = 7.3 \times 10^{-5} \text{ 弧度 / 秒}。$$

地面上的一切物体随地球转动而作匀速圆周运动的角速度亦为 ω 。这些物体作匀速圆周运动的圆周平面垂直于地轴而和纬线相吻合。作匀速圆周运动的物体所需之向心力，是地球对物体的万有引力的一个分力，它使物体作匀速圆周运动。如图 1—18 所示，设物体 m 所在处地球的纬度为 φ 。F 是地球对物体的万有引力，方向指向地心 O ，地球以角速度 ω 绕地轴自西向东自转。现将 F 分解为 F_n 和 P 两个分力。 F_n 的方向指向物体 m 作圆周运动的圆心 O' ，它的大小等于物体 m 作圆周运动所需要的向心力，即 $F_n = m \omega^2 r = m \omega^2 R \cos \varphi$ 。

可见，物体所需要的向心力的大小随它所处的纬度而有所区别。 $F = G \frac{Mm}{R^2}$

（ m 为物体的质量， M 是地球的质量）。F 的方向指向地心 O 。利用平行四边形法则，可求另一分力 P。即使物体在自由落体运动中产生重力加速度的力，由于 P 的存在使物体对支持物产生压力，对悬绳产生拉力。P 就是物体所受的重力，它并不指向地心，也不等于地球对物体的万有引力 F。物体所受的重力随地域纬度的增大而增大。又因为地球是椭圆体，它的极半径（6357 千米）比平均半径（6370 千米）小，而赤道半径（6378 千米）比平均半径大。根据万有引力与距离平方成反比的关系，物体在赤道处所受的万有引力 F 就要比两极处受到的万有引力小。上述是以太阳作参照系，立足于惯性系。若以地球作参照系，则从地球这个非惯性系的角度来考虑，一定会受到如图 1 - 19 所示的惯性离心力 f 。 f 的方向与向心加速度的方向相反，背离轴心。 f 的大小等于 $m \omega^2 r = m \omega^2 R \cos \varphi$ 。此外物体还受到地球对它的万有引力 F。F 的方向指向地心，大小等于 $G \frac{Mm}{R^2}$ 。地球

对物体的万有引力 F 和惯性离心力 f 的合力 P，即为物体所受的重力。两种分析方法所得物体重力是相同的。所以同一物体在赤道上的重力最小，用弹簧秤称出的重量最轻，在两极处恰恰相反。同一物体在赤道和两极重量的比较，变化并不太大，增加部分约为原重的 5/1000。

【人造地球卫星】

凡火箭、太空航具，或其他人造物体经设计并置于绕地球运转之轨道上者，均称为“人造地球卫星”。人造卫星是牛顿在他《Principin》一书中所拟出来的理想实验，图 1—20 是从他的书上复印出来的。从一山顶射出来的子弹，当它们的初速度愈快，离山脚的距离就愈远。当速率足够高时，它将绕地球作圆周运动。

人造地球卫星绕地球运行的轨道为圆形或椭圆形两种。若使卫星沿圆形轨道运行，必须注意发射方向一定要水平，发射速度必须等于圆轨道速度，如有稍许偏差，必不能成圆形轨道。椭圆轨道对发射角度与速度无上述限制，但其近地点应在 300 公里以上，远地点应在 2000 公里以上。若近地点在 300 公里以内会受稀薄大气阻力，而使卫星失速而坠落。据测试卫星的近地点如在 500 公里以上，运行时间可维持在一年以上。如近地点恰在 300 公里的高度，则只能维持半月之久。若其近地点只达 160 公里，恐运行不满一周，即因大气阻力而使之坠落。据资料判定，假定近地点在 500 公里高度，大约可维持 5~10 年，这需要用事实来判断。

【宇宙速度】

物体脱离地球，不同程度地进入太空所需要的最小速度称为宇宙速度。在地球表面发射人造卫星，运用牛顿运动定律和万有引力定律。设卫星质量为 m ，离地心高度为 r ，地球的质量是 M 。卫星的速度是 v 。卫星做匀速圆周运动所需的向心力是地球对它的引力，即

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}, v = \sqrt{\frac{Gm}{r}}。$$

式中 r 越大，卫星离地面越高，它环绕地球运动的速度 v 越小。靠近地面运转的卫星，可认为 r 差不多等于地球的半径 $R_{地}$ ，地球对卫星的引力差不多等于卫星的重量 mg 。从 $mg = m \frac{v^2}{R_{地}}$ 可得 $v = \sqrt{gR_{地}}$ 。

在地球引力作用下，在半径等于地球半径的圆形轨道上飞行的人造卫星的速度 v_1 是

$$v_1 = \sqrt{gR}$$

式中 g 是地球的重力加速度 ($g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$)， R 是地球的平均半径 ($R = 6400 \text{ 千米}$)，则这一速度值为： $v_1 = 7.9 \times 10^3 \text{ 米/秒}$ 。叫做第一宇宙速度，亦称“环绕速度”。

当抛体的初速度继续增加时，它的运行轨道不再成闭合曲线，而成为抛物线或双曲线，这时抛体将脱离地球的引力范围，成为围绕太阳运行的人造行星。若不计空气阻力，抛体脱离地球运行的最低速度，叫做第二宇宙速度，亦称“脱离速度”。第二宇宙速度（相对于地球）是第一宇宙速度的 $\sqrt{2}$ 倍，以 v_2 表示

$$v_2 = \sqrt{2}v_1$$

它的数值约等于 $11.2 \times 10^3 \text{ 米/秒}$ 。当物体在地球表面附近以大于第一宇宙速度和小于第二宇宙速度被抛出，它将环绕地球作椭圆轨道运动。地球中心是这椭圆轨道的一个焦点，且抛射点是椭圆轨道上距离地球中心最近的一点，称为近地点。

物体能够挣脱太阳系引力的束缚，进入宇宙空间去，它所需的最小速度，叫第三宇宙速度，亦称“逃逸速度”。若不计空气阻力，则它的数值约为 $16.7 \times 10^3 \text{ 米/秒}$ 。

【静止】

在力学中，一个物体相对于另一个物体的相互位置不发生变化，则称这两个物体处于相对静止状态。通常所说的物体静止，是以地球为参照物，相对于地球而言的。例如，地面上的树木、房屋、停驶的汽车与地面没有发生位移的变化，均属于静止的物体。静止是物体的加速度为零，速度也等于零的运动的特殊形式。

【相对静止】

没有任何方法可以证实一个物体是在绝对静止之中。绝对静止的物体是不存在的。静止只是一个物体对于它周围的另一个参照物保持位置不变，所以也只能是相对静止和相对运动。判断一个物体是在静止中还是在运动中必须选择合适的参照物。选择的参照物不同，物体的运动状态就不同。例如，坐在火车里的人若以火车作参照物，则他看到火车上的货物对火车的位置不变，故货物对火车相对静止。若选地面上的树木或建筑物为参照物，人看到货物对建筑物的位置是不断变化的，故货物对树木做相对运动。

【相对运动】

一物体相对另一物体的位置随时间而改变，则此物体对另一物体发生了运动，此物体处于相对运动的状态。如果相对之间的位置并不随时间而改变，则此物体即在相对静止状态之中。因此，静止与运动两者都是相对的概念，与物体相对于选定的参照物有关。一栋楼房或一棵树对地球来说，它们是静止的；但对太阳来说，它们却都在运动着。当一列火车经过车站时，我们就说这列火车相对车站而运动。但是对在火车上的旅客，可以认为车站是在与火车运行相反的方向相对火车而运动。所以，在描述物体是否运动时，观察者必须选择一个参照物，然后根据所选定的参照物来确定物体是否运动。

【拉力】

在弹性限度以内，物体受外力的作用而产生的形变与所受的外力成正比。形变随力作用的方向不同，使物体延伸的力称“拉力”或“张力”。

【推力】

由火箭或喷气引擎加于宇宙飞船上的反作用力，其大小决定于燃料燃烧情况以及燃气喷出之速度。在地球上发射宇宙飞船时，火箭的推力必须比飞船及火箭本身的重量大，才能使其升空，所以如果送质量较大的宇宙飞船由地球进入轨道时则需用较大推力的火箭。又如举重运动员将杠铃向上推举所用之力称为“推力”。

【阻力】

妨碍物体运动的作用力，称“阻力”。在一段平直的铁路上行驶的火车，受到机车的牵引力，同时受到空气和铁轨对它的阻力。牵引力和阻力的方向相反，牵引力使火车速度增大，而阻力使火车的速度减小。如果牵引力和阻力彼此平衡，它们对火车的作用就互相抵消，火车就保持匀速直线运动。物体在液体中运动时，运动物体受到流体的反作用力，使其速度减小，这种反作用力亦是阻力。例如划船时船桨与水之间，水阻碍桨向后运动之力就是阻力。又如，物体在空气中运动，因与空气摩擦而受到阻力。

【压力】

垂直作用在物体表面上的力叫作“压力”。力可以使物体产生形变。例如，一个面团用木棒从各个角度挤压面团，可看到，当木棒离开后，面团上留下一个个的凹坑，这种使面团发生凹陷形变的力为压力。压力是垂直作用在物体表面上，使物体表面凹陷的力。其中“作用在物体表面上”一语，意味着表面上各点都是压力的作用点，“垂直物体表面”是压力的方向，“使物体表面凹陷”是压力产生的作用效果。例如按图钉，其方向可以与墙面垂直，可与天花板垂直，也可与水平桌面垂直，无论这个面如何放置，压力的方向总是要与接触面相垂直的。这是与其它力的一个根本区别。

【压强】

垂直作用于物体的单位面积上的压力。若用 p 表示压强， F 表示垂直作用在物体表面上的力， S 表示受力面积，则 $P = \frac{F}{S}$ 。它的国际单位为帕斯卡（1 帕斯卡=1 牛顿/米²）。

对于压强的定义，应当着重领会四个要点：

1. 受力面积一定时，压强随着压力的增大而成正比例地增大。
2. 同一压力作用在支承物的表面上，若受力面积不同，所产生的压强大小也有所不同。受力面积小时，压强大；受力面积大时，压强小。
3. 压力和压强是截然不同的两个概念：压力是支承面上所受到的并垂直于支承面的作用力，跟支承面面积大小无关。
4. 压力、压强的单位是有区别的。压力的单位是牛顿，跟一般力的单位是相同的。压强的单位是一个复合单位，它是由力的单位和面积的单位组成的。在国际单位制中是牛顿/米²，称“帕斯卡”，简称“帕”。

【压力和重力】

压力和重力是两个不同的概念。它们的施力物体，以及力的大小、方向、作用点都有区别。重力的施力者是地球，方向（永远）竖直向下，作用点在物体的重心上。压力的施力者是与受力物体接触的其他物体，本质是弹力，方向（永远）垂直于受力物体表面，作用点在受力物体的表面上。可见，压力和重力是两种完全不同的力。只有在某些情况下，压力和重力在数值上是相等的。如物体压在水平地面上时，其重量与压力相等。

【帕斯卡】

简称“帕”代号 Pa。为纪念帕斯卡而作为单位名称，他发现大气压强随高度而变化。帕斯卡是国际单位制中压强 P 的单位。1 帕斯卡的压强等于 1 米²的面积上均匀作用 1 牛顿的力所产生的压强，即 1 帕=1 牛顿/米²。它跟气体压强中其它单位的关系为：1 标准大气压=76 厘米汞柱高=1.013 × 10⁵ 帕斯卡。

【帕斯卡定律】

由于液体的流动性，加在密闭液体上的压强，能够按照原来的大小由液体向各个方向传递。这个定律在生产技术中有很重要的应用，例如液压机，液压传递都是根据这一定律制成和工作的。这一定律是法国物理学家帕斯卡首先提出的。

【液体内部压强】

液体内部压强的特点是：液体具有重量；液体具有流动性。由于液体有重量，因此在液体的内部就存在由液体本身的重量而引起的压强，从实验结果及理论推证都表明，这个压强等于液体单位体积的重量和液体所在处的深度的乘积，即 $P = \rho gh$ （式中 $g = 9.8$ 牛顿/千克）。由公式知，液体内部的压强与深度有关，深度增加，压强亦随着而增加。

因为液体具有流动性，所以液体内部的压强又表现出另外一些特点：液体对容器的底部和侧壁都有压强的作用，而且压强一定与底面或侧壁垂直；液体内部的压强是向各个方向的，而且在同一深度的地方各个方向的压强都相等。在解题时应注意下列几点：

1. 液体内部某处的深度 h ，应当取该处至液面的垂直距离，它与容器的形状无关。

2. 深度与高度是有区别的，深度是从液面向下至某一点的垂直距离，而高度是从容器或液体的底部起向上数到液面的竖直高度。

3. 液体内部某处至液面之间有几层密度不同的液体，则该处的压强等于几层液体各自产生的压强之和。在考虑大气压的情况下，还应当加上液面上受到的大气压。

4. 连通器中的液体在平衡时左管中液体的压强一定与右管中液体的压强相等。

【液体对容器的压强】

液体内部存在压强，压强的大小与液体的深度和液体的密度有关，即 $P = \rho gh$ 。由于液体具有流动性，当液体装入容器中时，容器的底和壁就要受到液体的压强。

1. 液体对容器底部的压强：在各种不同形状的容器中，如只装同种液体，只要液柱的竖直高度相等，液体对容器底部的压强就相等。它与容器的形状、容积以及底面积的大小无关，更不管所盛液体重量的大小。

液体对容器底部的压强与容器底对支承面的压强不同。例如，三个质量相同、底面积相同的不同容积的容器，装入同种而且高度亦相同的液体，静止放在水平的桌面上，根据公式 $P = \rho gh$ ，三个容器底部所受的液体压强是相等的。桌面受到的压强，是盛着液体的容器压在桌面上而产生的。根据压强的定义式：压强 = $\frac{\text{压力}}{\text{受力面积}}$ 。由于三个容器的容积不同，所盛液体重量不等，桌面上所受的压力就不相等。尽管桌面的受力面积相同，桌面所受的压强是不会相等的。

如果一个容器中装有几种不相溶混的液体，该容器底部所承受的压强，应是几种液体压强相加。因为下面的液体被上面的液体所封闭，根据帕斯卡定律，密闭的液体会将上面液体的压强传至容器的底面，因此容器底所受之压强是 $P_1 + P_2 + \dots = P_{\text{总}}$ 。

2. 液体对容器侧壁的压强：容器侧壁处于不同的深度，各点所受之压强亦有所不同。一般情况是测侧壁的平均压强，公式 $\bar{p} = \rho g \bar{h}$ ，式中的 \bar{h} 是深度的平均数，即液体深度的一半，所以 $\bar{p} = \rho g \bar{h} = \rho g \frac{h}{2}$ 。

【流体】

是液体和气体的总称。流体是由大量的、不断地作热运动而且无固定，平衡位置的分子构成的，它的基本特征是没有一定的形状和具有流动性。流体都有一定的可压缩性，液体可压缩性很小，而气体的可压缩性较大，在流体的形状改变时，流体各层之间也存在一定的运动阻力（即粘滞性）。当流体的粘滞性和可压缩性很小时，可近似看作是理想流体，它是人们为研究流体的运动和状态而引入的一个理想模型。

【流体力学】

研究流体的运动规律以及流体与流体中物体之间的相互作用。在流体力学中一般不考虑流体的分子、原子结构而把它看作连续介质。它处理流体的压强、速度及加速度等问题，包括流体的形变。压缩及膨胀。因此流体力学也是以牛顿运动三定律为基础的，并遵循质量守恒，能量守恒和功能原理等力学规律。流体力学又分为流体静力学和流体动力学，在中学教材中，只涉及到流体静力学的内容。

【流体静力学】

流体处于不流动的静止状态，称为流体处于平衡状态。研究流体静止条件及关于物体在流动中受力情况的力学称为“流体静力学”。其研究的主要内容有：密度、压强、液体内部压强、大气压强、帕斯卡定律、浮力及阿基米德定律等。

【流体动力学】

研究运动流体的宏观状态和规律的学科。主要研究对象包括流体的速度、压强、密度等的变化规律，粘滞流体的运动规律及粘滞流体中运动物体所受的阻力，以及其它热力学性质。

【液体之表面】

静止的液体，其表面永远趋于水平状态，否则其表面必将高低不平。设某一大容器内 B 处液面比 A 处液面高 h 米，而液体之密度为 ρ ，则在与 A 处于同一水平面上而又在 B 下之 C 点，所受之压强较 A 处之压强大 ρgh ，于是 C 点之液体必向 A 处流动。此时的液体不是静止而是处于流动状态，直至液面处于水平状态。这就是静止的液体表面永远趋于水平的道理。

【水压】

指水的压力。用容器盛水时，由于水有重量，就有相当于那么多重量的压力，向容器的壁及底面作用。盛在容器中的水，对侧面及底面都有压力作用，对任何方向的面，压力总是垂直于面的。而且深度相同时，压强也相同；液体越深，则压强也越大。例如，在一个两端开口的玻璃管的一端加一薄塑料片，开口一端向上，直放入水中时，薄片不会下落。这是因为有水向上托之力（即向上的压力）。然后将水慢慢地一点点灌入玻璃管中，管内的水面未接近管外的水面时，塑料薄片不会掉下。这证明水有向上的压力，给薄片一个支持的力。继续加水至管内外水面相平时，管内水柱向下的压力与管外薄片受到的向上压力相等，由于塑料薄片本身的重量而落下。此时，筒底薄片所受之向下的压力是筒中水柱的重量，所受之向上的压力，为筒所排除水的重量，二者相等而方向相反，遂相消而等于零，薄片是受重力作用而落下。如将玻璃管倾斜放置，其结果也是一样。即水的压力向上，各侧面都有压力作用。

【液体的压力】

液体受到重力作用，而向下流动，因受容器壁及底的阻止，故器壁及底受到液体压力的作用。如图 1 - 21 所示，为一竖直之容器，器底阻止液体向下流动，故等于液体重量的力向下压器底，器底面 cd 部分所受的压力等于 abcd 液柱之重。

液体因为重力的作用和它的流动特性，当液体静止时液体内部以及接触面上各点所受的压力，都遵守下列各条规律：

1. 静止液体的压力必定与接触面垂直。
2. 静止液体内部同一水平面上各点，所受压强完全相等。
3. 静止液体内部某一点的压强，对任何方向都相等。
4. 静止液体内部上下两点的压强差，等于以两点间的垂直距离为高度，单位面积为底的液柱重量。

前面曾提到静止液体的压力与液体重量的关系。但那是有条件的，因为容器筒壁是竖直的。如果有三个形状不同的容器 A、B、C，底面积相同都为 S，而且装有相同高度 h 的同种液体。在这种条件下静止液体的压力，是否一定等于液体的重量？对图 1 - 22 所示情况进行分析，根据上述条件，则： $P_A=P_B=P_C= gh$

图 1—22

$$F_A=F_B=F_C= ghS$$

但是三个容积大小不等，B 的容积大于 A，C 的容积小于 A。由于三个容积大小不同，尽管高度相同，但所盛液体的重量并不相等，所以有 $G_B > G_A > G_C$ 。尽管液重不同，但它们底部所受的压力却相等。因液体是流体，会流动，对容器的四壁都要产生压强。A 容器的液体重量竖直方向落在 S_A 上，只有容器 A 静止液体的压力与液体重量相等。其它两容器则不然，B 容器里液体的重量虽然很大，但真正作用在容器底面上的压力，只有图中虚线部分所包围的液柱的重量，和容器 A 底面上所受的压力一样， $F_B=F_A$ ，虚线外的那部分液体的重量，作用在斜壁上面。容器 C 由于 h 液柱压强的作用，而使容器“肩部”的内壁对液体产生压力 F 。如果用 S 表示一个“肩部”的横截面积，那么 $F = gh S$ 。这个压力 F ，正好就是“肩部”和容器 A 相比所缺少的那部分（图中虚线部分）液体的重量。“肩部”的压力 F ，都要被液体传递到容器的底部。所以，容器 C 的底部所受到的压力要比容器里的液体重量大，它等于以容器底为底的液柱的重量，即 $F_C=F_A$ 。从以上情况可见，不管容器的形状是怎样的，只要容器中装的是同一种液体，深度相同，而且底面积也相同，即使它们的重量不等，但是容器底部所受到的压力必定相等。所以，静止液体的压力，并不一定就等于液体的重量。在求静止液体产生的压力时，就应该用压强乘受力面积，即 $F= ghS$ 。

【液压机】

利用帕斯卡定律制成的利用液体压强传动的机械，种类很多。当然，用途也根据需要是多种多样的。如按传递压强的液体种类来分，有油压机和水压机两大类。水压机产生的总压力较大，常用于锻造和冲压。锻造水压机又分为模锻水压机和自由锻水压机两种。模锻水压机要用模具，而自由锻水压机不用模具。我国制造的第一台万吨水压机就是自由锻造水压机。

【液压机原理】

它是由两个大小不同的液缸组成的，在液缸里充满水或油。充水的叫“水压机”；充油的称“油压机”。两个液缸里各有一个可以滑动的活塞，如果在小活塞上加一定值的压力，根据帕斯卡定律，小活塞将这一压力通过液体的压强传递给大活塞，将大活塞顶上去。设小活塞的横截面积是 S_1 ，加在小活塞上的向下的压力是 F_1 。于是，小活塞对

液体的压强为 $P = \frac{F_1}{S_1}$ 。根据帕斯卡定律：“加在密闭容器内液体上的压强，

能够大小不变地被液体向各个方向传递”。大活塞所受到的压强必然也等于 P 。若大活塞的横截面积是 S_2 ，压强 P 在大活塞上所产生的向上的压力

$F_2 = PS_2$ 。如把 $P = \frac{F_1}{S_1}$ 代入 F_2 中，得 $F_2 = \frac{F_1}{S_1} S_2$ ，或写成 $\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$ 。式中的左边

$\frac{F_2}{F_1}$ 表示大活塞上的压力是小活塞上压力的倍数，右边的 $\frac{S_2}{S_1}$ 表示大活塞的横

截面积是小活塞横截面积的倍数。从上式知，在小活塞上加一较小的力，则在大活塞上会得到很大的力，为此用液压机来压制胶合板、榨油、提取重物、锻压钢材等。

【万吨水压机】

它是我国自己设计制造的第一台大型自由锻造水压机,于1961年由上海江南造船厂制成投入生产。这在当时的生产条件,以及生产设备来看,确是惊人的创举。这种大型水压机可以产生上亿牛顿的压力,它能把九百吨,以至上千吨的钢材加热后象揉面似的压制成各种不同形状的钢件。这种经过锻压过的铁块,其内部变得密实、均匀。而且有韧性,制成车轴、车轮等不易断裂。是造船厂以及重型机械制造厂在生产上不可缺少的设备。这台水压机有两个特点:其一是既重又大,它的主机重2200多吨,高23.6米,基础深入地下40米,共有4万多个零件,其中有13个大件,6个主缸,4根大立柱,3个大横梁。水压机的4根大立柱每根大约有18米高,1米粗,80吨重。每根立柱都有几个大螺帽,一个大螺帽就有5~6吨重。三个大横梁(上横梁,下横梁,动横梁)每个都有几百吨重。其二是精密,3500牛顿/厘米²的高压水要用12台高压水泵,16个高压容器和100多个高低压阀门进行联动控制,有关机件都必须有高度的精密性、密封性、准确性和灵活性,万吨水压机一般用于锻造、冲压、挤压、拉深、起重、打包等需要较大压力的工作。如,锻造大型发电机转子轴、大型轧钢机机架、万吨轮发动机主轴、炮管、导弹外壳等特大型的机件。

【油压千斤顶】

它是生产中常用的一种起重工具。它的构造简单、操作方便，修理汽车、拖拉机等常用它将车身顶起，便于修理。油压千斤顶是根据帕斯卡定律的原理工作的。它由油箱，大小不同的两个压力油缸、摇杆和关闭针阀等几个部分组成。工作时，提起小活塞将油吸入小压力油缸，当压下小活塞时将油压进大压力油缸。通过两个阀门的控制，小活塞对油的压强传递给大活塞，将重物顶起来。小活塞不断地往复动作，就可以把重物顶到一定的高度。工作完毕，打开关闭针阀，使大压力油缸和油箱连通。这时，只要在大活塞上稍加压力，大活塞即可下落，油回到油箱中去。

【连通器】

几个底部互相连通的容器，注入同一种液体，在液体不流动时连通器内各容器的液面总是保持在同一水平面上。连通器的原理可用液体压强来解释。若在 U 形玻璃管中装有同一种液体，在连通器的底部正中设想有一个小液片 AB。假如液体是静止不流动的，左管中之液体对液片 AB 向右侧的压强，一定等于右管中之液体对液片 AB 向左侧的压强。因为连通器内装的是同一种液体，左右两个液柱的密度相同，根据液体压强的公式 $P = \rho gh$ 可知，只有当两边液柱的高度相等时，两边液柱对液片 AB 的压强才能相等。所以，在液体不流动的情况下，连通器各容器中的液面应保持相平。

连通器的特点是只有容器内装有同一种液体时各个容器中的液面才是相平的。如果容器倾斜，则各容器中的液体即将开始流动，由液柱高的一端向液柱低的一端流动，直到各容器中的液面相平时，即停止流动而静止。如用橡皮管将两根玻璃管连通起来，容器内装同一种液体，将其中一根管固定，使另一根管升高、降低或倾斜，可看到两根管里的液面在静止时总保持相平。其原理在生产实践中有着广泛的应用，例如，水渠的过路涵洞，牲畜的自动饮水器、水位计，以及日常生活中所用的茶壶、洒水壶等都是连通器。

【水位计】

水位计和锅炉构成一个连通器。水位计也叫“液位计”或“液面计”。因锅炉里的水在高温时汽化供暖，水和汽的损耗较大，要不断地补充水，使锅炉里的水位保持一定的高度，水位过低，锅炉就有爆炸的危险。为了随时了解锅炉内的水位，在锅炉上都装有水位计，水位计和锅炉构成一个连通器。常用的有玻璃液位计、压强液位计、浮标液位计、电容液位计及电阻液位计等。在高温和高压下，也可采用同位素液位计。

【水渠】

农田灌溉常利用江河之水，通过地面上所开之“沟”，引入农田。水渠是人工开凿的水道，有干渠、支渠之分。干渠与支渠一般用石砌或水泥筑成。

【涵洞】

在水渠通过公路的地方，为了不妨碍交通，修筑于路面下的过路涵洞，让水从公路的下面流过再翻到地面上来，形状有管形、箱形、及拱形等。它是根据连通器的原理，常用砖、石、混凝土和钢筋混凝土等材料筑成。

【船闸】

在水位集中跌落的情况下（例如，建造闸、坝处），用以保证通航的水利工程建筑物，或利用河水灌溉农田，也可利用水力推动水力发电机进行工作，则需要在河流上修建拦河坝，用以提高水位。这样，河水被大坝隔断，上下游的水位差较大，航船无法通过。于是人们就利用连通器的原理，在运输频繁的江河上，在大坝的旁边修建了船闸。主要由闸室及上下游闸首所组成，闸室的两端设置闸门，用以与上下游隔开。当船下行时，先将闸室充水，待室内水位与上游相平时，将上游闸门开启，让船只进入闸室。随即关闭上游的闸门，闸室放水，待其降至与下游水位相平时，将下游闸门开启，船只即可出闸。上行时与上述过程相反。船闸须设有专门充水、放水系统及操纵闸门的设备。根据地形以及水位差的大小，船闸可做成单级或多级的。

【大气】

围绕任何行星或其它天体的气体，包括围绕地球的空气。地球的大气由地面向上扩展至高空。大气垂直方向，有各种分层方法，通常根据大气中温度随高度垂直分布的特征划分为对流层、平流层、中间层、热成层和外大气层等，主要天气现象多发生在对流层内。

大气的组成，在 120 公里以下的高空中，大气的主要组成为：氮分子占 78.00% (N_2) 和氧分子占 (O_2) 20.25% 的均匀混合体，其次为 0.93% 的氩 (Ar) 与 0.03% 的二氧化碳 (CO_2)。再其次的组成元素（按含量的递减而排列）为氖、氦、氪、氙、氢、氯、氧化亚氮、臭氧、二氧化硫、二氧化氮、氨、一氧化氮及碘。二氧化碳及臭氧在大气中的含量虽然很少，但它们确是大气中之重要成分，因为二氧化碳可保持环境温度，臭氧则可防止太阳的某种有害人类之短波辐射至地面。大气中的水蒸汽及微尘之含量，则是随高度之增加而降低，它们对于大气之变化，都有重要的作用。它们可使天气有雨、云、雾等的变化。大气组成元素的分布，在 120 公里以上的高空，随原子量的不同而异。在 120 公里以下的高空，大气组成为氮分子及氧分子的混合气体；由 120 公里至 1000 公里，氧原子占主要位置；1000 至 2500 公里为氮层，2500 公里以上的太空中为氢气，而且氢气由此一直延伸至星际太空中。

在高度距地面约 120 公里以下的高空中，大气是一个均匀且稳定的混合气体层，其中氮分子与氧分子为 4 : 1。在 120 公里以上，扩散作用的因素胜过混合作用，所以大气组成中的不同元素，则以原子形式分别集中在不同的高度层上。原子量最重的氧位于较低的高度，原子量较氧稍轻的原子，位于氧之上，如此类推，最轻的氢气位于最上层。在 120 公里以上的大气，由于太阳的辐射而引起的分解和电离作用，更增加了复杂性。大气的密度，按照其发光强度，电离层之反射能力，以及作用于人造卫星上的大气阻力等各项来看，自 100 公里以上密度的降低速度，远较 100 公里以下缓慢。大气密度在较高空所以缓慢下降的理由，可分两点：其一是由于大气温度随大气层厚度的增加而增加，即包围地球之大气层的温度愈高，则该大气层愈膨胀，其压力随厚度之降低亦愈加缓慢；其二是当高度至 100 公里以上时，大气的组成改变，愈向高空，其组成元素之重量愈轻，则大气的密度平均值亦因之降低。气体密度愈小，则其密度与压力依高度之下降亦愈加缓慢。在 200 公里以下的高空，对于密度的测量，可用火箭升高直接测量。但超过此高度后，直接测量就很困难。可通过作用在人造卫星上的大气阻力来分析，间接推算出密度。

【大气压】

亦称“大气压强”，是重要的气象要素之一。它是由于地球周围大气层本身的重量而产生的压强，其大小与高度、温度、湿度等有关。离海平面越高，大气压就越小。通常把 760 毫米汞柱高的大气压称为“标准大气压”，简称“大气压”。1 标准大气压=760 毫米汞柱所产生的压强=1.0336 千克/（厘米）²=1.013 × 10⁵ 帕斯卡。

【标准大气压】

在纬度是 45° 的海平面上，温度是 0°C 时，相当于 76 厘米汞柱高的大气压，称为标准大气压。因为托里拆利实验中水银柱产生的压强可用 $P = \rho gh$ 来计算。式中 h 表示水银柱的高度， ρ 表示水银的密度， g 表示重力加速度。水银的密度跟温度有关，重力加速度与测量地点的高度和纬度有关，所以只给出水银柱的高度 76 厘米并不能确切地规定标准大气压的数值，还必须给出测量地点的高度、温度和纬度。

【大气压强】

地面上空气的范围极广，常称“大气”。离地面 200 公里以上，仍有空气存在。虽其密度很小，但如此高的大气柱作用于地面上的压强仍然极大。人体在大气内毫不感觉受到气压的压迫，这是因为人体的内外部同时受到气压的作用恰好都相等的缘故。

由于从地球表面延伸至高空的空气重量，使地球表面附近的物体单位面积上所受的力称为“大气压强”。大气压强的测量通常以水银气压计的水银柱的高来表示。地面上标准大气压约等于 76 厘米高水银柱产生的压强。由于测量地区等条件的影响，所测数值不同。根据液体压强的公式 $P = \rho gh$ ，水银的密度是 13.6×10^3 千克/米³，因此 76 厘米高水银柱产生的压强是 $P = 13.6 \times 10^3$ 千克/米³ $\times 9.8$ 牛顿/千克 $\times 0.76$ 米 $= 1.013 \times 10^5$ 牛顿/米² $= 1.013 \times 10^5$ 帕斯卡。

【托里拆利实验】

是在 17 世纪，意大利数学家及物理学家托里拆利所做的一个著名实验。1643 年发明了水银气压计原理，首次造成真空状态，轰动了当时。托里拆利通过实验首先测出大气压的值。在一根长约 1 米一端封闭的玻璃管（称“托里拆利管”）内，灌满水银，用食指堵住开口的一端，把管子倒立在水银槽里。然后放开手指，管内的水银面下降到比水银槽中水银面大约高于 760 毫米处就不再下降了，与当时当地的大气压强的作用平衡。若将玻璃管倾斜，进到管里的水银就多些，尽管此时水银柱的长度增加了，但是管内外水银面的高度差仍保持原来的数值不变。如将管从水银槽里提起 20 毫米或将管向槽里按入 20 毫米，管内水银柱的高度，仍保持原来数值不变。在实验时可换用管径不同的玻璃管，其结果仍然不变。

【托里拆利真空】

托里拆利实验中充满水银的玻璃管，倒置于水银槽中，水银下降至一定高度即停止降落，这是因为管内的水银重量被作用于水银槽面上的大气压所支持。此时，在管内水银上面除了水银蒸气外，并无任何物质，因为水银蒸气的气压极低（在 20℃ 时只有 0.0012 毫米水银柱），所以几乎可看作是真空，这就叫作“托里拆利真空”。现在管里水银面的上方没有空气，因此也就没有空气压强对管内液面的作用。管外水银面上所受到的大气压与管内水银柱对底面的液体压强是等值的。若玻璃管的顶端，突然破裂一个小洞，管里水银面上就受到跟管外水银面上相同的大气压，根据连通器的原理，管内外的水银面就会趋于水平状态。

【马德堡半球】

亦称“马德堡圆盘”，是用来演示大气压强的仪器。1654年德国马德堡市的市长、学者奥托·格里克表演了一个最惊人的试验。他把两个铜质直径三十多厘米的空心半球紧贴在一起，两半球的对口处经过研磨。在贴在一起之前，应用抹布将对口处擦净，并涂上凡士林，两半球接触后，要用力压一下并稍稍左右转动一下。然后打开阀门，并用胶皮管把气嘴跟抽气机相连接，将球内气体抽出后，球外的大气压使两半球合在一起。在半球的两侧各装有一个巨铜环，环上各用八匹马向两侧拉动，结果用了相当大的力却未拉开。球内的空气被抽出，没有空气压强，而外面的大气压就将两个半球紧紧地压在一起。通过上述实验不仅证明大气压的存在而且证明大气压是很大的。这个实验是在马德堡市进行的，因此将这两个半球叫“马德堡半球”，而将这个试验叫“马德堡半球实验”。后来各学校物理实验室所用的是铸铁制成直径1.0厘米左右的两半球体，目前教学仪器改进而用硬橡胶制成扁圆形的半球体，省去了用抽气机抽气的装置。实验时只要将两半球紧压，将球体内空气挤出即可，也能说明球内外具有压强差。市场商店出售的塑胶制品的挂衣钩，也是根据上述实验及其原理而制成的。

在解释实验原理时应注意：拉开马德堡半球的力并不是大气压乘以球的“表面积”。作用在马德堡半球的表面上的大气压，其中有一部分作用是互相抵消的，所产生的压紧半球的力，不等于大气压强乘球的表面积，而是等于大气压强乘球的横截面积。

【气压计】

根据托里拆利的实验原理而制成，用以测量大气压强的仪器。气压计的种类有水银气压计及无液气压计。其用途是：可预测天气的变化，气压高时天气晴朗；气压降低时，将有风雨天气出现。可测高度。大约每升高12米，水银柱即降低大约1毫米，因此可测山的高度及飞机在空中飞行时的高度。

【水银气压计】

利用托里拆利管来测定大气压的一种装置。玻璃管底部的水银槽是用一个皮囊所代替，并附有可以调准的象牙针使其指示水银面，叫做“福廷式水银气压计”。在玻璃管外面加上一个金属护套，套管上刻有量废水银柱高度的刻度尺。在水银槽顶上另装一只象牙针，针尖正好位于管外刻度尺的零点，另用皮袋作为水银槽底。使用时，轻转皮袋下的螺旋，使槽内水银面恰好跟象牙针尖接触（即与刻度尺的零点在一水平线上），然后由管上刻度尺读出水银柱的高度。此高度示数即为当时当地大气压的大小。另外还有不需调准象牙针的观测站用气压计，可测低气压山岳用的气压计，以及对船的摇动不易变动的航海用气压计。

【无液气压计】

是气压计的一种。它的主要部分是一种波纹状表面的真空金属盒。为了不使金属盒被大气压所压扁，用弹性钢片向外拉着它。大气压增加，盒盖凹进去一些；大气压减小，弹性钢片就把盒盖拉起来一些。盒盖的变化通过传动机构传给指针，使指针偏转。从指针下面刻度盘上的读数，可知道当时大气压的值。它使用方便，便于携带，但测量结果不够准确。如果在无液气压计的刻度盘上标的不是大气压的值，而是高度，于是就成了航空及登山用的高度计。

【真空】

是指没有任何实物粒子存在的空间，地球以及星球中间的广大太空就是真空。物理学上的真空，是指稀薄的气体状态，又可分为高真空、中真空和低真空。一般是用特制的抽气机得到真空的。它的气体稀薄程度用真空计测定，现在已能用分子抽气机和扩散抽气机得到 $1/10^{11}$ 大气压的高真空。真空在科学技术，电真空仪器，电子管和其它电子仪器方面，都有很大用途。

【低气压】

我们研究气压高低问题是相对而言的，某地区气压的高低是与周围比较而说的，其中气压最低的地方，叫作“低气压中心”。四周压力较高地方的空气都会流到中心来，这正好象四周高山上的水都汇集到盆地中心去一样。此半球的低气压中心附近，风是向中心吹进，为左旋的旋涡，且吹进来的空气即向上升。而形成上升的气流，通常是天气不好。

【高气压】

指比周围的气压高的地点而言，其中气压最高的地点，叫作“高气压中心”。北半球的高气压中心附近，风是以右旋的涡旋而向外吹去，所以该部分的空气较为稀薄。为补充它，空气自上空降落，形成下降气流，所以通常都是好天气。

【抽水机】

抽水机又名“水泵”。是利用大气压的作用，将水从低处提升至高处的水力机械。它由水泵、动力机械与传动装置组成。它广泛应用于农田灌溉、排水以及工矿企业与城镇的给水、排水。为适应不同需要，而有多种类型。

【活塞式抽水机】

又叫“吸取式抽水机”。机体下部的进水管插入水中，抽水机是一个圆筒，筒内装一个可以上下滑动而且跟筒壁紧密配合的活塞，筒底和活塞上各有一个只能向上开的活门 v_1 和 v_2 。使用时，若活塞向上移动，活门 v_2 受到大气压的作用而关闭，因此活塞下面空气稀薄，气压小于外界的大气压。于是，低处的水受到大气压的作用推开活门 v_1 进入筒内。当压下活塞时，筒底活门 v_1 被水的压迫而关闭，水被阻不能向下流动，于是冲开活门 v_2 向上，水进入筒的上部。再提起活塞时，活塞上面的水将活门 v_2 关闭，水即从侧管流出，与此同时，井里的水又在大气压的作用下推开活门 v_1 而进入圆筒中。这样，活塞不停地上下移动，水就从管口连续不断的流出。这种抽水机的结构简单，操作方便，但出水量小，提水的高度只能达到八米左右，效率也较低。

【离心式水泵】

简称“离心泵”。它是一种利用水的离心运动的抽水机械。由泵壳、叶轮、泵轴、泵架等组成。起动前应先往泵里灌满水，起动后旋转的叶轮带动泵里的水高速旋转，水作离心运动，向外甩出并被压入出水管。水被甩出后，叶轮附近的压强减小，在转轴附近就形成一个低压区。这里的压强比大气压低的多，外面的水就在大气压的作用下，冲开底阀从进水管进入泵内。冲进来的水在随叶轮高速旋转中又被甩出，并压入出水管。叶轮在动力机带动下不断高速旋转，水就源源不断地从低处被抽到高处。

【压水机】

压水机采用杠杆来推动。活塞本身并没有活门，但在吸管的顶部，却有一个向上开的活门 v_2 ，第二个活门 v_1 则装在压力管接连唧筒的开口处。提高活塞时，唧筒内便形成空气稀薄的空间，大气压将水从低处压入这个空间。在这个过程中，活门 v_1 关闭， v_2 打开。当活塞向下压时， v_2 关闭，唧筒里面的水经由打开的活门 v_1 ，被压入压力管中，并从这个管中强烈地喷射出去。它与抽水机一样，水被正常气压压入吸水管时，最多只能抽到 10.33 米的高度。但是压水管做成任何长度都可以，因为压力管里的水并非是由于外界气压的作用，而是经由加在活塞上的压力所压出的。因此，压水机常被用在需要把水压高到超过 10 米的各种场合。此外，水在继续运动时，如需克服巨大的压力，例如供应锅炉之给水，也非应用压水机不可，所以压水机必须造得更加坚固。

【抽气机】

为空气抽气机之一种，是用来抽出密闭容器内气体的机器。一般有手摇和电动两种，主要构造与吸取式抽水机相似。其动作原理与抽水机相似，只不过被抽出的物质为空气。

【压缩气体】

凡需要大量气体的场所，处处都会用到压缩气体，因为在压缩情况下，就不需占用庞大的空间。例如，气体焊接金属，是用高热的火焰将两块金属板熔接起来。这种火焰乃由氢气在氧气里或是乙炔气在氧气里燃烧而得来的。灭火器中应用的是压缩碳酸气。在灭火的一瞬间，经过化学作用而产生碳酸气，以使窒息火焰的灭火液及碳酸气在强大的压力下喷射出来。利用压缩空气来推动机器的其它例子甚多，例如，混凝土击碎器以及隧道之钻机，只要能向工作地点继续送进新鲜空气的地方都可以利用。此外，压缩空气的推动力，还可用于气枪和鱼雷的发射器，若干大城市的电信局用来传送邮件（即：管邮）等方面。

【虹吸现象】

由于大气压的作用，液体从液面较高的容器通过曲管越过高处而流入液面较低容器的现象。它发生的条件是曲管（虹吸管）里先要灌满液体，同时高于较高液面的液柱的压强不超过大气压。例如，汽车司机常用虹吸管从油桶中吸出汽油或柴油；河南、山东一带应用虹吸管把黄河里的水引到堤内灌溉农田；在日常生活中，如给鱼缸换水等都是。

【浮力】

漂浮于流体表面或浸没于流体之中的物体，受到各方向流体静压力的向上合力。其大小等于被物体排开流体的重量。例如石块的重量大于其同体积水的重量，则下沉到水底。木料或船体的重量等于其浸入水中部分所排开的水重，所以浮于水面。气球的重量比它同体积空气的重量小，即浮力大于重量，所以会上升。这种浸在水中或空气中，受到水或空气将物体向上托的力叫“浮力”。例如，从井里提一桶水，在未离开水面之前比离开水面之后要轻些，这是因为桶受到水的浮力。不仅是水，例如酒精、煤油或水银等所有的液体，对浸在它里面的物体都有浮力。

产生浮力的原因，可用浸没在液体内的正立方体的物体来分析。该物体全浸之物体，受到四面八方液体的压力，而且是随深度的增加而增大的。所以这个正立方体的前后、左右、上下六个面都受到液体的压力。因为作用在左右两个侧面上的力由于两侧面对应，而且面积大小相等，又处于液体中相同的深度，所以两侧面上受到的压力大小相等，方向相反，两力彼此平衡。同理，作用在前后两个侧面上的压力也彼此平衡。但是上下两个面因为在液体中的深度不相同，所以受到的压强也不相等。上面的压强小，下面受到的压强大，下面受到向上的压力大于上面受到的向下的压力。液体对物体这个压力差，就是液体对物体的浮力。这个力等于被物体所排开的液体的重量。当一个浮体的顶部界面接触不到液体时，则只有作用在底部界面向上的压力才会产生浮力。至于一个位于容器底面上的物体，并和容器底面密切接触，那它就只能受到向下作用于物体表面的液体压力了，所以这个物体不受浮力作用，这种现象并不多，因为只要其间有一层很薄的液膜，就能传递压强，底面就有向上的压力，物体上下表面有了压力差，物体就会受到浮力。

【阿基米德定律】

浸在液体（或气体）里的物体受到向上的浮力。浮力的大小等于物体排开的液体（或气体）的重量。这就是著名的“阿基米德定律”。该定律是公元前 200 年以前阿基米德所发现的，又称阿基米德原理。浮力的大小可用下式计算： $F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液(气)}} g V_{\text{排}}$ 。

【物体浮沉条件】

物体上浮或下沉时都显示出浮力的存在。关于物体浮沉的问题，不仅是浮力问题，实际上是个运动和力关系的问题。因为浸在液体或在气体中的物体要受到两个力的作用：一个是重力；另一个是浮力。重力的方向总是竖直向下的，而浮力的方向总是竖直向上的，物体的浮沉就决定于这两个力的大小。掌握物体浮沉条件的关键就在于正确地分析浸在液体（或气体）里的物体共受到几个力的作用，而且还要明确这些力大小关系和方向关系。

1. 当浮力 $F_{\text{浮}}$ 大于重力 G 时，物体就上浮，直到 $F_{\text{浮}}=G$ 时为止；
2. 当浮力 $F_{\text{浮}}$ 小于重力 G 时，物体就下沉，一直沉到容器底为止；
3. 当浮力 $F_{\text{浮}}$ 等于重力 G 时，物体处于平衡状态，静止不动。如果此时物体已全部浸没在液体里（或气体）物体就可以停留在液体（或气体）内任何深度的地方。

物体的浮沉还可以从物体和液体（或气体）的密度方面来分析：

1. 当 $\rho_{\text{物}} < \rho_{\text{液(气)}}$ 时，物体就上浮；
2. 当 $\rho_{\text{物}} > \rho_{\text{液(气)}}$ 时，物体就下沉；
3. 当 $\rho_{\text{物}} = \rho_{\text{液(气)}}$ 时，物体可以在液体（或气体）内任何位置悬浮。

因此，在分析浸在液体（或气体）中的物体上浮还是下沉时，不要只看物体本身的质量或密度如何，而要根据物体的浮沉条件来具体分析才能确定。

【漂浮】

是指物体有一部分体积在液体里，另一部分体积露出液面。例如，一般树木、冰块等都属于漂浮的物体，这种物体也叫作“浮体”。浮体可以静止在液面上，也可以在液面上水平运动，例如轮船，船从河里驶入大海，船是沉下些还是浮上些？有人认为海水的密度比河水的密度大，所以船在海水中受到的浮力将比河水中受到的浮力大。此种观点是错误的。根据阿基米德定律，浮力的大小，不仅决定于液体的密度，而且还决定于物体所排开的液体的体积。因此，只有在排开相同体积的液体时，液体的密度越大，对物体产生的浮力才越大。船所排开的液体的体积是变化的，所以液体的密度大，对物体所产生的浮力不一定大。船无论是在河里，还是在海里，都是浮在液面上。根据浮体的平衡条件，河水或海水对船的浮力都应等于船的重量，又因船的重量不变，所以，河水对船的浮力等于海水对船的浮力，即： $\rho_{\text{河}} g V_{\text{排河}} = \rho_{\text{海}} g V_{\text{排海}}$ 。因为 g 是一个常量，而 $\rho_{\text{海}} > \rho_{\text{河}}$ ，所以 $V_{\text{排海}} < V_{\text{排河}}$ ，船排开海水的体积变小，船应浮起一些。可见，同一浮体不论放在什么液体中，其所受浮力都等于它自身重量，即 $F_{\text{浮}} = G_{\text{物}}$ 。

根据 $F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g V_{\text{排}}$ 和 $G_{\text{物}} = \rho_{\text{物}} g V_{\text{物}}$ ，结果漂浮条件 $F_{\text{浮}} = G_{\text{物}}$ ，可推出 $V_{\text{排}}/V_{\text{物}} = \rho_{\text{物}}/\rho_{\text{液}}$ 。此式表明，只有 $\rho_{\text{物}} < \rho_{\text{液}}$ 时， $V_{\text{排}}$ 才小于 $V_{\text{物}}$ ，物体才能漂浮在液面上。由 $F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g V_{\text{排}}$ 及漂浮条件 $F_{\text{浮}} = G_{\text{物}}$ ，可以得到 $V_{\text{排}} = G_{\text{物}}/\rho_{\text{液}} g$ 。此式表明，浮体没入液体里的体积与浮体重量成正比，与液体密度成反比。故同一物体 ($G_{\text{物}}$ 不变) 在密度不同的液体里漂浮，排开液体的体积不同，没入深度也不同。这就是比重计的原理，也是轮船在淡水里和海水里航行时吃水深度 (没入的深度) 不同的原因。

【悬浮】

悬浮是指物体在液体中既不沉底，又不露出液面，即悬浮物体的体积全部在液体里。悬浮或静止的漂浮是一种平衡状态。悬浮条件与漂浮条件，形式上虽然相同，即 $F_{\text{浮}}=G_{\text{物}}$ ，但内容含意不同。悬浮的物体完全没入液体里，这时物体所受的浮力是最大的浮力。漂浮情况，由于 $V_{\text{排}} < V_{\text{物}}$ ，物体所受浮力，肯定不是最大的浮力。

悬浮的物体，可在液体中的任何位置停留，例如鱼及潜水艇就可悬浮于水中。又如，浮沉子的重量等于浮力时，即可悬浮于水中，悬浮在液体中的物体或漂浮在液面上的物体，它们受到的浮力一定等于物体的重力。这就是它们的平衡条件，即 $F_{\text{浮}}=G$ 或 $\rho_{\text{液}} g V_{\text{排液}} = \rho_{\text{物}} g V_{\text{物}}$ 。

【排开】

基米德定律“浸在液体里的物体受到向上的浮力，浮力的大小等于物体排开的液体的重量”这段话中的“排开”。从实验知道弹簧秤下端所挂之重物，放入一个已经将水装到溢水管口的水槽中，水立即被排挤出来，流出来水的体积与物体的体积相等。即水的位置被物体所取代，而将水排挤出去。这里所提到的排开，就是被物体所取代的部分，所以 $V_{\text{排液}}=V_{\text{物}}$ 。如果是部分浸入，则 $V_{\text{排液}}$ 等于浸在液体中那部分物体的体积。

【上浮】

是一种竖直向上的运动，如物体在液体里向上浮起来。上浮的物体是因为本身的重量小于所排开液体的重量，在液体里受到了不平衡力的作用，而使物体改变了原来的运动状态。

【下沉】

是一种竖直向下的运动，如物体在液体里向下沉降。凡是在液体里下沉的物体，其本身的密度必然大于液体的密度，即 $\rho_{物} > \rho_{液}$ 。当浮力 $F_{浮}$ 小于重力 G 时，物体就下沉，一直沉到容器底为止。

【浮力公式】

运用阿基米德定律在解决一些实际问题时，应深入理解所运用的浮力公式 $F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g V_{\text{排液}}$ 和求重量公式 $G = mg$ 。两式从字母看很相似，又有一定的联系，但两个式子是有区别的，应当注意几点：

1. 求浮力实际上就是求物体所排开液体的重量。此处 $\rho_{\text{液}}$ 表示液体密度，决不是浸在液体中物体的密度； $V_{\text{排}}$ 表示物体所排开的液体（或气体）的体积，它不一定等于物体的体积 V 。因为物体有漂浮、悬浮和浸没几种情况，只有当物体全部浸没在液体（或气体）中时，物体所排开的液体（或气体）的体积才等于物体本身的体积，即 $V_{\text{排}} = V_{\text{物}}$ 。假如物体是漂浮的，那么 $V_{\text{排}}$ 就小于物体的体积 V ， $V_{\text{排}} < V_{\text{物}}$ ，这时 $V_{\text{排}} + V_{\text{露}} = V_{\text{物}}$ 。所以，在写浮力公式时应在 F 、 ρ 、 V 等字母的右下角一定用汉字注明，例如，区别开 $\rho_{\text{液}}$ 与 $\rho_{\text{物}}$ ； $V_{\text{物}}$ 、 $V_{\text{露}}$ 与 $V_{\text{排}}$ ； $G_{\text{物}}$ 、 $G_{\text{液}}$ 与 $G_{\text{排}}$ 的意义。

2. 从公式 $F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g V_{\text{排}}$ 可以看出浮力的大小只跟液体的密度，物体排开这种液体的体积这两个因素有关。跟这个物体的密度、体积、形状、重量，以及这个物体在液体中是否运动等因素无关。若这个物体完全没入液体中时，它所受浮力的大小不受深度变化的影响。

3. 在应用 $F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g V_{\text{排液}}$ 公式时，各物理量一般采用国际单位。密度的单位是千克/米³， $g = 9.8$ 牛顿/千克，体积 V 的单位是“米³”。浮力的单位是“牛顿”。

4. 计算浮力的大小时，无论物体的外形是有规则的，还是不规则的；无论物体是实心的还是空心的；也无论物体在液体中的状态怎样，它所受浮力的大小都可以通过计算排开液体的重量得到。

5. 阿基米德定律及其计算式，也适用于气体。因为在大气里的物体，它所排开大气的体积就等于它本身的体积，即 $V_{\text{排}} = V_{\text{物}}$ 。因为大气的密度是不均匀的，随着高度的增加，则空气逐渐稀薄，密度减小，在计算时应考虑 $\rho_{\text{气}}$ 的变化。

【浮力测定】

根据已掌握的如质量、密度、重量、体积、压力、压强、拉力等，可归纳出计算浮力的四种方式：

1. 实验法之一。根据力的平衡原则，从物体在空气中的重量减去物体在液体中的重量，即得出浮力 $F_{\text{浮}} = G_{\text{物}} - G_{\text{视}}$ 。

2. 实验法之二。根据阿基米德定律 $F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g V_{\text{排液}}$ 计算。

3. 对于漂浮在液面或悬浮在液体中的物体，浮力等于物体的重量，即 $F_{\text{浮}} = G_{\text{物}}$ 。

4. 根据浮力产生的原因，液体对物体向上和向下的压力差就是液体对物体的浮力，即 $F_{\text{浮}} = F_{\text{上}} - F_{\text{下}}$ 。浮体受到的浮力等于物体的下表面受到液体向上的压力，即 $F_{\text{浮}} = P \cdot S = \rho_{\text{液}} g h S$ (h 为物体下表面在液面下的深度)。

【排水量】

船的大小是用排水量来表示的。是指船装满货物后排开水的重量，也就是船满载后受到水的浮力。根据物体漂浮的条件，即可得出下列公式：

排水量（浮力）=船自身的重量+满载时货物的重量。

【吃水线】

表示轮船没入水中的深度，在船旁用油漆画上很多水平横线，用以表示不同载重时的吃水深度。最高吃水线表示最大的安全载重量。

【浮沉子】

用以演示液体浮力、气体具有可压缩性以及液体对压强的传递的仪器。它是法国科学家笛卡儿（1596～1650）所创造。它是玻璃制的小瓶体，其下端开有小孔，水可通过小孔进出瓶体。把它放入高贮水筒中，并使之浮在水面上。用薄橡皮膜把筒口蒙住并扎紧，用手按橡皮膜，筒内的水和空气是在密闭的容器内。根据帕斯卡定律，当空气被压缩时，将压强传递给水，水被压入瓶体中，将瓶体中的空气压缩，这时浮沉子里进入一些水，它的重量增加，大于它受到的浮力，就向下沉。手离开橡皮膜，筒内水面上的空气体积增大，压强减小，浮沉子里面被压缩的空气把水压出来，此时浮沉子的重量小于它所受的浮力，因此它就向上浮。当手对橡皮膜施加的压力适当时，浮沉子便悬浮在水中的任意深度上。浮沉子的浮沉是在外加压强作用下，靠改变它的重量来实现的（体积不变）。潜水艇与浮沉子升降道理相同。

【潜水艇】

潜水艇在水中可以自由浮沉，因此它是军事上的一种重要舰艇。它可以潜入水下航行，进行作战或侦察，是根据阿基米德原理制造的。当它潜水和上浮时是靠改变它自身的重量来实现的。潜水艇的侧面有水舱，当它下潜时，使水舱充水，于是艇身重量增大，潜艇就逐渐下沉。当水舱中充入适量的水时，潜艇就能在水中任何位置上停留，此时潜艇的重量等于浮力。当潜艇需要上浮时，可用压缩空气将水排出，当艇身的重量减小到小于浮力时即浮出水面。

【浮船坞】

是一种可以移动并能浮沉的凹字形船舱。它不仅可用于修、造船舶，还可用于打捞沉船，运送深水船舶通过浅水的航道等。我国于 1974 年建成了第一艘 25000 吨的“黄山号”浮船坞。此船坞全长 190 米，高 15.8 米，38.5 米宽，沉入水下最大深度是 13.2 米，具有 13000 吨的举力。它能抬起 25000 ~ 30000 吨载重量的海轮进行坞修。浮船坞的自动化和电气化程度较高，船坞的浮沉是由中央指挥台操纵，坞上设有电站（发电量可供十万人口的城镇照明用），以及机工、电工、木工等车间。

【比重计】

比重计是根据阿基米德定律和物体浮在液面上平衡的条件制成的，是测定液体密度的一种仪器。它用一根密闭的玻璃管，一端粗细均匀，内壁贴有刻度纸，另一头稍膨大呈泡状，泡里装有小铅粒或水银，使玻璃管能在被检测的液体中竖直的浸入到足够的深度，并能稳定地浮在液体中，也就是当它受到任何摇动时又能自动地恢复成垂直的静止位置。当比重计浮在液体中时，其本身的重量跟它排开的液体的重量相等。于是在不同的液体中浸入不同的深度，所受到的压力不同，比重计就是利用这一关系刻度的。

液体比重计的长管子上，常标有下列数字标度 0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3。当液体比重计在液体中沉至 0.9 的标度时，便能立刻知道所量度的液体密度为 0.9。使用这种仪器，物体只会沉到被其所排除之液体的重量恰好等于它自身重量的那种深度为止。因此，液体比重计在比重较轻的液体里，比在较重的液体里要下沉得更深。例如，它在酒精里，就会比在掺水的酒精里下沉得更深；在纯牛奶里比在掺水的牛奶里较浅。将比重计依次插入比重渐减的各种液体里，如硫酸（1.8），水（1.0），醚（0.717）等，则其下沉的深度逐渐加深。因此较大的比重必位于标度的下部，较小的比重则位于其上部。标度本身当然先要经过校准，并且还要依照各种液体的比重来标准，或者直接依照所测定液体的特殊性质，如酒类的酒精成分，牛奶里的脂肪成分。硫酸里的纯酸成分等等来校准。

常用的比重计有两种。一种用来测量密度大于 1 的液体的密度，称“重表”。它的下端装的铅丸或水银多一些。这种比重计的最小刻度线是“1”，它在标度线的最高处，由上而下，顺次是 1.1、1.2、1.3。把这种比重计放在水里，它的大于 1 的标度线，全部在水面下，另一种用来测量密度小于 1 的液体的密度，称“轻表”。它的下部装的铅丸或水银少一些，这种比重计的最大标度线是“1”，这个标度线是在最低处，由下而上顺次是 0.9、0.8、0.7。把这种比重计放在水里时，它小于 1 的标度线全部在水面上。使用时，应注意根据液体的密度大于 1 还是小于 1 来选用比重计。目前中学课本不再讲比重单位而是讲密度单位，但在测密度时仍使用比重计，所测数值无大差异，应予以说明其原因。

【气体的浮力】

气体的浮力与液体同理，物体在空气中时，亦失去与物体相同体积的空气重量。故物体在空气中的重量，并非其真正的重量，因其所差甚小可忽略不计。不仅空气如此，凡物体在任何气体中，均受到气体的浮力。

【气球】

若物体自身的重量小于同体积空气的重量，则在空气里就可以浮起来。气球的原理就是利用空气的浮力，将氢或氦装在大气囊内而成。在气囊的下面系一个篮子，人可坐在篮中随之而上升。气球的军事上极为重要，可用以侦察敌情或防御敌机。在气象观测上也可以将各种自记仪器系在球下，使之随球上升，可测高空的压力，密度和温度等方面的情况。

【飞艇】

亦称“飞船”。飞艇是气球中的一种，贮氢气或煤气于长椭圆形或梭形的气囊中。因这些气体较空气轻，故能借空气之浮力以上升。囊下有艇，内装发动机，舵及推进器，用发动机旋转推进器，则艇前进。用舵改变方向。欲下降可将囊中气放出一些。惟气囊每遇落雷。太阳辐射热及发动机的热，容易爆破而损坏，故需装特异的避雷针，涂善于反射光的物质。艇内有铝支架者称为“硬式飞艇”，不用架者称“软式飞艇”。无论是气球还是飞艇，都是利用它们本身的重量加上所载的物体和人的重量小于气囊所排开空气的重量，也就是小于它们受到空气的浮力，才能上升。由于高空的空气稀薄，空气的密度小，因此气球在上升的过程中，越升高则受到的浮力也在减小。当升到一定的高度时，即浮力等于气球的重量时，气球就不再上升了。当需要下降时，只要将囊中的气体放出一些，使气囊的体积减小，其所受的浮力减小，即可下降。

【简单机械】

凡能够改变力的大小和方向的装置，统称“机械”。利用机械既可减轻体力劳动，又能提高工作效率。机械的种类繁多，而且比较复杂。根据伽利略的提示，人们曾尝试将一切机械都分解为几种简单机械，实际上这是很困难的，通常是把以下几种机械作为基础来研究。例如，杠杆、滑轮、轮轴、齿轮、斜面、螺旋、劈等。前四种简单机械是杠杆的变形，所以称为“杠杆类简单机械”。后三种是斜面的变形，故称为“斜面类简单机械”。不论使用那一类简单机械都必须遵循机械的一般规律——功的原理。

【杠杆】

用刚性材料制成的形状是直的或弯曲的杆，在外力作用下能绕固定点或一定的轴线转动的一种简单机械。其上有支点（用 O 表示），动力（ F ）作用点，阻力（ W ）作用点，杠杆的固定转轴就是通常所说的“支点”，从转轴到动力作用线的垂直距离叫“动力臂”，从转轴到阻力作用线的垂直距离叫“阻力臂”。上述就是通常所讲的三点两臂。由于杠杆上三点的位置不同。即产生不同的受力效果。

【杠杆原理】

亦称“杠杆平衡条件”。要使杠杆平衡，作用在杠杆上的两个力（动力和阻力）的大小跟它们的力臂成反比。动力×动力臂=阻力×阻力臂，用代数式表示为

$$F \cdot L_1 = W \cdot L_2$$

式中，F表示动力， L_1 表示动力臂，W表示阻力， L_2 表示阻力臂。从上式可看出，欲使杠杆达到平衡，动力臂是阻力臂的几倍，动力就是阻力的几分之一。在使用杠杆时，为了省力，就应该用动力臂比阻力臂长的杠杆；如欲省距离，就应该用动力臂比阻力臂短的杠杆。因此使用杠杆可以省力，也可以省距离。但是，要想省力，就必须多移动距离；要想少移动距离，就必须多费些力。要想又省力而又少移动距离，是不可能实现的。

【动力】

任何机械，不论是简单的还是复杂的，在工作时，总要受到两种力的作用：一种是推动机械的力叫作“动力”，另一种是阻碍机械运动的力叫作“阻力”。动力可以是人力，也可以是畜力、风力、电力、水力、蒸汽压力等，阻力除了我们要克服的有用阻力之外，还有一些是不可避免的无用阻力。

【作用线】

通过力的作用点沿力的方向所引的直线，叫作“力的作用线”。

【动力臂】

从支点到力的作用线的垂直距离叫“力臂”。从支点到动力的作用线的垂直距离 L_1 叫作“动力臂”；从支点到阻力的作用线的垂直距离 L_2 叫作“阻力臂”。如果把从动力点到支点的棒长距离作为动力臂，或把从阻力点到支点的棒长距离作为阻力臂，这种认识是错误的。这是因为对动力臂和阻力臂的概念认识不清所致。

【阻力臂】
见动力臂条。

【转动轴】

转动是常见的一种运动。当物体转动时，它的各点都做圆周运动，这些圆周的中心在同一直线上，这条直线叫做“转动轴”。门、窗、砂轮、电动机的转子等都有固定转轴。只能发生转动，而不能平动。几个力作用在物体上，它们对物体的转动作用决定于它们的力矩的代数和。若力矩的代数和等于零，物体将用原来的角速度做匀速转动或保持静止。

【三类杠杆】

对杠杆的分类一般是两种方法。第一种是以支点、阻力点和动力点所处的位置来分的；另一种是按省力或费力来区分的。无论怎样来划分，总离不开省力、费力、不省力也不费力这几种情况。分别简述如下：

第一种分类法

第一类杠杆 是动力 F 和有用阻力 W 分别在支点的两边。这类杠杆的机械利益 $= \frac{W}{F} = \frac{L_1}{L_2} > 1$ 。所以，即可以省力，也可以费力，还可以不省力也不

费力。例如，剪金属片用的剪刀，刀口很短，它的机械利益远大于 1。这是因为金属板很硬，刀口短，刀把长，即动力臂大于阻力臂，可以少用力。属于这种情况的杠杆还有克丝钳等。家庭裁衣剪布用的剪刀，把与刃基本是等长的，即动力臂等于阻力臂，属于不省力也不费力的类型。因为布的厚度较薄，不需太大的力，剪布要直故刀口要长些，为此用力不大，布剪的也直。属于这种类型的还有物理天平。又如理发用的剪刀，刀口很长，即动力臂小于阻力臂，它的机械利益小于 1。这是因为剪发本来不需要多大的力，刀口长一些，能够剪得快一些和齐一些。

第二类杠杆：是支点和动力点分别在有用阻力点的两边。这类杠杆的动力臂大于阻力臂，其机械利益总是大于 1，所以总是省力的。例如，用铡刀铡草、独轮车等都是这类杠杆。

第三类杠杆：是支点和有用阻力点分别在动力点的两边。这类杠杆的动力臂小于阻力臂，其机械利益总是小于 1，所以总是费力的、例如，缝纫机的脚踏板、夹食品的竹夹子都属于这类杠杆。

第二种分类法

第一类杠杆：是省力的杠杆，即动力臂大于阻力臂。例如，羊角锤、木工钳、独轮车、汽水扳子、铡刀等等。

第二类杠杆：是费力的杠杆，即动力臂小于阻力臂。如镊子、钓鱼杆、理发用的剪刀。

第三类杠杆：不省力也不费力的杠杆，即动力臂等于阻力臂。其机械利益等于 1。如天平、定滑轮等。

【机械利益】

表示机械省力程度的物理量。机械虽然绝对不能省功，但可以省力。使机械做功的力称为“动力”（F），阻碍机械做功的力称为“阻力”（P）。使用机械的目的，在于使用很小的动力而与阻力平衡。所谓机械利益（A），就是机械的有用阻力（P）跟动力（F）的

比值。机械利益 = $\frac{\text{阻力}}{\text{动力}}$ ，即 $A = \frac{P}{F}$ ，机械利益可以大于1，等于1或小于1。

机械利益 > 1 时，省力费时，凡省力的机械，其机械利益必大于 1。例如，独轮车、钳子、起子、省力的杠杆等都是省力的机械。机械利益=1 时，不省力，也不费力。例如物理天平。机械利益 < 1 时，费力省时，例如竹夹、火钳等。机械利益是由实际测得的有用阻力和动力的大小所决定。由于机械润滑情况的不同，在克服同样的有用阻力时，亦有所不同。机械润滑得不好，无用阻力大，需要动力也大，机械利益就小些；机械润滑得好，无用阻力小，需要的动力也小，机械利益就大些。新生产出的机器需要磨合，汽车出厂要用上一段时间，目的是使其摩擦阻力减小。但机器陈旧，机件磨损，又会增加阻力。

【杠杆的应用】

不同类型杠杆各具有不同的特点和用途。掌握了杠杆原理，就可根据需要意识地选用不同类型的杠杆来使用。应明确：省力杠杆省力但要多移动距离，费力杠杆费力但省距离，等臂杠杆不省力也不省距离，又省力又省距离的杠杆是没有的。有的杠杆是否省力或省距离，不是永恒不变的。根据使用情况的不同，会由省力变为省距离。例如，用铁锹铲土，往车上装土的过程都会有所改变。铲土时支点在动力点及阻力点之间，在装土时动力在支点与阻力点之间。为此，在使用杠杆时应注意几点：

1. 解答杠杆问题时，必须根据题意画出示意图，在图上标出杠杆的支点、动力作用线和阻力作用线。同时用线段标明动力臂和阻力臂的大小，再根据杠杆平衡条件，列出方程，进行计算。

2. 力臂是一个重要的概念。力臂是从支点到力的作用线的垂直距离，不要理解为力臂是从支点到力的作用点的长度。动力和阻力都是指作用在同一杠杆上的力，而不是作用在重物或其他物体上的力。

3. 画杠杆示意图的方法：

(1) 画出杠杆：用粗直线表示直杠杆，用变曲的粗线表示曲杠杆。

(2) 在杠杆转动时找出支点，并在支点旁用箭头表示杠杆转动的方向。

(3) 根据转动方向判断动力、阻力的方向。动力、阻力的作用点应画在杠杆上，可用力的示意图表示。

(4) 用虚线表示力的作用线的延长线和力臂。

4. 杠杆的平衡条件，适用于任意一个平衡位置上，所谓杠杆的平衡是指杠杆静止不转动或匀速转动。

【杆秤】

它是测量物体质量的量度工具，是以提扭为转动轴，根据杠杆平衡原理制造的。杆秤主要由秤杆、秤砣、秤钩（或秤盘）等构成。如图 1-23 所示。G 表示杆秤的重量，B 点是它的重心，未挂重物时若将秤砣 P 放于 A 点，使之以提扭 O 为支点的杆秤平衡，则：

图 1—23

$G \times \overline{OB} = P \times \overline{OA}$ ，A 点即为杆秤的“定盘星”。在秤钩上加物 W 后，将秤砣从 A 点移至 A' 点，杆秤再度平衡。根据杠杆的平衡原理建立方程： $W \times \overline{OC} + G \times \overline{OB} = P \times (\overline{OA} + \overline{AA'})$ 解方程，可得线段 AA' 之长，由此可决定秤杆上与重量 G 相对应的刻度 A' 的位置，杆秤是我国劳动人民所发明并使用已久的测量工具，旧秤以斤，两为单位计量，目前以千克计量。

【力矩】

又叫“转矩”，是表示力对物体作用时，使物体发生转动或改变转动状态的物理量。力矩是矢量。力矩的大小等于力与从转轴到力的作用线的垂直距离之乘积。如果物体所受的力不在垂直于转轴 O 的平面内，就必须把力分解成两个分力：一个分力与转轴平行；另一个分力是在转动的平面内。只有转动平面内的分力才可能改变物体的转动状态。因此，在力矩等于力跟力臂乘积的计算中，应理解力是在它的作用点的转动平面内的分力。如这一点在力的作用线上，则力矩为零。如果若干个力同时作用在一个物体上，则合力矩是所有分力矩的代数和。一个处于平衡的物体，顺时针方向力矩的和等于逆时针方向力矩的和，在国际单位制中，力矩的单位是米·牛顿。其方向用右手螺旋法则决定。在中学阶段，因为只研究有固定转轴的物体的平衡，力矩就只有两种转向。规定物体逆时针转动的力矩为正，使物体顺时针转动的力矩为负。力矩愈大，使物体转动状态发生改变的效果就愈明显。用大小相同的力推门时，力的作用点离转轴愈远，且方向垂直于门，力臂愈大，则推门愈省力。

【力偶】

大小相等、方向相反,但作用线不在同一直线上的两个力叫作“力偶”。用双手攻螺纹或用手旋钥匙、水龙头时,所施加的作用常是力偶。它能使物体发生转动,或改变其转动状态。汽车驾驶员双手转动转向盘时所施加的一对力就是一个力偶。力偶的转动效果决定于力偶矩的大小。力偶矩等于其中任何一个力的大小和两力作用线之间的垂直距离(力偶臂)的乘积。如图 1-24 所示。如果作用力 F 的方向跟 AB 垂直, AB 的长度等于 d ,那么这个力偶的力偶矩 (M) 为:

$$M = \pm Fd。$$

图 1—24

式中 Fd 为力偶矩的大小,符号用来表示力偶的转向。规定力偶逆时针转向取“+”,反之取“-”(也可规定,力偶顺时针转向取“+”,那么力偶逆时针转向就取“-”)。应注意:力偶中力的方向不跟 AB 垂直时,应象力矩那样分解成垂直分量,再进行计算。力偶的转矩(即力偶矩)和所绕着转动的点无关。由于力偶的合力为零,它不能使物体产生位移,只能使物体发生转动或改变物体的转动状态。

【力偶矩】

简称为“力偶的力矩”，亦称“力偶的转矩”。力偶是两个相等的平行力它们的合力矩等于平行力中的一个力与平行力之间距离（称力偶臂）的乘积，称作“力偶矩”，力偶矩与转动轴的位置无关。力偶矩是矢量，其方向和组成力偶的两个力的方向间的关系，遵从右手螺旋法则。对于有固定轴的物体，在力偶的作用下，物体将绕固定轴转动；没有固定轴的物体，在力偶的作用下物体将绕通过质心的轴转动。

【力偶臂】

力偶之两个力之间的垂直距离。见力偶条图 1-24 所示。

【轮轴】

是固定在同一根轴上的两个半径不同的轮子构成的杠杆类简单机械。半径较大者是轮，半径较小的是轴。从形式上看是圆盘，但从实质上看起来只有它们的直径或半径起力学作用。用 R 表示轮半径，也就是动力臂； r 表示轴半径，也就是阻力臂； O 表示支点。当轮轴在作匀速转动时，动力 \times 轮半径 = 阻力 \times 轴半径，所以轮和轴的半径相差越大则越省力。上式动力用 F 表示，阻力用 W 表示，则可写成 $FR = Wr$ 。它的机械利益

为 $A = \frac{W}{F} = \frac{R}{r}$ 。由于 R 总是大于 r ，因此 F 总是小于 W ，即利用轮轴可以省力。

若将重物挂在轮上则变成费力的轮轴，但它可省距离。轮轴的原理也可用机械功的原理来分析。轮轴每转一周，动力功等于 $F \times 2R$ ，阻力功等于 $W \times 2r$ 。在不计无用阻力时，机械的动力功等于阻力功。即 $F \cdot 2R = W \cdot 2r$ ，其结果仍是 $\frac{W}{F} = \frac{R}{r}$ 。日常生活中常见的辘轳、绞盘、石磨、汽车的驾驶盘、手摇卷扬机等都是轮轴类机械。

【滑轮】

滑轮是属于杠杆变形的一种简单机械，是可以绕中心轴转动的，周围有槽的轮子。使用时，根据需要选择。滑轮可分为定滑轮、动滑轮、滑轮组、差动滑轮等。有的省力，有的可以改变作用力的方向，但是都不能省功。

【定滑轮】

滑轮的轴固定不动，它实质上是一个等臂杠杆。动力臂和阻力臂都是滑轮的半径 r ，根据杠杆原理 $Fr_1=Wr_2$ 。它的机械利益为 $A=$

$\frac{W}{F} = 1$ 。表示使用这种机械既不省力，也不费力。定滑轮的作用是改变了动力的方向，如要把物体提到高处，本应用向上的力，如利用定滑轮，就可以改用向下的力，因而便于工作。

【动滑轮】 滑轮的轴和重物一起移动的滑轮。它实质上是一个动力臂二倍于阻力臂的杠杆。根据杠杆平衡的原理 $Wr = F \cdot 2r$ ，它的机械利益为 $A = \frac{W}{F} = \frac{2r}{r} = 2$ ，表示使用这种机械时，可以省去一半力。但不能改变用力的方向。其方向是与物体移动的方向一致。

【滑轮组】

动滑轮和定滑轮组合在一起叫“滑轮组”。图为动滑轮能够省力，定滑轮能改变力的方向，若将几个动滑轮和定滑轮搭配合并而成滑轮组，既可以改变力的大小，又能改变力的方向。普通的滑轮组是由数目相等的定滑轮和动滑轮组成的。而这些滑轮或者是上下相间地坐落在同一个轮架（或叫“轮辘”），或者是左右相邻地装在同一根轴心上。绳子的一端固定在上轮架上，即相当于系在一个固定的吊挂设备上，然后依次将绳子绕过每一个下面的动滑轮和上面的定滑轮。在绳子不受拘束的一端以 F 力拉之，被拉重物挂在活动的轮架上。对所有各段绳子可视为是互相平行的，当拉力与重物平衡时，则重物 W 必平均由每段绳子所承担。若

有 n 个定滑轮和 n 个动滑轮时，则平衡条件即为 $F = \frac{W}{2n}$ 。若欲提升重物 W ，

而提升之运动并无摩擦阻力且为匀速运动时，则 L 所需之 F 力的大小仍和上面一样。因此，在提升重物时才能省力。其传动比乃为 $F : W = 1 : 2n$ 。注意，在使用滑轮组时，不能省功，只能省力，但省力是以多耗距离（即行程）为前题的。

前边所分析的定滑轮、动滑轮以及滑轮组，都是在不计滑轮重量，滑轮与轴之间的摩擦阻力的情况下得出的结论。但在使用时，实际存在轮重和摩擦阻力，所以实际用的力要大些。

图 1—25

【差动滑轮】

即链式升降机，是一种用于起重的滑轮组。上面是由两个直径不同装
在同一个轴上的圆盘 A、B 组成的定滑轮。下面是一个动滑轮，用铁索与上
面的定滑轮联结起来而成滑轮组。若大轮 A 的半径是 R ，小轮 B 的半径是 r ，
如图 1-25 所示。当动力 F 拉链条使大轮转一周，动力 F 拉链条向下移动了
 $2R$ ，大轮卷起链条 $2R$ ，此时小轮也转动一周，

并放下链条长 $2r$ 于是动滑轮和重物 W 上升的高度为 $\frac{1}{2}(2R - 2r)$ 。

在不考虑无用阻力时，根据功的原理得 $\frac{W}{F} = \frac{2R}{R-r}$ 。由于 $2R$ 大于 $(R-r)$ ，
差动滑轮的机械利益大于 1，若提高机械利益，可加大两轮的半径同时缩
小两轮间的半径差。这种机械，亦称“葫芦”，有手动，也有用电来驱动
的。链条是闭合的为防止滑轮和链条间的滑动，滑轮上有齿牙与链条配合
运动。

【斜面】

简单机械的一种，可用于克服垂直提升重物之困难。距离比和力比都取决于倾角。如摩擦力很小，则可达到很高的效率。用 F 表示力， L 表示斜面长， h 表示斜面高，物重为 G 。不计无用阻力时，根据功的原理，得

$$FL=Gh$$

倾角越小，斜面越长则越省力，但费距离。

【螺旋】

属于斜面一类的简单机械。例如螺旋千斤顶可将重物顶起，它是省力的机械。千斤顶是由一个阳螺旋杆在阴螺旋管里转动上升而将重物顶起。根据功的原理，在动力 F 作用下将螺杆旋转一周， F 对螺旋做的功为 $F \cdot 2L$ 。螺旋旋转一周，重物被举高一个螺距（即两螺纹间竖直距

离），螺旋对重物做的功是 Gh 。依据功的原理得 $F = \frac{h}{2L}G$ 。因为螺距 h 总

比 $2L$ 小得多，若在螺旋把手上施加一个很小的力，就能将重物举起。螺旋因摩擦力的缘故，效率很低。即使如此，其力比 G/F 仍很高，距离比由 $2L/h$ 确定。螺旋的用途一般可分紧固、传力及传动三类。

【齿轮和齿轮组】

两个相互咬合的齿轮，在它们处于平衡状态时，由力矩平衡方程可得

$$F \cdot r_1 = W \cdot r_2$$

式中 F 表示作用力， W 表示物重， r_1 和 r_2 分别表示大、小齿轮的半径。它们的机械利益为

$$\frac{W}{F} = \frac{r_1}{r_2}$$

由两个以上齿轮所组成的齿轮组和齿轮类似，其机械利益 $= \frac{W}{F} = \frac{R_1 R_2 R_3 \dots}{r_1 r_2 r_3 \dots}$

(R 为大齿轮半径)。

【劈】

亦称“尖劈”，俗称“楔子”。它是简单机械之一，其截面是一个三角形（等腰三角形或直角三角形）。三角形的底称作劈背，其他两边叫劈刃。施力 F 于劈背，则作用于被劈物体上的力由劈刃分解为两部分，如图 1-26 所示。 P 是加在劈上的阻力，如果忽略劈和物体之间的摩擦力，利用力的分解法，知 P 与劈的斜面垂直， P 的作用可分成两个分力：一个是与劈的运动方向垂直，它的大小等于 $P \cdot \cos \alpha$ ，对运动并无影响；另一个是与劈的运动方向相反的，它的大小等于 $P \cdot \sin \alpha$ ，对运动起阻碍作用。所以，当 $F = 2P \cdot \sin \alpha$ 时劈才能前进，因而 P 与 F 大小之比等于劈面的长度和劈背的厚度之比，因此劈背愈薄，劈面愈长，就愈省力。劈的用途很多，可用来做切削工具，如刀、斧、刨、凿、铲等；可用它紧固物体，如鞋楦榫头，斧柄等加楔子使之涨紧；还可用来起重，如修房时换柱起梁等。

图 1—26

【功】

是描述物体状态改变过程的物理量，能量变化的量度。功的概念来源于日常生活中的“工作”一词。在物理学中，它有特殊的涵意。当物体在恒力 F 的作用下，力的作用点的位移是 S 时，这个功就等于力跟距离的乘积。对初中学生来说，只要明确“在力的作用下，物体沿力的方向通过了一段距离，那么这个力就对物体做了功”这是指物体在恒力作用下，沿力的方向作单向直线运动的情况，所以对功的计算可用公式 $W=FS$ 。当物体在恒力作用下，作非单向直线运动，如竖直上抛运动、平抛运动、斜抛运动等等，物体受力方向和运动方向不一定是一致时。对功的理解应加深为“力对物体所做的功，等于力的大小、力的作用点的位移大小，力和位移间夹角的余弦三者之乘积”即 $W=FS\cos\alpha$ 。式中 W 表示外力 F 对物体所做的功， S 表示物体移动的路程， α 表示 F 与 S 之间的夹角。根据公式研究力对物体做功的一些情况：

1. 当 $\alpha=0^\circ$ 时， $W=FS$ ，力对物体做正功；
2. 当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时， $\cos\alpha > 0$ ，则力 F 的有效分力 $F\cos\alpha$ 和物体的运动方向一致，力 F 对物体做正功；
3. 当 $\alpha=90^\circ$ 时， $\cos\alpha=0$ ，则 $W=0$ ，此时力 F 对物体不做功；
4. 当 $180^\circ > \alpha > 90^\circ$ 时， $-1 < \cos\alpha < 0$ ，则 $W < 0$ ，即 W 为负值。在这种情况下 F 对物体做负功，也可说成物体克服阻力 F 做功；
5. 当 $\alpha=180^\circ$ 时，则 $W=-FS$ ，这时力 F 对物体做负功，或者说成物体克服阻力 F 做功。

必须注意：在研究有关“功”的问题时，应分清有没有做功，谁在做功。功是一个只有大小而没有方向的物理量，它是标量而不是矢量。至于正功和负功，不过是区别外力对物体做功还是物体克服阻力做功，或用来表示力与路程同向还是反向，并不是功有方向性。

功是力对空间的累积效应。力对物体做功，使物体发生位置或运动状态的改变，因而也就发生了机械能的改变。功即是反映在这一过程中，物体机械能改变多少的物理量。在力学中功的狭义概念仅指机械能转换的量度；而在物理学中功的广义概念指除热传递外的一切能量转换的量度。所以功也可定义为能量转换的量度。一个系统总能量的变化，常以系统对外做功的多少来量度。能量可以是机械能、电能、热能、化学能等各种形式，也可以多种形式的能量同时发生转化。功的单位和能量单位一样，在国际单位制中，都是焦耳。

计算变力做功是把运动的轨迹分成许许多多无限小的小段，在每个小段内，可以把力看作为恒力，按恒力做功的定义来计算在各个小段内所做的功，最后把各个小段的功加起来，就是变力做的功，即 $A = \sum F_i \cdot S_i$ ，如果力和位移都是连续的，则可用积分法计算， $A = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot dS$ 。

【功的原理】

亦称“机械功的原理”。即动力对机械所做的功等于机械克服阻力所做的功。也就是说利用任何机械都不能省功。动力功 $W_{\text{动}}$ ，又称输入功或总功。阻力功 $W_{\text{阻}}$ ，包括克服有用阻力所做的 $W_{\text{有用}}$ （又称输出功）和克服无用阻力所做的 $W_{\text{无用}}$ （又称损失功），即 $W_{\text{动}}=W_{\text{阻}}=W_{\text{有用}}+W_{\text{无用}}$ 。也可写成 $W_{\text{输入}}=W_{\text{输出}}+W_{\text{损失}}$ 。功的原理是机械的基本原理。要省力就要多移动距离，要少移动距离就要多用力，使用任何机械都不能省功。在机械做功过程中，只有在不存在无用阻力，机械本身作匀速运动的理想情况下，有用功才等于总功，效率为 100%。事实上，必然存在无用阻力，效率一定小于 100%，也就是说使用任何机械，在实际情况下总是费功的。应明确，只有在理想情况下，有用功才等于总功。

【正功】

作用力的方向和力的作用点的位移方向之夹角小于 90° 且大于或等于 0° 时（即为锐角），根据公式作用力 A 做正功。当力 F 与位移 S 夹角 $=0^\circ$ 时， $W=FS\cos 0^\circ=FS$ 。 F 做最大正功；当 $0^\circ < <$

$\frac{\pi}{2}$ 时， $FS > W > 0$ 。 F 做正功。

【负功】

当作用力方向与力的作用点位移方向夹角大于 90° 且小于或等于 180° 时，这时 $\cos < 0$ ，根据公式功为负。力对物体作负功 $-A$ 就代表受力作用的物体克服阻力作了正功 A 。这两种说法描述的是同一物理过程。例如，空气压缩机中空气对活塞作负功，也可以说成是活塞克服空气的压力作正功。又如，汽车紧急制动，车轮停止转动，轮胎在地面上滑动，这时摩擦力对汽车作负功，反过来也可以说汽车克服摩擦力作正功。

【功率】

功跟完成这些功所用时间的比值叫做“功率”。最初定义功率为“单位时间里完成的功”，它是指做功快慢不变的情况，初中学生易于掌握。

“功跟完成这些功所用时间的比值”这一定义功率，对于做功快慢不变的情况，既表示平均功率，又表示即时功率。对于做功快慢不均匀的情况，如时间取得长些，则为平均功率；时间趋于零，这一比值的极

限值为即时功率。课本上介绍计算功率的关系式是： $P = \frac{W}{t}$ 。又根据 $W = FS$ ，

得 $P = \frac{F \cdot S}{t} = F \cdot \frac{S}{t} = Fv$ 。由公式 $P = \frac{W}{T}$ 计算出来的功率，只能表示机器在一

段时间 t 内的平均功率。而由公式 $P = Fv$ 计算出来的功率就有了不同的含义。若速度 v 代表平均速度，那么 P 代表平均功率，如果 v 代表即时速度，那么 P 就代表机器在某瞬时的即时功率。

公式中力是一个矢量，速度也是一个矢量，而功率却是一个标量。这一问题涉及两个矢量相乘的问题。两个矢量（设为 \vec{a} ， \vec{b} ）相乘有两种方法：一为“标积”；一为“矢积”。两矢量的“标积”为一标量，其大小（ k ）为两矢量的大小和两矢量夹角的余弦的乘积，用公式表示为 $k = ab \cos(\hat{a, b})$ 。两矢量的标积在两矢量之间用一圆点“ \cdot ”表示，即 $k = \vec{a} \cdot \vec{b}$

$= ab \cos(\hat{a, b})$ 。所以标积又称“点积”。在计算功率的公式 $P = Fv$ 中，

实际上 P 应为 \vec{F} 矢量和 \vec{v} 矢量的标积，即

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = Fv \cos(\hat{\vec{F}, \vec{v}})$$

所以得到的功率 P 应为一标量。

关于公式 $P = Fv$ 中 F 与 v 成反比的关系，应明确，不能脱离具体条件，防止得出谬误的结果。因为机器的牵引力要受速度的限制，又受机器的构造、运转条件等限制，任何机器在设计制造时，已规定了它的正常功率和最大作用力。超过最大作用力范围，牵引力和速度成反比这一关系就不能适用。另一方面也不能使机器的牵引力趋近于零，而使机器的速度无限制地增加。因为任何机器在工作时要受到阻力作用，阻力还与机器运转的速度有关。即使在没有负载的情况下，机体间的摩擦阻力仍然存在。为维持机器的运转，发动机的牵引力不能小于它所受的阻力。因而它的速度也不能无限增加。因此，任何机械在有一定的最大输出功率的同时，还具有一定的最大速度和最大作用力。

功率的常用单位是瓦特（焦耳/秒），简称瓦，单位符号 W 。瓦特这个单位较小，技术上常用千瓦做功率的单位。还有尔格/秒、牛顿·米/秒、千克力·米/秒。

【平均功率】

功跟完成这些功所用时间的比值，即 $P = \frac{W}{t}$ ，指在时间 t 内的平均功率。当物体受恒力作用时也可表示为 $P = F\bar{v}$ 。式中 \bar{v} 表示某段时间的平均速度。平均功率随所取的时间不同而不同，因此在谈到平均功率时，一定要指出是哪一段时间内的平均功率。参阅功率条。

【即时功率】

即“瞬时功率”，简称功率。描述机械在某一瞬间做功的快慢。当 Δt 趋近于零时，平均功率 \bar{P} 的极限值。即 $P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t}$ 。因为

$W = F S \cos \alpha$ ， $P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F \Delta S \cos \alpha}{\Delta t} = F \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} \cos \alpha$ 。而 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = v$ ，故
 $P = F v \cos \alpha$ ，即功率等于力在物体运动方向的投影与物体运动即时速度的乘积。作平均速度时， P 当然代表平均功率，如果作即时速度，那么 P 就代表机械在某瞬时的即时功率。当作匀速运动时，即时功率和平均功率相同。

【马力】

功率的常用单位，它是工程技术上常用的一种计量功率的单位。在现行初、高中课本中，功率的单位马力，是指米制马力而不是英制马力，英国、美国等一些国家采用的是英制马力。1 英制马力等于 550 磅/秒，等于 745.7 瓦特。在 18 世纪后期，英国物理学家瓦特（1736~1819）为了测定新制造出来的蒸汽机的功率，他把马力的定义规定为在 1 分钟内把 1000 磅的重物升高 33 英尺的功，这就是英制马力，用字母 HP 表示。在现行课本中的功率单位马力，指的是米制的马力，它的规定完全是人为的，它取了一个非常接近英制马力的值。规定 1 米制马力是在 1 秒钟内完成 75 千克力·米的功。即 1 米制马力=75 千克力·米/秒=735 瓦特。1 英制马力=1.0139 米制马力。米制马力没有专门的字母表示，1 米制马力的值和 1 英制马力的值也是不同的。

【瓦特】

功率的国际单位制专门名称，符号为 W，为纪念英国科学家瓦特（1736 ~ 1819）而得名。每秒钟作出 1 焦耳的功为 1 瓦特，即焦耳/秒。其常用十进倍数单位和分数单位有：

$$1 \text{ 兆瓦 (MW)} = 10^6 \text{ 瓦 (W)}$$

$$1 \text{ 千瓦 (kW)} = 10^3 \text{ 瓦 (W)}$$

$$1 \text{ 毫瓦 (mW)} = 10^{-3} \text{ 瓦 (W)}$$

$$1 \text{ 微瓦 (}\mu\text{W)} = 10^{-6} \text{ 瓦 (W)}$$

【焦耳】

英国物理学家、研究电与热。1840年，他由实验的结果发现了焦耳定律。接着以实验证明，热和功在本质上是相同的，而确立了能量不灭定律，测定了热的功当量。他和楞次各自独立地发现了电流通过导体时发生热量的定律，称为焦耳-楞次定律。焦耳是能量和功的国际制单位的专门名称，符号为 J。1 焦耳相当于 1 牛顿的力使物体在力的方向上移动 1 米时所做的功。其定义式为： $W=FS$ ，即 1 焦耳=1 牛顿·米，也等于 1 瓦特的功率在 1 秒钟内所作的功（ $W=Pt$ ），即 1 焦耳=1 瓦特·秒。

（1 焦耳 = 10^7 尔格 = $\frac{1}{9.8}$ 公斤·米）。

【尔格】

能量和功的厘米·克·秒制单位的专门名称，国际符号为 erg。1 尔格相当于质量为 1 克、速度为 1 厘米/秒的运动物体所具有的动能，或相当于 1 达因的力沿着力的方向移动 1 厘米所做的功。1erg=10⁵J。

【达因】

力的厘米·克·秒制单位的专门名称，国际符号为 dyn。1 达因的力相当于促使质量为 1 克的物体获得 1 厘米/秒²的加速度的力，

即1达因 = 1克·厘米 / 秒²。1达因 = $\frac{1}{10^5}$ 牛顿。

【额定功率】

指工厂生产的机器在正常工作时所能达到的功率。即平常所说的某机器的功率。机器的额定功率是一定的， $P=Fv$ ，所以机器产生的力和运转速度成反比。例如，汽车行驶在平坦的柏油路面时，需要的牵引力 F 较小，时速就可以大些；在路不平坦或上山时，需要的牵引力大，就必须改用低速行驶。

【机械能】

物质机械运动的量度。机械能有两种不同的形式——动能和势能。动能，重力势能和弹性势能统称为机械能。

【能量】

简称“能”，它是描述物质（或系统）运动状态的一个物理量，是物质运动的一种量度。任何物质都离不开运动，在自然界中物质的运动形式是多种多样的，相应于各种不同的运动形式，就有各种不同形式的能量。自然界中主要有机械能、热能、光能、电磁能，原子能等形式的能量。当运动形式之间相互转化时，它们的能量也随之而转换。例如，利用水位差产生的河水冲击力推动水轮机转动，能使发电机发电，将机械能转换为电能；电流通过电热器能够发热，使电能转换为热能；电灯泡可使电能转换为光能和热能；各种内燃机，利用汽油或柴油在汽缸中燃烧的过程，将化学能转换为热能，热能再转换为机械能，推动活塞往复移动。从上述的实例，证实各种形式的能量都可相互转化，在转化过程中，一种形式的能增加了多少，必有另一种形式的能减少多少，能的总量保持不变。自然界一切过程都服从能量守恒和转换定律。物体要对外界作功，就必须消耗本身的能量或从别处得到能量的补充，因此一个物体的能量越大，它对外界就有可能作更多的功。能量是一个标量。用数学语言说，能量是物质运动状态的一个单值函数。能量的单位与功的单位一致。常用的单位是尔格、焦耳、千瓦小时等，和功的单位相同。能量和质量之间具有密切的关系。

【动能】

物体由于本身运动而具有的能量，或者说，由物体运动的速度所确定的能量叫做“动能”。在一般条件下，一个作平动的物体，如果它的质量是 m ，速度是 v ，则它的动能是 $\frac{1}{2}mv^2$ 。物体的动能只能增减，没有方向，而且不会小于零，所以动能是标量，而不是矢量。当物体作变速运动时，其动能是随时在变化的，所以，计算变速运动物体的动能时应明确在哪一时刻的动能。由于物体的运动速度是相对的，因此物体的动能也是相对的，它对于不同的参照物有不同的值。一个以角速度 ω 作转动的物体，如果它绕某一转轴的转动惯量是 I ，则它的转动动能是 $\frac{1}{2}I\omega^2$ 。当运动物体的速度接近光速 c 时，物体的平动动能等于 $\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0c^2$ 。动能的单位与功的单位相同。

【动能定理】

合外力对物体所做的功，等于物体动能的增量，这一结论叫做“动能定理”。即

$$W_{\text{合}} = E_{k_2} - E_{k_1} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \Delta E_k$$

式中 E_{k_1} 和 E_{k_2} 各表示运动物体在初状态时和末状态时所具有的动能， $W_{\text{合}}$ 表示合外力（即外力的合力）对物体所做的功，也就等于各个外力对物体所做的总功 $W_{\text{总}}$ 。如果 $E_k > 0$ ，则表示外力对物体做正功，物体获得能量，动能增加；如果 $E_k < 0$ ，则表示外力对物体做负功，即物体对外做正功，或者说物体克服外力做功，物体必须消耗能量，它的动能减少。如果 $E_k = 0$ ，这说明外力对物体不做功，物体的动能不增加也不减少。

动能定理是力学中一条重要规律，它是根据牛顿运动定律推导出来的。牛顿第二定律 $\vec{F} = m\vec{a}$ 中的 \vec{F} 表示质点所受外力的合力，因此动能定理中的 $F\cos\alpha$ 代表作用在运动质点上的合外力的功。从动能定理深入领会“功”和“动能”两个概念之间的区别和联系。动能是反映物体本身运动状态的物理量，物体的运动状态一定，能量也就唯一确定了，故能量是“状态量”，而功并不决定于物体的运动状态，而是和物体运动状态的变化过程，即能量变化的过程相对应的，所以功是“过程量”。功只能量度物体运动状态发生变化时，它的能量变化了多少，而不能量度物体在一定运动状态下所具有的能量，有的书上把动能定理称之为动能原理。对原理、定理区分不严格，本辞条按课本教材要求，称“动能定理”。此定理体现了功和动能之间的联系。称为定理的原因是因为它是从牛顿定律，经数学严格推导出来的，并不能扩大其应用范围。由于动能定理不涉及物体运动过程中的加速度和时间，不论物体运动的路径如何，因而在只涉及位置变化与速度的力学问题中，应用动能定理比直接运用牛顿第二定律要简单。

【势能】

亦称“位能”。由相互作用的物体之间的相对位置，或由物体内部各部分之间的相对位置所确定的能叫做“势能”。按作用性质的不同，可以分为引力势能、弹性势能、电势能和核势能等。力学中势能有引力势能、重力势能和弹力势能。势能不是属于单独物体所具有的，而是相互作用的物体所共有。在相互作用力是“耗散力”（如摩擦力）时，设物体由 A 点（假设它是势能零点）移到 B 点克服它做功为 W ，当物体由 B 点回到 A 点时，它并不能对物体做功，故不能说由于耗散力存在使物体具有了势能。与此相反，如果上述过程是在保守力作用下进行的，那么物体从 B 回到 A 时，保守力对物体做的功正好等于 W ，这是因为保守力所做的功才只与物体的初始和最终的相对位置有关。如果物体不受其它力的作用那么这个功 W 就使物体得到同样多的动能。故我们说物体在 B 点有势能 W 。总之势能的大小由体系内各物体之间保守力所作的功来量度。势能是属于物体系共有的能量，通常说一个物体的势能，实际上是一种简略的说法。势能是一个相对量。选择不同的势能零点，势能的数值一般是不同的。

【重力势能】

由于地球和物体间的相互作用（重力）物体所具有的能量叫做“重力势能”。物体由于被举高才具有重力势能，而物体在举高过程中是在克服重力做功。因此，重力势能跟克服重力做功有密切关系。用 E_p 表示重力势能，则

$$E_p=mgh。$$

从上式看，物体的重力势能等于它的重量和高度的乘积，或等于物体的质量、重力加速度、高度三者的乘积。物体的质量越大，高度越大，它的重力势能就越大。重力势能是相对的，同一物体的重力势能的大小决定于零势能位置的选择。零势面以下的物体，重力势能为负值。物体的重力势能属于物体与地所共同具有的。重力对物体做的功等于物体重力势能的增量的负值。即重力所做的功只跟初末位置有关，而跟物体运动的路径无关。

【弹性势能】

物体由于发生弹性形变，各部分之间存在着弹性力的相互作用而具有的势能叫做“弹性势能”。在工程中又称“弹性变形能”。例如，被压缩的气体、拉弯了的弓、卷紧了的发条、拉长或压缩了的弹簧都具有弹性势能，被压缩或伸长的弹簧具有的弹性势能，等于弹簧的倔强

系数K与弹簧的压缩量或伸长量x的平方乘积的一半，即 $E_p = \frac{1}{2} Kx^2$ 。弹力

势能的单位与功的单位是一致的。确定弹力势能的大小需选取零势能的状态，一般选取弹簧未发生任何形变，而处于自由状态的情况下其弹力势能为零。弹力对物体做功等于弹力势能增量的负值。即弹力所做的功只与弹簧在起始状态和终了状态的伸长量有关，而与弹簧形变过程无关。弹性势能是以弹力的存在为前提，所以弹性势能是发生弹性形变，各部分之间有弹性力作用的物体所具有的。如果两物体相互作用都发生形变，那么每一物体都有弹性势能，总弹性势能为二者之和。

【引力势能】

物体系的各物体之间由于万有引力相互作用而具有的势能叫做“引力势能”。例如地球周围各物体和地球之间有引力作用，因此这个物体具有引力势能。在物体远离地面的情况下，通常将距地心无限远处定为零势能状态，这时引力势能公式应为

$$E_g = -G \frac{Mm}{r}.$$

该式又叫引力势能公式，式中 G 是万有引力常数， M 、 m 分别为地球和物体的质量， r 是物体与地心之间的距离。

【机械能守恒定律】

合外力（不包括万有引力、重力和弹性力）对物体没有做功或所做的功为零时，任何物体在势能和动能相互转化过程中，物体的总机械能（即势能和动能的总和）保持恒定不变，这一结论就叫做“机械能的转化和守恒定律”。是自然界最普遍定律——能量的转化和守恒定律的一种特殊形式，是力学中重要定律之一。机械能守恒定律只适用于机械能与非机械能没有发生转化的系统，通常将这样的系统称为机械能守恒系统。机械能守恒定律只涉及初始状态和终了状态的机械能，不涉及转换过程。因此，如果不要要求去了解过程的具体情况的话，用机械能守恒定律来分析某些力学过程，比用其他方法简便。

【功能原理】

合外力（不包括万有引力、重力和弹性力）对物体所做的功等于物体机械能的增量，这个结论就叫做“功能原理”。其表达式为

$$W_{\text{合}}=E_2-E_1= \Delta E。$$

式中 E_1 和 E_2 各表示物体在初状态和末状态时的机械能， $W_{\text{合}}$ 表示合外力（不包括重力和弹性力）对物体所做的功。从式中可知：当机械能增加时，即 $E_2 > E_1$ ，则 $\Delta E > 0$ ，合外力对物体做正功；当机械能减少时，即 $E_2 < E_1$ ，则 $\Delta E < 0$ ，合外力对物体做负功；机械能不变时，即 $E_2 = E_1$ ，则 $\Delta E = 0$ ，合外力对物体不做功。从上述分析知：能是表达物体运动状态的物理量，用做功的多少可以量度能量的变化量。功和能都是标量，它们的单位相同，但却是两个本质不同的物理量。能是用来反映物体的运动状态的物理量。处于一定的运动状态的物体就具有一定的能量。而做功的过程是物体在力的相互作用下，位置变化的过程，也就是能量从一个物体传递给另一个物体的过程。因此，功是用来反映某一过程中物体间能量传递了多少的物理量。

【冲量】

作用在物体上的力和力的作用时间的乘积，叫做该力对这物体的“冲量”。冲量的作用是使受力物体的动量发生变化。冲量的数学公式为 $I = Ft$ 。冲量是矢量，它的方向跟作用力的方向相同。因为冲量是力对时间的累积效应，它是一个过程物理量。只要有力，而且力作用了一段时间，不论力的大小，作用时间的长短，总有力的冲量。在国际单位制中，力的冲量的单位为牛顿·秒（常用的单位还有达因·秒）。

【冲力】

一般将作用时间短，在短时间内变化大，且能达到很大瞬时值的力叫做“冲力”。在中学物理的某些问题里，为叙述方便，常用“打击力”代表作用力，“冲力”代表反作用力。如锤头击钉子，有时把锤头对钉子的作用力叫打击力，而把钉子对锤头的反作用力叫冲力。实际上，打击力也是冲力。

【动量】

用物体的质量 (m) 和它的速度 (v) 的乘积来描述物体运动状态的物理量叫做“动量 (P)”。用公式表示为 $P=mv$ 。它是一个矢量。跟速度的方向相同。其大小等于物体的质量跟速度的乘积。一物体的机械运动转移为另一物体的机械运动,反映为物体之间动量的传递。因而动量是物体运动的一种量度。动量的单位是千克·米/秒。从量纲上看它跟冲量的单位是一致的。由于速度还具有瞬时性和相对性,所以,动量也还具有瞬时性和相对性。

【动量定理】

物体的动量的增量，等于相应时间间隔内物体所受合外力的冲量。它表明具有动量的物体受合外力作用，经过一段时间速度将发生变化，因而动量也发生变化。此时，物体所受的合外力的冲量等于它的动量的变化。数学表达式是： $I=P_2-P_1= \Delta P$ 。其中 I 表示各外力冲量的矢量和，即 $(F \cdot t)$ ，它等于合外力的冲量。 P_1 、 P_2 各表示物体在始、末状态时的动量。冲量和动量都是矢量。冲量的方向是动量增量的方向。冲量是对力而言，动量是对物体而言的。只能说“某力的冲量”、“某物体的动量”，而不能讲“某力的动量”、“某物体的冲量”。国际单位制中，力的冲量的单位为牛顿·秒，物体动量的单位为千克·米/秒。它们具有相同的量纲。动量单位和冲量单位等同，即 1 牛顿·秒=1 千克·米/秒，(1 达因·秒=1 克·厘米/秒)

运用动量定理可以求力、质量、速度三方面问题。解决具体问题的思路和方法是：明确物理过程；确定研究对象；进行受力分析；确定作用前的动量和作用后的动量；建立坐标系或规定正方向，根据动量定理列出方程；求解。

【动量守恒定律】

物体系不受外力作用，或所受外力的合力为零，则系统的总动量守恒。这一结论叫“动量守恒定律”。其数学表达式为： $m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1 +m_2v_2$ =恒量。式中的 m_1 、 m_2 分别为两个物体的质量， v_1 和 v_2 分别为它们原来的速度， v_1 和 v_2 分别为它们相互作用后的速度，等号左边是两物体原来的总动量，右边是它们相互作用后的总动量。该定律是指相互作用的物体的总动量是守恒的。但在作用过程中，动量从一个物体传递给其它物体，即每一物体的动量并不守恒。运用此定律时还应注意守恒条件：要求系统不受外力或所受外力的合力为零。但当外力远小于内力时亦可运用。如外力不为零，但在某一方向上的外力为零，则可在这一方向运用该定律。从大到星系的宏观系统，小到基本粒子的微观系统，无论系统内各物体之间相互作用是什么力，只要能满足守恒条件，都可运用动量守恒定律。所以它是自然界最重要最普遍的规律之一。

【麦克斯韦滚摆】

简称“滚摆”。它是演示机械能转换的仪器。在演示前应调绳使摆轮处于水平状态。演示时用于捻动摆轴，使滚摆上升，同时悬线就缠在轴上。滚摆升到顶点的时候，具有一定的势能。若将摆松开，它就旋转下降，势能随着滚摆的下降而逐渐减少；可是它越转越快，表示动能在逐渐地增加，当悬线完全伸开，滚摆不再下降时，由于滚摆的继续旋转，它又开始绕着悬线上升。在上升过程中，动能逐渐减少，而势能则逐渐增加。上升到跟上一回差不多的高度，然后再下降，再上升，假如没有阻力（例如空气阻力、绳子与轴向摩擦力等），滚摆每次上升的高度相同。即滚摆的势能和动能在转换过程中总量保持不变。

【碰撞】

相对运动着的物体靠近时在极短时间内运动状态发生显著变化的过程叫做“碰撞”。碰撞是一种常见的现象。碰撞的一个特点是冲力很大，在碰撞过程中，可以不考虑外力对碰撞质点运动的影响，往往将外力忽略不计，而用动量守恒定律处理质点系的运动问题。碰撞过程的另一特点是时间短，而运动状态在碰撞前后的变化又非常显著。因此，很容易分清哪是在碰撞前，哪是在碰撞后，哪是碰撞开始，哪是碰撞过程的结束。这为运用动量守恒定律，创造了有利条件。

物体（或质点）之间相互作用实际是交换能量和动量的过程。碰撞不仅指物体相互接触时的冲击过程，微观粒子间非接触的相互作用而干扰它们的运动状态的过程也叫碰撞。若以物体间碰撞的形式区分，可分为对心碰撞（正碰）、非对心碰撞（斜碰）。如以物体碰撞前后两物体的总动能是否变化来区分，可分为弹性碰撞，非弹性碰撞，而完全非弹性碰撞则是非弹性碰撞的特例。

各类碰撞都遵守动量守恒定律和能量守恒定律，即物体系内各物体碰撞前的总动量和总能量分别等于碰撞后的总动量和总能量。不过在非弹性碰撞中，有一部分动能转变为其他形式的能量，因此，动能就不守恒了。碰撞的过程一般伴随着两种力学过程：机械运动的传递；机械运动和其他运动形式的转化。

【正碰】

亦称对心“碰撞”。物体在相互作用前后都沿着同一直线（即沿着两球球心连线）运动的碰撞。在碰撞时，相互作用力沿着最初运动所在的直线，因此，碰撞后仍将沿着这条直线运动。研究正碰时，可如上述沿两小球球心的连线作 x 轴。碰撞前后的速度就在 x 轴上，根据动量守恒定律则可判断两小球碰撞前后的总动能是否守恒，从而将碰撞分为弹性碰撞和非弹性碰撞。在原子或原子核的碰撞中，把碰撞后入射粒子和靶沿同方向或相反方向运动的碰撞或者靶在碰撞后沿入射方向运动的碰撞亦称为正碰。

【斜碰】

亦称“非对心碰撞”。两球在碰撞前的相对速度不沿两球球心连线的碰撞叫“斜碰”。研究斜碰问题时，运用正交分解法较为方便。斜碰也可分为弹性碰撞、非弹性碰撞两类。

【弹性碰撞】

参加碰撞的所有粒子或物体的总动能在碰撞前或在碰撞后彼此相等的碰撞，叫做“弹性碰撞”。动量和动能同时守恒的碰撞也称“完全弹性碰撞”。设 m_1 、 m_2 代表两个物体的质量， u_1 、 u_2 表示碰撞前两物体的速度， v_1 、 v_2 表示碰撞后两物体的速度。以下只讨论两物体的对心碰撞，即 u_1 、 u_2 、 v_1 、 v_2 都沿同一直线。弹性碰撞的过程遵守功能守恒定律和动量守恒定律，即

$$\frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 ,$$

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2 .$$

如两物体的质量和碰撞前的速度已知，则碰撞后的速度

$$v_1 = \frac{u_2(m_1 - m_2) + 2m_2 u_1}{m_1 + m_2} ,$$

$$v_2 = \frac{u_1(m_2 - m_1) + 2m_1 u_2}{m_1 + m_2} .$$

两式相减得 $v_1 - v_2 = u_2 - u_1$.

上式 $v_1 - v_2$ 是两物体碰撞后的相对速度（分离速度）， $u_2 - u_1$ 是它们碰撞前的相对速度。对于弹性碰撞，两物体碰撞前后的相对速度大小不变，但方向相反。完全弹性碰撞的一个基本条件：两物体相碰时，它们之间的相互作用力是弹性力，不存在耗散力。而且碰撞过程可分为两个理想的阶段

〔注〕把两个理想阶段也定为完全弹性碰撞的条件是因为它能保证，碰后，每个小球都不具有内部发生的弹性振动能。压缩阶段，由开始发生变形至两物体相对速度为零，两物体克服弹性力作功，一部分动能转化为弹性势能；在恢复阶段，弹性力作功，两接触物体形变完全消失，弹性势能又全部转化为两球的动能，而以不同速度分离。微观粒子的弹性碰撞，相碰撞的粒子速度的大小和方向都发生改变，但它们的内部状态没有变化，如低能电子在分子上的散射。

【非弹性碰撞】

碰撞前后物体系的总动能不守恒（但总能量仍是守恒的），碰撞过程有一部分机械能转换为其它形式的能量，称为非弹性碰撞。此过程中，碰撞体的内部状态发生变化，如物体变热、变形（不能恢复）或破裂、原子受到激发、粒子的种类或性质发生改变等。

【完全非弹性碰撞】

它是非弹性碰撞中的特例。这种碰撞，当两物体碰撞后粘合为一体，以同一速度 v 运动，即 $v_1=v_2=v$ ，这样的碰撞叫“完全非弹性碰撞”，这时碰撞的系统只遵守动量守恒定律，即

$$(m_1 + m_2) v = m_1 v_1 + m_2 v_2 ,$$

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} .$$

如果物体碰撞后，各自具有不同的速度，但系统的总动能减小，这种碰撞叫“非完全弹性碰撞”。 $0 < e < 1$ ，即分离速度小于接近速度。对于完全非弹性碰撞， $e = 0$ ，即分离速度为零，两物体粘合在一起运动。

【非完全弹性碰撞】
见完全非弹性碰撞条。

【反冲运动】

枪或火箭等系统由于发射子弹或喷射气体而发生的枪身或火箭本身沿子弹或气体速度的相反方向运动的现象，谓之反冲运动。可通过动量守恒定律加深对射击和喷气等反冲运动特点的理解。在中学教学中常涉及三种不同形式的反冲运动。

1. 步枪的后座。处理这一问题选择子弹与枪身这一质点系为研究的对象。首先判断从击发开始到子弹离开枪管为止，这段时间是否守恒。由于作用于枪身的爆发力（内力）比肩窝的抵抗力（外力）大得多，后者对枪身运动的影响可忽略不计。所以，在发射子弹的过程中，可应用动量守恒定律近似求解。
2. 炮身以仰角 α 发射炮弹问题。炮弹向斜上方飞出后，炮身除沿水平方向后退外，还要朝下运动。地面对炮身则产生极大的竖直向上的弹力，阻碍炮身下沉，这一竖直向上的巨大弹力属于外力。质点系所受的合外力不等于零，因此动量不守恒。但是，合外力在水平方向上的分量为零（炮身运动的摩擦力与爆炸力相比，可忽略不计），所以质点系的动量在该方向上的分量是守恒的。这就是沿某一方向的动量守恒问题。
3. 喷气火箭的飞行。这类反冲运动的物体，在运动中不断地释放某些气体（如气体）而运动，或在运动中不断地俘获另外一些物体而共同运动，这属于可变质量物体运动的问题。在处理这类问题时应按齐奥尔科夫斯基公式，不能死套动量守恒定律。

【机械效率（力学）】

在同一时间内，机械输出功（有用功）与输入功（动力功）之比，叫做“机械效率”。任何机械在正常运转时，动力对机械所作的功，总有一部分消耗在克服摩擦和机件阻力上，这是不可避免的。因此，机械对外所作的功总小于动力对机械所作的功。动力对机械所作的功称为输入功，机械对外所作的功称为输出功。机械效率总小于1，在实用上，对于各种机器和传动设备等，机械效率指输出功率跟输入功率的百分比。实用的机械效率高低不一致，效率高的多是精细，轻巧而简单的机械，效率低的都是粗糙、复杂、笨重的机器。

【内力】

研究对象内部各部分之间的相互作用力称为“内力”。它不能改变系统的运动状态。例如，汽车的制动是依靠制动器的闸瓦和车轮的相互作用力来使汽车的车轮停止旋转，这种力对汽车来说只是内力，它只能使车轮停止转动，但不能使整个汽车停下来。

【外力】

研究对象受到研究对象以外的物体的作用。外力改变研究对象整体的运动状态。例如，车轮由于受内力作用停止旋转，但不能使整个汽车停下来，制动的作用只不过是使车轮停止旋转，车轮和地面之间由滚动摩擦变成滑动摩擦，由于受到滑动摩擦力的作用，汽车才能迅速地停止下来。

系统的选择往往是依解决问题的方便而定，所以在同一个问题中，内力与外力又不是绝对不变的。例如，马拉车在地面上行驶，如果将马和车看成一个系统，那么马和车之间相互作用力（马对车的作用力与车对马的反作用力）就是内力；而地面给予马和车的摩擦力就是外力，如果将车当作一个系统，此时马对车的拉力就不再是内力而是外力了。

【力系】

作用于物体上的一群力称“力系”。

【力场】

若负点所受作用力是它在空间所处位置的函数，即在空间的每一点处都有一确定的力矢量与之对应，则称这部分空间为“力场”。例如，物体周围的万有引力场，电荷周围的静电场都是力场。

【汇交力系】

力系中的各力的作用线都汇交于一点的力系，称“汇交力系”。又称共点力系。

【力线】

力线是一种形象地描述力场分布而虚拟的曲线，是假想的线，实际上并不存在。它是用以表示力场强度和方向的线族，力线的密度代表场强，力线越密，场强越大。

【力程】

力场作用的有效范围称为“力程”。按力程的大小，又可分为两大类：其一是短程力，即力的作用范围很小，影响力随距离的增加而急速减小。如核子间的核力，在 10^{-13} 厘米的距离内，作用力很强，超过该距离后即可忽略；其二是长程力，它是随距离的增加而缓慢减少。如静电力，万有引力等平方反比力都是。

【场】

在物理学中“场”是物质存在的基本形态之一。这种形式的主要特征在于它的质量和能量是弥散于空间的。根据近代物理学的观点，物质存在的基本形态可分为两种，即场和实物。由具有静止质量的基本粒子所组成的物质叫做实物。

人们对场的认识是有一段历史过程的，首先通过物体间的非接触相互作用，如物体间的万有引力作用，带电体间的静电力作用以及磁铁间的磁力作用等，逐渐认识到了场的存在。在相当长的一段时期内，曾有一种观点认为，物体间的非接触作用，是一种既不需要时间，也不需要中间媒介传递的瞬时超距作用。英国物理学家法拉第反对这种观点，并于 1837 年引入了场的概念。他认为那些非接触作用的发生，都必须通过某种中间媒质的传递才能实现。而这种传递相互作用的媒质就是场。它分布在空间或部分空间。随着科学的发展，人们逐步认识到了场的物质性，场和实物一样具有能量、动量和质量等物质的基本属性。场与实物在一定的条件下可以相互转化，例如，具有一定能量的光子可以转化为一个电子和一个正电子；同样，电子与正电子相碰可以转化为一对光子，场与基本粒子是紧密相联的，任何实物粒子都不可能脱离有关的场而单独存在，场与实物之间就不存在绝对的界限。

在数学中场是一种抽象的概念，把分布在空间某一区域内的物理量或数学函数称为场，它不一定是物质存在的形式，而是为了研究方便起见，才引入场的概念。如果所研究的物理量或数学函数在空间不同的点仅有数量上的区别，其相应的场称标量场。例如温度或电势分布的场都是标量场；如果它们不仅有数量上的差异，而且还有方向上的区别，则其相应的场叫做矢量场。例如，电场强度、磁感应强度，速度及重力分布的场，都是矢量场；不随时间变化的场称“稳恒场”；随时间变化的则称“可变场”。

【保守力】

大小和方向完全由物体间相对位置确定的，且做功多少只由始末位置所决定，而跟路径无关的力叫做“保守力”。保守力对物体做功的多少取决于物体始末位置，如果在该力作用下，物体的运动沿闭合路线绕行一周回到了起始位置，则所做的功为零。万有引力（包括重力）、弹力等属于保守力。物体系确定后保守力和物体的运动状况无关，其大小和方向由相互作用物体的相对位置所确定。例如，物体确定后，重力的大小决定于它离开地面的高度，方向竖直向下，而和物体以什么样的速度运动无关和物体运动速度的大小和方向如何变化无关。保守力和物体系的势能有着极为密切的联系。保守力做正功，则物体系的势能减少；反之，则物体系的势能增加。而且相对两个位置之间，功能一定，势能差一定。所以物体间存在保守力是物体系具有势能的条件。系统的各物体在只受保守力作用的情况下，其机械能守恒。保守力的功和势能的变化关系为： $W_{\text{保}}=E_{p1}-E_{p2}$ 。这里的 E_{p2} 和 E_{p1} 表示终点和起点的势能。当 $W_{\text{保}} > 0$ 时，保守力作正功， $E_{p1}-E_{p2} > 0$ ，物体系统的势能要减少；当 $W_{\text{保}} < 0$ 时，保守力作负功， $E_{p1}-E_{p2} < 0$ ，物体系统的势能就要增加，保守力的功决定于物体系势能的变化量，在实际问题中涉及到的只有两个状态的势能差，而不是某一状态势能的绝对值。

【非保守力】

亦称“耗散力”。做功多少和物体运动路径有关的力叫非保守力。非保守力做功就不能由物体的始末位置决定，而和物体的运动路径有关。例如，人推车是克服摩擦力做功，摩擦力是非保守力，人推车对车做的功并不与车向哪个方向运动有关。又如，空气对运动物体的阻力，其方向随着物体运动的方向改变而改变，它的大小随物体运动速度增大而增加。非保守力不象保守力，对于两个位置之间，力对物体做功没有确定的值，从而相应的两个位置之间没有一定的能量差。所以非保守力和物体系的势能没有联系。物体在有非保守力作用时，其动能与势能之和（机械能）不再守恒。质点运动时作负功的非保守力也称为耗散力。除空气阻力外，爆炸力，内燃机气缸中气体对活塞的推力都是耗散力。耗散力之所以命名为“耗散”，是由于这种力所作的功一般是跟机械运动转化为非机械运动（如热运动）紧密联系在一起。

【力的正交分解法】

在处理力的合成和分解问题时，我们常把力沿两个互相垂直的方向分解，这种方法叫做力的正交分解法。这是一种很有用的方法，在运用时要注意以下几点：

1. 力是矢量 \vec{F} 在x轴和y轴上的分矢量 \vec{F}_x 和 \vec{F}_y 是矢量，分量为正值表示分矢量的方向跟坐标轴的方向相同，分量为负值表示分矢量的方向跟坐标轴的方向相反。

2. 确定矢量正交分量的坐标轴，不一定是取竖直方向和水平方向。例如，分析物体在斜面上的受力情况，一般选取x轴与斜面平行，y轴与斜面垂直。坐标轴的选取是以使问题的分析简化为原则。通常选取坐标轴的方法是：选取一条坐标轴与物体运动的加速度的方向相同（包括处理物体在斜面上运动的问题），以求使物体沿另一条坐标轴的加速度为零，这样就可得到外力在该坐标轴上的分量之和为零，从而给解题带来方便。

【速度的解析表示法】

将速度矢量沿直角坐标轴分解叫“力的正交分解法”。又称“速度的解析表示法”。经常使用的运动分解方法有两种，一种是矢量加减的几何方法，即三角形（或平行四边形）法则以及在此基础上的多边形矢量相加（减）法则，另一种就是将速度矢量沿直角坐标轴分解，叫做速度的解析表示法。在中学课本中没有专门讨论力的正交分解法，但在某些问题中实际上已用到了正交分解法。譬如，把放在斜面上的物体所受的重力，分解为垂直于斜面和于斜面的两个分力，并讨论了这两个分力与斜面对物体的正压力和摩擦力的关系，这就是力的正交分解法。

这里，仅以速度矢量 v 在平面直角坐标系中的情形为例如图 1-27 所示。由坐标轴原点画 v ，设 v 与 x 轴成 α 角，将 v 沿 x 轴和 y 轴的方向分解为两个分矢量 v_x 和 v_y ，则这两个分矢量的大小和方向，可用 v 在两个坐标轴上的投影来表示：

$$v_x = v \cos \alpha$$

v_x 和 v_y 分别叫做速度矢量 v 在 x 轴和 y 轴上的分量，其大小分别表示 v_x 和 v_y 的大小，正负号则表示与坐标轴同向或反向。正值表示与轴的正向相同。写成矢量式，则为：

$$v = v_x i + v_y j$$

式中 i ， j 为 x 与 y 轴方向的单位矢量，若已知 v_x ， v_y 两个分量，则 v 的大小和方向可由下式求得：

$$\begin{cases} v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ \alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{v_y}{v_x} \end{cases}$$

应用解析法（或称正交分解法），较为方便。

【正功和负功的物理实质】

对功的计算式 $W = FS \cos \alpha$ 的讨论：

当 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时， $FS \cos \alpha > 0$ 。表明：力和物体的位移方向相同或两者的夹角小于 90° 。 $W > 0$ ，作用力对运动的物体做正功。

当 $\alpha = 90^\circ$ 时， $W = 0$ 。表明：力和物体的位移方向相互垂直，力对物体不做功。

当 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ 时， $0 > W = -FS \cos \alpha$ 。表明：力和物体的位移方向大于 90° ，小于 180° 或等于 180° 。 $W < 0$ ，力对物体做负功，或者说运动物体克服阻力而做功（说了“克服”或反抗，就不能说克服阻力做负功）。力总是成对发生的，当物体 A 以一个力作用于物体 B，物体 B 必然同时给予物体 A 一个反作用力，两者大小相等、方向相反。因此除了场力（如重力、电场力等）做功情况以外，任何两个系统之间的接触力形成做功过程时，总是正功和负功同时发生的。甲对乙做正功的过程，也是乙对甲做负功的过程。任何一个做功过程，既可以从做正功的一方来表述，也可以从做负

功的一方来表述。习惯用语常将“正”字省略，而且只从正功一方来表述。“谁做了功”指的是“谁做了正功”。我们表述时，必须指明是“谁对谁做功、是什么力对什么物体做功”。这里还应注意两个问题：

1. 功是标量，只有量值，没有方向。功的正、负并不表示功的方向，而且功的正、负也不是数量上的正与负，不能说正功与负功方向相反，正功和负功是借以区分谁对谁做功的标志。表示两种相反的做功效果。

2. 动力总是对物体做正功，阻力总是对物体做负功，一般情况下容易理解，但遇到摩擦力做功时，可能会认为摩擦力总是做负功。这是将摩擦力和阻力等同看待的结果。其实摩擦力可能做负功，也可能做正功，当摩擦力对物体的运动起着推动作用时，它就做正功。

【势】

或叫“位”。在保守场里，把一个单位质点（如重力场中的单位质量，静电场中的单位正电荷）从场中的某一点 A 移到参考点，场力所作的功是一个定值。也就是说，在保守场中，单位质点在 A 点与参考点的势能之差是一定的，人们把这个势能差定义为保守场中 A 点的“势”。势是保守场的位置的单值函数，与质点的存在与否无关。只有在保守场中才能引入势的概念。参考点的选定是可以任意的。例如，对于静电场参考点常选在无限远处，也可以把地球或其它大的导体选作参考点。对于重力场则把地面作为参考点。摩擦力所作的功不仅与运动质点的初、终位置有关，而且与它所通过的路径有关，所以摩擦力是非保守力。运动电荷在磁场中所受到的磁力也是非保守力。在非保守场中不存在势能，也不能引入势的概念。

【气垫导轨】

气垫导轨是一种摩擦阻力很小的力学实验仪器，用来测定速度、加速度、验证牛顿第二定律和动量守恒定律，研究碰撞、简谐振动、受迫振动、阻尼振动等等。气垫导轨是利用导轨表面小孔中喷出的压缩空气，使导轨表面和滑块（即作运动的物体）之间形成一层很薄的空气膜（即所谓“气垫”）而将滑块托起。这样，滑块在导轨表面上运动时就不存在接触摩擦力，仅仅有小得多的空气阻力，滑块的运动可近似地看成是无摩擦运动。由于气垫导轨极大地减少了以往力学实验中难于克服的摩擦力的影响，因而可以获得比较精确的实验数据，大大提高实验效果。

【机械振动】

物体在某一位置附近来回往复地运动，称为“机械振动”。例如，弹簧振子、摆轮、音叉，琴弦以及蒸汽机活塞的往复运动等等。凡有摇摆、晃动、打击、发声的地方都存在机械振动。振动是自然界最常见的一种运动形式，波动是振动的传播过程。振动远不止于机械运动范围，热运动、电磁运动中相应物理量的往复变化也是一种振动。产生振动的必要条件之一是物体离开平衡位置就会受到回复力的作用；另一条件是阻力要足够小。当然物体只有惯性，而物体的惯性使物体经过平衡位置时不会立即静止下来。每经过一定时间后，振动体总是回复到原来的状态（或位置）的振动称为周期性振动。不具有上述周期性规律的振动称为非周期性振动。

【回复力】

能够使振动物体回到平衡位置的力称作“回复力”。每当振动物体离开平衡位置就会受到回复力的作用。它跟向心力的情况类似，回复力是根据力的效果而命名的，而不是根据力的性质命名的。它可能是重力、强力等各种性质的力，也可能是它们的分力或合力。例如单摆中，回复力是重力的切向分量；弹簧振子中，回复力是弹簧形变后产生的弹力。

【振幅】

振幅是用来表示振动强弱的物理量，振动物体离开平衡位置的最大距离，叫做振动的“振幅”，通常用符号 A 表示。简谐振动的振幅是不变的。强迫振动的稳定阶段振幅也是一个常数。阻尼振动的振幅逐渐减小，振幅是可变化的。

有的书上说：“物体离开平衡位置的最大位移，称作振幅”。应明确振幅与位移是有区别的。因为位移矢量，在坐标系确定之后，位移是有正负之分的。在中学物理教学中，振幅本身只表示“振动的幅度”。如振动的强弱不变，振动的振幅就是一个不变的量。振幅的单位是米或厘米。

【周期】

对于任何往复循环的物理过程，都用它表示振动快慢的物理量。当物体作往复运动时完成一次全振动所需要的时间称为物体振动的“周期”，简称周，用 T 表示。周期的单位是秒。振动的显著特点是重复性，即周期性。所谓周期性，就是振动物体的位移、速度、加速度经过一定时间之后又重复地回到原来的数值，即开始的状态。例如，位移 x 在时

刻 t 的值 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ ，到时刻 $t + \frac{2\pi}{\omega}$ 时， x 又回到 t 时刻的值，则

$T = \frac{2\pi}{\omega}$ 就是振动的周期。周期这个物理量是物体运动周期性的描述。简

谐振动是严格的周期性运动，它的周期是一个常数。有些振动的（如阻尼振动）的周期是在不断相对缓慢地变化。严格地说，这种往复运动已不再是周期性的，但周期这个物理量仍然可以反映这种运动的往复情况。

【频率】

在 1 秒钟内，物体完成全振动的次数叫“频率”。通常用符号 f 表示频率。在国际单位制中，频率的单位是赫兹（Hz），简称赫。象周期一样，频率既可以表示作振动或其他周期性运动的物体每秒钟完成周期性运动的次数；又可以表示某些物理量每秒钟完成周期性变化的次数。频率等于周期 T 的倒数，即 $f = \frac{1}{T}$ 。

【弹簧振子】

一种简谐振子。它的典型结构是由一个一端固定，质量可以忽略的轻弹簧和连在它另一端（自由端）的一个带孔而不易变形的小球，并将球穿在一根光滑的水平杆上组成，这样的，以及与此类似的系统称为弹簧振子。如图 1-28 所示，当小球处于 O 点时，所受外力的合力为零，弹簧没有形变，小球不受力，这点就是平衡位置。将小球从平衡位置 O 向右拉到 B，然后释放，小球将沿杆左右振动起来，当小球在振动过程中，它的重力和杆的支持力始终平衡。杆又很光滑，对小球的运动又没有阻力（些小阻力可略而不计），对振动起作用的只是弹簧作用在小球上的弹力。当小球受外力作用被拉到 O 点的右侧 B 点时，对平衡位置的位移方向向右，则弹力方向却向左；当小球运动到 O 点左侧时，位移方向向左，而弹力方向却向右，可见这个弹力的方向总是跟小球对平衡位置的位移方向相反，指向平衡位置。显然这个弹力就是迫使小球振动的回复力。由胡克定律知弹簧提供的回复力 F 的大小跟小球对平衡位置的位移 x 成正比，这一关系式为

$$F = -Kx$$

式中 K 是弹簧的倔强系数，负号表示回复力与位移方向相反。弹簧振子的振动是简谐振动。它是一种理想化的模型。

【振动】

振动是一种很常见的运动形式。在力学中，指一个物体在某一位置附近作周期性的往复运动，常叫机械振动，也称振荡。见机械振动条。

一个物理量在某一恒定值附近往复变化的过程也称振动，如交流电电压、电流随时间的变化。

【简谐振动】

物体在受到大小跟位移成正比，而方向恒相反的合外力作用下的运动，叫做“简谐振动”。见弹簧振子条。弹簧振子所作的运动是简谐振动。由于弹簧振子的回复力 F 与位移 x 成正比而方向相反，它们之间的关系式用 $F=-Kx$ 表示。又弹簧振子的加速度 a 也与位移 x 成正比而方向相反。它们之间的关系，根据牛顿第二定律公式 $F=ma$ ，得 $ma=-Kx$ ，

则 $a = -\frac{K}{m}x$ ，式中 m 是弹簧振子的质量，式中负号表示加速度与位移方向

相反。所以也可以说，凡是回复力满足 $F = -Kx$ 或加速度满足 $a = -\frac{K}{m}x$ 的机械

振动叫简谐振动。这是从动力学角度定义的。若从运动学角度，可定义为“质点离开平衡位置的位移 x 随时间 t 而变化的规律，能遵从余弦函数（或正弦函数）的振动称为简谐振动。即 $x=A\cos(\omega t + a)$ 。上述两种说法是对简谐振动最常用的两种定义。其实质是一样的。

通过上述公式 $x=A\cos(\omega t + a)$ ，明显说明，作简谐振动物体的位移 x 随时间 t 的变化规律是遵从余弦函数（或正弦函数）的，如将 x 随 t 变化的关系，用图 1-29 所示的曲线形象

地表示出来（横坐标为 t ，纵坐标为位移 x ），就是用振动图线法表示来描述简谐振动。

还有一种矢量图法，或称参考圆法，能更直观地认识简谐振动的位移和时间的关系，深刻领会表明简谐振动的三个物理量 A ， ω 和 a 的涵意。如图 1-30 所示。在图平面内画轴 Ox ，由原点坐标 O 作一个矢量。我们对这矢量作三条规定：1. 它的长度等于振动的振幅 A （所以又称振幅矢量）。2. 在 $t=0$ 时，它与 x 轴所成的角等于初位相 a 。3. 这个矢量以数值等于圆频率 ω 的角速度，在图平面内绕 O 点作逆时针方向的匀速转动。这样一来，振幅矢量在旋转时，它在 x 轴上的投影 OP 就代表了给定的简谐振动 $x=A\cos(\omega t + a)$ 。道理是：在时刻 t ，振幅矢量和 x 轴所成的角为 $(\omega t + a)$ ，由直角三角形 OPQ 可以得到，振幅矢量在 x 轴上的投影为 $A\cos(\omega t + a)$ ，正好代表了简谐振动的位移 x 。

归纳起来，表示一种振动共有四种方法：

(1) 动力学方法： $F = -Kx$ 。或 $a = -\frac{K}{m}x$ 。

(2) 三角函数法： $x=A\cos(\omega t + a)$ 。

(3) 振动图线法：

(4) 矢量图示法：

上述四种方法，在中学物理教学中都用到了，在机械振动部分就利用第 (1)、(2) 种方法；在交流电部分就用到第 (3)、(4) 种方法。各

种方法是分别从不同的角度来反映简谐振动。因此必须掌握它们的特点。简谐振动是最简单、最基本的振动，一切复杂的振动都可以看作是若干个振幅、频率不同的简谐振动的合成。

【等幅振动】

振幅保持不变的振动称作“等幅振动”。物质系统作受迫振动达到稳定状态，即外力对系统所作的功恰好补偿系统因阻尼而耗散的能量时，系统的机械能保持不变，系统的振动也就稳定下来，振幅保持不变，而成为等幅振动。

【固有振动】

又称自由振动、本征振动。物理系统（包括机械、电磁或其它类型的振动）从外界取得一定的能量，开始振动以后，不再受外界作用而阻尼又可忽略的情况下，仅在内部弹性力或准弹性力作用下以固有频率而保持振幅恒定的振动状态叫“固有振动”。固有振动的振幅决定于系统开始振动时所具有的能量，但频率则完全取决于系统本身的性质（如弹性和惯性，电容和电感等）。被击动后鼓膜的振动，弹簧振子偏离平衡位置后无外力作用下的振动等都是“自由振动”。

【自由振动】
见固有振动条。

【固有周期】

物体作固有振动时的周期称为“固有周期”。它是由振动系统本身的性质所决定的，而与振幅大小无关。例如，用不同倔强系数的弹簧分别连接质量相同的振子实验，可知弹簧的倔强系数越大，振动的周期越短；反之，周同一弹簧连接质量不同的振子做实验，结果表明振子的质量越大，周期就越长。由此可见，弹簧振子的振动周期是由倔强系数 K 和振子的质量 m 决定的，通过理论计算，可证明，弹簧振子的固有周期可由下式确定：

$$T = 2 \sqrt{\frac{m}{K}}$$

上式表明，弹簧振子的周期跟质量的平方根成正比，跟弹簧的倔强系数的平方根成反比，而跟振幅无关。

通过上述结论，可以理解：当振子的质量一定，弹簧的倔强系数越大，振子所受弹力就越大，加速度也越大，振子从最大位移处回到平衡位置所需之时间越短，则周期就越短；当弹簧的倔强系数一定，如振子的质量越大，加速度就越小，振子从最大位移处回到平衡位置所需时间越长，则周期也长；当振子的质量和弹簧的倔强系数都一定的情况下，若振幅大，振子在最大位移处起振时的加速度也大，速度增长得很快，虽然振子完成一次全振动通过的路径较长，但所用时间并不长，因此振动的周期与振幅的大小无关。

【固有频率】

它是系统本身所具有的一种振动性质。当系统作固有振动时，它的振动频率就是“固有频率”。一个力学体系的固有频率由系统的质量分布，内部的弹性以及其它的力学性质决定。如弹簧振子的固有

频率 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$ ，由它的弹性（倔强系数K）和惯性（质量m）所决定；一

个电路的固有频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，由它的电容（C）和电感（L）所决定，与

振幅无关。

【单摆】

又称数学摆。它是由一根上端固定且不会伸长的细线（细线的质量略而不计）和在下端悬挂的一个小球（可看作质点）所组成。线在竖直位置时，小球处于平衡位置 O 点，将小球从平衡位置略为移动后，小球在重力作用下，将返回到原来的平衡位置 O，但在返回平衡位置后 O，又因具有动能而继续向另一侧运动，小球就这样在竖直平面内作来回重复的运动，这种振动系统称为“单摆”。

在单摆定义中应注意几段话：1. “不会伸长的细线 小球”这是说摆球可以当作质点看待，细绳质量略而不计，摆长可看作是由悬点到小球球心间长度不变的距离。2. “小球 摆球由于体积小，在运动中空气阻力可略而不计，小球的振动可看作只是由重力和绳子弹力的合力引起的。3. “略为移动”单摆振动只有在振幅很小的时候才能看作是简谐振动，所以只能施以很小的外力使摆球略为移动，满足振幅很小的条件。一般说摆角 5° 。4. “重复”就是说，第二次全振动与第一次全振动所经过的过程是一样的，这是因为空气的阻力忽略不计。如果说“往复”，在阻尼振动的情况下，就不能算简谐振动了。5. “在竖直平面内”如果摆球运动不在竖直平面内，那么它就不是简谐振动了。因此对单摆必须严格定义。

单摆的周期 T 与摆长 l 以及摆所在地的重力加速度 g 值的大小有关，也与摆角（摆线和垂线所成的最大夹角）有关，而与重锤的质量 m 无关。数学表达式为（在摆角 5° 时，周期可用下式）

$$T = 2\sqrt{\frac{l}{g}}$$

【相】

也叫相位，位相或周相。相是一个无量纲的物理量，它的单位是弧度。“相”是一个用来反映振动物体运动状态的物理量。在简谐振动 $x=A\cos(\omega t + a)$ 中， $(\omega t + a)$ 叫振动的“相”。常数 a 叫振动的初相，即 $t=0$ 时的相。 $(\omega t + a)$ 是决定质点在时刻 t 的运动状态（如位移）的重要物理量。振动地物理量在每一时刻的数值是不同的，这种不同就反映在相的不同上。

相这个名词在物理学中有多种不同的含义。例如，物态叫相；具有相同的成份及相同的物理，化学性质的均匀物质部分叫相；在电路中，每一个单独的电动势所构成的电路叫作一相；在力学中，相和相差的概念在振动和波的研究中具有重要的意义。

【相差】

亦称“相位差”，“位相差”或“周相差”。两个振动量（随时间作周期性变化的量）的相位之间的差值即“相差”。在实际问题中，常常用相这个物理量来比较两个简谐振动的步调是否一致。两个振动的角频率相同时，步调是否一致，是由二者的初相所决定。如它们的初相相同，总是同时经过平衡位置，同时到达正的（或负的）最大位移，同时向同一方向运动，振动的步调就一致。如果它们的初相不相同，则振动的步调就不一致。即相差等于零或 2π 的整数倍时，称同相；相差等于 π 的奇数倍时，称反向。当一个振动量的初相大于另一个振动量的初相时，就称前者超前于后者，或后者滞于前者。

【角频率】

振动（或振荡）频率 f 的 2 倍。也称圆频率。一般用 ω 表示， $\omega = 2\pi f$ 。

【复摆】

又称物理摆。当一个能绕定轴摆动的重物(轴线不通过重心)振动时,若振幅很小(重心到定轴的垂直连线与垂线形成的摆角不超过 5°)也可看成是简谐振动。如用 J 表示物体对转轴的转动惯量, m 为物体的质量, i 为物体的重心与转轴的垂直距离,则复摆的振动周期数学表达式为

$$T = 2 \sqrt{\frac{J}{mgl}}。$$

利用复摆可以计时或用以测定重力加速度。

【振动的超前与落后】

在同一时刻，将两个相同频率的简谐振动的位相相比较

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

若 $\varphi_1 > \varphi_2$ ，则称振动 a_1 的相位超前于振动 a_2 的相位， a_1 简称 a_1 超前 a_2 ，或称 a_2 落后于 a_1 ，若 $\varphi_2 > \varphi_1$ ，则 a_2 超前 a_1 。 $|\varphi_1 - \varphi_2| = \Delta\varphi$ 称为两振动的相位差。参阅相差。

【受迫振动】

系统在外部策动力作用下发生的振动叫“受迫振动”。受迫振动是物体在策动力的强迫下所产生的振动，它和自由振动不同。例如，扬声器中纸盒的振动、蒸汽机活塞的振动以及缝纫机上缝针的振动，都是受迫振动的例子。受迫振动开始的情况非常复杂，但经过一段时间后可以达到一种稳定状态。在稳定状态下，振动的频率即为策动力的频率，跟它固有的频率无关。振动的振幅保持恒定不变，振幅的大小不仅与策动力的大小有关，而且还跟策动力的频率以及系统本身的固有频率有关。实际上在这种受迫振动中，一方面系统因策动力做功而获得能量，另一方面又因有阻尼而使机械能损耗。开始时，策动力对系统作的功往往大于系统克服阻尼损耗的能量，总的趋势是振幅逐渐增大。由于阻力一般是随速度而增加的，所以当振动加强时，因阻力而损耗的能量也要增多。当策动力对系统做功而传递给系统的能量，恰好补偿系统因阻力而损耗的能量时，系统的机械能保持不变，振幅保持稳定，成为无阻尼等幅振动。受迫振动的基本特点就是：物体做受迫振动的频率等于策动力的频率，而跟物体的固有频率无关。

【阻尼振动】

由于振动系统受到阻力作用造成能量损失而使振幅减小的振动叫“阻尼振动”。又称减幅振动。振动系统由于受到阻力（这种作用为阻尼），消耗系统能量做功，而使振动的能量不断地减少，由于振动系统的能量与振幅的平方成正比，即 $E = \frac{1}{2}kA^2$ ，所以在能量随时间减少的同时，振动物体的振幅也逐渐减小，这是一种非简谐振动。这里所谓受到阻力、系统的能量减少，一般指两种情况：一种是由于摩擦阻力存在，使振动系统的机械能量逐渐转变为热运动的能量；另一种是由于振动系统引起邻近质点的振动而做功，并使它们振动起来，使系统的能量逐渐向四周辐射出去，转变为波动的能量。例如，簧片振动时，不仅由于摩擦而消耗能量，同时也因辐射声波而减少能量；电磁振荡回路中因电阻和电磁辐射而使振幅逐渐减小的振动；天平臂的摆动；电流计线圈的摆动都属于阻尼振动。在使用天平和电流计时，总希望它们能很快地达到平衡位置，为使振动的衰减加快，而增大对振动的阻尼。增大阻尼常用机械或电磁的方法，如天平中的空气盒，电流计中的阻尼线圈等。

【阻尼因数】

阻尼振动中描述阻尼程度的一个物理量。或称“减缩量”。阻尼振动的振幅随时间衰减规律的公式是 $A=A_0e^{-\beta t}$ ，式中 t 为时间， e 为自然对数的底， A_0 为初始时刻的振幅， β 称为阻尼因数。阻尼因数愈小，振幅衰减愈慢；反之， β 愈大，则振幅衰减就愈快。若相邻两

振幅为 A_1 、 A_2 ，对应的时间为 t 与 $(t+T)$ ，则阻尼因数
$$= \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_0e^{-\beta t}}{A_0e^{-\beta(t+T)}}$$
 $= e^{\beta T}$ 。因为 $\ln e^{\beta T} = \beta T$ ，所以， βT 叫做“对数减缩〔量〕”，又叫“衰减常数”， T 是振动的周期。

【临界阻尼】

任何一个振动系统，当阻尼增加到一定程度时，物体的运动是非周期性的，物体振动连一次都不能完成，只是慢慢地回到平衡位置就停止了。当阻力使振动物体刚能不作周期性振动而又能最快地回到平衡位置的情况，称为“临界阻尼”，或中肯阻尼状态。如果阻尼再增大，系统则需要很长时间才能达到平衡位置，这样的运动叫过阻尼状态，系统如果所受的阻尼力较小，则要振动很多次，而振幅则在逐渐减小，最后才能达到平衡位置，这叫做“欠阻尼”状态。

【无阻尼振动】

机械振动按振幅的变化来区分，可分为无阻尼振动和阻尼振动。物体作无阻尼振动，并不一定指它不受阻力，而是指它在振动过程中保持振幅不变。无阻尼振动又可分为两种：一种是无阻尼自由振动，即振动物体只受回复力作用，不受任何阻力作用，不对外做功，系统无能量损失，这是一种理想情况，是“简谐振动”。另一种实际上是“受迫等幅振动”，即振动时系统从外界取得的能量，刚好补偿在振动过程中所损耗的能量，系统的能量、振动物体的振幅都保持不变。

【共振】

一个振动系统，当外加的策动力的频率与系统本身的固有频率很接近或相同时，系统受迫振动的振幅将趋于最大值，这种现象叫共振。

在强迫振动的情况下，当外力的圆频率 $\Omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta}$ ω_0 时，振幅B

有极大值 B_{\max} ，称为共振。 $B_{\max} = \frac{F_0 / m}{2\beta\Omega} = Q \frac{F_0}{K} = QA_0$ 。 $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ 上式中的

A_0 为受力 F_0 作用而达平衡时的最大位移，即静振幅，所以共振时的振幅较

静振幅大Q倍，Q为品质因数。 $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ 说明，振动的位相较外力位相落后

$\frac{\pi}{2}$ ，即外力与振动速度同位相。共振是受迫振动的一种特殊情况。从力的

角度看，要求周期性变化的策动力的方向跟振动物体的运动方向相同，凡是跟振动物体运动方向相反的力都会促使振动物体的振幅减小。策动力频率变化跟系统的固有频率越接近，使物体振幅的力作用次数就越多。当策动力的频率与系统的固有频率相等时，并且策动力的位相跟物体运动的位相同相时，策动力的每一次作用都将使物体的振幅增加而达到最大值。若从功能关系来说，就要求在任何时刻，周期性变化的策动力对振动系统做正功。在一个振动周期中，由于策动力的频率和系统的固有频率不同，因此策动力的方向和物体运动的方向有时一致，有时相反。当方向一致时，供给系统振动能量，对物体做正功；当方向相反时，使系统振动能量减少，而对物体做负功。只有在策动力频率跟振动系统的固有频率相同，且位相相同时，才有可能使其方向在整个周期中跟物体运动方向一致，从而达到在任何时刻做正功的效果。系统能量不断增加，振幅不断增大，直到策动力做功供给系统的能量等于克服摩擦阻力消耗的能量，振幅不再增大，即达到了最大的振幅。因为在物体作无阻尼自由振动时，外力的频率等于振动体的固有频率就会发生共振，由于实际的振动多少存在一些阻尼作用，策动力的频率要稍稍偏移振动体的固有频率才能发生共振，在这种情况下，只能说“接近固有频率”，而不说“等于固有频率”。

在许多情况下要利用共振现象，例如，收音机的调谐就是利用共振来接收某一频率的电台广播，又如弦乐器的琴身和琴筒，就是用来增强声音的共鸣器。但在不少情况下要防止共振的发生，例如，机器在运转中可能共振而降低精密。上世纪中叶，法国昂热市附近一座长102米的桥，因一队士兵在桥上齐步走的步伐周期与桥的固有周期相近，引起桥梁共振，振幅超过桥身的安全限度，而造成桥塌人亡事故（死亡226人）。

【策动力】

一般指外力而言。这里策动力可以是简谐力（即其大小随时间按正弦或余弦规律变化的力），如电动机转动时对机座产生的作用；也可以是非简谐力，如人们对秋千的推力。

【振动迭加原理】

当一个振动系统受两个或两个以上简谐强迫力作用时，振动系统的稳态响应就是在各简谐强迫力作用下系统的稳态响应的合成，称为“振动迭加原理”。不同频率的谐振动迭加（合成）后，不再是谐振动，称为非谐振动成振动。根据这一原理可解决两个或多个简谐振动合成的问题，它不仅在振动中重要，在波的传播过程中也很重要。

【拍】

它是一种重要的振动合成的现象。两个振动方向相同的简谐振动，若它们的频率之和远大于它们的频率之差时，合振动的振幅发生周期性的、明显的变化，这种现象称为“拍”。设有两个频率相近，振幅相等，初位相相同和振动方向相同的谐振动，如下式

$$x_1 = A_0 \cos(\omega_1 t + \varphi)$$

$$x_2 = A_0 \cos(\omega_2 t + \varphi)$$

它们叠加的结果是

$$x = x_1 + x_2 = 2A_0 \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t + \varphi\right)$$

合振动不是简谐的，因为会振幅

$$A = 2A_0 \cos\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$$

是周期性变化的，振幅或能量的周期性变化称为拍。因振幅（正值）的周期为 $\frac{2\pi}{\omega_1 - \omega_2}$ ，故拍的频率

$$\nu = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} = \nu_1 - \nu_2$$

为两振动之差。若两个频率相差不多，拍的频率便较小。当两个频率相差很小的音叉同时振动时，声音强度有节奏的时强时弱现象就是声拍，利用这个现象可以校准乐器的频率或进行声频的测量。在声学中，拍曾称为拍音、升沉和念。

【拍频】

同向进行之波列频率接近时，其干涉作用形成定时强弱的规律。它每秒间的拍数称为“拍频”，即为二波频率之差。若使一发声体每秒之振动数为 m ，另一发声体每秒之振动数为 n ，而 m 较 n 大，此两声

波相合时，一秒钟所闻之音数 x ，则闻一次音所需之时间为 $\frac{1}{x}$ 秒，在此时

间内二发音体各振动 $\frac{m}{x}$ 、 $\frac{n}{x}$ 次，且此时间内振动数大的发音体多振动一次，

故得

$$\frac{m}{x} = \frac{n}{x} + 1$$

$$x = m - n$$

例如两个音叉的频率，一为 251，一为 250，当同时敲两音叉时所合成之声波，其拍频为 1。

【波】

也称波动。从平衡位置发生的任何扰动，在介质中传播的过程叫做“波”或“波动”。波动是能量传递的一种形式。

波有多种形式，最常见的是机械波（如水波、声波等）和电磁波（如光波）。机械波以实物（固体、液体或气体等）为传波媒质，电磁波是场传播的一种形式。在力学中所提到的波都是机械波。因此波是一种机械运动的形式。形成波必须有两个条件：振源及弹性媒质。只有在弹性媒质中，某个质点的振动才能带动与其相邻的质点运动。波动过程中的媒质质点只在平衡位置附近振动，而并不沿着振动传播的方向迁移。波传递的是能量，原来不动的质点，在波动所及时，发生了振动，获得了能量。实际上可以认为，传播的弹性媒质的各个质点间是以弹性力互相联系着的。这样，如果媒质中有一个质点 A，因受外界扰动而离开平衡位置时，A 点周围的质点，对 A 将产生弹性力，使 A 回到平衡位置，并在平衡位置附近作振动。与此同时，A 点周围的质点也受到 A 的弹性力，它们也离开各自的平衡位置振动起来。所以，媒质中一个质点的振动会引起邻近质点的振动，而邻近质点的振动又引起较远质点的振动。从上述情况来看，波在媒质中所表现的运动状态，其特点是相邻质点的振动位相依次落后，而且是振动位相的传播过程，而所有质点都仍在各自的平衡位置附近振动。

【波源】

即振源。凡能引起波动的作机械振动的物体称“波源”。

【横波】

质点的振动方向与波的传播方向垂直，这样的波称为“横波”。横波在传播过程中，凡是波传到的地方，每个质点都在自己的平衡位置附近振动。由于波以有限的速度向前传播，所以后开始振动的质点比先开始振动的质点在步调上要落后一段时间，即存在一个位相差。横波的传播，在外表上形成一种“波浪起伏，即形成波峰和波谷，传播的只是振动状态，媒质的质点并不随波前进。实质上，横波的传播是由于媒质内部发生剪切变形（即是媒质各层之间发生平行于这些层的粗对移动）并产生使体元恢复原状的剪切弹性力而实现的。否则一个体元的振动，不会牵动附近体元也动起来，开平衡位置的体元，也不会弹性力的作用下回到平衡位置。固体有切变弹性，所以在固体中能传播横波，液体和气体没有切变弹性，因此只能传播纵波，而不能传播横波。液体表面形成的水波是由于重力和表面张力作用而形成的，表面每个质点振动的方向又不和波的传播方向保持垂直，严格说，在水表面的水波并不属于横波的范畴，因为水波与地震波都是既有横波又有纵波的复杂类型的机械波。为简便起见，有的书中仍将水波列为横波。

【纵波】

亦称“疏密波”。振动方向与波的传播方向一致的波称为纵波。纵波的传播过程是沿着波前进的方向出现疏、密不同的部分。实质上，纵波的传播是由于媒质中各体元发生压缩和拉伸的变形，并产生使体元恢复原状的纵向弹性力而实现的。因此纵波只能在拉伸压缩的弹性的媒质中传播，一般的固体、液体、气体都具有拉伸和压缩弹性，所以它们都能传递纵波。声波在空气中传播时，由于空气微粒的振动方向与波的传播方向一致所以是纵波。

【水面波】

它既不是纵波，也不是横波。它是因重力以及表面张力的作用，在水表面上传播的波。在其波动过程，水的质点运动较为复杂。如果水表面上某一质点由于外力作用而下降，形成水窝。在重力和表面张力的作用下，周围的质点开始向下降处流动，填充水窝的凹部，并在其四周形成圆形凹槽。在这凹槽外沿上的水的质点，继续向低处汇流，使圆槽直径增大。在圆槽里面的水的质点，将向上“浮出”而形成凸峰。当这部分质点再次下降时，凸峰将以圆圈状向外传播开去，形成了水面波。在下降时水的质点除了向下运动外，还向波源方向运动；而在上升时它们除向上运动外，还向波源的反方向运动（即背向波源方向）。随着水的质点在其平衡位置附近做周期性的运动，水面波逐渐向外传播。

【弹性波】

弹性介质中物质粒子间有弹性相互作用，当某处物质粒子离开平衡位置，即发生应变时，该粒子在弹性力的作用下发生振动，同时又引起周围粒子的应变和振动，这样形成的振动在弹性介质中的传播过程称为“弹性波”。在液体和气体内部只能由压缩和膨胀而引起应力，所以液体和气体只能传递纵波。而固体内部能产生切应力，所以固体既能传播横波也能传播纵波。

【波长】

沿着波的传播方向，两个相邻的同相位质点间的距离叫做“波长”。它是指波动媒质中，任意两个相位差为 2π 的质点之间的距离。例如，纵波中，两个相邻疏部中央间的距离或两个相邻密部中央间的距离也都等于波长。在横波中，两个波谷间的距离或两个波峰间的距离也都等于波长。由波速、波长的定义可知：在质点振动的一个周期内，振动状态传播的距离恰是一个波长，所以 $\lambda = v/f$ ，或 $\lambda = vT$ 由上式可以看出，同一频率的波，在不同媒质中的波速是不同的，因而波长也就不同。式中 λ 表示波长。波长、波速和波源振动频率，称为波的三要素。

【波速】

波传播的速变。波速只决定于介质本身的惯性和弹性而与波源的振动频率无关。例如，在固体介质中，横波和纵波的传播速度分别为

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{横波}) \quad v = \sqrt{\frac{r}{\rho}} \quad (\text{纵波})$$

式中 G 和 r 分别为介质的剪切弹性模量和杨氏弹性模量， ρ 为介质的密度。在气体和液体介质中纵波的传播速度

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

式中 K 为介质的体积弹性模量， ρ 为介质的密度。对于单色波来说，波速等于相速度，其数值等于波长 λ 和波源振动频率 f 的乘积，即

$$v = \lambda f。$$

波动存在三种速度，在物理意义上却有明显的区别。

1. 质点速度：介质的质点在其平衡位置附近作简谐振动的速度。

2. 波速或相速度：等相位面（如波峰或波谷）在介质中传播的速度。在中学物理课中讲的波速就是相速度。

3. 群速度：即波群传播能量的速度。由一系列波长和频率不同的分波叠加而成的合成波。若各个分波在介质中传播时的相速度各不相同，则群波的波形将随时间变化，其振幅最大部分的运动速度称为群波的群速度。

假使两个分波的相速度不同，即 $\frac{\omega_1}{K_1} \neq \frac{\omega_2}{K_2}$ ，则群波的群速度 $v_g =$

$\frac{\omega_1 - \omega_2}{K_1 - K_2} = \frac{\Delta\omega}{\Delta K}$ 。若群波所包含的一系列分波的频率几乎相等，则群波的群

速度 $v_g = \frac{d\omega}{dK}$ 。

【波峰】

在横波中，某一时刻波到达的各点都处于不同的振动状态，当处于波形最突起的地方，即此时那一点的纵向位移具有正向最大值的位置称为“波峰”。例如水波突起的最高处。

【波谷】

在横波中，某一时刻波到达的各点都处于不同的振动状态，当处于波形最凹下的地方，即此时那一点的纵向位移具有反向最大值的位置称为“波谷”。例如水波凹下的最低处。

【行波】

从波源向外传播的波称“行波”。又称“前进波”。除驻波外，一般的波都是行波。

【波形】

波形是指位移对于质点坐标的曲线形状。在波的传播过程中，由反映波线上一系列介质质点在某一时刻的位移值的点所连接而成的曲线图形。纵波的波形只是间接地反映疏部和密部相间的图形；横波的波形是波峰和波谷相间的图形。行波的波形是以波速沿着波的传播方向行进的；而驻波的波形永不前进，而是在原地变化，已知其时刻的波形为 $f(x)$ ，则任一时刻的波形必为 $Kf(x)$ 、其中 K 为与 x 无关的常数。

【波的迭加原理】

反映波动属性的基本原理之一，它是从大量实验事实中总结出来的。由不同波源产生的几列波在同一介质中传播时，每列波都会保持各自的特性（频率、波长、振幅、振动方向和传播方向等），每一列波并不因其他波的存在而改变其传播规律。在几列波相遇的区域内，任一介质质点的振动等于各列波单独传播时在该位置所引起的振动之和，这叫做“波的迭加原理”。例如，乐队合奏或几个人同时谈话时，不因声波在空间互相交迭而改变原来声音的特色，我们仍能清楚地辨别出各种乐器或每个人的声音来。又如将两个小石块同时投入静水池中，它们将各以投入点为圆心，激起一系列圆形波纹。这两列波在水面传播时而相遇，交叉而过，每列波的波前并不因遇到另一列波面而改变形状，原来圆形波前仍保持其圆形波前，好像在传播的过程中并没有遇到其它波一样，每列波的特性，也不会因其它波的存在而改变。其它如光波、声波也同样具有这种独立传播的特性。

【波的衍射】

亦称波的“绕射”、是波的重要特性之一。是指波在传播过程中，遇到障碍物或缝隙时传播方向发生变化的现象。水波、声波、光波都能发生衍射现象。障碍物或缝隙的宽度越小，而波长越大，则衍射现象就越明显。波绕过障碍物或通过小孔绕到障碍物的背后。这种波能绕过障碍物继续传播的现象，叫“波的衍射”。室内发出声波可以绕过门，窗而到达室外的各角落。如果障碍物或缝隙的宽度远远超过波长时，波的衍射现象就不明显。波的衍射现象可用惠更斯原理来解释。

【波的干涉】

由两个或两个以上的波源发出的具有相同频率，相同振动方向和恒定的相位差的波在空间迭加时，在迭加区的不同地方振动加强或减弱的现象，称为“波的干涉”。符合上列条件的波源叫做“相干波源”，它们发出的波叫做“相干波”。这是波的迭加中最简单的情况。

二相干波迭加后，在迭加区内每一位置有确定的振幅。在有的位置上，振幅等于二波分别引起的振动的振幅之和，这些位置的合振动最强。称为“相长干涉”；而有些位置的振幅等于二波分别引起的振动的振幅之差，这些位置上的合振动最弱，称为相消干涉。它是波的一个重要特性。在日常生活中最常见的是水波的干涉，利用电磁波的干涉，可作定向发射天线，利用光的干涉，可精确地进行长度测量等。

【驻波】

在同一媒质里，两个频率相同、振幅相等、振动方向相同、沿相反方向传播的行波迭加而成的波叫“驻波”。它是局限于某一区域而不向外传播的波动，获得驻波的方法是让前进波与反射波迭加而成。这是干涉的一种特例。两列波方程分别是

$$y_1 = A \cos \omega(t - \frac{x}{u}) \quad y_2 = A \cos \omega(t + \frac{x}{u})$$

$$\text{迭加后} \quad y = [2A \cos 2 \frac{x}{\lambda}] \cos \omega t$$

驻波的特点。各点均作简谐振动，但其振幅随 x 作周期性的变化，有些点的振幅增大，有些点的振幅减小。 $|\cos 2 \frac{x}{\lambda}|$ 的那些点振幅最大，为 $2A$ ，它们位于 $x = \pm K \frac{\lambda}{2}$ $K = 0, 1, 2$ 这些点称为波腹，相邻波腹间的距离为 $\frac{\lambda}{2}$ 。

$|\cos 2 \frac{x}{\lambda}| = 0$ 的那些点始终不动，它们位于

$$x = \pm (2K + 1) \frac{\lambda}{4} \quad K = 0, 1, 2, \dots$$

这些点称为波节，相邻间的距离也是 $\frac{\lambda}{2}$ 。当 $\cos \omega t = 1$ 时，两波节之间

所有的点同时达到各自的最大位移； $\cos \omega t = 0$ 时，所有的点同时通过平衡位置，即相邻波节间的点振动相位相同，而波节两侧的点振动相位相反。当各点同时达到各自的最大位移时，速度均为零因而动能为零，势能即总能，此时主要集中在波节附近，因为此时波节处的形变最大。当各点同时通过平衡位置时，势能均为零，动能即总能，此时主要集中在波腹附近，因为波腹附近点的速度最大。由此可见，驻波并不是能量的传播过程，而是在波腹与波节间动能与势能的相互转换。驻波与行波不同，它无所谓传播的方向，亦不能传播任何能量，实质上它是介质的一种特殊的振动状态。

【波节】

在驻波系统中振幅为零的点。详见驻波。

【波腹】

在驻波系统中振幅最大的点，位于两相邻的波节之间。详见驻波。

【冲击波】

又称激波。由非线性振动引起的，并以超音速传播的表示波的特性的物理量，几乎是不连续的声波。例如爆炸，在它的波前后面将出现介质质点的密度、速度和温度的急剧变化，因而产生高压和高温。

【波面】

也称波阵面。从波源发出的振动，在传播过程中，在媒质中振动相位相同的点组成的面称为“波面”。例如，以石投入静水中，水波的波面是许多同心圆。最前面的一个波面称为波前。波前上点的位相与波源的初位相相同。与波面垂直、且指向波的传播方向的线称为波线。波面、波前、波线是对波的运动状态的描述，对波的理解很重要。

【波前】
详见波面。

【波线】
详见波面。

【平面波】

波面是平面的波。平面波的波线是一束与波面垂直的平行线，它是一个理想模型，如波源是由振动状态相同的点组成的平面，在距波源不太远处可将波当成平面波；距波源足够远处的球面波亦可看作是平面波。例如射到地面的太阳光波就可以认为是平面波。

【球面波】

波面是同心球面的波。其波线是自球心引出的一族射线。球心是点波源。真正的点波源是不存在的，因而球面波是一种理想模型。例如，从点光源发出的光波，在均匀的各向同性媒质中传播时，就是一种球面波。

【表面波】通常在液体或气体之间的表面上传播的机械波。由于各物质粒子振动的振幅随粒子在表面下的深度的增加而迅速减小，因此这种波只存在于表面附近，由于表面张力而引起振幅很小的表面波，叫张力波。如水面上的微小波纹，在液面由于重力作用而产生的表面波称重力波。如水波等。

【波的反射】

波由一种媒质达到与另一种媒质的分界面时，返回原媒质的现象。例如声波遇障碍物时的反射，它遵从反射定律。在同类媒质中由于媒质不均匀亦会使波返回到原来密度的介质中，即产生反射。

【波的折射】

波在传播过程中，由一种媒质进入另一种媒质时，传播方向发生偏折的现象，称波的折射。在同类媒质中，由于媒质本身不均匀，亦会使波的传播方向改变。此种现象也叫波的折射。它也遵从波的折射定律。

【波的图象】

在平面直角坐标系中，用横坐标表示在波的传播方向上各个质点的平衡位置与参考原点的距离，用纵坐标表示某一时刻各个质点偏离平衡位置的位移，连接各位移矢量的末端所得到的曲线，就叫“波的图象”也称为波形。利用波的图象，可以形象地反映出通过机械波的媒质区域中，某一时刻每个质点偏离平衡位置的位移对空间的分布规律。由简谐振动在媒质中传播所形成的波——简谐波，在任何时刻的图象都是余弦（或正弦）曲线，而媒质质点的振动图象也是余弦（或正弦）曲线。这两条曲线变化规律相同，但它们的物理意义不同。振动图象的横坐标表示时间，纵坐标表示某一质点在各个时刻的位移；波的图象的横坐标是质点的位置，而纵坐标表示的是某一时刻各个质点的位移。在振动图象中，相邻两个最大值之间的间隔等于周期 T 。在波的图象中，相邻两个最大值之间的距离等于波长 λ 。振动曲线是跟踪一个质点标记出它的位移随时间变化的情况，就好象是给该质点拍的“电影”。而波形曲线则是记录了某时刻波线上各点相对平衡位置的位移情况，就好象给波线上全体质点照的一张“像片”。见图 1—31 和图 1—32 所示。

【声学】

物理学的一个分支，是研究声波的产生、传播、接收和作用等问题的学科。根据研究的方法、对象和频率范围的不同，它与许多其它学科交叉在一起，形成了很多独特的边缘学科，例如，大气声学、水声学、电声学、生物声学、心理声学、语言声学、建筑声学、环境声学、几何声学、物理声学、生理声学、分子声学、声能学、超声学、次声学、微观声学、音乐声学、振动与波动声学、噪声控制学等部分。随着近代工业发展起来的声学，是古典声学、电子技术和各种工业应用相结合的产物，它还在随着工业的发展而继续发展。

【音】

即“律音”。具有单一基频的声音。纯律音（或纯音）具有近似于单一的谐振波形。这种律音可由音叉产生，乐器则产生复杂的律音，它可以分解成一个基频以及一些较高频率的泛音。参见音品。

【声源】

一个向周围媒质辐射声波的振动系统叫“声源”。例如，二胡、小提琴等弦乐器是靠弦的振动发声；笛子等管乐器是靠空气柱的振动发声；锣、鼓等膜乐器是靠板或膜的振动发声；唱歌或说话是靠咽喉声带的振动发声。任何发声的物体都在振动着，所以把各种振动着的发声物体，叫做声源。固体、液体、气体都能振动发声，都可视为声源。

【声波】

弹性媒质中，各质点振动的传播过程称为“声波”。它是一种机械波。起源于发声体的振动频率在20赫兹与20000赫兹之间的声波能引起人的听觉，故又称可听声波，频率在 10^{-4} ~20赫兹的机械波称为次声波，频率在 2×10^4 ~ 2×10^8 赫兹的机械波称为超声波。次声波和超声波一般不能引起人的听觉。从物理的观点来看，频率在20~20000赫兹的声振动与这个频率外的声振动没有本质上的不同。因此，广义的声波包含次声波与超声波在内。是否能引起人的听觉，不完全由机械波的频率决定，还与声强有关。声波在固体中可以纵波和横波两种形式传播，但在液体和气体中，则只能以纵波的形式传播。

【声速】

又称音速。是指声音在介质中的传播速度。它与介质的密度、弹性系数以及介质所处的状态有关。在固体中声波可以纵波和横波两种形式传播，其纵波的传播速度

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E 是固体的弹性模量， ρ 是它的密度。

在气体和液体中声波是纵波，其传播速度

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

K 是介质的体积弹性模量。

声音在空气中的传播速度随温度的升高而增大，它与绝对温度 T 的平方根成正比，与分子量 μ 的平方根成反比，而与压强无关，即 $v = \sqrt{\frac{rRT}{\mu}}$ ，其中 r 为定压比热 C_p 与定容比热 C_v 之比，R 为气体恒量。通常以下式表示

$$v_t = 331.45 + 0.61t$$

v_t 是 t 时空气中的声速，单位是米/秒，331.45 米/秒是 0 时空气中的声速。温度每升高 1℃，声速约增加 0.6 米/秒。

【声波的反射】

声源发出的声波,在传播过程中遇到障碍物时声波反射回来,谓之“声波的反射”。北京天坛公园的回音壁、山谷中的回声、雷鸣,以及建筑物内的交混回响都是声波反射现象所造成的不同情况。

【回声】

当声投射到距离声源有一段距离的大面积上时，声能的一部分被吸收，而另一部分声能要反射回来，如果听者听到由声源直接发来的声和由反射回来的声的时间间隔超过 $\frac{1}{10}$ 秒，他就能分辨出是两个声音，这种反射回来的声叫“回声”。如果声速已知，当测得声音从发出到反射回来的时间间隔，就能计算出反射面到声源之间的距离。利用这个道理，已设计成水声测位仪，用以测量海水的深度。回声是山谷中或大厅中常有的现象，夏天响雷轰轰不绝，也是雷声经天空密云层多次反射的回声。广义讲，凡有这种性质的其他信号，都属回声。例如，反射回来的超声波信号。利用回声制造的回声探测仪、水声定向器、超声波探伤仪等用声波探测鱼群、或用地面上爆炸声波的反射用以探测地下的油矿等。

【交混回响】

声源停止作用后，声音的延续现象称为“交混回响”。在各种建筑物中，声波要经过墙壁，天花板等多次反射和吸收。混响持续时间的长短和反射声波的材料对声波的吸收有关。如果每次只吸收很少一部分声能，则混响时间延长，使声音前后重迭辨别不清感到声音模糊。如果混响时间过短，虽然对声音分辨很清楚，但使人对声音听起来枯燥、单调，有沉寂枯燥的感觉，对音乐演奏的效果很不适宜影响对演奏的欣赏。一般适当的时间在 1~2 秒之间，使混响时间降低 60 分贝。各种物质的吸声性质用吸声系数来表示，吸声系数即吸收的声能在入射波能量中所占的百分比。软而多孔的物质吸声系数大，而坚硬平滑的物质吸声的系数就小。所以，交混回响时间的长短，是建筑物重要的声学性质。例如，北京首都剧场的交混回响时间，满座时是 1.36 秒，空座时是 3.3 秒。北京人民大会堂的交混回响时间，满座时是 1.6 秒，空座时是 3 秒。

【声波的干涉】

可用音叉演示声波的干涉。音叉的两个叉股是两个相同的波源，当音叉发声时，辐射出的两列波发生干涉，使音叉绕叉柄的纵轴旋转，或音叉不动，我们环绕正在发声的音叉走一周，会听到音叉的声音忽强忽弱。当音叉产生的两列波发生干涉时，会出现相间的加强区和减弱区。在加强区，空气的振动加强，我们听到的声音也强。在减弱区，空气的振动减弱，我们听到的声音也弱。声波的干涉是指在同一区域中，两列频率相同的持续声波相遇而叠加的现象，它只能在特定的条件下发生，不是常见的现象。

【声波的衍射】

声波在通常情况下，有的表现为直线传播，有的会发生明显的衍射。由于声波的波长约在 1.7 厘米到 17 米之间，它跟一般室内的障碍物以及门窗等物的尺寸相接近，当声波在传播过程中，碰到与声波波长差不多的障碍物，声波就能绕过障碍物传到它的背后去，即发生衍射现象。

【共鸣】

发声器件的频率如果与外来声音的频率相同时，则它将由于共振的作用而发声，这种声学中的共振现象称作“共鸣”。许多乐器应用振动体和空气柱的共鸣，来增强乐器发出的声音。使两个共鸣箱相对放置（箱口相对），然后敲击一共鸣箱上的音叉，过一段时间后，以手握住被敲击的音叉，使其停止振动，此时可听到另一个未被敲击的共鸣箱发出声音，从而证实共鸣的产生。由于二共鸣箱之一发生振动，附近空气向周围传播，另一共鸣箱和音叉即发生共鸣，故也能发出声音。当两个物体的固有频率相同，或其中一个是另一个作为声源的固有频率的整数倍时，就会发生共鸣。音叉下面所附的音匣是起着使声音加强的作用。弦乐器如小提琴、琵琶、二胡等的琴身或琴筒，也都具有音匣的作用。从前，所建戏台，往往在舞台下面放置几口大缸，同样是利用共鸣作用使台上演员和乐器发出的声音造成宏亮而圆润的效果。

【空气柱的共鸣】

向细玻璃管的一端吹气，或将振动着的音叉放在管口处，可以听到管内空气发出声音。这就是说，管内空气柱由于自身的振动而成为一个发声体。若将一玻璃管的下端与盛有水的漏斗用皮管连通。把一个频率为 ν 的振动着的音叉放近管口，上下移动漏斗，用以改变管中空气柱的长度。在某一长度处能听到声音最大，这是因为管中的空气柱在音叉产生的连续正弦声压的振动作用下，发生了受迫振动，当音叉振动频率恰好与空气柱的固有振动频率重合时，发生了共振。慢慢调节，使管内水平面继续下降，还可在其他几个适当的空气柱长度，听到声音的强度达到最大值。管内空气柱的这种由声波的作用而引起的共振现象叫做声的共鸣。空气柱的长度 L 与声波的波长 λ 有如下的关系：

$$L = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

又因为声源音叉的频率 ν 固定不变，而空气柱中的声速 v 又有确定值，所以由发生共振的特定波长 $\lambda = v/\nu$ 可得其共鸣频率。利用气柱共鸣可以方便地测定声波的波长，从而可推算出声速。

【音叉】

一种声学仪器，用钢制成形如字母 U，但是做得细而长，下端的柄插在一端开口的空木箱上，用以增加发音强度。音叉的振动频率一定，则其音调高低一定，且其振动为棒的振动，所发之声极清朗。故常用它作为测定音调的标准。用橡皮锤轻敲音叉之上端，则其两叉股左右振动而发声。又音叉音之高低，视其叉股之长短厚薄而定。股臂长而薄者振动缓而音低；股臂短而厚者振动急而音高。

音叉的振动通常不易产生泛振动，偶而产生泛振动，亦因棒之阻抗大而即时消减，因此音叉容易产生基振动。音叉振动时，亦有干涉的现象产生，其两叉股的振动，系同时向内或向外。若两叉股同时向内振动，其间 a 成稠密状，如图 1—33 所示，而叉股外侧 b 和 b 即成稀疏状，等到两叉股同时相背向外振动时，则中间变成稀疏，而 b 和 b 处变成稠密。因为音叉的两叉股振动的振幅和波长或频率均相等，故如图 1—33 中虚线所示位置，疏密相遇，产生干涉，则无声。这可将振动音叉，放在耳边，徐徐转动，而找到这样无声区域的位置。

音叉能在很长时间内保持其音的频率不变，振动的振幅和温度都不容易使频率改变。音叉的频率有高达每秒九万周者。通常音叉都用钢或弹性钢制成。因音叉尺寸不大，发声的输出很少传入空气中，又因其振动方法，只有极少量的纵波成分沿叉柄振动，故此振动系统的阻滞极少。用音叉木柄与共鸣器相连，可增加声音输出，且因共鸣器与音叉的泛音并不相同，故只有基音产生共鸣，音叉的用途很多，在调乐器时，音叉被用作音调标准。

【音调】

声音的高低叫做“音调”。音调的高低，主要取决于声波频率的高低。当声波的强度增加，亦会使同一频率的声波有音调较高之感。通常乐器所发出的声波均非单音或纯音，而有其波形的复杂性，故音调的高低，实际是由很多因素所决定。乐音与噪音的区别，在于乐音有一定的频率，而噪音的频率是经常在变化的，它使人们有快速音调变化之感。在音调上有基音与泛音之别，泛音即其振动频率为基音的整数倍，有第一泛音，第二泛音等等。在波动中，周期与频率成反比，所以泛音周期比主周期短，它们的比例也是整数倍。

男子发音，其频率约在 90 ~ 140Hz 之间，其音较低。妇女发音的频率约在 270 ~ 550Hz 之间，其音较高。人耳器官所能感受音波频率的范围因人而异，一般人的听觉范围由 50 ~ 15000Hz，听觉灵敏的可由 20 ~ 20000Hz。人类口腔发声大约是 100 ~ 8000Hz。各种乐器的频率范围是 40 ~ 14000Hz，扬声器的频率是 40 ~ 8000Hz。如声音由张紧的弦发出，则弦越细、越短、张的越紧，音调便越高；反之音调就低。

【响度】

又称音量。人耳感受到的声音强弱，它是人对声音大小的一个主观感觉量。响度的大小决定于声音接收处的波幅，就同一声源来说，波幅传播的愈远，响度愈小；当传播距离一定时，声源振幅愈大，响度愈大。响度的大小与声强密切相关，但响度随声强的变化不是简单的线性关系，而是接近于对数关系。当声音的频率、声波的波形改变时，人对响度大小的感觉也将发生变化。

【音品】

声音的品质叫音品，也称“音色”，是声音的属性之一。它由泛音的多少、泛音的频率和振幅所决定。不同的乐器在基本振动频率相同的情况下，仍然可以区分其各自的特色，就是因为它的音色不同。例如合奏的二胡、月琴、琵琶，由于音色不同，人们的听觉可以分辨各乐器名称。

【声音的三要素】

音色、音调、响度是声音的三个主要属性，故称它们是声音的三要素。

【基音】

在复音中，频率最低的声音叫做“基音”。乐音的音调是由基音的频率决定的。例如 100Hz 的钢琴声，除发出频率是 100Hz 的声音外，还同时发出许多较弱的不同频率的声音，100Hz 的纯音叫钢琴的基音。

【泛音】

频率为基音的整数倍或大于 1 的非整数的其余纯音称作“泛音”。等于基音频率整数倍之声音又称为谐音。作简谐振动的发声体，发出的是非常单纯的纯音，乐器发出的声音，一般由若干个频率和振幅都不同的纯音所组成的复音，其中频率最低的纯音称基音，还有频率是基音整数倍的泛音。乐音的音品就是由泛音的多少及其频率和振幅决定的。

【声压】

由于声波作用而产生的压强叫“声压”。声波在传播过程中，空气中任一点附近质点由于声波作用，时而疏松，时而紧密，因而压强也相应地忽强、忽弱变化。当空气中有声波传播时该点的压强与没有声音到达时的压强之差叫做该点的声压。声压的单位是牛顿/米²，又称帕。声压的大小和传声介质中质点在声波作用下振动速度、介质的密度以及声波的传播速度有关。如用 ρ 表示空气密度， μ 表示声速， v 是空气质点的振动速度，则声压 P 为

$$P = \rho v$$

树叶被微风吹动的响声声压约为 0.01 帕；在房中大声说话的声压约为 0.1 帕。

【声强】

声波传播的能流密度。即在单位时间内通过垂直于传播方向上单位面积的声音能量。由于声音的强弱与声源的振幅有关。若声源的振幅大，单位时间内传出去的能量就大，因而声波也就较强。声波在某点发出的声波，向外传播，在距波源 r 处的声强为

$$I = \frac{E}{4\pi r^2}$$

式中 E 是声源每秒钟发出的能量，声强 I 的单位是瓦/米²。声强与声音传播的距离有关，跟响度有关，但响度随声强的增加并不呈线性关系，两者是有区别的。声强是客观存在事实，它是声音强弱的物理量，不受人耳功能的影响。但响度却与人的感觉有关，当声波引起耳膜振动时又因人而异，对同一声强的声波反映不同，耳感灵敏者觉得响度大，而耳感差的就觉得响度小。对不同频率的声波，耳感亦不相同。凡能引起正常听觉的声波，对声强有一定范围的要求，对于每个给定的频率，要引起听觉，其声强也有两个极值。若根据正常听觉的实验结果，以频率为横坐标，以声强为纵坐标，将各种频率的声强上下限坐标连起来，低于下限的声强，不能引起听觉。凡超过上限的声强，使人耳有痛感。故上限曲线叫痛觉阈，下限曲线叫可闻阈，两曲线间的区域即为听觉范围。因此凡能引起人的听觉的声波，除对频率要求在 20 ~ 20000 赫兹外，还要求声强范围在 10^{-12} 瓦/米² ~ 1 瓦/米²。由此可见声强变化范围是很大的。

【声强级】

声强的量度。声强 I 与标准声强 I_0 之比的对数称作声强 I 的“声强级”，用 L 表示，即

$$L = \lg \frac{I}{I_0}$$

单位为贝尔，用 Bel 表示，这个单位在实用上太大，故常用贝尔的 1/10，即分贝（用 dB 表示）作为单位，所以声强级的表示式为

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB})$$

I_0 为声强的参考标准，国际上选定 $I_0=10^{-12}\text{W}/\text{m}^2$ ，即可闻阈的声强值。这样，最轻音 $10^{-12}\text{W}/\text{m}^2$ 的声强级就是 $10\lg \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 0$ ，用 dB 为单位，最轻声就是 0。通常在谈话时的声强级为 60 ~ 70dB。

【乐器】

演奏音乐、戏曲伴奏、电影中的音响效果等所用的器具。一般是按发音来分类，如管乐器：它的发声是靠空气柱的振动而取得效果，这类器具有，笙、管、笛、箫等；弦乐器，是靠弦的振动而发声，如，月琴、琵琶、提琴、二胡、马头琴等多种；打击乐器，是利用打击发声的，如鼓、锣、铃、钹、钗等。

【乐音】

凡由声源按周期性振动而有规则的声音，令人悦耳动听谓之乐音。它的波形图线是周期性的曲线。乐器按规律振动的才是乐音，否则即是噪音，刺耳难听。乐音的三要素是音调、响度和音品，它们各自反映乐音的特性。

【噪音】

它是由声源作无规则的，非周期性振动所产生，或是由不同强度和不同频率的声音无规律的组合在一起而形成的。例如，车辆的发动机、喇叭声，工地或工厂的各种机器的响声，婴儿啼哭以及喧哗声，凡是刺耳的声音都是噪音，亦称噪声。它对人们的生活、工作影响甚大。噪声使人烦恼、疲劳、紧张和分散注意力。影响人们的学习、工作、休息以及睡眠，严重时引起疾病（如耳聋、心脏病等）和事故。国际上规定 90dB 为听力保护的最高限度。噪声是目前污染环境的三大公害（污水、废气和噪声）之一，噪声没有污染物，又不会累积，它污染的面积大，其能量最后完全转化为热能而转移。因此，控制噪音是环境保护的一个极为重要的方面。

【超声波】

声波频率高于 20000Hz，超过一般正常人听觉所能接收到的频率上限，不能引起耳感的声波。其频率通常在 $2 \times 10^4 \sim 5 \times 10^8$ Hz 范围之间。它具有与声波一样的传播速度，因为超声波的频率高，波长短，所以它具有很多特性：由于它在液体和固体中的衰减比在空气中衰减小，因而穿透力大，超声波的定向性强，一般声波的波长长，在其传播过程中，极易发生衍射现象。而超声波的波长很短，就不易发生衍射现象，会象光波一样沿直线传播。当超声波遇到杂质会产生反射，若遇到界面时则将产生折射现象；超声波的功率很大，能量容易集中，对物质能产生强大作用。可用来焊接、切削、钻孔、清洗机件等；在工业上被用来探伤、测厚、测定弹性模量等无损检测，以及研究物质的微观结构等；在医学上可用作临床探测，如，用“B超”测肝、胆、脾、肾等病灶，或用来杀菌、治疗、诊断等；在航海、渔业方面，可用来导航、探测鱼群、测量海深等，超声波在各个领域都有广泛的应用。

【次声波】

又称亚声波。低于 20Hz，不能引起人的听觉的声波。它传播的速度和声波相同。在很多大自然的变化中，如地震、台风、海啸、火山爆发等过程都会有次声波发生。人为的次声源亦在核爆炸，喷气式机飞行时，以及行驶的车船，压缩机运转时发出。凡晕车、晕船，也都是受车、船运行时次声波的影响。利用次声波亦可监视和检测大气变化。

二、热学

【热学】

热学是物理学的一个重要部门。它专门研究热现象的规律及其应用。对热现象的研究：一是由观察和实验入手，总结出热现象规律，构成热现象的宏观理论，叫做热力学；二是从物质的微观结构出发（即以分子、原子的运动和它们之间的相互作用出发），应用统计方法去研究热现象的规律，构成热现象的微观理论，叫做统计物理学。它所研究的范围包括：测温学、量热学、热膨胀以及热传递等。若从广泛的涵义上，热学还包括其他有关热现象研究的热力学、分子物理学和热工学等分科。热力学和统计物理学研究对象是一致的，都是研究物体内部热运动的规律性以及热运动对物体性质的影响，但是研究的方法截然不同。热力学根据观察和实验所总结出来的热力学定律，以严密的逻辑推理来研究宏观物体的热性质，它不涉及物质的微观结构。统计物理学则以物质的微观结构出发，依据每个粒子所遵循的力学规律，用统计学的方法研究宏观物体的热性质。热力学对热现象给出可靠的依据，用以验证微观理论的正确性；统计物理学可深入探讨热现象的本质，使热力学的理论获得更深刻的意义。因此这两种方法，起到了相辅相成的作用，使热现象的研究更加深入。

【热力学】

它是研究热现象中物态转变和能量转换的学科。由观察和实验总结出热现象的规律，构成热现象的宏观理论。在 19 世纪中叶，焦耳等人通过多次实验，将热确定为能的一种形式，从而建立了热力学。热力学的研究是从大量经验中总结了自然界有关热现象的一些共同规律而得出热力学定律（即热力学第零、第一、第二和第三定律），用严密的逻辑推理来研究宏观物体的热性质及规律。热力学所研究的内容，在量子力学发展以前就有了一定的基础，故论及的系统及所持的理论均出于宏观的概念。主要探讨物质系统的平衡状态以及与平衡状态偏离不大的物理、化学过程，近年来，对非平衡状态过程的研究，亦取得一定的成果。热力学不涉及物质内部的微观结构，对热现象的本质亦不能作出解释，这是它的局限性，这些都需要统计物理学来补充、说明并加以发展。

【统计物理学】

是用统计方法研究由大量微观粒子组成的物质系统内部热运动规律及其对系统性质的影响。它是从物质的微观结构，即从分子、原子的运动和它们之间的相互作用出发，来研究热现象的规律，构成热现象的微观理论。统计物理学的前身是气体分子运动论。统计物理学是从宏观系统内部的微观结构出发，根据微观粒子所遵从的力学规律，用统计方法，将系统的宏观性质及其变化规律推导出来。所以，统计物理学与热力学两者之间可以相互补充。19世纪在经典力学基础上形成了“统计力学”。在研究气体处于平衡状态下的性质方面取得成就，对热力学已经获得的结果，能从微观角度更深刻地加以阐明。此后，随着研究范围的扩展而取得统计物理学的名称。20世纪以来，由于发现微观粒子具有量子性质之后，在量子力学基础上形成“量子统计物理”。

统计物理学对于许多涉及多体问题的学科都有重要应用。例如，在固体物理学、原子核物理学、物理化学和天体物理学等方面均取得巨大成就。在相变，超导性、超流性、等离子体等方面运用统计物理方法，于近年来亦有很大的进展。

【热】

热的概念来自人们对冷热的感觉。它是物质运动表现的形式之一。它的本质是大量的实物粒子（分子、原子等）永不停息的作无规则的运动。热与实物粒子的无规则运动的速度有关，无规则运动越强烈时，则该物体或系统就越热，温度也越高。热的另一种涵义是热量，热量是能量变化的一种量度。热量与温度的概念不同、不能混为一谈。

【热运动】

是物质的一种运动形式。宏观物体内部大量微观粒子（如分子、原子、电子等）永不停息的无规则运动称为热运动，它是物质的一种基本运动形式。一个物体或某一系统在热平衡时的温度，取决于他内部微观粒子热运动的状况，热运动越剧烈，它的温度就越高。

【热现象】

凡与温度有关的物质系统性质的变化，统称为“热现象”。例如，物体吸热后温度升高，体积膨胀；水受热后变成水蒸汽等，都是由于温度发生了变化，物体的性质也随着而变化，这说明热现象是大量分子无规则运动的表现。

【温度】

是表示物体冷热程度的物理量。由人的感觉来判断物体的冷热程度，是建立在主观感觉基础上的。为了能客观地反映物体的冷热程度。人们引入了温度的概念。从分子运动论的观点来看，温度是物体内部大量分子无规则热运动剧烈程度的体现。它是物体冷热的内在根据，热运动越剧烈，物体的温度就越高。某一物体温度升高或降低，就标志着物体

内部分子热运动平均动能的增加或减少。 $\frac{1}{2}m\overline{v^2}$ 称为物体内部分子的平均动

能。若用T表示物体的温度（绝对温标），就有 $\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT$ 。对于气体来说

$\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT$ 。式中k为玻尔兹曼常数，T为热力学温度， $\overline{v^2}$ 为平均速率。

气体温度的微观实质是分子平均动能的量度。由此看来，温度是含有统计意义的，它是大量气体分子热运动的集体表现。对于个别分子而言，它的动能可能大于平均动能，也可能小于平均动能。但在温度一定时，它是一个确定的值。对于个别分子，说它温度是多少是没有意义的。

【温标】

温度数值的表示方法叫做“温标”。为了定量地确定温度，对物体或系统温度给以具体的数量标志，各种各样温度计的数值都是由温标决定的。为量度物体或系统温度的高低对温度的零点和分度法所做的一种规定，是温度的单位制。建立一种温标，首先选取某种物质的某一随温度变化的属性，并规定测温属性随温度变化的关系；其次是选固定点，规定其温度数值；最后规定一种分度的方法。最早建立的温标是华氏温标、摄氏温标，这些温标统称为经验温标。它们的缺陷是温度读数与测温物质及测温属性有关，测同一热力学系统的温度，若使用摄氏温标标定的不同测温属性的温度计，其读数除固定点外，并不严格一致。经验温标现已废弃不用。为了统一温度的测量，温度的计量工作中采用理想气体温标为标准温标。规定温度与测温属性成正比关系，选水的三相点为固定点。在气体液化点以下及高温下理想气体温标不适用，由于氦的液化温度最低，因此氦温度计有它一定的优越性。国际单位制中采用的温标，是热力学温标。它的单位是开尔文，中文代号是开，国际代号是 K。

【摄氏温标】

是经验温标之一，亦称“百分温标”。温度符号为 t ，单位是摄氏度，国际代号是“ $^{\circ}\text{C}$ ”。摄氏温标是以在一大气压下，纯水的冰点定为 0°C 。在一大气压下，沸点作为 100°C ，两个标准点之间分为 100 等分，每等分代表 1°C 。在温度计上刻 100°C 的基准点时，并不是把温度计的水银泡（或其他液体）插在沸腾的水里，而是将温度计悬在蒸汽里。实验表明只有纯净的水在正常情况下沸腾时，沸水的温度才同上面蒸汽温度一样。若水中有了杂质，溶解了别的物质，沸点即将升高，也就是说，要在比纯净水的沸点更高的温度下才会沸腾。如水中含有杂质，当水沸腾时，悬挂在蒸汽里的温度计上凝结的却是纯净的水，因此它的水银柱的指示跟纯净水的沸点相同。在给温度计定沸点时，避免水不纯的影响，应用悬挂温度计的方法。

为了统一摄氏温标和热力学温标，1960 年国际计量大会对摄氏温标予以新的定义，规定它应由热力学温标导出，即

$$t = T - 273.15$$

用摄氏度表示的温度差，也可用“开”表示，但应注意，由上式所定义的摄氏温标的零点与纯水的冰点并不严格相等，沸点也不严格等于 100°C 。

华氏温度计的冰点为 32°F ，沸点为 212°F ，两者对应关系为 $\frac{100}{180} = \frac{5}{9}$ 。

【华氏温标】

是经验温标之一。在美国的日常生活中，多采用这种温标。规定在一大气压下水的冰点为 32 度，沸点为 212 度，两个标准点之间分为 180 等分，每等分代表 1 度。华氏温度用字母 °F 表示。它与摄氏温度两标准点间相对应关系为 $\frac{100}{180} = \frac{9}{5}$ 。摄氏温度(C)和华氏温度(F)之间的换算关系为

$$F = \frac{9}{5}C + 32, \text{ 或 } C = \frac{5}{9}(F - 32)。$$

摄氏温标与华氏温标的各种温度计，在玻璃管中根据不同的用途，装有不同的液体（如煤油、酒精或水银），由于液体膨胀与温度之间并不严格遵守线性关系，而且不同的液体和温度的非线性关系彼此也不一样，由于测温物质而影响温标的准确性，为此这些经验温标已在废弃之列。

【热力学温标】

亦称“开尔文温标”、“绝对温标”。它是建立在热力学第二定律基础上的一种和测温质无关的理想温标。它完全不依赖测温物质的性质。1927年第七届国际计量大会曾采用为基本的温标。1960年第十一届国际计量大会规定热力学温度以开尔文为单位，简称“开”，用K表示。根据定义，1开等于水的三相点的热力学温度的 $1/273.16$ 。由于水的三相点在摄氏温标上为 0.01 ，所以 $0 = 273.15\text{K}$ 。热力学温标的零点，即绝对零度，记为“OK”。热力学温标，按照国际规定是最基本的温标，它只是一种理想温标。理想气体温标由于在它所能确定的温度范围内等于热力学温标，所以往往用同一符号T代表这两种温标的温度。在理想气体温标可以实现的范围内，热力学温标可通过理想气体温标来实现。

【兰氏温标】

该温标是美国工程界使用的一种温标。开氏温标以水的三相点为 273.16K，兰氏温标以 273.16K 作为 491.688 ° R。它们都是从绝对零度起算，所以热力学温标又叫绝对温标。

华氏温度 t_F 与兰氏温度 T_R 的关系是

$$t_F = T_R - 459.67。$$

【国际实用温标】

从准确与实用出发，在 1927 年第七届国际计量大会上决定采用国际温标。由于科学技术不断地发展，工业生产上的需要，国际温标不断修改，目前所采用的国际实用温标，是 1968 年国际计量委员会对 1948 年国际实用温标（1960 年修正版）作了重要修改而建立的。1968 年国际实用温标选取的方法，是根据它所测定的温度可紧密接近热力学温度，而其差值应在目前测定准确度的极限之内。1968 年国际实用温标在国际实用开耳文温度和国际实用摄氏温度之间是用符号 T_{68} 和 t_{68} 来加以区分的。 T_{68} 和 t_{68} 之间的关系是： $t_{68}=T_{68}-273.15$ 。 T_{68} 和 t_{68} 的单位如在热力学温度 T 和摄氏温度 t 中一样仍为开尔文（符号 K）和摄氏度（符号 $^{\circ}\text{C}$ ）。常用的换算公式是 $T=t+273.15$ 。

【三相点】

亦称“三态点”。一般指各种稳定的纯物质处于固态、液态、气态三个相（态）平衡共存时的状态，叫做该物质的“三相点”。该点具有确定的温度和压强。

物态叫做“相”，通常物质是以三种形态存在。即固态、液态、气态，也可称为固相、液相、气相。物态的变比常叫做相变。或者说，在某一系统中，具有相同物理性质均匀的部分亦称为相。相与相间必有明显可分的界面。例如，食盐的水溶液是一相，若食盐浓度大，有食盐晶体，即成为两相。水和食油混合，是两个液相并存，而不能成为一个相。又如水、冰和汽三相共存时，其温度为 273.16K (0.01 °C)，压强为 6.106×10^2 帕。由于在三相点物质具有确定的温度，因此用它来作为确定温标的固定点比选汽点和冰点具有优越性，所以三相点这个固定温度适于作为温标的基点，现在都以水的三相点的温度作为确定温标的固定点。

几种物质三相点的数据

	温 度 (K)	压 强 (帕)
氢	13.84	7038.2
氘	18.63	17062.4
氦	24.57	43189.2
氮	63.18	12530.2
二氧化碳	216.55	517204
水	273.16	610.5

【理想气体温标】

即用任何一种气体，无论定容还是定压所建立的一种温标，在气体压强趋于零时的极限温标称为“理想气体温标”。定义式为 $T = \lim_{P \rightarrow 0} T(P) = \lim_{V \rightarrow 0} T(V)$ 。为统一温度的测量，在温度的计量工作中采用理想气体温标来实现热力学温标，测温属性是理想气体的压强或体积。规定温度与测温属性成正比关系， $T(P) = aP$ ，或 $T(V) = aV$ 。选水的三相点为固定点，规定水的三相点温度为 273.16K。饱和蒸气压为

610.5帕。因此可得 $T(P) = 273.16K \frac{P}{P_{tr}}$ ， $T(V) = 273.16 \frac{V}{V_{tr}}$ ， P_{tr} 、 V_{tr} 为测

温泡中气柱在水的三相点时的压强和体积。理想气体温标用气体温度计来实现，但读数与气体的个性无关。受气体共性限制，在气体液化点以下及高温下，理想气体温标不适用。由于氦的液化温度最低，且不易在金属(铂)中扩散，所以氦温度计，具有一定的优越条件。

【绝对零度】

绝对零度是根据理想气体所遵循的规律，用外推的方法得到的。当温度降低到 -273.15 时，气体的体积将减小到零。若用分子运动论来解释，理想气体分子的平均平动动能由温度 T 确定，则可将绝对零度与“理想气体分子停止运动时的温度” 等同看待。事实上一切实际气体在温度接近 -273.15 时，早已变成液态或固态，它的温度趋于一个极限值，这个极限值就称为绝对零度。绝对零对是温度的最低点，实际上永远也不会达到的。

【温度计】

是测定温度的仪器之统称。利用物质的某一物理属性随温度的变化来标志温度。根据使用目的的不同，已设计制造出多种温度计。其设计的依据：如利用固体、液体、气体受温度的影响而热胀冷缩的现象；在定容条件下，气体（或蒸气压强因不同温度而变化；热电效应的作用；电阻随温度的变化而变化；以及热辐射的影响等多种。一般说，任何物质的任一物理属性，只要它随温度的改变而发生单调的、显著的变化，都用来标志温度而制成温度计。

温度计的种类很多，如定容气体温度计、定压气体温度计、液体（水银、酒精、煤油）温度计、铂电阻温度计、温差电偶温度计、辐射高温计、光测高温计等多种类型。在我国气象上常将能自动记录温度变化的仪器称“温度计”。而对无自动记录装置的测温仪器称“温度表”。

【温度表】

俗称“寒暑表”。我国气象上将直接能读取数值而无自动记录装置的仪器，统称为温度表。其种类甚多，如干湿球温度表、最低温度表、最高温度表、地面温度表等。家庭使用的温度表，系常见的一种两端封闭内径均匀的毛细玻璃管。封闭的下端是圆球或圆柱形，内注水银、酒精或煤油。由于温度的变化，液柱升降而伸缩。根据液柱顶端所在位置，即可直接读出标度数值。

【水银温度计】

它是利用水银热胀、冷缩的性质而制造的一种测温计。高温可以测到300多摄氏度。由于熔点关系，测量-30 以下的低温时则不能使用。

制造水银温度计，首先应选取壁厚、孔细而内径均匀的玻璃管，经酸洗等过程使管内洁净。一端加热并吹成一个壁薄的球形或圆柱形的容器。水银是在某种特定温度下注入球形容器与玻管之中，此时水银的温度应比以后所测之最高温度还要高些。然后用火焰将灌满水银玻管的顶端封闭。当水银温度降低时开始收缩，于是在水银柱的上部管内出现一段真空。温度计的定标分度，首先要确定两个固定标点，作为永不改变的标记。将温度计液泡部分，插入在一标准大气压下正在熔解的冰块中，当水银柱下降至某一处稳定时，刻一记号作为下固定点。然后再将温度计的整体，置于一标准大气压下的水蒸气中，当水银柱上升停在某一位置不动时作一记号为上固定点。此二固定点间的距离，称为基本标距。此标距的长短与温度计的管径以及液泡的容积有关。将这段标距分成100等分，每一等分即为一度。在下固定点处标0°记号，在上固定点标100°记号。在熔点以下及沸点以上还可刻同样长的标度。刻在0°以下的标度，称为冷度，刻在0°以上称热度。由于温度计的基本标度被均分为100等分，故称百分温度计，又称摄氏温度计。除摄氏温标外也有采用华氏温标的，此温标以32°为冰点，以212°为沸点，其中等分180个刻度。华氏温度计用字母F表示。两种温标关系为

$$F = \frac{9}{5} C + 32, C = (F - 32) \frac{5}{9}。$$

水银温度计存在一定的缺点，例如，玻璃管的内径不可能完全相同，尽管每个刻度与每个刻度之间的距离相等，但由于管的内径不同，则每刻度之间水银液柱的体积并不相等，因而造成误差。当玻璃管内水银受热体积膨胀的同时，温度计的玻璃管及液泡部分的玻璃也受热膨胀。结果所读出的只不过是水银膨胀数值与玻璃膨胀数值之间的差数而已。由于水银的凝固点（-38.87 °C）与沸点（356.7 °C）的关系，故它的计量只能在这个范围之内，可以测高温。若用以测低温，则必受限制。

【酒精温度计】

构造与水银温度计相同，唯管内装有含红色染料的酒精。便于观察，此种温度计是用酒精为工作物质。因酒精的沸点（78℃）较低，凝固点在-117℃，因此多用酒精温度计作测低温物质。

【煤油温度计】

煤油温度计的工作物质是煤油，它的沸点一般高于 150°C ，凝固点低于 -30°C 。所以煤油温度计的量度范围约为 $-30^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。因酒精的沸点是 78°C ，凝固点是 -114°C 。酒精温度计能比煤油温度计测更低的温度，但高于 78°C 的温度它就不能测定了。从中学物理实验室经常要测量的温度范围来看，煤油温度计比酒精温度计更适用。当学生看到温度计的刻度在 100°C ，却不加分析地把温度计说成是酒精温度计，这是错误的（酒精温度达到 78°C 就已经沸腾了，岂能有 100°C 的温度刻度）。目前中学实验室里所用的装有红色工作物质的温度计，一般都是煤油温度计，而不是酒精温度计。

【体温计】

是测量人体温度用的温度计。亦称“体温表”或“医用温度计”。体温计的工作物质是水银。它的液泡容积比上面细管的容积大的多。泡里水银，由于受到体温的影响，产生微小的变化，水银体积的膨胀，使管内水银柱的长度发生明显的变化。人体温度的变化一般在 35 到 42 之间，所以体温计的刻度通常是 35 到 42 ，而且每度的范围又分成为 10 分，因此体温计可精确到 1/10 度。体温计的下部靠近液泡处的管颈是一个很狭窄的曲颈，在测体温时，液泡内的水银，受热体积膨胀，水银可由颈部分上升到管内某位置，当与体温达到热平衡时，水银柱恒定。当体温计离开人体后，外界气温较低，水银遇冷体积收缩，就在狭窄的曲颈部分断开，使已升入管内的部分水银退不回来，仍保持水银柱在与人体接触时所达到的高度。体温计是一种最高温度计，它可以记录这温度计所曾测定的最高温度。用后的体温计应“回表”，即拿着体温计的上部用力往下猛甩，可使已升入管内的水银，重新回到液泡里。其它温度计绝对不能甩动，这是体温计与其它液体温度计的一个主要区别。

【高温计】

测量由物体辐射形成的极高温（约 1000 以上）用的装置。它用在冶金工业和其它技术部门。由于待测温度的范围不同。高温计的类型亦有多种，如光测高温计，辐射高温计，电阻温度计及热电偶温度计等。

【低温计】

用来测量极低温度的温度计。管内盛无色酒精及一个哑铃状黑色细小的玻璃棒，用时平放，温度降低时酒精收缩，由表面张力作用使棒下降；温度升高时，此小棒即附着不动。若再作测定时，可将温度计倒立即可恢复原状。

【电阻温度计】

利用导体电阻随温度变化而改变的性质而制成的测温装置。通常是把纯铂细丝绕在云母或陶瓷架上，防止铂丝在冷却收缩时产生过度的应变。在某些特殊情况里，可将金属丝绕在待测温度的物质上，或装入被测物质中。在测极低温的范围时，亦可将碳质小电阻或渗有砷的锗晶体，封入充满氦气的管中。将铂丝线圈接入惠斯通电桥的一条臂，另一条臂用一可变电阻与两个假负载电阻，来抵偿测量线圈的导线的温度效应。电阻将按下列公式随温度发生变化：

$$R=R_0(1+a\Delta t)$$

式中 R 是 t 时的电阻， R_0 是 0°C 时的电阻， a 是常数。比较精确的式子是：

$$R=R_0(1+a\Delta t+b\Delta t^2)$$

式中 b 是第二个常数。电阻温度计在 $-260 \sim +1200^\circ\text{C}$ 范围内，可作极精确的测定。它适用范围广，远远超出水银温度计。可作测温的标准。

【温差电偶温度计】

利用温差电偶来测量温度的温度计。将两种不同金属导体的两端分别连接起来，构成一个闭合回路，一端加热，另一端冷却，则两个接触点之间由于温度不同，将产生电动势，导体中会有电流发生。因为这种温差电动势是两个接触点温度差的函数，所以利用这一特性制成温度计。若在温差电偶的回路里再接入一种或几种不同金属的导线，所接入的导线与接触点的温度都是均匀的，对原电动势并无影响，通过测量温差电动势来求被测的温度，这样就构成了温差电偶温度计。这种温度计测温范围很大。例如，铜和康铜构成的温差电偶的测温范围在 200 ~ 400 之间；铁和康铜则被使用在 200 ~ 1000 之间；由铂和铂铑合金（铑 10%）构成的温差电偶测温可达千摄氏度以上；铱和铱铑（铑 50%）可用在 2300 ；若用钨和钼（钼 25%）则可高达 2600 。

【光测高温计】

它是利用热源辐射的亮度和温度的关系来测量高温的仪器。该仪器主要部分包括：如图 2 - 1 所示，望远镜 M 管内装一红色玻璃滤色镜 F 及一个小灯泡 L。当光测高温计对着熔铁炉时。从望远镜里看到灯泡的黑色灯丝及后面炉火的强光。灯丝和电源 E 及可变电阻 R 串接，调节可变电阻 R 的阻值使适当的电流通过灯丝。直到灯丝的亮度与炉火的亮度相同时为止。如果事先在安培表 A 上将已知温度值刻好，则由安培表的读数就可以直接读出温度的数值。测温时，不需将仪器与被测体接触，因此光测高温计，可用来测很多金属的熔点以上的温度。

【全辐射高温计】

它是一种测量高温辐射源的仪器。将来自辐射源的辐射，经凹面镜会聚到一块涂黑的箔片上，此箔片贴在温差电偶上。根据测出的温差电动势，即可知道箔片的温度。于是从箔片上的温度反映，得知辐射源的温度。

【最高最低温度计】

即“ 息克斯温度计 ”。它能指出在测量时间内所达到的最高温度和最低温度，但不能指出确切的时间。管内分别装入水银和无色酒精，由于酒精与水银膨胀系数悬殊，当温度上升时，酒精膨胀，于是迫使水银挤向毛细管内而上升，上指针亦随之而上升，指示到达最高温度；当温度下降，则水银回流至另一管，将下指针推至最低温度处。

【贝克曼温度计】

它也是一种玻璃管里贮有水银的温度计。它的构造特点是在装水银的细管上部，有一个可调节水银量的空泡，通过调节水银的流入量，从而改变可测温度的高低，但整个管长只允许有几度范围的温度变化。它的用途是能比较准确地测量温度差。刻度可直接读出 0.01 ，可估计到 0.001 ，相当精确。这一温度计的整个测温范围仅有 5 或 6 ，所以它能测 5 或 6 的温度差。

【簧片温度计】

在水银面上放一短小的铁棒，当温度变化上升时，水银推棒前进；温度下降时，水银缩回，而铁棒则留在实际温度所到的最高刻度处。记录最高温度时，将此测温计横放。如计划再作测定时，可用磁铁将铁棒吸回，或将温度计直立即可。

【气体温度计】

利用一定质量的气体作为工作物质的温度计。用气体温度计来体现理想气体温标为标准温标。用气体温度计所测得的温度和热力学温度相吻合。气体温度计是在容器里装有氢或氮气，它们的性质可外推到理想气体。这种温度计有两种类型：定容气体温度计和定压气体温度计。定容气体温度计是气体的体积保持不变，压强随温度改变。定压气体温度计是气体的压强保持不变，体积随温度改变。

【定容气体温度计】

定容气体温度计，是保持气体体积不变，由气体的压强算出所测温度的一种装置。如图 2 - 2 所示。测温泡 B (材料由待测温度范围和所用的气体决定) 内贮有一定质量的气体 (一般装有氦，氢或氮气) ，经毛细管与水银压强计的左臂 M 相连。测量时，使测温泡与待测系统相接触，然后上下移动压强计的右臂 M' ，使左臂中的水银面在不同的温度下始终保持固定在同一位置 O 处，以保持气体的体积不变。当待测温度不同时，气体的压强不同，这个压强可由压强计两臂水银面的高度差 h 和右臂上端水银面所受的大气压强求得。这样，就可由压强随温度的改变来确定温度。在实际测量的过程中，还必须考虑到各种误差的影响，例如，测温泡和毛细管的体积随温度的改变，以及毛细管中那部分气体的温度与待测温度不一致等等。因此，对测量的结果还必须进行修正。

【定压气体温度计】

定压气体温度计是保持气体的压强不变，由气体的体积算出所测温度的装置。这种温度计的结构比定容气体温度计复杂，操作和修正工作也麻烦得多，除在高温范围外，在实际工作中一般都使用定容气体温度计。

【分子物理学】

物理学的一个学科。分子物理学从物质的微观结构的观点出发，研究气体、液体和固体的基本性质及其热现象的规律。如物体的体积，压强和温度之间的关系；物质的比热容；扩散、热传递、粘滞性等输运过程以及液体的表层性质，相平衡以及简单的相变过程。

【分子运动论】

分子运动论是从物质的微观结构出发来阐述热现象规律的理论，例如它阐明了气体的温度是分子平均平动动能大小的标志，大量气体分子对容器器壁的碰撞而产生对容器壁的压强。此外，它还初步揭示了气体的扩散，热传递和粘滞现象的本质，并解释了许多气体实验定律，分子运动论的成就促进了统计物理学的进一步发展。

【分子】

由化学键结合起来的单个原子或一组原子，它是物质中能独立存在并保持该物质一切化学性质的最小单位。例如，水分子是由两个氢原子和一个氧原子组成的(H_2O)。象氯化钠那样的离子化合物并无明显的分子结构。氯化钠一般写成 $NaCl$ ，但氯化钠晶体事实上是由氯离子(Cl^-)和钠离子(Na^+)的有规则排列。构成物质的单位是多种多样的，或是原子(如金属)或是离子(如盐类)或是分子(如有机物)。为了简化，在中学物理中，一般把构成物质的单位统称为分子。用油膜法可以粗略地测定分子的大小。分子直径的数量级是 10^{-10} 米。物理学中有各种不同的方法来测定分子的大小。用不同方法测出的分子的大小并不完全相同，但数量级是相符的。把分子看作小球，是分子运动论中对分子的简化模型，实际上，分子有它复杂的内部结构。

【阿伏伽德罗常数】

是化学和物理学中的重要常数之一。1 摩尔(简称摩,国际符号是 mol)的任何物质,其中含有的粒子数相同。称为“阿伏伽德罗常数”。用“N”表示

$$N=6.022045 \times 10^{23} \text{ 摩尔}^{-1}。$$

此常数系意大利化学家阿伏伽德罗发现,因而得名。知道阿伏伽德罗常数,可算出水分子的质量 $m_{\text{H}_2\text{O}}=3 \times 10^{-26}$ 千克。阿伏伽德罗常数是微观世界的一个重要常数,用分子运动论定量地研究热现象时经常要用到它,它是联系宏观世界和微观世界的桥梁。这一常数将摩尔质量或摩尔体积这种宏观物理量跟分子质量或分子大小这种微观物理量联系起来。因此阿伏伽德罗常数相当重要。上述为其精确值,通常可取作 $N=6.02 \times 10^{23} \text{ 摩}^{-1}$ 。

【阿伏伽德罗定律】

又称“阿伏伽德罗假说”。由压强公式和气体分子的平均平动动能与温度的关系，将得到气体压强的另一表达式：

$$P=nKT$$

这一公式表明，在相同的温度 T 和相同的压强 P 下，任何气体在相同的体积内所包含的分子数都相等。这一结论叫做“阿伏伽德罗定律”。如在标准状态（大气压值为标准大气压，温度 T 为 273.15K ）时，任何气体在 1米^3 中含有的分子数都等于 2.6876×10^{25} 个/米³。这个数值就称为洛喜密脱常数。由于 1 摩尔的任何气体所含分子数都相等，所以阿伏伽德罗定律也可表述为：在相同的温度和相同的压强下，1 摩尔的任何气体所占有的体积都相同。这一定律仅对理想气体才严格正确。

【物态】

亦称“聚集态”。是物质分子集合的状态，是实物存在的形式，在通常条件下，物质有三种不同的聚集态：固态、液态和气态，即平常所说的物质三态。固态和液态，统称为凝聚态。它们在一定的条件下可以平衡共存，也可以相互转变。例如，在一个标准大气压，0 时，冰、水混合物可以平衡共存，当温度和压强变化时，该混合物可以完全变成水，或完全结成冰。除上述物质三态外，近年来我们还把“等离子体”称为物质的第四态，把存在于地球内部的超高压、高温状态的物质称为物质的第五态。此外还有超导态和超流态。

【固体】

凡具有一定体积和形态的物体称为“固体”，它是物质存在的基本状态之一。组成固体的分子之间的距离很小，分子之间的作用力很大，绝大多数分子只能在平衡位置附近作无规则振动，所以固体能保持一定的体积和形状。在受到不太大的外力作用时，其体积和形状改变很小。当撤去外力的作用，能恢复原状的物体称弹性体，不能完全恢复的称塑性体。构成固体的粒子可以是原子、离子或分子，这些粒子都有固定的平衡位置。但由于这些粒子的排列方式不同，固体又可分为两类，即晶体和非晶体。如果粒子的排列具有规则的几何形状，在空间是三维重复排列，这样的物质叫晶体，如金属、食盐、金刚石等。如果组成固体的粒子杂乱堆积，分布混乱，这样的物质叫非晶体。如玻璃、石蜡、沥青等。晶体有一定的熔点，而非晶体却没有固定的熔解温度。非晶体的熔解和凝固过程是随温度的改变而逐渐完成的。它的固态和液态之间没有明显的界限。

【液体】

液体的分子结构介于固体与气体之间，它有一定的体积，却没有一定的形状。液体的形状决定于容器的形状。在外力作用下，液体被压缩性小，不易改变其体积，但流动性较大。由于受重力的作用，液面呈水平面，即和重力相垂直的表面。从微观结构来看，液体分子之间的距离要比气体分子之间的距离小得多，所以液体分子彼此之间是受分子力约束的，在一般情况下分子不容易逃逸。液体分子一般只在平衡位置附近作无规则振动，在振动过程中各分子的能量将发生变化。当某些分子的能量大到一定程度时，将作相对的移动改变它的平衡位置，所以液体具有流动性。液体在任何温度下都能蒸发，若加热到沸点时迅速变为气体。若将液体冷却，则在凝固点凝结为固体（晶体）或逐渐失去流动性。

【气体】

是物质三种聚集状态之一。气体分子间的距离很大，分子间的相互作用力很小，彼此之间不能约束，所以气体分子的运动速度较快，因此它的体积和形状都随着容器而改变。气体分子都在作无规则的热运动，在它们之间没有发生碰撞（或碰撞器壁）之前，气体分子作匀速直线运动，只有在彼此之间发生碰撞时，才改变运动的方向和运动速度的大小。由于和器壁碰撞而产生压强，因此温度越高、分子运动越剧烈，压强就越大。又因为气体分子间的距离远远大于分子本身的体积，所以气体的密度较小，且很容易被压缩。任何气体都可以用降低温度或在临界温度以下压缩气体体积的方法使它变为液体。所以，对一定量的气体而言，它既没有一定的体积，也没有一定的形状，它总是充满盛它的容器。根据阿伏伽德罗定律，各种气体在相同的温度和压强下，在相同的体积里所包含的分子数都相同。

【晶体】

具有规则几何形状的固体。其内部结构中的原子、离子或分子都在空间呈有规则的三维重复排列而组成一定型式的晶格。这种排列称为晶体结构。晶体点阵是晶体粒子所在位置的点在空间的排列。相应地在外形上表现为一定形状的几何多面体，这是它的宏观特性。同一种晶体的外形不完全一样，但却有共同的特点。各相应晶面间的夹角恒定不变，这条规律称为晶面角守恒定律，它是晶体学中重要的定律之一，是鉴别各种矿石的依据。晶体的一个基本特性是各向异性，即在各个不同的方向上具有不同的物理性质，如力学性质（硬度、弹性模量等等）、热学性质（热膨胀系数、导热系数等等）、电学性质（介电常数、电阻率等等）光学性质（吸收系数、折射率等等）。例如，外力作用在云母的结晶薄片上，沿平行于薄片的平面很容易裂开，但在薄片上裂开则非易事。岩盐则容易裂成立方体。这种易于劈裂的平面称为解理面。在云母片上涂层薄石蜡，用烧热的钢针触云母片的反面，便会以接触点为中心，逐渐化成椭圆形，说明云母在不同方向上导热系数不同。晶体的热膨胀也具各向异性，如石墨加热时沿某些方向膨胀，沿另一些方向收缩。晶体的另一基本特点是有一定的熔点，不同的晶体有它不相同的熔点。且在熔解过程中温度保持不变。

对晶体微观结构的认识是随生产和科学的发展而逐渐深入的。1860年就有人设想晶体是由原子规则排列而成的，1912年劳埃用X射线衍射现象证实这一假设。现在已能用电子显微镜对晶体内部结构进行观察和照相，更有力地证明假想的正确性。

【非晶体】

指组成它的原子或离子不是作有规律排列的固态物质。如玻璃、松脂、沥青、橡胶、塑料、人造丝等都是非晶体。从本质上说，非晶体是粘滞性很大的液体。解理面的存在说明晶体在不同方向上具有不同的力学性质，非晶体破碎时因各向同性而没有解理面，例如，玻璃碎片的形状就是任意的。若在玻璃上涂一薄层石蜡，用烧热的钢针触及背面，则以触点为中心，将见到熔化的石蜡成圆形。这说明导热系数相同。非晶体没有固定的熔点，随着温度升高，物质首先变软，然后由稠逐渐变稀，成为流体。具有一定的熔点是一切晶体的宏观特性，也是晶体和非晶体的主要区别。

晶体和非晶体之间是可以转化的。许多物质存在的形式，可能是晶体，也可能是非晶体。将水晶熔化后使其冷却，即成非晶体的石英玻璃，在它转化过程需要一定的条件。

【各向同性】

亦称均质性。物理性质不随量度方向变化的特性。即沿物体不同方向所测得的性能，显示出同样的数值。如所有的气体、液体（液晶除外）以及非晶质物体都显示各向同性。例如，金属和岩石虽然没有规则的几何外形，各方向的物理性质也都相同，但因为它们是由许多晶粒构成的，实质上它们是晶体，也具有一定的熔点。由于晶粒在空间方位上排列是无规则的，所以金属的整体表现出各向同性。

【各向异性】

亦称非均质性。物理性质随量度的方向而变化的通性，称为各向异性。各向异性是晶体的重要特征之一。即在各个不同的方向上具有不同的物理性质，如力学、热学、电学、光学性质等。参见晶体条。

【多晶体】

由许多晶体（称为晶粒）构成的物体，称多晶体。一块晶体是由许多小的晶粒聚合起来组成的。每一晶粒又由许多原子构成。原子在每一晶粒中作有规则的整齐排列，各个晶粒中原子的排列方式都是相同的。但是在—块晶体中，各个晶粒的取向彼此不同，晶粒与晶粒之间并没有按照一定的规则排列。尽管每个晶粒内部原子排列很整齐，但由于—块晶体内部各个晶粒的排列不规则，总的来看是杂乱无章的，这样的多晶体不能用来制造晶体管。例如多晶硅可用来拉制单晶，称为单晶硅。掺有特定微量杂质的单晶硅，可制成大功率晶体管、整流器及太阳能电池等。

【单晶体】

简称“单晶”。单个晶体构成的物体。在单晶体中所有晶胞均呈相同的位向。单晶体具有各向异性。自然界存在的单晶，如金刚石的晶体等。亦可由人工将多晶体拉制成单晶体，如电子器件中所用的锗及硅的单晶体。

【解理面】

晶体中易于劈裂的平面称为“解理面”。凡显露在晶体外表的晶面往往是一些解理面。例如，云母结晶薄片，在外力作用下很容易沿平行于薄片的平面裂开，石膏也容易沿一定方向裂成薄片，岩盐则容易裂成立方体。解理面的存在，说明晶体在不同方向上具有不同的力学性质。非晶体破碎时因各向同性而没有解理面，例如，玻璃碎片形状就是完全任意的。

【结合力】

晶体中粒子之间存在着相互作用力，这种力称为“结合力”。这种力使粒子规则地聚集在一起形成空间点阵，使晶体具有弹性、具有确定的熔点和熔解热，决定晶体的热膨胀系数等等。因此结合力是决定晶体性质的一个主要因素。可从四种典型的结合力（离子键、共价键、范德瓦耳斯键和金属键）的本质和有关结合力的规律来进一步探讨。

【离子键】

将正、负离子结合在一起的静电力，称为“离子键”。由离子键的作用而组成的晶体，称为离子晶体。最典型的离子晶体是 NaCl。由于离子键的作用强，因此离子晶体具有高的熔点，低的挥发性和大的压缩模量。

【共价键】

因共有电子而产生的结合力称为“共价键”。例如氢分子就是氢原子靠共价键而形成的。完全由负电性元素组成晶体时，粒子之间的结合力就是共价键。由共价键的作用而组成的晶体称为原子晶体，例如，金刚石和金刚砂（SiC）为典型的原子晶体，由于共价键的作用强，所以原子晶体硬度大，熔点高、导电性差、挥发性慢。例如，硅、锗、碲这些半导体中的重要材料都是原子晶体。

【范德瓦尔斯键】

对原来就具有稳定电子结构的分子，例如，具有满壳层结构的惰性气体分子，或价电子已用于形成共价键的饱和分子，在低温下组成晶体时，粒子间有一定的吸引力，但这个吸引力是很微弱的。它们的结合，是由于分子间的范德瓦尔斯力的作用，称范德瓦尔斯结合，亦称分子性结合。由于这种结合的单元是分子，它们之间的范德瓦尔斯力，即分子力称为“范德瓦尔斯键”，或分子键。分子晶体的结合很弱，导致硬度低，熔点低，易于挥发，多为透明的绝缘体，这是分子晶体的特点。

【金属键】

正离子与自由电子的总体之间的作用力使各粒子结合在一起，这种结合力称为“金属键”。这种结合的特点是电子的“共有化”。在结合时，原来分属各自原子的价电子不再被束缚于其本身，而为所有“原子实”所共有。于是共有化电子形成的负电子云和浸在这个负电子云中的带正电的原子实之间出现库仑作用，原子越紧密，势能越低，从而把原子聚合在一起。由金属键的作用而组成的晶体叫金属晶体，简称金属。因此金属可以具有较高的熔点，高硬度和低挥发性，还具有导电、导热性能好和金属光泽，以及较大的范性。

【结合能】

分散的原子（离子或分子）在结合成稳定晶体的过程中，所释放出来的能量称为“结合能”。如以 E_N 表示组成晶体的 N 个原子在自由时的总能量， E_0 为晶体的总能量，则结合能 E_6 可表示为

$$E_6 = E_N - E_0$$

虽然四种化学键的性质不同，起源不同，但具有共同的特征即：排斥力和吸引力两部分。结合能也有排斥和吸引两部分，并与 r 有关。例如，在范德瓦尔斯键和离子键的情况下，整个晶体的相互作用能与气体分子间的势能相似，可写成

$$E_p = \frac{A_m}{r_m} - \frac{A_n}{r_n},$$

式中 $\frac{A_m}{r_m}$ 表示斥力所引起的相互作用能， $-\frac{A_n}{r_n}$ 表示引力所引起的相互作用

能， r 是两相邻粒子间的距离。由于排斥能随距离的变化比吸引能迅速，因而 $m > n$ 。 A_m 、 A_n 、 m 、 n 的大小由晶体的结构和作用力的性质所决定。

【分子力】

组成物体的分子间在距离相当近时所显示的相互作用力。这种相互作用在分子间距 $r < 10^{-10}$ 米时才显示出来。当分子间距 $r < 10^{-8}$ 米时，分子之间表现为斥力，而当分子间距处于 $10^{-8} \text{ 米} > r > 10^{-10} \text{ 米}$ 的范围内，分子之间又表现为引力。如图 2 - 3 所示。当 $r < r_0$ (r_0 约为 10^{-10} 米左右) 时，两分子之间的引力和斥力将随距离的缩小而迅速增大，引力比斥力增长慢，总的表现是斥力。当 $r > r_0$ 时，两分子间的斥力和引力都随距离的增大而减小，但引力减小得慢，总的表现出是一种引力。当 $r = r_0$ 时，两分子之间的引力和斥力相等，作用的合力为零。分子间的作用同时存在引力和斥力，由于这两个力随分子间距离变化的情况不同，所表现出来的合力有时为引力，有时为斥力，有时为零。分子力的本质相当复杂，它与分子的电性结构有密切关系。对于气体，在一般条件下，分子之间的距离较大，其分子力是微不足道的，可以忽略。但在低温、高压情况下，分子力不能忽略。固体和液体分子聚集的主要因素是分子力，使它们有一系列不同于气体的性质。此外，分子之间的作用力在不同的情况下表现的形式是不同的。有时表现为“内聚力”，有时表现为“附着力”。

【内聚力】

是在同种物质内部相邻各部分之间的相互吸引力，这种相互吸引力是同种物质分子之间存在分子力的表现。只有在各分子十分接近时（小于 10^{-6} 厘米）才显示出来。

内聚力能使物质聚集成液体或固体，特别是在与固体接触的液体附着层中，由于内聚力与附着力相对大小的不同，致使液体浸润固体或不浸润固体。

【附着力】

是在两种不同物质的接触处所发生的相互吸引力。这种相互吸引力是两种物质分子之间存在分子力的表现。只有在这两种物质的分子十分接近（小于 10^{-8} 米）时才显示出来。从微观角度来看固体表面总是“粗糙”的，所以两固体接触时很难显示附着力的作用。液体与固体则能密切接触，它们之间就容易显示附着力的作用。液体浸润固体的现象，就是附着力发生作用的结果。总之附着力和内聚力都来源于分子之间的作用力，但不能把分子之间的作用力称为附着力或内聚力，因附着力和内聚力是指物质各部分间的相互作用，并不是指某几个分子之间的相互作用。

【表面张力】

液体表面分子间的吸引力。即液体表面的分子有一种使其面积缩成最小的力，或称一种抵抗表面积扩张的力，此力称“表面张力”。液体表面是指液体与空气或其它液体相接触的自由面。若不指明，即可认为相对于空气而言。表面张力的大小与接触面的物质有密切关系。此外，表面张力还与温度有关，温度越高，表面张力越小。表面张力的方向总是与液面相切，与分界线相垂直。若在液面作一长为 L 的直线，将液面分成两部分，这两部分之间的相互牵引力为 F ，则表面张力 $F = \sigma L$ 。其中 σ 为液体表面张力系数。表面张力的单位为牛顿/米。由于表面张力的作用，液滴表面有收缩到最小的趋势，而使液滴成近似球形的状态。

【液体的表面层】

液体自由面以下厚度等于分子力作用半径的一层液体层，叫做“液体表面层”。从微观角度来看，液体表面并不是一个几何面，而是有一定厚度的薄层。由于表面层内的分子力作用，使分子都受到一个与液体自由面相垂直、方向指向液体内部的作用力。表面张力就是由表面层中应力的各向异性所引起的。

【表面张力系数】

促使液体表面收缩的力叫做表面张力。即液体表面相邻两部分之间，单位长度内互相牵引的力。如液面被长度为 L 的直线分成两部分，这两部分之间的相互拉力 F 是垂直于直线 L ，并与表面相切。则

$$= \frac{F}{L}$$

比例系数 就是液体的表面张力系数，它表示液体表面相邻两部分间单位长度的相互牵引力。

如果液体表面积增大 S ，液体表面自由能增加 E ，则表面张力系数等于增加单位表面积时，外力所需作的功，也可用下式表示

$$= \frac{\Delta E}{\Delta S}$$

这说明，表面张力系数 在数值上等于增加单位表面积时所增加的表面能，在等温条件下能转变为机械能的表面内能部分，在热力学中称为表面自由能。从能的角度看，表面张力系数 就是增加单位表面时所增加的表面自由能。液体表面张力系数的性质表现为：1. 液体不同表面张力系数不同。例如，密度小的，容易蒸发的液体表面张力系数小，如液氢和液氦；已熔化的金属表面张力系数则很大；2. 表面张力系数随温度的升高而减小，近似地为一线性关系；3. 表面张力系数的大小还与相邻物质的化学性质有关；4. 表面张力系数还与杂质有关，加入杂质可促使液体表面张力系数增大或减小。一般说来醇、酸、醛、酮等有机物质大都是表面活性物质，比水的表面张力系数小得多。例如，在钢液结晶时，加入少量的硼，就是为了促使液态金属加快结晶的速度。

【液体的表面能】

可详见表面张力系数词条。

【液体的附着层】

设液体分子的分子力作用半径为 r ，固体分子的分子力作用半径为 l ，当液体与固体接触时，在界面处液体一侧厚度等于 r （当 $r > l$ 时），或等于 l （当 $l > r$ 时）的一层液体层，叫做“液体的附着层。在附着层中的液体分子，是处于液体与固体两种物质分子的分子力相互作用下，于是在与固体接触处的液面将出出浸润、不浸润、弯月面以及毛细现象等。

【浸润现象】

亦称润湿现象。当液体与固体接触时，液体的附着层将沿固体表面延伸。当接触角为锐角时，液体润湿固体，若为零时，液体将展延到全部固体表面上，这种现象叫做“浸润现象”。如图 2-4a、b 所示。润湿现象的产生与液体和固体的性质有关。同一种液体，能润湿某些固体的表面，但对另外某些固体的表面就很难润湿。例如，水能润湿玻璃，但不能润湿石蜡。造成浸润现象的原因，可从能量的观点来说明润湿现象。如图 2-5 所示。A 为附着层中任一分子，在附着力大于内聚力的情况下，分子 A 所受的合力与附着层相垂直，指向固体，此时，分子在附着层内比在液体内部具有较小的势能，液体分子要尽量挤入附着层，结果使附着层扩展。附着层中的液体分子越多，系统的能量就越低，状态也就越稳定。因此引起了附着层沿固体表面延展而将固体润湿。

【不浸润现象】

亦称不润湿现象。当液体与固体接触时，液体的附着层将沿固体表面收缩。当接触角为钝角时，液体不润湿固体，若 $\theta = 180^\circ$ 时，液体完全不润湿固体。这种现象称为液体不浸润现象。如图 2—6a、b 所示。不润湿现象的产生与液体和固体性质有关。同一种液体，能润湿某些固体的表面，但不能润湿另一些固体的表面。例如，水银不能润湿玻璃，却能润湿干净的锌板、铜板、铁板。造成不浸润现象的原因。可从能量的观点来说明润湿现象。如图 2-7 所示。A 为附着层中任一分子，在内聚力大于附着力的情况下，分子 A 受到的合力 F 垂直于附着层指向液体内部。此时，若将一个分子从液体内部移到附着层，必须反抗合力 F 做功，结果将使附着层中势能增大。附着层中的液体分子越少，系统的能量就越低，状态就越稳定，因此附着层就有缩小的趋势，宏观上就表现出液体不被固体所吸附。当然液体就不能润湿固体了。

【接触角】

在液体与固体接触处，作液体表面的切线与固体表面的切线，这两条切线通过液体内部所成的角度称为“接触角”。决定接触角的因素，用图 2 - 8 来说明。虚线上方三角形的液块，在忽略重力的情况下，此液块将受到两部分力。一是固体给液块的力 A ，由于整个固体给任何一个分子的力都与固体表面垂直，故力 A 也与固体表面垂直，且指向固体内部。另一个力是虚线下边三角液块的力，这一部分决定于小液块底面处的应力。底面可分为三个区域：是附着层内部，是液体内部，是表面层内部。通过区域作用在小液块上的力是使液体沿固体表面延展的压力 C ；区域作用在液块上的力是张力 T ；区域作用在小液块上的力与 C 和 T 比较，可忽略不计。故小液块受力为 A 、 C 和 T 这三个力。由小液块的平衡条件得到

$$T \cos \theta = C,$$

$$T \sin \theta = A_0.$$

因 A 、 C 和 T 是决定液体和固体的性质，故对一定的液体和一定的固体，接触角具有完全确定的值，当 $C > 0$ 时， $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ，此时液体浸润固体； $C = T$ 时， $\theta = 0$ ，此时液体完全浸润固体； $C > T$ 时，液块不能保持平衡， θ 也为零； $C < 0$ 时， $\theta > \frac{\pi}{2}$ ，此时液体不浸润固体； $C = -T$ 时， $\theta = \pi$ ，这时液体完全浸润固体，最后 $C < -T$ 时，液块不能保持平衡， θ 也为 π 。

【弯月面】

由于液体对固体浸润或不浸润的作用，使液体在圆柱形的管子里，呈现不同的液面。凡不浸润固体的液体表面呈凸状。例如水银装在玻璃管内，液面即成凸状，而浸润体的液体表面则成凹状，例如，水装在玻璃管内其液面即成凹面状态。这些弯曲的液面，统称为弯月面。

【布朗运动】

悬浮在液体或气体中的微粒所作的永不停息的无规则运动，叫做布朗运动。作布朗运动的微粒（直径约为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 厘米）称为布朗微粒。布朗运动是英国植物学家布朗于 1827 年观察悬浮在溶液中花粉运动时发现的。这些小的颗粒，为液体的分子所包围，由于液体分子的热运动，小颗粒受到来自各个方向液体分子的碰撞，布朗粒子受到不平衡的冲撞，而作沿冲量较大方向的运动。又因为这种不平衡的冲撞，使布朗微粒得到的冲量不断改变方向。所以布朗微粒作无规则的运动。温度越高，布朗运动越剧烈。它间接显示了物质分子处于永恒地，无规则地运动之中。所以，布朗运动只反映了液体分子热运动所产生的结果，它并不能代表液体分子本身的热运动。布朗运动的颗粒并不是单一分子，每个小颗粒都含有千百万个分子。因此，小颗粒的布朗运动只间接地揭露了分子的运动，并不就是分子运动。由于分子的频繁碰撞，每个小颗粒在液体中受周围液体分子的碰撞每秒钟约有 10^{21} 次。在气体中由于气体分子的密度较低，小颗粒受气体分子的碰撞每秒至少也有 10^{15} 次。在这样频繁的碰撞下是很难观测的。通常在显微镜下观察到的仅是微粒经过数秒或数十秒钟运动的总结果。

但是，布朗运动并不限于上述悬浮在液体或气体中的布朗微粒，一切很小的物体受到周围介质分子的撞击，也会在其平衡位置附近不停地作微小的无规则颤动。例如，灵敏电流计上的小镜以及其它仪器上包括有悬挂的细丝，都会受到周围空气分子的碰撞而产生无规则的扭摆或颤动。

【毛细管】

凡内径很细的管子叫“毛细管”。通常指的是等于或小于 1 毫米的细管，因管径有的细如毛发故称毛细管。例如，水银温度计、钢笔尖部的狭缝、毛巾和吸墨纸纤维间的缝隙、土壤结构中的细隙以及植物的根、茎、叶的脉络等，都可认为是毛细管。

【毛细现象】

插入液体中的毛细管，管内外的液面会出现高度差。当浸润管壁的液体在毛细管中上升（即管内液面高于管外）或当不浸润管壁的液体在毛细管中下降（即管内液面低于管外），这种现象叫做“毛细现象”。产生毛细现象原因之一是由于附着层中分子的附着力与内聚力的作用，造成浸润或不浸润，因而使毛细管中的液面呈现弯月形。原因之二是由于存在表面张力，从而使弯曲液面产生附加压强。由于弯月面的形成，使得沿液面切面方向作用的表面张力的合力，在凸弯月面处指向液体内部；在凹弯月面处指向液体外部。由于合力的作用使弯月面下液体的压强发生了变化——对液体产生一个附加压强，凸弯月面下液体的压强大于水平液面下液体的压强，而凹弯月面下液体的压强小于水平液面下液体的压强。根据在盛着同一液体的连通器中，同一高度处各点的压强都相等的道理。因此，当毛细管里的液面是凹弯月面时，液体不断地上升，直到上升液柱的静压强抵消了附加压强为止；同样，当液面呈凸月面时，毛细管里的液体也将下降。

当液体浸润管壁致使跟管壁接触的液面是竖直的，而且表面张力的合力也竖直向上时。若毛细管内半径为 r ，液体表面张力系数是 σ ，沿周界 $2\pi r$ 作用的表面张力的合力等于 $2\pi r \sigma$ 。在液面停止上升时，此一作用力恰好跟毛细管中液体柱的重量相平衡。若液柱上升高度为 h ，液体密度是 ρ ，则得

$$2\pi r \sigma = \pi r^2 h \rho g$$

因而液柱上升高度是

$$h = \frac{2\sigma}{r \rho g}。$$

【半透膜】

只允许某种混合气体或溶液中的某一种物质透过而不允许另一种物质透过的薄膜，叫做半透膜。例如，动物的膀胱，只允许水分子通过，而不允许糖的分子透过。肠壁膜、玻璃纸等，主要由于膜的微细孔而引起，半透膜性能与孔的大小有关。

【渗透】

被半透膜所隔开的两种液体，当处于相同的压强时，纯溶剂通过半透膜而进入溶液的现象，称为渗透。渗透作用不仅发生于纯溶剂和溶液之间，而且还可以在同种不同浓度之间发生。低浓度的溶液通过半透膜进入高浓度的溶液中。砂糖、食盐等晶体之水溶液，易通过半透膜，而糊状、胶状等非晶体则不能通过。

渗透现象，在生物机体内发生的许多过程都与此有关。如各物浸于水中则膨胀；植物从其根部吸收养分；动物体内的养分，透过薄膜而进入血液中等现象都是渗透作用。

【渗透压强】

简称渗透压。当溶液和溶剂之间被半透膜隔开时，纯溶剂会通过半透膜进入溶液而使溶液变淡。若在原溶液上，加一适当的压强，恰好阻止了纯溶剂进入溶液，此时，所施加的压强就等于原溶液中溶质的渗透压强。当浓度不太大时，溶液的渗透压与浓度及绝对温度成正比，而与纯溶剂的压强无关。根据范托夫理论，渗透压 P 在稀溶液时等于

$$P = \frac{C}{\mu} RT$$

这就是用来表示渗透压强的范托夫公式，由公式知：若温度一定，溶质的渗透压强 P 与溶液浓度 C 成正比；若浓度一定，溶质的渗透压强 P 与溶液的绝对温度 T 成正比；对不同的溶质，若浓度和温度均相同。则渗透压强 P 与溶质的摩尔质量 μ 成反比。此公式只适用于不导电的稀溶液；而不适用于电解液和浓度较高的非导电溶液。

【摩尔】

它是国际单位制中物质的量的基本单位，符号为 mol。含有的基本单元数与 0.012 千克碳 12 的原子数相等。使用这单位时必须指明是什么样的基本单元，它可以是原子、分子、离子、电子、光子等。1 摩尔含有 6.02252×10^{23} 个基本单元。1 摩尔原子量为 A 的元素具有 A 克质量（以前称 1 克原子）。1 摩尔分子量为 M 的化合物具有 M 克质量（以前称为 1 克分子）。

【扩散】

由于粒子（原子、分子或分子集团）的热运动自发地产生物质迁移现象叫“扩散”。扩散可以在同一物质的一相或固、液、气多相间进行。也可以在不同的固体、液体和气体间进行。主要由于浓度差或温度差所引起的。一般是从浓度较大的区域向浓度较小的区域扩散，直到相内各部分的浓度达到均匀或两相间的浓度达到平衡时为止。物质直接互相接触时，称自由扩散，若扩散是经过隔离物质进行时，则称为渗透。

在自然界中扩散现象起着很大的作用。它使整个地球表面附近的大气保持相同的成分；土壤里所含有的各种盐类溶液的扩散，便于植物吸收，以利生长。此外在半导体，冶金等很多行业都应用扩散，以达目的。扩散，热传导和粘性通称为输运现象，其分别将物质（质量）、热能、动量由一位置移至另一位置，从而达到浓度或温度的均匀。

【粘滯性】

液体滚动时，若其各层流动速度不同，则各层流体间有相互作用。流动速度大的一层带动流动速度小的一层，而流动速度小的一层则阻碍速度大的一层，这种性质称“粘滯性”。例如，水在管中流动较易，而糖浆由于粘滯度比水大，因而流动较慢。粘滯性的大小，用粘〔滯〕度来量度。粘〔滯〕度又分〔动力〕粘〔滯〕度和运动粘度两种。液体的粘滯系数比气体大得多。粘滯系数与温度的关系也截然不同，在液体的情况下，温度越低，粘滯系数越大，而且随着温度的降低粘滯系数是近似地按指数规律增大的。在气体情况下则不同，温度越低，粘滯系数越小，粘滯系数与绝对温度T的平方根成正比。下表列举几种不同温度下水的粘滯系数的值。液体的粘滯系数的这种特点是由液体中热运动的特点所引起的。液体分子的热运动，主要是在平衡位置附近作微小的振动。平均说来，每隔一段时间就变换一次平衡位置。分子改变平衡位置的次数越少，液体的流动性就越小，而粘滯性也就越大。由此可见，定居时间越大，液体的粘滯系数也就越大。因而液体中粘滯系数是和定居时间成正

比的。由于定居时间近似地为 $\tau = \tau_0 e^{\frac{\Delta W}{KT}}$ ，所以

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{\Delta W}{KT}}$$

水的粘滯系数与温度的关系

温度 ()	粘滯系数 (N · s · m ⁻²)
0	0.001793
20	0.001006
40	0.000675
80	0.000356
100	0.000284

【吸收】

物质吸取其它实物或能量的过程。气体被液体或固体吸取，或液体被固体所吸取。在吸收过程中，一种物质将另一种物质吸进体内与其融和或化合。例如，硫酸或石灰吸收水分；血液吸收营养；毡毯、矿物棉、软质纤维板及膨胀珍珠岩等材料可吸收噪声；用化学木浆或棉浆制成纸质粗松的吸墨纸，用来吸干墨水。吸收气体或液体的固体，往往具有多孔结构。当声波、光波、电磁波的辐射，投射到介质表面时，一部分被表面反射，一部分被吸收而转变为其它形式的能量。当能量在介质中沿某一方向传播时，随入射深度逐渐被介质吸收。例如玻璃吸收紫外线，水吸收声波，金属吸收 X 射线等。

【吸附】

在固体或液体表面对气体或溶质的吸着，而形成一层某种物质的原子和分子的过程。一切固体的表面都从周围的大气中吸附了一层气体。吸附层可以是化学键的结合（化学吸附），也可以是范德瓦耳斯力的结合（物理吸附）。物理吸附是以“分子间力”相互吸引的，例如活性炭吸附各种气体。化学吸附，一般吸附热较大，如镍催化剂吸附氢气。在防毒、脱色等方面，吸附现象起一定的作用。

【液晶】

是某些有机化合物，在一定温度范围内，并不由固态直接变为液态，而呈现一种中间状态，这种处在过渡状态的物质称为“液晶”。即“液晶晶体”的简称。液晶的力学性质，象是液体，具有液体的流动性。它的光学性质象是晶体，具有晶体的有序性。从某个方面来看，液晶的分子排列比较整齐，有特殊的取向，分子运动也有特定的规律，因而液晶既有液体的流动性，又具有表面张力。但从另一方面看时，分子排列杂乱无章，只有近程有序特点，而没有不可改变的固定结构，因此它也呈现某些晶体的光学性质（如光学的各向异性、双折射、圆二向色散等）。液晶只能存在于一定的温度范围内，这一温度范围的下限 T_1 称为熔点，其上限 T_2 称清亮点。当温度 $T < T_1$ 时，液晶就变为普通的晶体，失去流动性；当温度 $T > T_2$ 时，液晶就变成普通的透明液体，失去上述的光学性质，称为“各向同性液”。只有在这个温度范围内，物质才处于液晶态，才具有种种奇特的性质和许多特殊的用途。根据分子的不同排列情况，可分为向列型、胆甾型和近晶型三种。近年来胆甾型液晶，用于温度指示、无损伤探测及医疗诊断方面。向列型液晶已用于电子工业，作为显示的材料，还用于分析化学（气相色谱和核磁共振）等方面。早在 1881 年就已发现液晶，受条件限制发展较慢，到 1968 年发现液晶的动态散射现象后，才获得进展。

【向列型液晶】

分子呈棒状，分子的质心有长程的有序性，分子排列方式如同一把筷子。上下方向排列整齐，但沿前后左右方向排列可以变动并不规则。具有不易变形的棒状分子这种形态的化合物都能形成“向列型液晶”。它是人工合成的有机物质，目前常用的是甲亚胺族的化合物。它是在两块镀有透明的导电电极的玻璃间夹一薄层向列型液晶（厚约 10 微米），由于电压的变化，使呈“动态散射”，利用这一特性，制作各种显示器件，显示文字和图象。

【胆甾型液晶】

它包含着许多层分子，每层分子的排列方向相同，但相邻两层分子排列方向稍有旋转，夹角约 15 分，层层叠成螺旋结构，当分子的排列旋转了 360° 而又回到原来方向时，在这种分子排列完全相同的两层间的距离称胆甾型液晶的螺距。这种液晶一般是用胆固醇为主要原料再加某些有机酸（如油酸、苯甲酸、壬酸等）反应而成的酯类化合物。它的温度效应强，随温度的变化有选择性的反射光。这是由于液晶的螺距对温度非常敏感，当螺距与光的波长一致时，就产生强烈性有选择的反射。在日光下，随温度的升高，色彩按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的顺序变化，温度下降又按相反顺序变色。高灵敏度的在不到一度的温差内就可显出整个色谱。利用这一温度效应可作金属探测仪，用来探知金属材料 and 零部件的内部结构质量，探测微电子学中热点（短路处），检查致冷机的漏热，以及诊断疾病，探查肿瘤，如通过热点形式，可探查癌变，并可通过冷点形式检查出动脉梗塞。

【近晶型液晶】

分子呈棒状，排列成层，各层之间的距离可变动。但分子不会来往于层间，只能在本层中活动，这类液晶在排列的有序程度上和晶体相近，故称为近晶型。

【热质说】

是在 19 世纪初期以前流行的一种对热的本性解释的学说。它认为“热”是一种没有质量，也没有体积的流质，称之为“热质”。含热质越多的物体，温度就越高、所以物体温度的高低是取决于热质的含量。它还认为热质可以渗入一切物体之中，热质可以从温度高的物体向温度低的物体流动。当时就有人发现热质说对摩擦生热等现象无法解释，而且是矛盾的。后来人们逐渐认识到热现象是与构成物质的微粒的运动相联系，热质并不存在。到 19 世纪中期有关热质说即被废弃。

【热传递】

亦称“传热”。物质系统间的能量转移过程。即内能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到同一物体邻近部分的过程，叫做“热传递”。内能永远自发地从温度高的物体向温度低的物体传递。在任何条件都相同的情况下，两个物体温度相差越大，内能的传递速度也快，当冷热程度不同的物体互相接触时，热传递要进行到它们的温度相等时才会停止，即达到热平衡。一个物体不同部分的温度有差别，热传递在物体内部也要进行，直到温度相同为止。虽然参加热传递过程的物体的温度将发生这样或那样的变化，但传递的能量与温度的变化之间没有必然的联系。

热传递的方式有三种：即对流、传导和辐射。这三种热传递的方式往往是伴随着进行的。

【热接触】

在两个系统相互接触时，在系统间发生了热量的传递，这种接触即称为热接触。参见热传递。

【热平衡】

当两个系统互相接触时，如有温度的差异，其各自的状态可能发生变化，一段时间后，不再发生热量的传递，两系统将达到热平衡状态。这种热平衡是经过热传递出现的。某一系统，与外界接触时，其内部温度各处均匀，且与外界的温度相等，亦呈现热平衡。

【热传导】

亦称“导热”。是热传递三种基本方式之一。它是固体中热传递的主要方式，在不流动的液体或气体层中层层传递，在流动情况下往往与对流同时发生。热传导实质是由大量物质的粒子热运动互相撞击，而使能量从物体的高温部分传至低温部分，或由高温物体传给低温物体的过程。在固体中，热传导的微观过程是：在温度高的部分，晶体中结点上的微粒振动动能较大。在低温部分，微粒振动动能较小。因微粒的振动互相联系，所以在晶体内部就发生微粒的振动，动能由动能大的部分向动能小的部分传递。在固体中热的传导，就是能量的迁移。在金属物质中，因存在大量的自由电子，在不停地作无规则的热运动。自由电子在金属晶体中对热的传导起主要作用。在液体中热传导表现为：液体分子在温度高的区域热运动比较强，由于液体分子之间存在着相互作用。热运动的能量将逐渐向周围层层传递，引起了热传导现象。由于热传导系数小，传导的较慢，它与固体相同，而不同于气体；气体依靠分子的无规则热运动以及分子间的碰撞，在气体内部发生能量迁移，从而形成宏观上的热量传递。

【对流】

是流体（液体和气体）热传递的主要方式。热对流指的是液体或气体由于本身的宏观运动而使较热部分和较冷部分之间通过循环流动的方式相互掺和，以达到温度趋于均匀的过程。

对流可分自然对流和强迫对流两种：自然对流是由于流体温度不均匀引起流体内部密度或压强变化而形成的自然流动。例如，气压的变化，空气流动，风的形成，地面空气受热上升，上下层空气产生循环对流等；而强制对流是因受外力作用或与高温物体接触，受迫而流动的，叫强制对流。例如，由于人工的搅拌，或机械力的作用（如鼓风机、水泵等），完全受外界因素的促使而形成对流的。

【热辐射】

热的一种传递方式。它不依赖物质的接触而由热源自身的温度作用向外发射能量，这种传热方式叫“热辐射”。它和热的传导、对流不同。它不依靠媒质而把热直接从一个系统传给另一系统。热辐射是以电磁波辐射的形式发射出能量，温度的高低，决定于辐射的强弱。温度较低时，主要以不可见的红外光进行辐射，当温度为 300 K 时，热辐射中最强的波长在 5×10^{-4} 厘米左右，即在红外区。当物体的温度在 500 K 以上至 800 K 时，热辐射中最强的波长成分在可见光区。例如，太阳表面温度为 6000 K，它是以热辐射的形式，经宇宙空间传给地球的。这是热辐射远距离传热的主要方式。近距离的热源，除对流、传导外，亦将以辐射的方式传递热量。热辐射有时亦称红外辐射，波长范围约 0.7 微米到 1 毫米，为可见光谱中红光端以外的电磁辐射。

关于热辐射，其重要规律有四个：基尔霍夫辐射定律、普朗克辐射分布定律、斯蒂藩—玻耳兹曼定律、维恩位移定律。这四个定律，有时统称为热辐射定律。

【保温瓶】

此容器能使放置其中之物体保持较长时间温度不变。它即可使开水的温度在一相当长的时间内保持不下降，又可使冰在一个相当长的时间内保持不融化。保温瓶的玻璃和软木塞是热的不良导体，内、外瓶胆互不接触，防止热的传导。夹层间已被抽成真空，防止对流作用。在夹层的玻璃壁上镀一薄层银（实际镀的是水银），由于光亮面能把辐射出去的内能反射回来。因此保温瓶把传导、对流、辐射三种作用尽可能地减少，从而起到保温作用。

【热绝缘】

阻止或减少热能传递的任何方法谓之“热绝缘”。例如，用泡沫材料或锯末填充的空心墙或屋顶棚，起绝热作用。

【热绝缘体】

不易传热的材料，亦称热的不良导体。如石棉等很多材料都是多孔的或纤维状的固体，它们能把空气封闭在小孔内。气体不易导热，并防止对流。瓷、纸、木头、玻璃、皮革等是热的不良导体。羊毛、棉花、软木、除水银外的液体、以及气体等都是热的绝缘体。

【导热体】

具有相当高热导性能的材料。一般情况下各种金属都是良好的导热体，最善于传热的是银。

【热动平衡】

当系统处于平衡状态时，其宏观物理性质是不随时间变化的，但从微观方面来看，组成系统的粒子却处于永不停息的热运动之中。在热力学中的平衡是动的平衡，故称作“热动平衡”。例如，若将两个处于不同温度的铜块放在一起，将发生热量的传递，直到两个物体的温度相同时，这两个物体就处于热平衡。液体与其相接触的饱和蒸气处于平衡状态。从宏观上看，压强、密度、温度等是不变化的。在这种情况下，分子仍在从液态变成气态，同时分子以同样速率从蒸气回到液体。因此称这种类型的平衡为热动平衡。

【热导率】

或称“导热系数”。是物质导热能力的量度。符号为 λ 或 K 。其定义为：在物体内部垂直于导热方向取两个相距 1 米，面积为 1 米²的平行平面，若两个平面的温度相差 1K，则在 1 秒内从一个平面传导至另一个平面的热量就规定为该物质的热导率，其单位为瓦特·米⁻¹·开⁻¹($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)。如没有热能损失，对于一个对边平行的块形材料，则有

$$E/t = \lambda A (t_2 - t_1) / d$$

式中 E 是在时间 t 内所传递的能量， A 为截面积， d 为长度， t_2 和 t_1 分别为两个截面的温度。在一般情况下有：

$$dE/dt = - \lambda A dt / d$$

热导率 λ 很大的物体是优良的热导体；而热导率小的是热的不良导体或为热绝缘体。 λ 值受温度影响，随温度增高而稍有增加。若物质各部之间温度差不很大时，在实用上对整个物质可视 λ 为一常数。晶体冷却时，它的热导率增加极快。

【红热】

系统的大量微观粒子（分子、原子等）的混乱运动，即组成宏观物体或系统的大量微观粒子的无规则运动。这种形式的运动越剧烈，那么，由这些微观粒子所组成的物体或系统就越热。随着温度升高，物体开始发出可见光，首先是波长较长的红色部分，由暗红色逐渐变成橙红色。处于这种红热状态的物体，温度约为 500 ~ 1200 之间，物体将由红热转换为白炽状态。物体受热达到红光的状态称为红热。

【白热】

系统的温度升高到 1200 ~ 1500 时，系统所发出的可见光中除波长较长的红、黄色光外，还有较多的绿、蓝色波长较短的光，呈现耀眼的白光。此时系统处于白炽状态。这种状态谓之白热。参见红热条。

【热膨胀】

物体因温度改变而发生的膨胀现象叫“热膨胀”。通常是指外压强不变的情况下，大多数物质在温度升高时，其体积增大，温度降低时体积缩小。在相同条件下，气体膨胀最大，液体膨胀次之，固体膨胀最小。也有少数物质在一定的温度范围内，温度升高时，其体积反而减小。因为物体温度升高时，分子运动的平均动能增大，分子间的距离也增大，物体的体积随之而扩大；温度降低，物体冷却时分子的平均动能变小，使分子间距离缩短，于是物体的体积就要缩小。又由于固体、液体和气体分子运动的平均动能大小不同，因而从热膨胀的宏观现象来看亦有显著的区别。

【膨胀系数】

为表征物体受热时，其长度、面积、体积变化的程度，而引入的物理量。它是线膨胀系数、面膨胀系数和体膨胀系数的总称。

【固体热膨胀】

固体热膨胀现象，从微观的观点来分析，它是由于固体中相邻粒子间的平均距离随温度的升高而增大引起的。晶体中两相邻粒子间的势能是它们中心距离的函数，根据这种函数关系所描绘的曲线，如图 2 - 9 所示，称为势能曲线。它是一条非对称曲线。在一定温度下，粒子在平衡位置附近振动、具有的动能为 E_k ，总能量为 E_k 与相互作用能 E_k 之和，它在整个运动过程中是守恒的。图中，粒子间最接近的距离是 r' ，最远的距离是 r 。由于距离减小所引起的斥力增长比由于距离增大所引起的引力快的多，因而粒子间接近的

图 2-9

距离与粒子间远离的距离关系是

$$r_0 - r' < r - r_0。$$

所以两相邻粒子中心的平均距离为

$$\bar{r} = \frac{r' + r}{2} > r_0$$

随温度的升高， E_k 增大，平均距离亦增大。图中曲线 OO' 表示 \bar{r} 随 E_k 而变的情形。由此可见，当晶体温度升高，粒子热振动加剧，体积膨胀。

【固体的线膨胀】

由于固体随温度的变化而变化，当温度变化不太大时，在某一方向长度的改变量称为“固体的线膨胀”。例如，一细金属棒受热而伸长。固体的任何线度，例如，长度、宽度、厚度或直径等，凡受温度影响而变化的，都称之为“线膨胀”。

【线膨胀系数】

亦称线胀系数。固体物质的温度每改变 1 摄氏度时，其长度的变化和它在 0 时长度之比，叫做“线膨胀系数”。单位为 1/开。符号为 α_1 。其定义式是

$$\alpha_1 = \frac{l_t - l_0}{l_0 t} ,$$

即有

$$l_t = l_0 (1 + \alpha_1 t) 。$$

由于物质的不同，线膨胀系数亦不相同，其数值也与实际温度和确定长度 1 时所选定的参考温度有关，但由于固体的线膨胀系数变化不大，通常可以忽略，而将 α 当作与温度无关的常数。

【固体的面膨胀】

当固体的温度变化不大时，其表面积随温度的升高而增大，这一现象叫“固体的面膨胀”。遵循的规律为：

$$S_t = S_0 (1 + \alpha_s t)$$

式中 α_s 为面膨胀系数，单位是 1/度，其量值为 $\alpha_s \cdot 2 \cdot t_0$ 。

【固体的体膨胀】

当固体的温度变化不大时，其体积随温度的升高而增大，这一现象叫“固体的体膨胀”。

【体积膨胀系数】

或称“体胀系数”。无论物质是哪一种（固体、液体或气体）形态的变化，都称之为体膨胀。当物体温度改变1摄氏度时，其体积的变化和它在0℃时体积之比，叫做“体积膨胀系数”。符号用 α 表示。设在0℃时物质的体积为 V_0 ，在 t ℃时的体积为 V_t ，则体胀系数的定义式为

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t},$$

即有

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t).$$

由于固体或液体的膨胀系数很小，为计算方便起见，在温度不甚高时，可直接用下式计算，无需再求0℃时的体积 V_0

$$V_2 = V_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)].$$

式中 V_1 是在 t_1 ℃时的体积， V_2 是在 t_2 ℃时的体积。这一式只适用于固体或液体，因为气体物质的膨胀系数值较大，不能运用此式。

【液体热膨胀】液体是流体，因而只有一定的体积，而没有一定的形状。它的体膨胀遵循 $V_t = V_0(1 + \beta t)$ 的规律， β 是液体的体膨胀系数。其膨胀系数，一般情况是比固体大得多。

【气体的热膨胀】气体热膨胀的规律较复杂，当一定质量气体的体积，受温度影响上升变化时，它的压强也可能发生变化。若保持压强不变，则一定质量的气体，必然遵循着 $V_t = V_0 (1 + \alpha t)$ 的规律，式中的 α 是气体的体膨胀系数。法国科学家盖·吕萨克定律，反映了气体体积随温度变化的规律。这一定律也可表述为：一定质量的气体，在压强不变的情况下，温度每升高（或降低）1℃，增加（或减小）的体积等于它在 0℃ 时体积的 $\frac{1}{273}$ / 度。

【视体胀系数】

液体真正的体胀系数，跟固体的体胀系数之差，叫做“视体胀系数”。在测液胀系数时，不能不考虑容器的膨胀，由于烧瓶本身受热时也要膨胀，冷却时也要收缩，这样测得的体胀系数显然比液体的真正的体胀系数要小一些，要求出液体真正的膨胀系数，必须把测定时求得的数值加上固体的体胀系数。由于固体的体胀系数要比液体的体胀系数小得多，因而在一般的计算过程中，即可略去不计。即可把液体的视体胀系数当作液体真正的体胀系数。为减小误差，烧瓶应选用膨胀系数最小的物质，如石英玻璃等来制造。

【反常膨胀】

一般物质由于温度影响，其体积为热胀冷缩。但也有少数热缩冷胀的物质，如水、锑、铋、液态铁等，在某种条件下恰好与上面的情况相反。实验证明，对 0 的水加热到 4 时，其体积不但不增大，反而缩小。当水的温度高于 4 时，它的体积才会随着温度的升高而膨胀。因此，水在 4 时的体积最小，密度最大。湖泊里水的表面，当冬季气温下降时，若水温在 4 以上时，上层的水冷却，体积缩小，密度变大，于是下沉到底部，而下层的暖水就升到上层来。这样，上层的冷水跟下层的暖水不断地交换位置，整个的水温逐渐降低。这种热的对流现象只能进行到所有水的温度都达到 4 时为止。当水温降到 4 以下时，上层的水反而膨胀，密度减小，于是冷水层的停留在上面继续冷却，一直到温度下降到 0 时，上面的冷水层结成了冰为止。以上阶段热的交换主要形式是对流。当冰封水面之后，水的冷却就完全依靠水的热传导方式来进行热传递。由于水的导热性能很差，因此湖底的水温仍保持在 4 左右。这种水的反常膨胀特性，保证了水中的动植物，能在寒冷季节内生存下来。这里还应注意，冰在冷却时与一般物质相同，也是缩小的。受热则膨胀，只有在 0 到 4 的范围内的水才显示出反常膨胀的现象来。

【复合金属板】

由两种不同金属（铜片和铁片）组成长度相同的物体，将它们铆钉在一起，在室温情况下是直的。当温度升高后，它们将发生弯曲。在这种情况下，虽然两种金属温度上升是相同的，但由于它们的线膨胀系数不同，所以两种金属伸长的量不相等，因而发生弯曲。这种金属板称为复合金属板。

利用双金属片的特性，可制成金属温度计，或自动调节温度电路的触点。日光灯电路中的起辉器就是用它来作起动开关的。

【伸缩管】

在温度变化较大的管道上连接伸缩管或波纹管，是一种保护措施。由于固体在热胀冷缩时，长度的变化量虽然不大，但对妨碍它发生形变的物体，却有巨大的作用力。例如，截面积为 1 厘米²、长度为 1 米的钢条，当温度升高 40 时，伸长只有约 0.0005 米。如果不让它伸长，它就会对限制它的物体产生 10^4 牛顿的作用力。横截面积越大，作用力也越大。为此在工程技术上对于热膨胀所产生的力，应预先考虑，采取必要的措施。例如，钢制桥梁必须把一端架置在活动支座上，使桥梁能自由的伸缩。又如在铺设铁轨时，也都是分段留有膨胀余地。

【金属温度计】

利用一种呈弧形的双金属片在温度变化的影响下，双金属片带动指针偏转，用以指示或自动记录温度的变化。

【温度调节器】

它是用来保持恒温的装置。如图 2—10 所示的是一种温度调节器的构造原理。弧形的双金属片 C 由于温度的改变促使其伸展或更加弯曲。在 C 的自由端固定一块金属板 L，在 C 受热膨胀而伸展时，L 与触点相接触；当温度降低时，C 将更加弯曲，L 与 K 离开。若将 L 与 K 串接在电热器的 QQ_1 中，当 L 与 K 相接触时，电路接通，电热器开始加热，使双金属片 C 的温度升高。当温度达到某一定值时，由于 C 更加弯曲，L 离开 K，电路断开，电热器停止加热。当温度再一次降低时，C 又伸展使电路接通。这样就可以自动地保持恒定的温度。复合金属板的里、外层，用线胀系数大的材料，根据仪器构造的需要，可将膨胀系数大的复合板用在环内侧或环外侧。

【液体体胀系数的测定】

用一个细口长颈的烧瓶。它的容积是已知的。在测定某种液体的体胀系数时，先将 0 的该种物质的液体装在烧瓶中，一直装满到颈口为止。然后将烧瓶加热到某一温度 t ，此时，瓶内液体因受热体积膨胀，将有一部分液体从瓶中溢出。再将烧瓶放在冰水混合物中使它冷却到 0 ，这时，由于液体的体积缩小，液面由颈口处下降，于是瓶中空出来的那部分容积就是液体由 t 降低到 0 时所缩小的体积，也就是等于液体由 0 升高到 t 时所增大的体积。若知道了温度的变化 t ，再量出这部分空出的容积，就能够求出液体的体胀系数。由于烧瓶本身受热也要膨胀，冷却时也要收缩，这样测出的体胀系数比液体的真正体胀系数要小一些，一般计算时就可以略去不计。原因是固体体胀系数较液体体胀系数小得多，尽量选膨胀系数小的烧瓶较好。

为了要使在测量中受热膨胀的影响不致于太大，故在制造精密仪器的材料方面，一般都采用线胀系数极小的物质，例如，制造精确的测量仪器，用熔凝石英（ $\alpha = 4 \times 10^{-7} \text{度}^{-1}$ ）和一种殷钢（是钢镍合金，约含 36% 的镍， $\alpha = 1.5 \times 10^{-6} \text{度}^{-1}$ ）做材料。殷钢常用来制造钟摆的杆，这种钟摆无论气温怎样变化，几乎都是一样准确。因为熔凝石英的线胀系数极小，用石英做成的容器，就是在烧红以后立刻投入冰水中，也不会炸裂，所以这种容器能经受温度剧烈的变化而不致破裂。普通玻璃制成的容器，当温度变化稍大时，就会破裂。因玻璃的线胀系数较石英大，当玻璃与热水接触的部分因温度突然升高，膨胀得快，而其他部分因温度逐渐升高，膨胀得较慢，因此在这两部分之间产生了很大的应力，玻璃的强度是受不住这种应力的，故常常用熔凝石英来制造测量仪器。在用不同材料来制造仪器或设备时，应选择线胀系数相等或相近的材料。例如，灯泡的玻璃铲中的金属丝的膨胀系数，就与玻璃线胀系数相近。

【相对膨胀】

置于容器中的液体，温度升高后，直接观察到的并不就是液体的真实膨胀，因而当温度升高时，固体容器的容积也要膨胀。因此所见到的膨胀，既有液体的膨胀也有固体的膨胀，这种膨胀是液体相对于容器的膨胀故称“相对膨胀”。参阅视膨胀系数。

【液体的实胀系数】

液体膨胀时受容器的影响，所观察到的是液体的视膨胀，把液体的实际膨胀叫“液体的实膨胀”。液体与固体一样，它的体胀系数也有视胀系数与实胀系数的区别。参阅液体体胀系数的测定及下式的推论，可明确液体的实胀系数与视胀系数间的关系。

设 V_0 表示液体在 0 时的体积，也就是容器在 0 时的容积，当温度增加到 t 时，液体的体积增加到 V_t ，而容器的容积增加到 V_t' 。又设 β 和 β_c 各为液体的实胀系数，视胀系数和容器的体胀系数，那末

$$V_t = V_0 (1 + \beta t) ; V_t' = V_0 (1 + \beta_c t) ;$$

$$V_t - V_t' = V_0 (1 + \beta t) - V_0 (1 + \beta_c t)$$

$$= V_0 (\beta - \beta_c) t ;$$

$$\beta - \beta_c = \frac{V_t - V_t'}{V_0 t}。$$

依定义得

$$\beta = \frac{V_t - V_t'}{V_0 t} , \quad \beta_c = \beta - \beta_c \text{ 即 } \beta = \beta_c + \beta_c。$$

据上推论：液体的实膨胀系数等于液体的视膨胀系数跟容器的体膨胀系数的和。

【分子的动能】

分子作无规则运动所具有的动能叫做“分子的动能”。由于各个分子的运动速度一般说是不同的，因而分子的动能亦不相等，而它们动能的平均值，叫做“分子平均动能”。物体的温度是大量分子热运动剧烈程度的表征；分子热运动越剧烈，物体的温度就越高。也可以说分子的平均动能大，物体的温度就高；分子平均动能小，温度就低。从分子的运动论的观点来看，温度是分子平均动能的标志。温度的升高与降低，标志分子平均动能的增大或减小。物体的动能是一种机械能，是力学中的量。它只跟物体的机械运动有关，而跟物体内部分子的无规则运动无关。分子的平均动能，是分子动能的平均值，它是热运动的能量。

【分子的势能】

由于分子间的相互作用而具有的势能，叫做“分子的势能”。地面上的物体，由于它跟地球相互作用而具有势能。拉长或压缩弹簧，反抗弹力做功，使弹簧各部分之间的相对位置发生变化，增加了弹簧的势能。一切相互作用的物体都具有由它们的相对位置或物体内部各部分之间的相对位置所决定的势能。若物体间的相互作用力是引力，那么，当它们的距离增大时，必须反抗引力做功，使物体的势能增加；在距离缩小时，引力做功，势能减小。如果物体之间的相互作用力是斥力，在距离增大时，物体的势能减少；距离缩小，物体的势能增加。分子之间也存在相互作用力，并且随着距离的不同，有时表现为引力，有时表现为斥力。因此，分子也具有由它们的相对位置所决定的势能。

【分子平均动能】
见分子的动能。

【内能】

内能是指由物质系统内部状态所决定的能量。从分子运动论的观点看，热力学系统的内能，包括组成物质的所有分子热运动的动能、分子与分子间相互作用的势能的总和，以及分子中原子、电子运动的能量和原子核内的能量等等。当有电磁场和系统相互作用时，还应包括相应的电磁形式的能。内能是热力学系统的态函数，完全由系统的初、终状态所决定的物理量。当状态一定时，系统的内能也一定。当系统从一个状态转变到另一个状态时，不论这种转变通过什么过程实现，只要系统的初、终状态不变，在各种不同的绝热过程中，采用各不相同的做功形式，所测得功的数值都相同，而与转变过程无关。对于均匀系统而言，若没有外力场的作用，内能可以表示为温度 T 和体积 V 的函数，即

$$U=U(T, V)$$

当温度和体积分别增加 dT 和 dV 时，内能的增加量可如下表示

$$\begin{aligned}dU &= \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV \\ &= C_V dT + [(C_p - C_V)\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P - P]dV\end{aligned}$$

式中 C_V 和 C_p 分别为系统的定容热容量和定压热容量。

对于理想气体系统而言，由于不存在分子间的相互作用，系统的内能只是所有分子热运动动能的总和。而分子热运动动能只是温度的函数，所以理想气体的内能也只是温度的函数，即 $U=U(T)$

当温度增加 dT 时，内能的增量可如下式表示：

$$dU=C_V dT$$

式中 C_V 为理想气体系统的定容热容量。

物体内能的大小跟它的质量有关。质量越大，即分子数量越多，它的内能就越大。还跟物体的温度和物体的聚集态（固态、液态和气态）以及物体存在的状态（整块、碎块或粉末）有关。其原因是物体温度越高，分子运动越快，分子动能越大；分子间距离越大，分子的势能就越大。对气体来说，它的内能基本上只有分子的动能。因气体分子间的距离已经变得很大，它们之间相互作用力实际上已不再发生作用、所以气体分子的势能可以忽略。物体的内能跟整个物体的机械能含义不同，只要是物体的温度、体积、形状、物态不变，尽管它的机械能在变，它的内能仍保持不变。

物体的温度升高，物体内能增加。因为分子无规则运动加快，分子的动能增加；还因为一般物体受热体积膨胀，分子间距离增大，分子的势能增加。相反，物体的温度降低时，物体的内能就减少。整块物体破成碎块或粉末，分子的势能就要增加。物态变化也伴随物体内能的变化。在熔解、蒸发，沸腾等过程中，物体的内能增加。相反，在凝固和液化等过程中，物体的内能减少。改变物体内能的方式是做功和热传递两种方式。

【物体的状态】

物体的状态是指它所处的情况。物体的状态由一组物理量来确定，例如，物体的机械运动状态是指它的位置和速度；一定质量气体的热学状态由它的温度、压强、体积这三个物理量中的任意两个量来确定；物体的状态也指它的聚集态（固态、液态、气态）。是整块的还是分散的。

【分散】

把整块物体分裂成粉末或碎片的现象，叫做物体的“分散”。它是物体状态变化中一种很重要的概念。例如，喷雾器将水喷出；在黑板上用粉笔写字；用铅笔在纸上绘图；磨粉机磨面粉；车刀切削金属等都是分散的事例。物体在分散时，分子间的平均距离有了增加，这就需要克服分子间的引力做功。所以分子相互作用的势能就要增加。

【物体内能的变化】

改变物体的内能有两种方式：一种叫做做功，另一种叫做热传递。热传递只能发生在温度不同的两个物体之间，或一个物体的温度不同的两个部分间。它是温度不同的两物体间能量转移的过程，即能量从高温物体转移到低温物体。热传递的结果使两个物体的温度趋于均衡。在热传递的过程中转移的能量，称之为热量。改变系统内能的另一条途径是做功。即用机械的或电的办法来对系统做功以达到改变其内能的目的。对物体传递热量或做功，不但同样可以改变物体的内能，并且在量的方面也具有一定的关系（热功当量）。

【热量】

由于温度差，在热传递过程中，物体（系统）吸收或放出能量的多少，叫做“热量”。它与做功一样，都是系统能量传递的一种形式，并可作为系统能量变化的量度。热量是热学中最重要概念之一，它是量度系统内能变化的物理量。在热传递的过程中，实质上是能量转移的过程，而热量就是能量转换的一种量度。热传递的条件是系统间必须有温度差，参加热交换不同温度的物体（或系统）之间，热量总是由高温物体（或系统）向低温物体（或系统）传递的，直到两个物体的温度相同，达到热的平衡为止。即使在等温过程中，物体间温度也不断出现微小的差别，通过热量传递而不断达到新的平衡。对于参加热传递的任何一个系统，只有在和其他系统之间有温差，才能获得或失去能量。另外，对系统本身来说，它获得或失去的这部分能量（即热量），并不一定全部用来升降自身的温度。也可用来使自身发生物态的变化。若用分子运动论的观点来看，实际就是将系统分子无规则的热运动转移到另一系统，使该系统的分子热运动的动能或分子间相互作用的势能发生变化。

热量原是热质说中引入的一个物理量。热质说把热量定义为热质之量，即热质的多少。热质说认为物体温度的高低由所含热量（热质）的多少来决定，而且传递的过程是热质移动的过程。现在热质说已被废弃，却保留了“热量”一词，但两者的含义根本不相同。我们说到热量由一个物体转移到另一物体时，意思是说，能量由热传递的方式，从一个物体转移到了另一个物体，其能量转移的数量（不是代表每个物体内能的多少）就用热量来表示。可见，热量只是用来衡量在热传递过程中物体内能增减的多少，并不是用来表示物体内能的多少。说某系统或某物体包含了多少热量，是没有意义的。在国际单位制中，热量的单位是焦耳（工程上常使用卡或千卡作为度量热量的单位）。

在对热量的理解基础上，有必要弄清与其他概念的关系：首先应明确，尽管热量和温度有一定的联系，但它们是完全不同的两个物理量。因为热量是系统内能变化的量度，而温度则是系统内部大量分子作无规则热运动的激烈程度的标志。尽管热传递必须在两系统间有温度差时进行，但传递的是能量，不是热质，更不是温度。热传递不仅可使系统温度发生变化，还可使物态发生变化。在物态变化过程中，传递给系统的热量不一定使系统温度变化（如萘的熔解过程）。因此说：“系统吸收热量多，温度变化不一定大”。“系统的温度高，放出的热量也不一定多”。因为放出的热量，不但和温度的变化值有关，还和热容量等因素有关；其次热量和功有着本质的区别。功是在没有热传递过程中，系统能量变化的量度。而热是在没有做功过程中，系统能量变化的量度。热量和功，都是系统内能变化的量度，都是与过程有关的物理量。热量可以通过系统转化为功，功也可以通过系统转化为热，一定量的热量和一定量的功是相当的。用作功来改

变系统的内能，是系统分子的有规则运动转化为另一系统的分子的无规则运动的过程，也就是机械能或其他能和内能之间的转化过程。用传热来改变系统的内能，是通过分子间的碰撞以及热辐射来完成的。它将分子的无规则运动，从一个系统转移到另一个系统。这种转移也就是系统间的内能转换的过程。因此功和热量既有内在的联系，又有本质的区别；最后还应明确热量和内能的关系：内能是由系统的状态决定的。状态确定，系统的内能也随之确定。通过做功和热传递这两种过程可使系统的内能发生变化。热量是热传递过程中的特征物理量。和功一样，热量只是反映物体在状态变化过程中所迁移的能量，是用来衡量物体内能变化的。有过程，才有变化，就某一状态而言，只有“内能”，根本不存在什么“功”和“热量”。因此也不能说一个系统中含有多少热量或多少功。

【卡】

卡路里的简称。是计算热量的一种单位。代号为 cal。使 1 克纯水温度升高 1 所需要的热量叫做 1 卡路里，简称 1 卡，有时亦称 1 小卡。由于水的比热随温度不同而略有差异，精密的量度发现，把 1 克纯水从 1 加热到 2 时所需要的热量，比把它从 31 加热到 32 时所需要的热量大约多 1%，所以在精密测定中，是把 1 克纯水从 14.5 加热到 15.5 所需要的热量规定为 1 卡。通常不加区别而以 1 卡/(克·度)为水的比热。应用上为方便起见，常以 1 千卡作为热量的单位，称为“千卡”或“大卡”。原来的“卡”是根据“热量是‘热质’的量”这一观点来定的，随着科学的发展，认识到热量是一种能量变化的量度。热量的单位完全应该采用能量的单位。但由于卡这一单位已经长期沿用，特别是在生物学和食品工业中，已习惯用卡来表示，故这一单位保留下来，但现在卡的意义跟原来的已经完全不同了。在国际单位制中热量的单位是焦耳，1 卡约等于 4.184 焦耳。即 1 焦耳等于 0.24 卡。

【大卡】

即千卡，为卡的 1 千倍。它是热量的单位。参见卡。

【热能】

是能量的一种形式，依物质的分子运动学说，热能是物质中分子或原子无规则热运动的动能。任何一种运动形式都有与其相对应的能量。例如，机械运动的能量是机械能。物体内部分子的各种动能以及分子间势能的总和叫做内能。内能包括两部分：一部分是与分子热运动相对应的各种分子运动的动能 E_k ，另一部分是由分子之间的相互作用力引起的分子势能 E_p 。

所有分子的各种形式的动能和势能的总和，叫物体的内能，用 E 表示，即 $E=E_k+E_p$ 。由上可见，热能只是内能的一部分。在某些技术部门中，曾把热能和内能混淆，教学中宜将内能和热能区别开来。

【热功当量】

热量以卡为单位时与功的单位之间的数量关系，相当于单位热量的功的数量，叫做热功当量。焦耳首先用实验确定了这种关系，将这种关系表示为

$$1 \text{ 卡 (热化学卡) } = 4.1840 \text{ 焦耳}$$

即 1 千卡热量同 427 千克的功相当，即热功当量 $J=427 \text{ 千克力} / \text{千卡} = 4.1840 \text{ 焦耳} / \text{卡}$ 。

从下述两点说明功和热是相当量，而不是相等。其一是在系统的内能发生同样的变化中，既可以通过做功来完成，也可以通过传递热量来完成。两者之间只是在作用于系统这一效果上是等效的，决不能等同起来；其二是功和热之间的转换只有通过系统内能的变化才能完成。脱离系统去谈功和热之间的直接转换是不恰当的。尽管在宏观上可能反映出系统的内能没有发生变化，也不能得出热可以变功或功可以变热这样简单的结论。如果在转换过程中，外界供给系统热量，使系统全部用来对外做功，实际是外界供给系统热量，使系统的内能增加，同时系统对外做功，消耗了从外界获得的能量。

功热当量是热功当量的倒数，它等于 0.24 卡/焦耳。

【平衡状态（热学）】

对于一定的热力学系统，当外界对它既不传热也不做功的条件下，无论该系统的初始状态如何，经过一定时间以后，必将达到其宏观物理性质不随时间变化的状态，这种状态称为平衡状态，简称平衡态。系统处于平衡态时，具有确定的状态参量。平衡态是热力学中重要的基本概念之一。它是在一定条件下对实际情况的概括和抽象，是一种理想的状态。事实上，自然界中并不存在完全不受外界影响，并且宏观性质又绝对不变的系统。只有当人们在研究有关热学问题时，为使问题简化，常把实际的状态，近似地当作平衡状态来处理。

【状态参量】

在一定的条件下，物质系统都处于一定的状态下，每个状态都需用一组物理量来表征，这些物理量称为“状态参量”。状态是指物质系统所处的状况。系统的状态由状态参量来表征。例如，由一定质量气体组成的系统的热学状态由系统的温度、压强和体积来描述。状态也指各种物态，如物质的固态，液态和气态等。热学中特有的状态参量有温度，内能，焓、熵等。当物质在一定状态下，其状态参量具有一定的数值。状态参量的数值，随外界作用的改变而变化。例如，封闭在容器内的气体，在平衡状态中，气体的密度，压强和温度各处相同。当对气体加热时，气体体积无大变化，但气体的压强却增加了，而且压强的增加和气体温度的升高有一定的对应数值。因此，当气体处于平衡态时可由三个量中任何两个变量来决定。可写成下面的函数关系： $F(P, t, V) = 0$ 。式中三个变量中的任意两个可作为独立变量。而状态方程正是反映其余一个为这两个独立变量的函数。描写均匀流体的状态也只需两个自变量，但标志流体性质的变量不局限于上述的压强，体积和温度。只要规定流体状态的各变量中，任意选择两个作为变量，则状态的其他一切变量都是这两个自变量的函数。对于均匀固体系统，除描写均匀流体所需的两个变量外，还需加上在各方向上的胁强或胁变作为变量才能作全面的描写。

【热力学系统】

热力学研究的对象是由大量粒子所组成的整体，这一宏观客体称热力学系统，简称系统。而与此系统相互作用的周围环境，称系统的外界。从系统与外界的关系来看，热力学系统有三种情况：其一是孤立系统。即热力学系统与外界没有任何相互作用的联系；其二是封闭系统。即与外界有能量交换的系统，但没有物质的交换；其三称为开放系统，与外界既有物质的交换，又有能量的交换。

【热力学过程】

简称过程，即热力学系统从一个状态向另一个状态的过渡，或者说热力学状态随时间的变化。例如，在物态变化中，汽化是物质由液态转变为气态的过程，是凝结的相反过程，都是热力学的过程。按过程所经历中间状态的性质，可把热力学过程分为准静态过程和非静态过程。若在准静态过程中系统内部没有摩擦，则系统经历的过程具有可逆性，也就是说系统从某一初态经过一系列的中间状态到达一末态，而后可按相反的次序经历中间各状态，由末态回到初态，因而这类过程又称为可逆过程。

【水当量】

在热的测量中，一般将量热器的热容量称之为“水当量”。

【量热器】

是一种测量热量等的仪器，亦称“卡计”。它是由白瓷外筒和铜（或铝）质小筒组成，小筒的底部用不传热的小支架支起来，见图 2 - 11 所示。两筒间是不易传热的空气，外筒上的盖子，一般用木料制成，其传热效率低。盖上有两个小孔，一孔插温度计，另一孔插搅动器，搅动器用来使投入水中的待测物（已知其质量和温度）跟水温迅速交换，而温度计则用来测小筒内已知质量水的初温及混合后的温度。两筒间不接触防止热的传递。这种量热器，可用来测定热量，比热、潜热（熔解热，汽化热、升华热等）、化学反应热，以及火炉及酒精灯火焰的温度等。

【焦耳实验】

它是 1850 年焦耳首先测定热功当量的实验。盛在绝热容器内的水，由于砝码的下落带动桨叶旋转。而使水温升高。如果砝码下落所作的功为 W ，使容器中质量为 m 的水升高温度为 T ，那么与 W 相当的热量 Q 应为 $Q = Cm T$ 式中 C 是水的比热，根据实验测得的 T ，可将 Q 计算出来； W 可以根据砝码的质量和下落的距离算出。根据实验所得数据。计算所得结果，这就是测热功当量的焦耳实验。

【燃料的燃烧值】

1 千克某种燃料完全燃烧放出的热量，叫做这种燃料的燃烧值。常用 q 表示，它的单位是焦耳/千克或焦耳/克。如果质量为 m 的燃料完全燃烧后所放出的热量为 $Q_{\text{放}}$ ，其定义式为

$$Q_{\text{放}}=qm$$

燃料燃烧时放出的热量多少，不但与燃料的质量多少有关，还与燃料的种类及燃烧程度有关。燃料燃烧放热与高温物体通过热传递向低温物体放热有本质的区别。前者是化学变化而后者是物理变化。燃烧值是反映燃料通过燃烧这种化学变化放热的特性。为比较各种燃料发热的本领，以相同质量的不同燃料完全燃烧后所释放出的热量对比各不相同。

【热容量】

系统在某一过程中，温度升高（或降低）1 所吸收（或放出）的热量叫做这个系统在该过程中的“热容量”。如果在一定的过程中，当温度升高 T 时，系统从外界吸收的热量为 Q ，那么在该过程中该系统的热容量为

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

热容量的单位是焦耳/开。系统的热容量与状态的转变过程有关。在提到系统或物质的热容量时，必须指明状态的转变过程。系统的热容量还与它所包含的物质的质量成正比，不同过程的热容量不同。

为计算简便，常用水当量的概念，如某系统的热容量与多少克水的热容量相等，即称该系统的水当量为多少克。所以任何系统的热容量在数值上就等于它的水当量。

通常规定，系统吸收的热量为正值，而释放的热量为负值，故在系统吸收热量引起温度升高时，热容量为正值。也有的系统，如饱和水蒸汽，在温度升高时，释放热量，故其热容量为负值。

【比热容】

即比热。是单位质量物质的热容量。单位质量的某种物质，在温度升高（或降低）1 时所吸收（或放出）的热量，叫做这种物质的“比热容”。在国际单位制中，比热的单位是焦耳/（千克·开）（常用的单位还有卡/（克· ）、千卡/（千克· ）等）在国际单位制中，能量、功、热量的单位统一用焦耳，因此比热容的单位应为 J/（kg·K）。

比热容是反映物质的吸热（或放热）本领大小的物理量。它是物质的一种属性。任何物质都有自己的比热容，即使是同种物质，由于所处物态不同，比热容也不相同。例如，水的比热容是 1cal/（g· ），而结成冰以后的比热容则为 0.5cal/（g· ）。比热容是热学中一个重要概念。

它涉及热量、温度、质量三个物理量间的变化即 $C = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$ 。在物质不变

的情况下，物质的比热容大小也因温度的高低、压强和体积的变化，而有所不同。水的比热容，只有当温度从 14.5 上升到 15.5 时，它的比热容才等于 1cal/（g· ），在其他温度间隔，水的比热容不一定等于 1cal/（g· ）。但由于差别很小，可不加考虑。其他物质在温度改变时，比热容也有很小的变化。比热容表中所给的数值都是这些物质的平均值。气体的比热容和气体的热膨胀有密切关系，在体积恒定与压强恒定时不同，故有定容比热容和定压比热容两个概念。但对固体和液体，二者差别很小，一般就不再加以区分。

【定容比热容】

在物体体积不变的情况下，单位质量的某种物质温度升高 1 所需吸收的热量，叫做该种物质的“定容比热容”。

【定压比热容】

在压强不变的情况下，单位质量的某种物质温度升高 1 所需吸收的热量，叫做该种物质的“定压比热容”。因为气体在压强不变的条件下，当温度升高时，气体一定要膨胀而对外作功，除升温所需热量外，还需要一部分热量来补偿气体对外所作的功，因此，气体的定压比热容比定容比热容要大些。由于固体和液体在没有物态变化的情况下，外界供给的热量是用来改变温度的，其本身体积变化不大，所以固体与液体的定压比热容和定容比热容的差别也不太大。因此也就不需要区别了。

【热平衡方程】

（热交换定律）温度不同的两个或几个系统之间发生热量的传递，直到系统的温度相等。在热量交换过程中，遵从能的转化和守恒定律。从高温物体向低温物体传递的热量，实际上就是内能的转移，高温物体内能的减少量就等于低温物体内能的增加量。其平衡方程式为

$$Q_{\text{放}}=Q_{\text{吸}}$$

此方程只适用于绝热系统内的热交换过程，即无热量的损失；在交换过程中无热和功转变问题；而且在初、末状态都必须达到平衡态。系统放热，一般是由于温度降低、凝固、液化及燃料燃烧等过程。而吸热则是由于温度升高，熔解及汽化过程而引起的。

【等温过程】

热力学系统在恒定温度下发生的各种物理或化学过程。在整个等温过程中，系统与其外界处于热平衡状态。例如，与恒温箱接触的一个气筒，可用一活塞对它缓慢地压缩，所做的功表现为流进容器内使气体的温度保持不变的量。蓄电池在室温下缓慢充电和放电，都是近似的等温过程。对一定质量理想气体等温可逆过程的特征是气体压强 P 和体积 V 的乘积不变， $PV=\text{恒量}$ 。理想气体的内能仅仅是温度的函数，所以过程中内能不变。

【等压过程】

又称“定压过程”。热力学系统在状态发生（物理或化学）变化过程中，其物质系统的压强始终保持恒定，其特点是 $P=\text{恒量}$ 。等压过程能量转化特点是系统吸收的热量等于系统内能的增量和系统对外所做功之和；等于系统态函数焓的变化。

等压过程在工程热力学中，如水蒸气在锅炉过热器内受热的过程，常常用工质的焓的数值所编成专门的图表，可直接根据状态从图表中查出焓值，用来计算工质在定压下吸收的热量。又如在大气压下，气缸中的气体受热缓慢的膨胀；等压下的化学反应，由 $Q_p = \Delta H$ 知其反应热等于生成物和反应物的焓差，可用来计算反应热。对一定质量理想气体等压过程的特征是它的体积在过程中与绝对温度成正比。

【等容过程】

又称“定容过程”。物质系统的体积保持不变的情况下所发生的各种物理或化学过程，其特点是体积 V =恒量。由于在等容过程中系统对外界不作功，所以，当系统的温度升高时，将从外界吸收热量 Q ，并全部转变为自身内能的增加。对一定质量理想气体等容过程的特征是压强和绝对温度按正比的变化。

【绝热过程】

热力学系统与外界无热交换的过程，即不吸收热量也不放出热量的过程叫“绝热过程”。由良好的绝热材料隔绝的系统中进行的过程，或由于过程进行得迅速来不及和外界有显著热交换的过程，都可近似地看作绝热过程。例如，声波在空中的传播，蒸气在汽轮机内膨胀做功的过程，均可当作绝热过程处理。一个系统作绝热变化，只是对外没有热量交换，并不是这系统本身温度不变。例如，对气体作绝热压缩，温度升高，当气体作绝热膨胀时，温度则常是降低。绝热过程中系统与外界无热交换 $Q=0$ 。根据热力学第一定律，绝热过程中能量转化的特点是系统内能的变化等于外界对系统所作的功， $U=A$ 。当 $A>0$ ，外界对系统做功，则 $U>0$ ，系统内能增加。反之，当 $A<0$ ，系统对外界做功，系统内能减少。

【相变】

(物态变化)不同相之间的相互转变,称为“相变”或称“物态变化”。自然界中存在的各种各样的物质,绝大多数都是以固、液、气三种聚集态存在着。为了描述物质的不同聚集态,而用“相”来表示物质的固、液、气三种形态的“相貌”。从广义上来说,所谓相,指的是物质系统中具有相同物理性质的均匀物质部分,它和其他部分之间用一定的分界面隔离开来。例如,在由水和冰组成的系统中,冰是一个相,水是另一个相。铁、铁、铁和铁是铁晶体的四个相。不同相之间相互转变一般包括两类,即一级相变和二级相变。相交总是在一定的压强和一定的温度下发生的。相变是很普遍的物理过程,它广泛涉及到生产及科技工作。在物质形态的互相转换过程中必然要有热量的吸入或放出。物质三种状态的主要区别在于它们分子间的距离,分子间相互作用力的大小,和热运动的方式不同。因此在适当的条件下,物体能从一种状态转变为另一种状态。其转换过程是从量变到质变。例如,物质从固态转变为液态的过程中,固态物质不断吸收热量,温度逐渐升高,这是量变的过程;当温度升高到一定程度,即达到熔点时,再继续供给热量,固态就开始向液态转变,这时就发生了质的变化。虽然继续供热,但温度并不升高,而是固液并存,直至完全熔解。一般物质三态相互变化过程可见图 2—12 所示。

【一级相变】

在发生相变时，有体积的变化同时有热量的吸收或释放，这类相变即称为“一级相变”。例如，在 1 个大气压 0 的情况下，1 千克质量的冰转变成同温度的水，要吸收 79.6 千卡的热量，与此同时体积亦收缩。所以，冰与水之间的转换属一级相变。

【二级相变】

在发生相变时，体积不变化的情况下，也不伴随热量的吸收和释放，只是热容量、热膨胀系数和等温压缩系数等的物理量发生变化，这一类变化称为二级相变。正常液态氦（氦）与超流氦（氦）之间的转变，正常导体与超导体之间的转变，顺磁体与铁磁体之间的转变，合金的有序态与无序态之间的转变等都是典型的二级相变的例子。

【熔解】

物质由固相转变为液相的过程，叫做“熔解”。它是凝固的相反过程。晶体物质在一定压强和一定的温度下，就开始熔解。在熔解过程中，要吸收热量，这部分热量是熔解热。尽管晶体物质吸收熔解热而熔解，但其温度不变，直至全部晶体都变成液体时为止。晶体熔解时对应的温度，称为熔点。

在熔解过程中，吸收热量的多少，只能影响熔解的快慢，而不能影响熔解温度的高低。这说明晶体在熔解和凝固的过程中具有共同的特征——温度保持不变。晶体的液态和固态之间有着明显的界限。这是由于晶体的分子是按一定的规则排列成为空间点阵的。分子只能在平衡位置附近不停地振动，因此，它具有动能；同时，在空间点阵中，由于分子之间相互作用，它又同时具有势能。晶体在开始熔解之前，从热源获得的能量，主要是转变为分子的动能，因而使物质的温度升高。但在熔解开始时，热源传递给它的能量，是使分子的有规则的排列发生变化，分子之间的距离增大以及分子离开原来的平衡位置移动。这样加热的能量就用来克服分子之间的引力做功，使分子结构涣散而呈现液态。也就是说，在破坏晶体空间点阵的过程中，热源传入的能量主要转变为分子之间的势能，分子动能的变化很小，因此，物质的温度也就没有显著的改变。所以熔解过程是在一定温度下进行的。

非晶体在熔解过程中，随温度的升高而逐渐软化，最后全部变为液体，所以熔解过程不是与某一确定温度相对应，而是与某个温度范围相对应。因为非晶体物质的分子结构跟液体相似，它的分子排列是混乱而没有规则的，即使由于它的粘滞性很大，能够保持一定的形状，但是实际上它并不具有空间点阵的结构。热源传递给它的能量，主要是转变为分子的动能。所以在任何情况下，只要有能量输入，它的温度就要升高。因此它没有一定的熔解温度，并且在熔解过程中温度是不断上升的。

固态在熔解时，物质的物理性质要发生显著变化，其中最主要的是饱和蒸汽压、电阻率以及熔解气体能力的变化，特别是体积的变化。例如，冰总是浮在水面上，严冬季节，盛满水的瓶子因冻结而将杯胀裂。固体石蜡放入熔解的液体石蜡里，会下沉到底部。从而得出固态熔解成液态，或液态凝固成固态时，体积和密度通常是要发生变化的。大多数物质如石蜡、铜、锌、锡等，在溶解时体积变大，在凝固时体积要缩小。这是因为在晶体内分子有规则排列时所占的体积要比在液体内分子杂乱无章排列时所占的体积小些。但也有少数物质例外，例如，冰、铋和锑等，它们在凝固时体积反而变大，熔解时体积反而缩小。利用这一特点，在铸铅字时，常常要在铅中加入一些铋、锑等金属，使其在凝固时膨胀，字迹清晰。

【熔点】

是晶体物质熔解时的温度。也就是该物质的固相和液相可以平衡共存 的温度。各种晶体中粒子之间相互作用力不同，因而熔点各不相同。同一 种晶体，熔点与压强有关，一般取在 1 大气压下物质的熔点为正常熔点。 在一定压强下，晶体物质的熔点和凝固点都相同。熔解时体积膨胀的物质， 在压强增加时熔点就要升高。因为压强的增加使物体体积被压缩，因此， 在这种情况下，就要阻碍物体熔解时体积的胀大。为使物质熔解后体积能 够胀大，则必须继续加热，使物质的分子振动更激烈，也就是使物体的温 度升得更高。例如，水银的熔点在 1 大气压下为 -39°C ，而在 15000 大气压 下为 10°C 。这类物质在压强减小时熔点就下降。熔解时体积缩小的物质， 在压强增加时熔点就要降低。在这种情况下，压强的增加会促使物质体积 的缩小，因此温度不必升高到原来的熔点就能够熔解。例如，冰在 1 大气 压下的熔点是 0°C ，而当外界压强每增加 1 个大气压，它的熔点就要下降 0.0075°C 。熔点随压强而改变的关系可由克劳修斯—克拉珀龙方程给出。 当液体中含有溶质（杂质）时，就不易凝固，因而熔点要降低。例如水中 含有蔗糖。凡水中含有机物越多，它的熔点也降低得越快。如在冰上撒盐， 冰就容易熔解。又如锡在 232°C 熔解，铅在 327°C 熔解，而其合金，在 170°C 左右即可熔解。但也出现另一种情况，即非常纯净而不含杂质的液体， 在冷却到熔点以下若干度时，仍保持液体状态而不凝固。此即液体的过度 冷却。

【熔解热】

单位质量晶体物质，在熔点由固相转变为液相所吸收的相变潜热。晶体的熔解是粒子由规则排列转向不规则排列的过程。这些热量就将用来反抗分子引力做功，增加分子的势能，也就是说，这时物质所吸收的热量是破坏点阵结构所需的能量，使分子的运动状态起质的变化——从固态的分子热运动转变成液态的分子热运动，同时改变了物质的状态。所以晶体不仅有固定的熔点，而且还需要吸收一定数量的热量来实现它的熔解。由于物质不同其晶体空间点阵结构不同，尽管各种不同物质的质量相同，但在熔解时所吸收的热量却不相同。为表示晶体物质的这一特性，而引入熔解热。它表示单位质量的某种固态物质在熔点时完全熔解成同温度的液态物质所需要的热量；该物质在凝固时，在凝固点，也等于单位质量的同种液态物质，转变为晶体所放出的热量。

如果用 q 表示物质的熔解热， m 表示物质的质量， Q 表示熔解时所需要吸收的热量，则

$$Q = m q$$

熔解热的单位是焦耳/克或焦耳/千克。测量熔点较高的物体的熔解热是比较困难的，但是对于熔点较低的物体，就可以用量热器来测定。

【凝固热】

液态晶体物质在凝固过程中，要释放出热量，这部分热量就是“凝固热”（即熔解热）。见熔解热。

【凝固】

物质从液相变为固相的过程，称为“凝固”。它是熔解的相反过程。在一定压强下，液态的晶体物质，其温度略微低于熔点时，微粒便将规则地排列成为稳定的结构。开始是少数微粒按一定的规律排列起来，形成所谓的晶核，而后围绕这些晶核成长为一个一个晶粒。因此，凝固过程就是产生晶核和晶核生长的过程，而且这两种过程是同时进行的。凝固时的温度就是凝固点，不同的晶体其凝固点亦不相同。液态晶体物质在凝固过程中放出热量（称为凝固热，其数值等于熔解热），在凝固过程中其温度保持不变，直至液体全部变为晶体为止。非晶体的液态物质，在凝固过程中，温度降低逐渐失去流动性，最后变为固体。在凝固过程它没有一定的凝固点，只是与某个温度范围相对应。

【凝固点】

是晶体物质凝固时的温度，不同晶体具有不同的凝固点。在一定压强下，任何晶体的凝固点，与其熔点相同。同一种晶体，凝固点与压强有关。凝固时体积膨胀的晶体，凝固点随压强的增大而降低；凝固时体积缩小的晶体，凝固点随压强的增大而升高。在凝固过程中，液体转变为固体，同时放出热量。所以物质的温度高于熔点时将处于液态；低于熔点时，就处于固态。非晶体物质则无凝固点。

【结晶】

物质从液态或气态形成晶体的过程。当温度降低时，微粒将有规则地排列起来，开始时是少数微粒按一定的规律排列而形成晶核，然后围绕这些晶核成长为一个一个小晶粒。因此，凝固过程实质就是产生晶核和晶核成长的过程，这两种过程是同时产生的而且又同时进行着，产生晶核是指在液体内部产生的一些晶核。这些晶核可以由液体中本身原子自发地聚集起来形成的；也可以是由外来杂质的质点为基础而非自发形成的；也可以是人为加入一小块单晶体作为晶核。晶核生长指的是围绕着晶核的原子继续按一定规律排列在上面，使晶体点阵得以发展。在凝固完成约将过半时，生长着的晶粒互相抵触，朝有液体存在的方向生长，最终凝成了多晶体。

【过冷】

温度降低超过了应该发生相变的温度但还未发生相变的现象，叫作“过冷”。在过冷蒸气因缺乏凝结核心尚未形成液滴的情形下，若引入高能粒子而使气体离子化，这些离子就会成为凝结液滴的核心，生成一连串的小液滴。在严冬，空气中的小雾珠在冷到-30℃时仍未冻结，由于飞机喷出大量烟气，空气也受到了振动，而使小雾珠结冰，附着在机翼上，极易造成事故。在加压情况下，纯净无杂质的液体，冷到凝固点以下，仍能保持液态。液体分子失去能量，但不会自发地构成固体的有规则的几何排列。若加入一小粒晶体作为形成晶体的晶核，液体就会凝固。

【冰点】

是水的凝固点。在一大气压下，含饱和空气的纯水和冰可以平衡共存的温度，叫作“冰点”。冰点与压强有关，压强增大，冰点则相应降低。1954年以前，以汽点和冰点作为温度计分度的两个固定点。以冰点作为摄氏温标的0，后因冰点准确值难以测定，故在1954年将此标准废弃。现已改用水的三相点作为温度计分度的标准。

【复冰现象】

为了表明冰的熔点随压强的增大而降低这一现象，通过实验与观察可以证实。例如，将一根钢丝放在一大块冰上，在钢丝的两端各悬挂一质量相等的大砝码。在钢丝下面的冰受到钢丝较大的压强，而变成液态的水，熔解的水处于钢丝的上面，由于这一部分的压强减小，又由于钢丝下面的冰在熔解过程吸收它的热量，于是这部分已被熔成的水，又结成为冰。结果是钢丝穿过冰块，而冰块并没有被分裂为两块。如果两砝码的质量增加，则熔解的速度更快些。这种现象称为复冰现象。

【熔化】
见熔解条。

【潜热】

物质发生相变（物态变化），在温度不发生变化时吸收或放出的热量叫作“潜热”。物质由低能状态转变为高能状态时吸收潜热，反之则放出潜热。例如，液体沸腾时吸收的潜热一部分用来克服分子间的引力，另一部分用来在膨胀过程中反抗大气压强做功。熔解热、汽化热、升华热都是潜热。潜热的量值常常用每单位质量的物质或用每摩尔物质在相变时所吸收或放出的热量来表示。

在一级相变中，吸收或释放热量，伴随体积的变化，但系统的温度不变。所吸收或放出的热量称为“相变潜热”。相变潜热与发生相变的温度有关，单位质量的某种物质，在一定温度下的相变潜热是一定值。若用 U_1 和 U_2 分别表示 1 相和 2 相单位质量的内能，用 V_1 和 V_2 分别表示 1 相和 2 相单位质量的体积，于是单位质量的物质由 1 相转变为 2 相时所吸收的相变潜热可用下式表示

$$l = (U_2 - U_1) + P(V_2 - V_1) = h_2 - h_1$$

式中 P 是作用于系统的外部压强 h_1 和 h_2 分别为 1 相和 2 相单位质量的焓。上式相变潜热公式表明，相变潜热 l 包括内潜热 $(U_2 - U_1)$ 和外潜热 $[P(V_2 - V_1)]$ 两部分。

【转变热】

或叫潜热。见潜热条。

【汽化】

是物质由液相转变为气相的过程。汽化有两种形式，即蒸发和沸腾。液体汽化时需要吸收热量，这部分热量称为汽化热，它是相变潜热之一。凝结是汽化的相反过程。

【汽化热】

单位质量的某种物质在温度保持不变的情况下，由液相转变为气相时所吸收相变潜热，也等于同种物质的单位质量，在相同条件下由气相转变为液相所释放的相变潜热。不同的液体汽化热不同，同种液体在不同的温度时其汽化热亦不同。当温度升高时其汽化热减小。这是由于温度升高，液态与气态之间的差别逐渐减小的缘故。例如，1 摩尔的水，在 50℃ 汽化，汽化热为 42780 焦耳，而在 100℃ 汽化，汽化热为 40680 焦耳。1 摩尔物质的汽化热称为摩尔汽化热。在国际单位制中，汽化热的单位是焦耳/千克（常用的还有卡/克；千卡/千克）。

【蒸发】

是发生在液体表面的汽化现象。它是液体汽化形式之一，而且在任何温度下都可以蒸发。从微观上看，蒸发就是液体分子从液面离去的过程。由于液体中的分子都在不停地作无规则运动，它们的平均动能的大小是跟液体本身的温度相适应的。由于分子的无规则运动和相互碰撞，在任何时刻总有一些分子具有比平均动能还大的动能。这些具有足够大动能的分子，如处于液面附近，其动能大于飞出时克服液体内分子间的引力所需的功时，这些分子就能脱离液面而向外飞出，变成这种液体的汽，这就是蒸发现象。飞出去的分子在和其他分子碰撞后，有可能再回到液面上或进入液体内部。如果飞出的分子多于飞回的，液体就在蒸发。在蒸发过程中，比平均动能大的分子飞出液面，而留存液体内部的分子所具有的平均动能变小了。所以在蒸发过程中，如外界不给液体补充能量，液体的温度就会下降。

影响蒸发的主要因素是：其一是与温度高低有关。温度越高，蒸发越快。无论在什么温度，液体中总有一些速度很大的分子能够飞出液面而成为汽分子，因此液体在任何温度下都能蒸发。如果液体的温度升高，分子的平均动能增大，从液面飞出去的分子数量就会增多，所以液体的温度越高，蒸发得就越快；其二是与液面面积大小有关。如果液体表面面积增大，处于液体表面附近的分子数目增加，因而在相同的时间里，从液面飞出的分子数就增多，所以液面面积增大，蒸发就加快；其三是与空气流动有关。当飞入空气里的汽分子和空气分子或其他汽分子发生碰撞时，有可能被碰回到液体中来。如果液面空气流动快，通风好，分子重新返回液体的机会越小，蒸发就越快。

其他条件相同的不同液体，蒸发快慢亦不相同。这是由于液体分子之间内聚力大小不同而造成的。例如，水银分子之间的内聚力很大，只有极少数动能足够大的分子才能从液面逸出，这种液体蒸发就极慢。而另一些液体如乙醚，分子之间的内聚力很小，能够逸出液面的分子数量较多，所以蒸发得就快。此外液体蒸发不仅吸热还有使周围物体冷却的作用。当液体蒸发时，从液体里跑出来的分子，要克服液体表面层的分子对它们的引力而做功。这些分子能做功，是因为它们具有足够大的动能。速度大的分子飞出去，而留下的分子的平均动能就要变小，因此它的温度必然要降低。这时，它就要通过热传递方式从周围物体中吸取热量，于是使周围的物体冷却。

【沸腾】

在一定压强下，被加热的液体温度升高到某一程度时，液体不仅表面汽化，内部也同时产生剧烈的汽化，这种现象叫“沸腾”。沸腾只能在某一特定温度（即沸点）时发生。在沸腾过程中，液体虽然不断地吸收热量，但温度保持不变。从微观角度看沸腾的过程，大体可分两个阶段：沸腾前，烧杯里的水被加热，由于水中溶有空气，在杯底及壁上出现了小气泡，这些小气泡是杯内壁及底部所吸附的空气被分离出来的。小气泡的周围都是水，水就要向气泡里不断地蒸发。小气泡的体积小，里面的气很快就达到饱和状态，所以气泡里不仅有空气而且还有饱和的水汽。当水温继续升高时，小气泡里的饱和蒸汽压也就逐渐增大，于是它的体积也随之增大，在浮力作用下，气泡脱离杯底及器壁而上升，同时，遗留在底面上的少量空气，又逐渐形成新的气泡而上升。当气泡上升到比较冷的水的上层时，由于泡内的饱和汽压小于外部的压强，气泡又逐渐变小，以使泡内的饱和汽逐渐凝结成液体，最后只剩下空气和少量的水汽逃出液面；沸腾过程中，随着温度的升高，气泡里的饱和汽压也越来越大。等到水的温度升高到一定的程度时，气泡内的饱和汽压增大到等于外部压强时，整个水层处在同一温度下，于是气泡在上升过程中就不会再发生水汽凝结和体积缩小的现象。由于不断吸热，气泡周围的水迅速地向气泡内蒸发，气泡的体积在上升过程中就不断地增大。最后当气泡升到水面时裂开，放出大量的蒸汽，此时杯内的水上下翻腾，形成沸腾现象。

由于液体的饱和汽压随温度的改变而改变。任何一种液体只有在一定的温度下才能沸腾，液体发生沸腾还必须是它的饱和汽压与外界压强相等。当外界压强增大时，液体的饱和汽压也相应的增大。因此液体的沸点又与外界压强有关，它随外部压强的增大而升高，随外部压强的减小而降低。一般高压锅内达到 2 个大气压时，锅内温度可达到 120 。

从宏观角度看沸腾与蒸发有所区别。但从相变机构看，沸腾与蒸发只是汽化的不同形式，并没有本质的区别。沸腾时，汽化仍在气、液分界面上以蒸发的方式进行。沸腾过程中只不过是液体内部向上涌起大量的小气泡，升到液面破裂而将大量蒸汽分子送出液面，加快了蒸发的速度。因此，可将沸腾看作是液体内部的汽泡界面上蒸发的过程。这样就大大地增加了气、液之间的分界面。

【沸点】

液体发生沸腾时的温度。当液体沸腾时，在其内部所形成的气泡中的饱和蒸汽压必须与外界施予的压强相等，气泡才有可能长大并上升，所以，沸点也就是液体的饱和蒸汽压等于外界压强的温度。液体的沸点跟外部压强有关。当液体所受的压强增大时，它的沸点升高；压强减小时；沸点降低。例如，蒸汽锅炉里的蒸汽压强，约有几十个大气压，锅炉里的水的沸点可在 200 以上。又如，在高山上煮饭，水易沸腾，但饭不易熟。这是由于大气压随地势的升高而降低，水的沸点也随高度的升高而逐渐下降。（在海拔 1900 米处，大气压约为 79800 帕（600 毫米汞柱），水的沸点是 93.5 ）。

在相同的大气压下，液体不同沸点亦不相同。这是因为饱和汽压和液体种类有关。在一定的温度下，各种液体的饱和汽压亦一定。例如，乙醚在 20 时饱和气压为 5865.2 帕（44 厘米汞柱）低于大气压，温度稍有升高，使乙醚的饱和汽压与大气压强相等，将乙醚加热到 35 即可沸腾。液体中若含有杂质，则对液体的沸点亦有影响。液体中含有溶质后它的沸点要比纯净的液体高，这是由于存在溶质后，液体分子之间的引力增加了，液体不易汽化，饱和汽压也较小。要使饱和汽压与大气压相同，必须提高沸点。不同液体在同一外界压强下，沸点不同。沸点随压强而变化的关系可由克劳修斯—克拉珀龙方程得出。

【过热】

液体被加热，当温度超过其沸点时仍不沸腾的现象叫“过热”。造成这种情形的原因是液体内缺少汽化核。因为液体中的空气泡是沸腾开始时的中心。周围的水要向气泡内蒸发使其体积增大而沸腾。若液体很纯洁无杂质和空气泡，或者经较长时间沸腾后，液体中的空气已经放尽，即使将水加热到 100 以上（其它液体温度高于沸点），也可能还不沸腾。如果在过热液体中投入一些附有空气的固体微粒如玻璃碎片等，液体也会立刻沸腾起来。

【暴沸】

对过热液体继续加热，会骤然而剧烈地发生沸腾现象，这种现象称为“暴沸”。或叫作“崩沸”。过热是亚稳状态。由于过热液体内部的涨落现象，某些地方具有足够高的能量的分子，可以彼此推开而形成极小的气泡。当过热的液体温度远高于沸点时，小气泡内的饱和蒸气压就比外界的压强高，于是气泡迅速增长而膨胀，以至由于破裂引起工业容器的爆炸。液体之所以发生过热的原因是液体里缺乏形成气泡的核心。为避免容器的暴沸，可在容器中放含有空气的无釉陶块等。

【汽化核】

液体内部剧烈汽化现象过程中，器壁上吸附的小气泡与其周围的液体间进行汽化的变化，这些小气泡起着汽化中心的作用，故称作“汽化核”。
见过热及暴沸条。

【蒸气】

由于液态物质的汽化，或固态物质升华而形成的气态物质，称为“蒸气”。蒸气是处于临界温度以下的气体。在保持温度不变的条件下，可通过压缩办法使蒸气变成液体（液化）或固体（凝华）。

【临界状态】

亦称为临界点。是物质的气态和液态能够平衡共存的一个边缘状态。当物质的饱和气的密度与它的液体的密度相等时，这时物质所处的状态叫做“临界状态”。使物质处于临界状态，必须在一定的温度和压强下才能实现。物质处于临界状态时的压强叫做临界压强，处于临界状态时的温度称为临界温度。这部分物质所占有的容积，称为临界体积。临界温度、临界压强、临界体积统称为临界参量，对于不同的物质其临界参量的数值亦不相同。

【临界点】

见临界状态。在临界等温线上相当于临界态的一点叫临界点。

【临界压强】

临界点的压强称临界压强。见临界状态。

【临界温度】

物质处于临界状态时的温度，称为“临界温度”。降温加压，是使气体液化的条件。但只加压，不一定能使气体液化，应视当时气体是否在临界温度以下。如果气体温度超过临界温度，无论怎样增大压强，气态物质也不会液化。例如，水蒸汽的临界温度为 374 ，远比常温度要高，因此，平常水蒸汽极易冷却成水。其他如乙醚、氨、二氧化碳等，它们的临界温度高于或接近室温，这样的物质在常温下很容易被压缩成液体。但也有一些临界温度很低的物质，如氧、空气、氢、氦等都是极不容易液化的气体。其中氦的临界温度为-268 。要使这些气体液化。必须具备一定的低温技术和设备，使它们达到它们各自的临界温度以下，而后再用增大压强的方法使其液化。

【临界常数】

亦称临界参量。它是临界温度、临界压强和临界体积的统称。不同物质的常数值不同。

【饱和蒸气】

蒸气跟产生它的液体处于动态平衡时，这种蒸气称为“饱和蒸气”。液体蒸发时，既有分子从液体中逸出形成蒸气，同时也有由于分子间或与器壁间相碰撞等原因而使分子又回到液体中去。当从液面逸出的分子数等于回到液体中来的分子数时，液面上蒸气的密度就不再增加了。液体也不再减少，此时的蒸气叫“饱和气”。在蒸气达到饱和状态时，液体分子仍不断地逃逸，只不过是在单位时间内从液面逃逸的分子数等于飞回液体的分子数。蒸气和液体之间达到了动态平衡。此时的蒸气才叫做饱和气。例如，在盖紧了酒的瓶子里，酒面上的蒸气都是饱和气。

【饱和蒸气压】

饱和蒸气的压强。它与液体的种类、体积及温度有关。每一种液体在一定的温度下有一定的饱和气压，而不同种类液体的饱和气压却不相同。由于液体分子的内聚力越小，飞出液面的分子数就越多。为了要使飞回液体的分子数和飞出液面的分子数相等，即达到动态平衡，液面上蒸气的密度就必须大些，但是，当液面上蒸气的密度大时，它的压强也就增大了。例如，乙醚的内聚力最小，所以它的饱和蒸气压就最大。

在一定的温度下，同一种液体的饱和气压和饱和气所占的体积没有关系。因为在一定的温度下，如果饱和气的体积增大，则蒸气的密度就要变小。因此，在单位时间飞回液面的分子数就要少于飞出液面的分子数。这样，蒸气将处于未饱和状态，于是，液体又要继续蒸发，直到蒸气处于饱和状态，即达到动态平衡为止。也就是说，蒸气的体积增大时，由于继续蒸发，蒸气的质量增加了，而蒸气的密度却保持不变。反之，在一定的温度下，减小饱和气的体积时，蒸气的密度变大，单位时间内飞回液面的分子数多于飞出液面的分子数。这样一部分蒸气就开始凝结，直到恢复了原有的饱和值时才停止。总之，在一定的温度下，增大或减小饱和气的体积时，它的质量也随着增加或减少，而它的密度却保持不变，所以它的饱和气压也就保持不变。

液体的饱和气压随温度的升高而变大。由于饱和气体的压强跟它单位体积内的蒸气分子个数以及蒸气分子速度有关。在液体温度升高的时候，液体分子的平均动能变大，每秒钟飞出液面的分子数增多，因而饱和蒸气的密度变大，单位体积空间内饱和蒸气的质量也增加了。同时，由于温度的升高，蒸气分子运动的平均速度也变大，这就使饱和蒸气每秒撞击液面或容器壁的次数增多，每次撞击的作用加强。正因为这个双重关系，而使饱和气压随温度的升高而变大。

饱和蒸气压的大小还与液面的形状密切相关。在凹液面情况下，分子逸出液面所需作的功比平液面时大，因要克服图 2—13 中画斜线部分液体分子的引力而做功。因此，单位时间内逸出凹液面的分子数比平液面时少，从而使饱和蒸气压比平液面时小。同理，分子逸出凸液面所需作的功，要比平液面时小，因不必克服如图 2—14 中画斜线部分液体分子的引力而作

图 2—13

功，从而使凸液面上方饱和蒸气压比平液面时大，由于引力的有效作用距离很短（数量级为 10^{-9}m ），所以弯曲液面与平液面上方饱和蒸气压之间的差别，只有当气液分界面的曲率半径很小时，如形成小液滴或小气泡，才会显示出来。

综上所述其结论是：饱和气压的大小，与物质的性质有关，与液面的形状有关，并随着温度的升高而增大，但它跟饱和蒸气的体积无关。

【过饱和蒸气】

在一定温度下，超过饱和蒸气应有的密度而仍不液化或凝华的蒸汽。即在蒸气凝结的初期，由于形成的液滴很小，相应的饱和蒸气压就很大。因此，有时蒸气压超过平面上饱和蒸气压几倍以上也不凝结，这种现象叫过饱和，这种蒸气叫“过饱和蒸气”。处于过饱和状态的蒸气，极不稳定，一旦出现凝结核，部分蒸气就会凝结成液体，其余蒸气就回到了饱和蒸气的状态。由于蒸气中充满了尘埃和杂质等小微粒，它们起着凝结核的作用。当这些微粒表面凝上一层液体后，便形成半径相当大的液滴，凝结就容易发生。在有凝结核时，蒸气压只要超过饱和蒸气压1%，即可形成液滴带电的粒子和离子都是很好的凝结核，静电吸引力使蒸汽分子聚集在它的周围而形成液滴。高能量带电基本粒子在其运动过程中会形成离子，这些离子就成为凝结核。云室中的过饱和水蒸气凝结在它上面，而形成雾状踪迹，由此可观察粒子的轨迹，因而过饱和蒸气在高能物理的研究方面有重要的作用。

【过冷蒸气】

由于过饱和蒸气的密度对应于较高温度时饱和蒸气的密度，所以过饱和蒸气也叫“过冷蒸气”。参阅“过饱和蒸气”。

【未饱和蒸气】

没有达到饱和程度的气叫“未饱和蒸气”。当液体在汽化时，从液体中不断飞出大量的分子而形成蒸气。在蒸发过程中，由于分子的热运动，也有部分分子从蒸气中反回液体中。在一定温度下，若单位时间内返回的分子数小于飞出的分子数，蒸气的密度还可增加。未饱和蒸气和饱和气两者性质不同，但在一定条件下可相互转化。用增加气压（减小它的体积），或降低蒸气的温度，可使未饱和蒸气变成饱和气。也可用减小蒸气的压强（增加它的体积），或增高蒸气的温度，而把饱和蒸气转变成未饱和气。未饱和气跟实际气体一样，它的压强、体积跟温度的相互关系近似地遵循理想气体的定律，而且它与饱和状态愈远，就越符合气体定律。而饱和气的体积、压强、温度变化是完全不遵循理想气体定律的，这就是未饱和蒸气与饱和蒸气在性质上的区别。

【水蒸气】

亦称水汽，是水的气态，它是由水汽化（包括蒸发或沸腾）或冰升华而成，是一种透明无色无味的气体。在空气中容易凝成许多细小水滴而成白色云雾状。由于大气温度变化，云、雨、雾、露、雪等都由此演变而成。

【液化】

物质由气态变为液态的过程，称作“液化”。在液化过程中物质放出热量而温度降低。物质由气态变为液态，必须降低到临界温度以下才能将气体液化，可通过加压或降温的方法来实现。临界温度较高的气体，如氨、二氧化硫、乙醚和某些碳氢化合物，在常温下压缩即可变为液体。有些物质，如氧、氮、氢、氦等的临界温度很低，必须预冷到临界温度以下再压缩才能使之液化。例如，氦气是 1908 年最后一个被液化的气体，它的临界温度是 -268 ，液化这样的气体，必须具备先进的科学技术与设备。

【云】

云是含有水蒸气的空气在上升时所形成的。在空气上升时，越升高到上空，气压便越低，需用自身的热来膨胀，这叫做绝热膨胀。每升高 100 米，气温就降低 1 。气温降到露点以下时，空气中的水蒸气以大气中的微粒为中心而凝结，成为半径约等于 0.01 至 0.05 毫米的无数小滴，这就是“云”。由于日照，地面空气上升，造成对流，不同温度之气流相遇，向外辐射部分热量，水气就凝结成云。气流受山脉的阻挡，沿山腰而上升，或受低气压中心的影响使悬浮在空中由大量水滴或冰晶组成可见的聚合体。按云层高度，一般可分为高云、中云、低云和直展云四族。外形或成层、或成块、或呈波状，由云状演变，能表明大气结构情况和天气的变化。

【雨】

是云中降落的液体水滴。它是由云中的冰晶或雪粒因水汽转移、碰撞、合并等作用，在不断增大到上升气流无力支持时下降融化而成。也有由液体水滴直接增大下降而成的。雨滴的直径约为 0.1~7 毫米。在暖云中有大小水滴共存时，由于各水滴上的饱和蒸气压不同，不能维持平衡。小的水滴将蒸发，蒸气将在大的水滴上凝结，大水滴不断长大，最后落到云外而成雨。

【暖云】

由水滴构成的云称为“暖云”。见雨条。

【雪】

从云中降落白色结晶的六角形固体。它是由于水蒸气在高空遇低温气流，水蒸气在空中直接凝华所致。雪花呈六角形晶体又称六出。雪花形状的形成与空气中含水汽的多少及温度的高低有关。

【雪雨】

温度低于 0 时云中的水滴形成冰晶，这种云称为冷云。但往往会有一部分水滴不凝固而与冰晶共存，这种云称为混合云。在冷云和混合云中，由于冰晶大小不同，或由于冰晶上的饱和蒸气压小于水滴上的饱和蒸气压，有些冰晶不断长大，最后落到云外，成为雪加雨的混合物，故俗称雪雨。

【冷云】
见雪雨条。

【制冷机】

产生低温的装置。要使气体液化首先要获得低温，只有使气体的温度下降到临界温度以下时才能用增大压强的方法使它液化。已知临界温度较高的气体只要稍微压缩就能使它液化，同时放出热量。而当压强减小时，它又可能汽化，同时吸收热量。所以当液体剧烈汽化时，可以使周围的物体冷却。利用这一方法获得低温。这一冷却的原理，就是制冷机、冷藏库等冷冻装置的依据。

冷冻装置的构造，主要是由蒸发器，压缩器和冷凝器三个主要部分组成。压缩器把蒸发器螺旋管中的气体氨用高压压入冷凝器的螺旋管中。由于在压缩过程中对氨做功，所以气体氨的温度要升高。在冷凝器螺旋管外面有流通的冷水，它们吸收了氨的热量后使被压缩的气体氨的温度降低，凝结成液体。液体氨由活门流入蒸发器的螺旋管中，冷凝器中压强约为1.2MPa，而蒸发器中大约只有0.3MPa，所以液体的氨进入蒸发器后很快就汽化，并且需要吸收热量以使周围的物体冷却。在蒸发螺旋管的下面放置冷冻箱，它的温度可低到-10 左右，故可作为冷藏或制冰之用。

【制冷剂】

它是制冷设备的工质，通过对流及液、气两相的转化而带走热量的流体。常用的工质是液态氨。液态氨的蒸发热较大（在沸点-33.35℃时为1370.1焦耳/克），因此它可作致冷剂藉以制冰，或用于电冰箱等设备中。

【湿度】

表示大气干燥程度的物理量。在一定的温度下在一定体积的空气里含有的水汽越少，则空气越干燥；水汽越多，则空气越潮湿。空气的干湿程度叫做“湿度”。在此意义下，常用绝对湿度、相对湿度、比较湿度、混合比、饱和差以及露点等物理量来表示；若表示在湿蒸汽中液态水分的重量占蒸汽总重量的百分比，则称之为蒸汽的湿度。

【绝对湿度】

单位体积空气中所含水蒸汽的质量，叫做空气的“绝对湿度”。它是大气干湿程度的物理量的一种表示方式。通常以1立方米空气内所含有的水蒸汽的克数来表示。水蒸汽的压强是随着水蒸汽的密度的增加而增加的，所以，空气里的绝对湿度的大小也可以通过水汽的压强来表示。由于水蒸汽密度的数值与以毫米高水银柱表示的同温度饱和水蒸汽压强的数值很接近。故也常以水蒸汽的毫米高水银柱的数值来计算空气的干湿程度。

【相对湿度】

空气中实际所含水蒸汽密度和同温度下饱和水蒸汽密度的百分比值，叫做空气的“相对湿度”。空气的干湿程度和空气中所含有的水汽量接近饱和的程度有关，而和空气中含有水汽的绝对量却无直接关系。例如，空气中所含有的水汽的压强同样等于 1606.24Pa (12.79 毫米高水银柱) 时，在炎热的夏天中午，气温约 35℃，人们并不感到潮湿，因此时离水汽饱和气压还很远，物体中的水分还能够继续蒸发。而在较冷的秋天，大约 15℃左右，人们却会感到潮湿，因这时的水汽压已经达到过饱和，水分不但不能蒸发，而且还要凝结成水，所以我们把空气中实际所含有的水汽的密度 ρ_1 与同温度时饱和水汽密度 ρ_2 的百分比 $\rho_1 / \rho_2 \times 100\%$ 叫做相对湿度。也可以用水汽压强的比来表示：

$$\text{相对湿度}(\%) = \frac{\text{水蒸气的分压强}}{\text{同温度下水的饱和蒸汽压}} \times 100$$

例如，空气中含有水汽的压强为 1606.24Pa (12.79 毫米汞柱)，在 35℃ 时，饱和蒸汽压为 5938.52Pa (44.55 毫米汞柱) 空气的相对湿度是 $(\frac{12.79}{44.55} \times 100\% =) 29\%$ ，而在 15℃ 时，饱和蒸汽压是 1606.24Pa (12.79 毫米汞柱)，相对湿度是 100%。

绝对湿度与相对湿度这两个物理量之间并无函数关系。例如，温度越高，水蒸发得越快，于是空气里的水蒸汽也就相应地增多。所以在一天之中，往往是中午的绝对湿度比夜晚大。而在一年之中，又是夏季的绝对湿度比冬季大。但由于空气的饱和汽压也要随着温度的变化而变化，所以又可能是中午的相对湿度比夜晚的小，而冬天的相对湿度又比夏天的大。由于在某一温度时的饱和水汽压可以从“不同温度时的饱和水汽压”表中查出数据，因此只要知道绝对湿度或相对湿度，即可算出相对湿度或绝对湿度来。

【湿度计】

用以测定空气的绝对湿度或相对湿度的仪器，称为“湿度计”。种类很多，有干湿球湿度计，毛发湿度计，通风干湿计，自记湿度计，露点湿度计等。

【干湿球湿度计】

又叫干湿计。利用水蒸发要吸热降温，而蒸发的快慢（即降温的多少）是和当时空气的相对湿度有关这一原理制成的。其构造是用两支温度计，其一在球部用白纱布包好，将纱布另一端浸在水槽里，即由毛细作用使纱布经常保持潮湿，此即湿球。另一未用纱布包而露置于空气中的温度计，谓之干球（干球即表示气温的温度）。如果空气中水蒸汽量没饱和，湿球的表面便不断地蒸发水汽，并吸取汽化热，因此湿球所表示的温度都比干球所示要低。空气越干燥（即湿度越低），蒸发越快，不断地吸取汽化热，使湿球所示的温度降低，而与干球间的差增大。相反，当空气中的水蒸汽量呈饱和状态时，水便不再蒸发，也不吸取汽化热，湿球和干球所示的温度，即会相等。使用时，应将干湿计放置距地面 1.2~1.5 米的高处。读出干、湿两球所指示的温度差，由该湿度计所附的对照表就可查出当时空气的相对湿度。因为湿球所包之纱布水分蒸发的快慢，不仅和当时空气的相对湿度有关，还和空气的流通速度有关。所以干湿球温度计所附的对照表只适用于指定的风速，不能任意应用。例如，设干泡温度计所示的温度是 22℃，湿泡温度计所指示的是 16℃，两泡的温度差是 6℃，可先在表中所示温度一行找到 22℃，又在温度一行找到 6℃，再把 22℃ 横向与 6℃ 竖行对齐，找到数值 54。它的意思就是相对湿度是 54%。

【通风干湿计】

又称吸气干湿计。当干湿球温度计的通风不好时，在湿球的周围很快就呈现饱和状态，因此可在顶部装一用电力或弹簧力使螺旋桨叶转动的送风装置，借以改良并提高灵敏度，此种湿度计叫做通风干湿计。

【毛发湿度计】

人的头发有一种特性，它吸收空气中水汽的多少是随相对湿度的增大而增加的，而毛发的长短又和它所含有的水分多少有关。利用这一变化即可制造毛发湿度计。用酒精等物将毛发洗净除油脂，以毛发十根为一束装置在容器中，利用杠杆原理，扩大它的伸缩藉指针直接在刻度板上指出湿度。另有一种是将头发的一端固定，而另一端挂一小砝码，为能够看清楚头发长短的变化起见，而将头发绕过一个滑轮，同时在滑轮上安一长指针。由于砝码本身的重量作用，而使头发紧紧地压在滑轮上。当头发伸长时，滑轮就作顺时针方向转动，并带动指针沿弧形向下偏转，而当头发缩短时，指针则向上转动。设空气完全干燥时，指针所指的位置为 0。空气中水蒸汽达到饱和状态时，指针所指的地方算作 100，再用干湿泡湿度计和它相核对，刻出度数，这样就可直接测出空气的相对湿度了。毛发湿度计的优点是构造简单，使用方便，唯一的缺点是不够准确。

【自记温度计】

是在毛发湿度计基础上的改进。利用毛发伸缩的性质，连接杠杆及指针，使湿度的变化转变为笔尖的上下运动，并记录在以时钟的装置，能旋转圆筒的记录纸上，这样就可自动地记录连续的湿度变化。

【露点湿度计】

将测定露点装置略加改良制成测定温度的仪器。在一个表面极光滑的金属盒里盛有乙醚，盒盖上开有三个小孔，在一个小孔内插入一支温度计；另一个小孔插入一根弯曲的玻璃管，其一端浸入乙醚中，空气可由这根管子的另一端进入金属盒内；第三个小孔是出气孔。用气筒向盒内打气，乙醚就迅速蒸发，同时吸收周围空气里的热量而使周围空气温度降低。当降到一定温度时，金属盒附近空气里的水汽达到饱和，于是盒面上就出现了一层很薄的细露珠。记下当时的温度 T_1 ，这一温度已较露点略低。以后停止打气，使金属盒的温度回升。等到金属面上的露珠完全消失，再记下温度 T_2 ，这一温度已较露点略高。 T_1 和 T_2 的平均温度就是露点。为能更正确地觉察出露珠的出现和消失，可在盒壁周围加上一个用同样的金属制成的边框，让边框和盒壁之间留有小缝，于是边框的温度比盒壁冷得慢。比较边框和盒壁两表面的状态，就能够很准确地测出露珠出现时的温度。

知道露点后，即可求出原来空气里水汽的绝对温度和相对湿度。这是因为当盒里的温度降低到露点时，周围空气中的水汽虽然呈饱和状态，但空气中水汽的含量却并未改变，即水蒸汽的压强并没改变，而只是由于盒周围温度降低使得它从未饱和变为饱和。因此露点时的饱和水汽压跟空气中原有的未饱和水汽压相等，也就是露点时的饱和水汽压跟原来温度时空气的绝对湿度相等。空气的温度下降到露点时，空气中的水汽就凝结成露。如果低于 0°C ，那么，水汽就直接凝结成霜。

【露点】

使空气中所含有的水蒸汽达到饱和状态而结露时的温度叫做“露点”。它是表示大气干湿程度的方式之一。在水汽无增减、气压不变的情况下，空气中的水蒸气由于冷却而达到饱和时的温度。当气温与露点的差值越小，表示空气越接近饱和，空气的相对湿度则越高。例如，在某一气压下，测得空气的温度是 20℃，露点是 12℃，从表中查到 20℃ 时的饱和蒸汽压为 2328Pa (17.54 毫米汞柱)，12℃ 时的饱和蒸汽压为 1402.3Pa (10.52 毫米高汞柱) 则此时

空气的绝对湿度 $P = 1402.3\text{Pa}$ ，

$$\text{空气的相对湿度 } B = \frac{1402.3}{2328} \times 100\% = 60\%。$$

露点的高低和大气的湿度有关。当大气的相对湿度大时露点高，相对湿度小则露点低。若露点在冰点以上，即变成雨、露、云、雾。若在冰点以下，则生成霜、雪、雹等。

【露】

空气在较冷的物体表面上凝结成的水滴，这一现象多发生在夜间的户外。例如，天黑后植物或岩石等物会放出热量而冷却。周围温暖、潮湿的空气，与物体相接触部分，达到饱和状态而成结晶水，附于其上便为露，它是属于液化的现象。这一现象多发生在夏秋之间，因这一时期的昼夜温差较大。

【骤雨】

夏季烈日当头，地面水汽上升，易形成剧烈的上升气流，形成乱积云。大粒水滴下落，形成倾盆大雨，并伴有雷声，亦称暴雨。

【雾】

白天太阳照射地面，地面吸收并积蓄了大量的热。夜间，热就开始向空中散发而使地面温度降低。如冷至露点以下，就会使接近地面的水蒸汽达到饱和状态。这些饱和水汽就以空气中的烟尘为核心，而凝结为细小的水滴，浮游于空中，如白气，是为雾。雾滴的直径约在 0.03 毫米~0.04 毫米左右。雾的形成条件必须是无风或风力极微弱的情况下，同时要有凝结核，空气还必须冷至零点以下才行。中国四川的重庆及英国的伦敦，由于地理位置及环境的因素，经常出现大雾，故称之为雾都。

【雾冰】

由雾凝冻而成的白色不透明的小粒状的冰晶。在浓雾中当气温降至 0 以下，雾的水滴在物体或冰的表面凝冻而成的。它不象霜一样的结晶，而是小粒状的冰集合体。

【凝结】

物质由气相转变为液相的过程，称为凝结，即液化的过程。使蒸汽凝结成液体、在凝结过程中放热。如果蒸汽单独凝结，则常以凝结核为中心而形成液滴，如雾。若蒸汽与液体共存，则凝结一般在液体表面发生。见液化条。

【凝结核】

蒸汽在凝结过程中，常是以气中的尘埃、杂质颗粒或带电粒子为中心，在它们周围开始凝结，这些起凝结作用的颗粒称作凝结核。如果蒸汽中缺少这种凝结核，则蒸汽将不会凝结，而会成为过饱和蒸汽。

【气泡室】

类似于云室，它用高压过热液体取代云室中的过饱和蒸汽。所用的液体通常为液态氢或丙烷等。当液体处于过热状态时，尽管液温已超过正常沸点亦不沸腾。此时若有带电粒子通过，在粒子经过的路径上液体被电离。而这些离子的周围便产生一些小气泡，因而就显示出带电粒子的径迹。

【升华】

固态物质不经过液态过程，直接蒸发变成蒸汽的过程叫做“升华”。升华是一个吸热过程，一般在常温和常压下，任何固体表面都会发生升华现象。例如，碘化钾、干冰、硫、磷、樟脑等物质都有很显著的升华现象。从微观角度来看，晶体表面的分子挣脱其他分子的吸引，而跑到晶体外面去成为蒸汽分子的过程就是升华。在三相点的压强以下加热时，固相物质就可以不经过液相而直接变成气相。例如，樟脑丸的逐渐变小，冬天晾在室外结了冰的衣服会变干，这就是升华的结果。

【升华热】

是单位质量的物质升华时所吸收的热量，也等于单位质量的同种物质在相同条件下的熔解热与汽化热之和。升华实际上是晶体中的微粒直接脱离晶体点阵结构而转变成为气体分子的现象，若把能使 1 千克物质升华时所吸收的热量称为升华热。如用 r 表示升华热则有

$$r = \frac{Q}{m}。$$

式中 m 为升华了的物质的质量； Q 为升华时吸收的热量，它的单位也是焦耳/千克。

在升华过程中，微粒一方面必须要克服粒子间的结合力做功，另一方面还要克服外界的压强而做功。根据能量守恒定律，此时必定要从外界吸收热量。因此升华热在数值上与熔解热和汽化热之和相等。其关系式为

$$r = \lambda + L。$$

【干冰】

它是固态的二氧化碳（ CO_2 ），雪白色，熔点为 -78.5 ，能从固态直接升华为气态。在常压下蒸发时可得 -80 左右的低温，减压下蒸发时则温度更低。主要用于食品工业及作致冷剂，亦可用为人工降雨的化学药剂。

【凝华】

物质由气态不经液态的过程，而直接转变为固态的过程叫做“凝华”。在这个过程中物质放出热量而降低温度。单位质量的气态物质凝华时，所放出的热量叫做凝华热在相同的热学状态下同种物质的升华热等于凝华热，且等于相同条件下，它的汽化热和熔解热的和。例如，空气中的水蒸汽遇冷而直接凝结于物体的表面，而成霜。

【霜】

当气温降至 0 以下，空气中的水蒸汽不经液态过程而凝华在地面物体表面呈白色的结晶体，叫做霜。霜一般出现于晴朗天气无风的夜晚或清晨。早霜多在晚秋出现，而晚霜则在早春时产生。霜的出现一般受局部地区影响很大，尽管在同一地区，同一时间里，不一定处处都见到霜。在有霜季节，往往伴随霜冻出现。霜是凝华的表现。北方霜降一般在 10 月底，为初霜期。植物在冷暖过渡季节因周围气温短时间降低到 0 或 0 以下可能遭受冻害。但出现霜冻时霜不一定出现。

【霰】

为白色不透明球形或圆锥形的固体降水物，直径比米雪大，约2~5毫米。它是由过冷水滴碰撞在冰晶（或雪花）上冻结所致，落地后会反跳，且易破碎。霰多在落雪前在一定对流强度的云中降落，多为阵性降落。

【霰】

为球形，圆锥形或不规则形体的冰块，直径大小不一，常见的5~50毫米，也有直径约30厘米的大冰霰。霰常自升降气流特别强烈的积雨云中降落。霰一般是由霰在积雨云中随气流多次升降，不断与沿途雪花、小水滴等合并，形成具有透明与不透明交替层次的冰块。在它增大到一定程度时，上升气流支持不住时而降落到地面，俗称冰霰。降霰为阵性，但其危害性却极大。

【汽化曲线】

又称气液两相图。是在 $P-T$ 图上表示气相和液相的相平衡曲线。如图 2 - 15 所示。以温度 T 为横坐标， P 为纵坐标，曲线 OK 称为汽化曲线。在曲线 OK 的上方为液相存在的范围，在曲线 OK 的下方则为气相存在的范围。至于在曲线 OK 上的每一个点，都对应着气、液两相平衡共存的状态。曲线 OK 上一点所对应的压强，就是气、液两相共存时的饱和蒸汽压强。因此，汽化曲线 OK 还可以表示饱和蒸汽压与温度的关系。从图中可知，汽化曲线有始点 O 和终点 K 。在始点 O 以下，气相不可能再和液相平衡共存，而只能和固相平衡共存。在终点 K ，它就是临界点， K 点以上就不存在气、液两相平衡共存的状态了。汽化曲线也可以表示沸点与外界压强的关系，因为沸点是随外界压强的变化而改变的。

【三相图】

当固体升华时，若固体和它的蒸汽达到动态平衡，则此时的蒸汽叫做饱和蒸汽，它的压强就叫做饱和蒸汽压强。如图 2 - 16P—T 图的曲线 OS，叫做升华曲线。它表示固、气两相共存时的温度和饱和蒸汽压强之间的关系。P、T 两个参量中，只要确定任何一个，则另一参量即可确定，但它们都不能任意选定。图 2 - 16 所示的 P—T 图为三相图。它表示固、液、气三相存在的条件以及相互转变的情况。如果固、液、气三相是平衡共存的，则温度和压强都是确定的，没有哪一个参量可以任意选取。因此，这三条曲线的公共交点 O 便表示了三相共存的状态，故称做三相点，例如，水的三相点的温度是 0.01（即 273.16 开），压强是 546.84Pa（4.851 毫米高汞柱）。

任一物质都有它独特的相图，特别是在冶金工艺方面，相图是重要的依据。掌握三相图可控制相变的条件。由于三相共存是一个不变的系统，三相点是不受其它条件影响而确定的状态，所以，三相点温度是一个确定的温度。为此，才选取三相点的温度作为制定温标的参考点。

【相平衡曲线】

在单元双相系平衡共存时,在 P—T 图上表示出压强和温度的关系曲线称为相“平衡曲线”。它是两相的分界线。在相平衡曲线上的点,表示两相共存的态。曲线两侧的区域,各自代表一个相独立存在的状态范围。

相平衡曲线包括熔解曲线、汽化曲线和升华曲线。熔解曲线是固相与液相平衡共存的相平衡曲线,它是固相和液相的分界线;汽化曲线是气相与液相平衡共存的相平衡曲线,它是汽相和液相的分界线;升华曲线是固相与气相平衡共存的相平衡曲线,它是固相和气相的分界线。

【克拉珀龙方程】

相平衡曲线上任何一点的线斜率满足克拉珀龙方程

$$\frac{dP}{dT} = \frac{l}{T(V_2 - V_1)}$$

式中 T 为发生相变的温度， l 为单位质量的相变潜热， V_1 、 V_2 分别为 1 相和 2 相的比容。这个方程式给出了单元双相系平衡压强随温度的变化关系。它不仅对于研究相变是非常重要的，同时，由于它是从热力学第二定律中得到的，式中各物理量都可以在实验中测量，所以可以通过这个方程式从实验上验证热力学第二定律的正确性。

利用上式可以考察沸点随压强的变化关系和熔点与压强的变化关系：若令 1 相为液相，2 相为气相，由于液相变为气相时要吸热，所以 $l > 0$ ，又由于气相的比容 V_2 总是大于液相的比容 V_1 ，即 $V_2 > V_1$ ，因此由上述方程可知，对于液气相变

$$\frac{dP}{dT} > 0$$

由此说明沸点随压强的增加而升高，随压强的减小而降低；若令 1 相为固相，2 相为液相，由于固相转变为液相时要吸热，所以 $l > 0$ ，但固相变为液相时（即固体熔解时）其体积有可能膨胀，也有可能缩小。

$$\text{如 } V_2 > V_1, \quad \text{则 } \frac{dP}{dT} > 0$$

$$\text{如 } V_2 < V_1, \quad \text{则 } \frac{dP}{dT} < 0$$

即熔解时体积膨胀，则熔点随压强的增加而升高，反之，熔解时体积缩小，则熔点随压强的增加而降低。

【能量守恒定律】

在自然界里所发生的一切过程中，能量既不会消灭，也不会创生，它只能从一种形式转变为另一种形式或从一个物体转移到另一个物体，而能的总量保持不变。这个规律叫做“能的转化和守恒定律”。或者说，任一封闭系统，无论发生什么变化，其能量的总值保持不变。这一定律包括定性和定量两个方面，在性质上它确定了能量形式的可变性，在数值上肯定了自然界能量总和的守恒性。一种能量的减少，总是伴随某种能量的增加，一减一增，其数值相等。各种不同形式的运动（机械运动、热运动、电磁运动等等）都具有相应的能量，因而这一定律是人类对自然现象长期观察和研究的经验总结。

【热工学】

它是以研究热能与机械能互相转化以及如何将热能合理地运用在生活和生产上的一门综合性学科。它以传热学和工程热力学为理论基础。主要研究范围包括锅炉、蒸汽机、汽轮机、内燃机、燃气轮机和制冷设备等的工作原理和结构。原子核反应堆的热能，太阳能以及地下热的利用等也在热工学研究的范围。

【热机】

热力发动机的简称。它能够连续不断地把燃料燃烧时所放出的热量，通过传热的方式转变为物质的内能，再通过做功的方式转变为其他形式的能（如机械能）的装置。它的种类很多，但是它们的主要工作原理都是利用高温高压的气体或蒸汽膨胀做功。如蒸汽机、汽轮机、燃气轮机、内燃机和喷气发动机等。是工农业生产、发电、交通运输各部门所需动力的主要来源。热能的来源有燃料燃烧所放出的热能以及原子能、太阳能及地热等。热机的组成必须具备三个组成部分。其一是发热器，它是使燃料所释放出的能量转变为工质内能的装置；其二是工作部分，它是使工质消耗内能来做机械功的装置；其三是冷凝器，这部分是容纳工作部分排出的废工质的装置。热机工作时，当工质从发热器得到的热量，只有一部分转变为机械功，其余部分都传给了冷凝器。工质从发热器得到的热量是 Q_1 ，其中一部分 Q_2 被做过功的废工质带入冷凝器，转变为机械功的只是 $Q_1 - Q_2$ 。

【工质】

热机都是利用气体或蒸汽的膨胀来做功的，在技术上常称气体或蒸汽为热机的工作物质，简称为工质。蒸汽机和汽轮机中的工质是蒸汽；内燃机的工质是汽油或柴油与空气的混合物。

【锅炉】

它是高压蒸汽的发生器。在锅炉中燃料的化学能转变为蒸汽的内能。锅炉由火室和汽锅两部分组成。根据构造和形式的不同。可以分为水管式锅炉和烟管式锅炉。水在水管或汽锅中受热变成水蒸汽后，由前水管送到汽锅的上部，汽锅中的饱和水蒸汽又由输气管送到过热器中，再次受热变成过热蒸汽，过热蒸汽经过送气管送到蒸汽机的汽缸中去推动活塞做功。

从火室中出来的烟气的温度很高，通常在 350 至 400 左右，为此在烟道中装有省煤器，器中装水，以便烟气通过时使水预热升温将这样的高温水注入汽锅，可避免汽锅温度的剧烈变化。

水管式锅炉蒸发量大，水管、汽锅和火室体积很大，一般用在火力发电站等固定位置，火车上用的是烟管式锅炉，结构简单，体积小被广泛地使用在火车或小型工厂。

【安全阀】

密闭在锅炉里的蒸汽，当压强超过一定限度时，汽锅有爆炸的危险。为保证安全生产，各种锅炉都装有安全阀，安全阀平时是关闭着的。当锅炉里的蒸汽压强超过一定限度时，蒸汽就会顶开安全阀，泄出一部分蒸气，而使锅炉里的气压恢复到安全限度以内，避免事故的发生。安全阀是利用杠杆原理制成可调控汽压的装置。

【蒸汽机】

利用蒸汽的循环，把热能转变为机械能的装置。将高温高压的水蒸汽引入蒸汽机的汽缸，利用蒸汽的膨胀，推动汽缸里的活塞往复运动。并且利用活塞杆、十字头、连杆、曲柄、飞轮，使活塞的往复运动转换为飞轮的转动。火车就是利用蒸汽机为动力的一种装置。

【静点】

当蒸汽机的活塞杆、连杆和曲柄位于同一条直线上时，连杆不能使曲柄转动，这个位置叫做“静点”，出现静点时，机器不能运转。为了使曲柄在静点的时候还能够继续转动，就在机轴上装置一个很重的飞轮，依靠飞轮转动的惯性，使曲柄通过静点，维持机器连续不断地转动。活塞往复一次将出现两次静点。也有把静点叫做死点的。

【冷凝器】

蒸汽在汽缸中膨胀做功以后，内能已经减少，常把它叫做废汽，或称为废工质。为使蒸汽机继续工作，就必须把废工质从汽缸中排出，并再吸进新的工质。容纳废工质的装置就叫做冷凝器。根据不同的需要冷凝器的种类亦有所不同，火车蒸汽机的冷凝器是大气。常见的冷凝器有喷射式和水管式，废工质经冷凝器后气温降低凝结成水，这部分水含杂质很少，而且水温较高，可经过去油污等处理再送到锅炉里作为给水，既可节约燃料，又能延长锅炉的寿命。

【燃烧效率】

燃料在发热器中燃烧时，往往由于设备不够完善而不能完全燃烧，同时也不可能把燃烧时所释放的化学能全部转变为工质的内能。设燃料经过完全燃烧所能够放出的热量是 Q ，传递给工质的热量只有 Q_1 ，那么燃烧效率：

$$\eta_{\text{热}} = \frac{Q_1}{Q}$$

因为燃料的燃烧过程是在锅炉中进行的，所以燃烧效率也称为锅炉效率。

【热效率】

工质从发热器吸收到的热量 Q_1 ，在做功时并不能全部转变为机械功，其中总是有一部分热量 Q_2 要被废工质带出热机的工作部分。所以转变成机械功的净热量是 $Q_1 - Q_2$ ，而热机的热效率：

$$\eta_{\text{热}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}。$$

【机械效率（热学）】

由热量 $Q_1 - Q_2$ 转变而成的机械功不能全部传到发动机的机轴上作为输出的有用功，其中有一部分要消耗在传动装置上，例如消耗在活塞、十字头、曲柄以及转动轴等处的摩擦上。因此传到机轴上的与有用功相当的热量 Q_3 ，又是 $Q_1 - Q_2$ 中的一部分。所以热机的机械效率：

$$\eta_{\text{机}} = \frac{Q_3}{Q_1 - Q_2}$$

【热机的总效率】

热机的总效率又叫做热机的经济效率，或有效效率，有时也简称为效率。它是与最后转变为机轴上有用功相当的热量 Q_3 跟燃料完全燃烧时所能放出的热量 Q 的比值，通常用百分比来表示。所以热机的总效率

$$\eta_{\text{总}} = \frac{Q_3}{Q} \times 100\%。$$

从上式看出

$$\frac{Q_3}{Q} = \frac{Q_1}{Q} \cdot \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot \frac{Q_3}{Q_1 - Q_2}$$

即

总 = 燃 · 热 · 机

蒸汽机的效率很低，目前最好的蒸汽机的效率也不过在 15% 左右，提高热机效率是热力工程中的重要任务，一般是从提高热机的燃烧效率、热效率和机械效率三方面着手。首先是改进锅炉的装置，提高热机的燃烧效率。可用煤粉代替煤块，将煤粉喷入火室，并输入热空气助燃，使煤充分燃烧放热。同时改进水管锅炉的构造，增加水的受热面积，并利用省煤器、空气预热器等等。其次是提高发热器的温度、压强和降低冷凝器的温度、压强，借以提高热机的热效率。

卡诺（法国工程师）在理论上研究了热机效率，并提出了没有热损失和摩擦损失的，热效率最高的理想热机的模型。理想热机热效率计算式是

$$\eta_{\text{热}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}，$$

其中 T_1 代表发热器的绝对温度， T_2 代表冷凝器的绝对温度，从公式得出提高热机热效率的主要途径就是提高 T_1 降低 T_2 。因此，目前对锅炉的制造正朝向高温高压方向发展。在锅炉中都用过热器来提高蒸汽的温度和压强，并且用提前闭汽、多级膨胀，减低冷凝器压强等方法来降低废汽的温度，从而提高热效率。

【提前闭汽】

在活塞离开行程终点还有相当距离的时候，即设法使滑动阀将进气管遮住，停止新蒸汽的供给，这叫做“提前闭汽”。或叫做断汽。断汽后汽缸中的蒸汽就要进行绝热膨胀，推动活塞做功并减少内能，于是蒸汽的压强和温度也都要降低。由于这时废汽的温度比不实行提前闭汽时废汽的温度低，并且排除的废汽量也比不提前闭汽时来得少，这就使蒸汽中内能的利用率大大地提高。

【多级膨胀】

由于提前闭汽，使蒸汽的温度和压强迅速下降。在蒸汽温度下降时，汽缸壁和活塞的温度也随之而下降，因此当再通入新蒸汽时，就需要将一部分热量传给汽缸壁和活塞，而这部分热量在废汽排除时又被废汽带走，这样就引起换热损失。换热损失随着新蒸汽和废汽的温度差的增加而增大。同时又由于蒸汽压强下降也会增加新蒸汽与废蒸汽之间的压强差。若压强差过大，可能引起汽缸汽室中的漏汽现象。从而使一部分新蒸汽还没有做功就从排汽口泄出，造成能量的损失。为此，采用多级膨胀法，不让蒸汽的温度在一个汽缸中降低得过多，而让它在第一级汽缸膨胀后，再进入第二、第三个汽缸进行膨胀，经过几次膨胀后再排出去，这样，在每个汽缸里温度和压强的下降并不大，而换热损失和漏汽损失也就减少了。

蒸汽依次通过二个或三个汽缸，最后才作为废汽从排气管排出的蒸汽机，叫做二级膨胀式蒸汽机，或者三级膨胀式蒸汽机。蒸汽每膨胀一次，体积就增加一些，同时压强也减小一些。所以第二级活塞的面积应该比第一级活塞的面积要大，而第三级又应该比第二级的大，只有这样才能使蒸汽对各级活塞的推力比较接近。由于多级膨胀蒸汽机在管理上很麻烦，因此在实际中，二级膨胀蒸汽机比较普遍，而三级以上的就比较应用得少了。

【换热损失】
见多级膨胀条。

【蒸汽机示功图】

它表示蒸汽机运转一周时所做的功。用 $P-V$ 图可研究汽缸中蒸汽压强变化的情况和蒸汽做功的过程，如图 2 - 17 所示。为进一步了解变化过程，分六个阶段描述：

1. 开始时，过热蒸汽从汽缸左面的进气管通过汽室而冲进汽缸，此时活塞在汽缸的左侧尚未运动，因此汽的压强急剧地增加。这一阶段可近似地看作为等容变化过程：汽缸中蒸汽的体积不变，而压强却从冷凝器中废汽的压强升高到锅炉新蒸汽的压强。相应地在 $P-V$ 图中，以直线 AB 来表示。在等容升压时，蒸汽对外不做功。

2. 左边进气管开放，活塞在高压蒸汽作用下向右移动。在这一阶段汽缸和锅炉始终相通，所以蒸汽的压强总是保持不变，并等于锅炉中的蒸汽压。这个过程可以看作是等压变化过程，用等压线 BC 来表示。在等压变化过程中，蒸汽所做的功，在数值上等于四边形 BCC_1B_1 的面积。

3. 此时滑动阀把进气管关闭，汽缸里的蒸汽开始绝热膨胀，消耗它的内能来推动活塞做功。因此，它的压强逐渐减小，用绝热线 CD 来表示它的变化。在这一过程中，蒸汽所做的功在数值上等于 CDD_1C_1C 所包围的面积。

4. 当活塞到达汽缸的右端时，滑动阀使汽缸的左边和排气管相通，使已经做过功的蒸汽开始排出。此时蒸汽的压强突然下降到跟冷凝器中的压强相同，在这一瞬间，蒸汽体积可以近似地看做不变，我们用直线 DE 来表示。

5. 由于飞轮的惯性，带动活塞通过静点，并向相反方向运动。因此为了要排除汽缸中的废汽，就要反抗它的压强而做功。废汽的压强总是等于冷凝器的压强，所以是一种等压变化过程，并用等压线 EA 来表示。但这时不是蒸汽对外做功，而是活塞依靠飞轮的惯性对废汽做功。活塞对废汽所做的功，在数值上等于 EAB_1D_1E 所包围的面积。

6. 当活塞向相反运动到开始时，左面的汽缸又恢复到情况“1”时，这时蒸汽压强又开始急剧上升。只有采用这样周而复始的变化，才能使蒸汽机继续不断地工作。

从 $P-V$ 图中可看出，图形 $B_1BCDD_1B_1$ 所包围的面积表示蒸汽在等压变化和绝热膨胀时所做的功的和，也就是蒸汽对活塞做的总功。图形 EAB_1D_1E 包围的面积表示活塞在排除废汽时对废汽所做的功。在计算蒸汽机运转一周所做的有用功，应该从 $B_1BCDD_1B_1$ 的面积中，减去 EAB_1D_1E 的面积，也就是应当等于图形 $ABCDEA$ 的面积。根据图形可计算出蒸汽机运转一周所做的功，若知其在单位时间里的运转周数，即能计算出蒸汽机的功率和某一段时间内所做的总功。图线 $ABCDEA$ 称为蒸汽机的示功图。实际上由于蒸汽机在工作中要受到很多其他因素的影响，所以它的几个过程不是严格地等容、等压或绝热地进行，而仅仅是近似于这种情况。

【内燃机】

是将燃料引入汽缸内，利用燃料和空气在汽缸里燃烧，产生高温高压气体急剧膨胀对外做功，推动活塞运动的机器叫内燃机。它的发热器是在工作部分之内的。为了使内燃机连续工作，必须把已膨胀做功后的气体排出，重新装入燃料和空气，再进行第二次燃烧。内燃机主要可分为奥托内燃机和狄塞尔内燃机两种。奥托内燃机通常用汽油作为燃料，而狄塞尔内燃机则是用柴油为燃料。

【汽油机】

是内燃机的一种，用挥发性高的汽油作燃料，汽油机将雾状汽油和空气的混合物引入汽缸，然后利用电极火花，使混合气体燃烧，燃烧时所形成的高温高压气体推动活塞，作往复运动。往复运动又利用曲柄等使移动变为转动。

奥托内燃机的工作过程可分为四个冲程来进行，即吸气冲程、压缩冲程、做功（燃料燃烧气体膨胀而做功，也可叫爆发冲程）冲程和排气冲程，这四个冲程是内燃机的一个循环。从内燃机做功的条件来看，可燃气体的化学反应是它的能源，造成工质的高温；汽缸活塞是它的工作部分；做了功的废工质排出到大气中以大气作为它的冷凝器。因为可燃烧的混合气体在汽缸内燃烧时所产生的温度很高（约在 1500 以上），所以内燃机的效率要比蒸汽发动机的效率高。奥托内燃机在工作中，约有 25%的热量作为有用功，10%的热量损失于摩擦中，25%的热量由废气带走，40%的热量传给汽缸外的冷却水，因此它的效率一般是在 20 ~ 30%。奥托内燃机的功率大小不一，小的约 367.7 瓦（1/2 马力），大的可到 1838.8 千瓦（2500 马力）。

【上止点】

活塞在距曲轴中心最远的位置，即活塞杆、曲柄在一条直线上，出现静点时的状态，叫“上止点”。

【下止点】

活塞在距曲轴中心最近的位置，即活塞杆、曲柄在一条直线上，出现静点时的状态，叫“下止点”。

【冲程】

活塞由下止点到上止点或由上止点到下止点之间的距离，即“活塞冲程”，亦称“行程”。往复式机械中的活塞在汽缸中往复运动时，两个极端位置间的距离。亦指活塞走过这距离的过程。

【四冲程】

内燃机是通过吸气、压缩、燃烧、膨胀、排气几个过程不断重复进行的。如果是在四个冲程里完成吸气、压缩、做功（燃烧、膨胀）、排气的循环动作，就叫做四冲程。相应的内燃机叫四冲程内燃机。

第一冲程，即吸气冲程。这时曲轴向下转动，带动活塞向下，同时通过齿轮带动凸轮向下旋转，使凸轮的凸起部分顶开进气阀门，雾状汽油和空气混合的燃料被吸入汽缸。

第二冲程，即压缩冲程。曲轴带动活塞向上，凸轮的凸起部分已经转了过去，进气阀门被关闭，由于凸轮只转了 $1/4$ 周，所以排气阀门仍然处于关闭状态。活塞向上运动时，将第一冲程吸入的可燃气体压缩，被压缩的气体的压强达到 $6 \sim 15$ 千克力 / 厘米²，温度升高到 300 左右。

第三冲程是做功冲程。在压缩冲程末火花塞产生电火花，混合燃料迅速燃烧，温度骤然升高到 2000 左右，压强达到 $3 \sim 5$ 兆帕。高温高压烟气急剧膨胀，推动活塞向下做功，此时曲柄转动半周而凸轮转过 $1/4$ 周，两个气阀仍然紧闭。

第四冲程是排气冲程。由于飞轮的惯性，曲柄转动，使活塞向上运动，这时凸轮顶开排气阀，将废气排出缸外。

四个冲程是内燃机的一个循环，每一个循环，活塞往复两次，曲轴转动两周，进、排气阀门各开一次。

【二冲程内燃机】

如果在两个冲程里完成进气、压缩、做功、排气这些循环动作，就叫二冲程，相应的内燃机叫二冲程内燃机。

【辅助冲程】

即进气冲程、压缩冲程和排气冲程的统称。为完成做功，这三个冲程都是为做功而准备的，故称之为辅助冲程。

【辅助设备】

内燃机除主要做功部分之外，还有燃料、点火、冷却及润滑四个辅助设备系统。燃料系统主要是化油器，它是把汽油和空气按一定比例配制成雾状的混合气体，以供给汽缸作为燃料使用；点火系统是由蓄电池、线圈、火花塞等部分组成，火花塞是由齿轮来管理的，它能够按时在汽缸中产生电火花，使压缩的混合气体燃烧爆炸；冷却系统，主要部分是汽缸外部缸体的水套，使水在其中可以流动，因为燃料在汽缸中燃烧时，汽缸的温度可以升到 2000 左右，使汽缸壁和活塞发热，易使机件损坏，故汽缸外壁的水套中的水吸热上升进入散热器，降温后，再用抽水机将冷水打回水套中，使水循环地将汽缸冷却。小型内燃机和少数飞机也常用空气减热法，使汽缸外壳与空气接触面积增大，将热散逸到空气中去；润滑系统，是为防止金属磨损，而在机内装有油盘、抽油泵等装置向机件各部分输送润滑油，以减小摩擦损耗。

【奥托循环图线】

四冲程内燃机的一个循环中，气体压强的变化以及气体膨胀做功，用 $P-V$ 图线来描述，这样的图线叫“奥托循环图线”，如图 2 - 18 所示。在吸气冲程中，活塞向下运动同时让气体进入汽缸，此时燃气的压强几乎保持不变，如图中 AB 线。在压缩冲程中，活塞向上运动压缩燃气，使气体压强逐渐增加，这时活塞对气体做功，消耗了机械能，增加了气体的内能。这个过程用曲线 BC 表示。在压缩冲程终

图 2—18

了，做功冲程开始时，气体突然燃烧，压强激增，在这瞬间体积还来不及变化，所以可把它看作是等容变化，并用 CD 线来表示。气体压强增加后就要作绝热膨胀推动活塞向下做功，同时消耗本身的内能转变为机械功，在这一过程中压强逐渐减小，用绝热线 DE 来表示。在做功冲程终了时，排气阀开放，气体压强突然降低而体积还来不及变化，用等容线 EB 来表示。最后是排气冲程，活塞由于惯性作用继续向上运动，同时排除废气，这时压强不变，用 BA 线来表示。这样得到的图线叫做奥托循环图线，根据 $P-V$ 线计算功，可知面积 BCDEB 代表在一次循环中气体对活塞所做的净功。

【柴油机】

一般称作狄塞尔内燃烧，它是 19 世纪末叶由德国工程师狄塞尔设计的，其构造原理与奥托内燃机大体相同，主要区别是它将石油或柴油喷进汽缸作为燃料燃烧，而不是用汽油的混合气体作为燃料。同时，在压缩冲程中也不是压缩可燃性混合气体，而是单纯压缩空气。汽油机是利用火花塞来点燃燃料，而柴油机顶部有个喷油嘴，利用高温空气将柴油引燃，故称压燃式。它也有四个冲程：第一冲程是吸气冲程，它吸入气缸里的只是空气。第二冲程是压缩空气，汽油机只把燃料混合物的体积压缩到吸气冲程末的 $1/6 \sim 1/9$ 。如果压缩得更多，在压缩过程的中途，燃料混合物就因温度升高超过燃点而燃烧，机器将发生反转，无法正常工作。柴油机则可以把空气的体积压缩到吸气冲程末的 $1/6 \sim 1/22$ ，压强达到 4 兆帕左右，温度可高达 $500 \sim 700$ ，超过柴油的着火点。第三冲程是做功冲程。在压缩冲程结束时，柴油在高压作用下从喷油嘴高速喷入汽缸，雾状液滴与热空气相遇立刻燃烧，由于柴油喷发时间较长，所以燃烧时间也较长，燃烧温度高达 2000 左右。第四冲程是排气冲程，与汽油机相同。

【狄塞尔循环图线】

狄塞尔内燃机的工作过程，用 P—V 图线来描述，这样的图线叫“狄塞尔循环图线”。它的吸气过程是在较小的气压下等压进行的，用直线 AB 来表示。如图 2 - 19 所示。在压缩过程中，气压逐渐上升，用绝热曲线 BC 来表示。在做功冲程开始一段时间内，柴油正在燃烧中，活塞在一定的压强下移动，用 CD 线来表示。等到燃烧停止后，烟气膨胀推动活塞做功，用 DE 线来表示。在排气冲程开始时，排气阀开启，汽缸中的压强又突然降到大气压强，而体积还来不及变化，用 EB 线来表示。在排气冲程中，废气排入大气中，体积逐渐减小，用 BA 线来表示。狄塞尔循环图线 BCDEB 所包围的面积在数值上代表一个循环内所做的净功。

【压缩比】

气体进入汽缸后的最大体积跟被压缩后最小体积的比值，叫做“压缩比”。压缩比不能过大，因它受其他条件的限制。在奥托内燃机里，被压缩的是汽油和空气的混合气体，如果压缩得太过分，温度会升得太高，这就可能使活塞在还没有达到压缩冲程的终点时就自燃起来。这时活塞本应向上运动，却由于自燃气体的膨胀而向下运动，结果机轮反向转动，产生打倒车的现象，这对机件的损坏是严重的。奥托内燃机的压缩比一般不能超过 4~5。而在狄塞尔内燃机里，被压缩的是空气，压缩比不受液体燃料燃点的限制，因此可以提高到 12~20。但也不宜过高，否则必须采用很笨重的机件才能承受压缩终了时的压强。

【旋转活塞式内燃机】

在两端封闭的鼓筒内装有两对旋转活塞，将筒分成四个空间。两对活塞在汽缸中是套在一起的，利用齿轮和杠杆组成的控制机构来控制它们。使这两对活塞能够绕着共同的轴线向同一方向旋转。由于它们的转速分别按照不同的规律变化，因此活塞之间的空间不断地增大或减小，就象往复式发动机中汽缸工作部分的容积在不断地改变一样。每一个空间可以看作是一个汽缸，这样它就成为四汽缸内燃机了。每个汽缸在鼓形筒里转过一周时，它必定经历两次压缩和两次膨胀的行程。从四个汽缸来看，它们是同时在进行着排气、吸气、压缩、做功四项工作的，在旋转一周的全部时间里，都有做功冲程。这和往复式活塞只有 1/4 时间在做功，就有很大的不同。这种内燃机与最好的同容积往复式内燃机相比所产生的马力要大 3.6 倍；耗油量却只有它的 1/3；体积小，转速广，从 60 转 / 分到 4000 转 / 分不等。这种内燃机效率高，是因为膨胀的气体几乎充分用来做功。吸气排气通畅，活塞始终不倒转，省掉阀门机构，减少摩擦，由于传动轴转一周受到四次燃气的推力，故转动均匀平稳。因此，旋转活塞式内燃机是内燃机改进发展的方向。

【蒸汽轮机】

蒸汽轮机是由一个中央很厚的钢盘和钢盘外沿弧形叶片所组成的，当蒸汽喷射到叶片上时，轮机就转动起来，而且蒸汽速度越大，轮机转动得越快。利用蒸汽使叶轮转动的机器叫“蒸汽轮机”。

当气体从高压空间流向低压空间时，压强差越大，流动的速度也越大。因此在蒸汽轮机里就利用喷嘴，使水管式锅炉的过热管送来的过热蒸汽，从喷嘴喷出时，体积开始急剧地膨胀。同时压强降低，速度增大，这样的蒸汽具有很大的动能。也就是说蒸汽的内能在喷嘴中转变为蒸汽的动能。当蒸汽喷射到叶片上时，它的动能又转变为机轴旋转的机械能。

为了提高蒸汽使用效率，常采用压力多级冲动式的汽轮机。蒸汽轮机跟蒸汽机相比，在同样功率下，重量轻、体积小，不需用曲柄和飞轮等机械来将移动改为转动，因此转动均匀，没有振动；转动速度大，每分钟可达 3000 转；它的缺点是只能沿一个方向转动，不能开倒车，蒸汽轮机必须和高压锅炉配套使用，故此它只能用在发电厂或巨型舰艇上。

【燃气轮机】

燃气轮机的基本原理与蒸汽轮机很相似，不同处在于工质不是蒸汽而是燃料燃烧后的烟气。燃气轮机属于内燃机，所以也叫内燃气轮机。构造有四大部分：空气压缩机，燃烧室，叶轮系统及回热装置。

燃气轮机是利用气体作为工质在燃烧室里燃烧，将燃料的化学能转变为气体的内能。在喷嘴里，气体的内能转变为气体的动能，燃气高速喷出，冲击叶轮转动。

燃气轮机优点是不需连杆、曲柄、飞轮等装置，又不需锅炉，因此体积小、重量轻，功率大到 100000 ~ 200000 千瓦，效率高达 60%，广泛地应用在飞机上，作为动力装置。但是喷射到叶轮上的汽体温度高达 1300℃，因此叶轮需昂贵的特殊耐热合金来制造，加工难，成本高。耗油量大，在同样功率下比活塞式汽油机多 2 倍，故燃气轮机适宜于 735 ~ 2205 千瓦（1000 ~ 3000 马力）以上的飞机和船舶上。

【空气喷气发动机】

它是利用气体从尾部高速喷出时所产生的反冲的推力来推动机身前进的机械。由于活塞式内燃机的螺旋桨叶转得越快，它所受到的阻力也就越大，效率就低。所以它的速度不能超过 211 米 / 秒。而且这种飞机只能在空气中飞行，因此飞行的高度及速度都受到限制。

喷气式发动机的燃料在燃烧室内燃烧后，产生高温和高压的气体，这种气体从尾部以极高的速度喷出，周时产生反作用力，推动机身向前运动。喷气机的作用是直接产生反冲推力，把燃料的内能转变为燃气的动能和飞机前进的机械能，而不需要通过能量转变的中间结构——活塞、螺旋桨等，减少了能量的损失，从而提高飞机的飞行速度。

喷气式发动机可分为两大类，即空气喷气发动机和火箭喷气发动机。空气喷气发动机本身携带燃料，它需要利用外界的空气来帮助燃烧。因此它不适宜在空气稀薄的高空飞行。由于发动机的种类很多，常见的有冲压式和气轮式等。

【冲压式喷气发动机】

发动机体类似一个圆筒，前面有进气口，中间有燃烧室，在燃烧室里有喷雾器和火花塞，尾部有喷气孔。当机身向前飞行时，空气从进气口进入燃烧室，由于通道的截面积比进口大，所以空气速度降低，同时被压缩而使压强增大。飞机飞行速度越大，则气体被压缩得越厉害，它的压强也越大。在燃烧室里，喷雾器喷出雾状的燃料，它和压缩空气混合后，被火花塞点火而燃烧成高温和高压的烟气。烟气以极大的速度从喷气口喷出，产生极大的反冲推力使机身向前高速运动。

冲压式发动机适宜于高速飞行，并能长时间地以比音速大好几倍的速度飞行。不足的是起飞时速度不大，需要其他的辅助发动机来帮助它发动。

【气轮式喷气发动机】

气轮式喷气发动主要包括进气口、压气机、燃烧室、辅助发动机、燃气轮机和尾喷管等，其中辅助发动机、压气机和燃气轮机装在同一根机轴上。在飞机中，空气压缩机常采用轴向式的，它是由多级定向叶轮和动叶轮组成的。当机身在空气中高速前进时，空气从进气口进入，于是速度减小，同时被初步压缩。当空气进入压气机后，就进一步被压缩。压气机每一级的动叶轮都象螺旋桨一样，能用很大的速度把进来的空气一级一级地向后推去，这时压强逐渐增加可达3至4个大气压。

被压缩的空气进入燃烧室后，和从喷雾器喷出的燃料混合，并由火花塞点火燃烧，此时温度可高达1500℃，所产生的大量气体向后喷出，同时冲击燃气轮机的叶轮转动，使转速达到15000转/分左右。最后它又以极大的速度从尾部喷管喷出，其速度可以达到500~600米/秒，使机身得到巨大的反冲推力而向前飞行。在刚起飞时，压气机由辅助发动机带动，等到叶轮旋转到一定的速度以后，辅助发动机就停止工作，改由燃气轮机带动压气机运转。目前一般接近音速的飞机，多采用这种发动机作为动力装置。航速可达300米/秒，飞行高度可在10000米以上。

【火箭喷气发动机】

发动机本身带有燃料和氧化剂，不需外界空气来帮助燃烧，它使用的燃料有固体燃料和液体燃料两种。

固体燃料火箭的主要部分是燃烧室和尾部喷口。一般将燃料做成实心或空心的圆柱体，贮存在燃烧室内，用电流点燃后，让它逐渐燃烧。燃烧所得到的烟气压强很均匀，烟气从尾部喷口喷出时，产生反冲推力推动火箭向前飞行。经常使用的固体燃料是硝化甘油、硝化纤维和其他少许附加物的混合物。这种发动机的工作时间短，一般不超过几分之一秒或十几秒钟，故常用它作为其他类型飞机起飞时的辅助发动机。

液体燃料火箭是由燃料箱、输送系统和燃烧室三个主要部分组成。燃料箱是用来贮存燃料的，液体燃料与氧化剂分别装在两个箱子里。如果用汽油或乙醇作为燃料，一般可用液态氧作为氧化剂；如果用甲醇为燃料，一般用过氧化氢作为氧化剂。输送系统是按时按量地把燃料从燃料箱输送到燃烧室中去燃烧的装置。工作时，由输送系统把燃料和氧化剂喷入燃烧室，最初用电火花点燃，其温度可高达 3700℃，压强可高达 20~40 个大气压。第一次点燃之后，以后继续进入燃烧室的燃料就可以自行燃烧。燃烧产生的气体以很高的速度从尾部喷口喷出，同时对火箭产生强大的反冲推力，使它前进。火箭喷气发动机的特点是功率巨大，可使火箭的飞行速度增大，上升的高度不受限制，因为它不需要空气的助燃。多级火箭可作为宇宙航行的工具。

【热力学基本定律】

通常是将热力学第一定律及第二定律视作热力学的基本定律，但有时增加能斯特定理当作第三定律，又有时将温度存在定律当作第零定律。一般将这四条热力学规律统称为热力学定律。热力学是热现象的宏观理论，它是以此四条定律为基础建立起来的理论。

【热力学第零定律】

若两个热力学系统中的任何一个系统都和第三个热力学系统处于热平衡状态，那么，这两个热力学系统也必定处于热平衡。这一结论称做“热力学第零定律”。热力学第零定律的重要性在于它给出了温度的定义和温度的测量方法。定律中所说的热力学系统是指由大量分子、原子组成的物体或物体系。它为建立温度概念提供了实验基础。这个定律反映出：处在同一热平衡状态的所有的热力学系统都具有一个共同的宏观特征，这一特征是由这些互为热平衡系统的状态所决定的一个数值相等的状态函数，这个状态函数被定义为温度。而温度相等是热平衡之必要的条件。因此，这一基本物理量实质是反映了系统的某种性质。

【热力学第一定律】

是热力学的基本定律之一。是能的转化与守恒定律在热力学中的表现。它指出热是物质运动的一种形式，并表明，一个体系内能增加的量值 $E (= E_2 - E_1)$ 等于这一体系所吸收的热量 Q 与外界对它所做的功之和，可表示为

$$E = E_2 - E_1 = Q + W$$

即 $W + Q = E$ 。在这个公式中，突出了做功和热传递是改变系统内能的两种不同形式，可通过做功和被传递的热量来量度系统内能的变化。在上述公式中，当外界对系统做功时， w 为正值；若系统对外做功时， W 为负值。如外界向系统传热， Q 即为正值；若系统向外界放热，则 Q 为负值。当 E 为正值时，表示系统的内能增加；如果 E 为负值时，则表现系统的内能在减少。

对热力学第一定律也可以从另一侧面来描述，即外界传递给系统的热量等于系统内能的增量和系统对外所作的功的总和。如果外界传递给系统的热量为 Q ，使系统从某一平衡状态到达另一平衡状态，内能的增加为 $E_2 - E_1$ ，同时对外做功 W ，则热力学第一定律可表示为

$$Q = (E_2 - E_1) + W'$$

即 $Q = E + W'$ 。在这个公式中，当系统从外界获得热量时， $Q > 0$ 为正值；而当系统向外界释放热量时， $Q < 0$ 为负值。若系统对外界做功， $W' > 0$ 为正值；若外界对系统做功， $W' < 0$ 为负值。在系统内能增加时， E 为正值，若系统的内能减少时，则 E 为负值。

上式是从热机的效率角度考虑，外界传递给系统的热量，一部分用来增加系统的内能，另一部分就是系统对外所作的功。

在运用热力学第一定律的数学表达式 $E = W + Q$ 解题时，应了解表达式的适用范围，应注意各物理量的正、负号表示的意义，以及式中的各量单位要统一。对热力学第一定律从广义上理解，应把系统内能的变化看作是系统所含的一切能量（如化学的、热的、电磁的、原子核的、场的能量等）的变化，而所作的功是各种形式的功，于是热力学第一定律就成了能量转换和守恒定律。

热力学第一定律也可表述为，第一类永动机是不可能制造的。

【第一类永动机】

在热力学第一定律建立以前，人们曾幻想制造出一种永动的机器，不需要任何燃料和动力，又不消耗系统本身的内能，却能不断对外做功而且永远运转，这类机器叫“第一类永动机”。根据能的转化与守恒定律，系统在对外做功过程中，它的内能要减小，要想不减少它的内能，外界必须同时对它传递热量或对它做功，不断地给系统补充能量，系统才能持续不断地对外做功。这种违背能量守恒与转化定律的器械，也就是违背热力学第一定律的器械永远也不可能制造成。

【热力学第二定律】

热力学的基本定律之一。它是关于在有限空间和时间内，一切和热运动有关的物理、化学过程具有不可逆性的总结。自热力学第一定律被发现以后，人们注意到许多自行发生的过程都是单方向的，例如热量从高温物体传到低温物体，液体由高处向低处流动，气体的扩散与混合，其反向自行发生的过程虽然没有违反第一定律，却从来还没有发现过，可见除了第一定律外，必定还有其他的定则在限制这些过程的发生。克劳修斯、开尔文等人，从将热转变为功时遇到的经验归纳成热力学第二定律。它实质上指出了宏观热现象的不可逆性。它的表述有很多种，但实际上都是互相等效的。如下列几种表述：

1. 克劳修斯表述：克劳修斯在 1850 年提出的。热量总是自动的从高温物体传到低温物体，不可能自动地由低温物体向高温物体传递。在它的表述中，指出在自然条件下热量只能从高温物体向低温物体转移，而不能由低温物体自动向高温物体转移，这个转变过程是不可逆的。若想让热传递方向逆转，则必须消耗功才能实现。

2. 开尔文表述：开尔文在 1851 年提出的。不存在这样一种循环过程，系统从单一热源吸取热量，使之完全变为有用功而不产生其他影响。表述中的“单一热源”是指温度均匀并且恒定不变的热源；“其他影响”指除了由单一热源吸热，把所吸的热用来作功以外的任何其他变化。若有其他影响产生时，把由单一热源吸来的热量全部用来对外作功是可能的。自然界中任何形式的能都可能转变成热，但热却不能在不产生其他影响的条件下完全变成其他形式的能，这种转变在自然条件下也是不可逆的。热机在运行过程中，可连续不断地将热变为机械功，一定伴随有热量的损失。第二定律和第一定律两者有所不同。第二定律阐明了过程进行的方向性。

开尔文还将它表述为：第二种永动机是不可能造成的。第二种永动机就是能从单一的热源吸收热量使之完全变为有用的功而不产生其他影响的机器。

除克劳修斯、开尔文的表述外，还有各种不同的陈述，例如，热效率为 100% 的热机是不可能造成的；热传导、摩擦所产生的热现象是不可逆的；不需要由外加功而可操作的致冷机是不可能造成的等等。不论如何描述，其内容彼此相同，不外乎主张不可逆变化的存在。从分子运动论的观点看，热运动是大量分子的无规则运动，而作功则是大量分子的有规则的运动。无规则运动要变为有规则运动的几率极小，而有规则的运动变成无规则运动的几率大。一个不受外界影响的孤立系统，其内部自发的过程总是由几率小的状态向几率大的状态进行，总是从包含微观状态数目少的宏观状态向包含微观状态数目多的宏观状态进行。由此可见热是不可能自发地变成功，这就是热力学第二定律的统计意义。

根据热力学第零定律，确定了态函数——温度；根据热力学第一定律，

确定了态函数——内能和焓；根据热力学第二定律，也可以确定一个新的态函数——熵。可以用熵来对第二定律作定量的表述。

热力学第二定律在引入熵的概念后，可用数学形式表示。其积分形式为

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

式中不等号对应于不可逆过程，等号对应于可逆过程，角码 1 和 2 分别表示系统的初状态和末状态，S 表示系统的熵。热力学第二定律的微分形式

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

式中不等号对应于不可逆过程，等号对应于可逆过程。在孤立系统内对可逆过程，系统的熵总保持不变；对不可逆过程，系统的熵总是增加的。这个规律叫做熵增加原理。熵的增加表示系统从几率小的状态向几率大的状态演变，也就是从比较有规则、有秩序的状态向更无规则，更无秩序的状态演变。

【第二类永动机】

只由单一的热源吸取热量而使其全部转变为对外界做功以外，对其他外界不产生任何效应的循环过程而制造的机器，称为“第二类永动机”。这是一种不可能实现的热机，而导致克劳修斯原理，并形成了热力学第二定律的基础。这种热机虽然不违背热力学第一定律，却违背热力学第二定律。要想制造出热效率为百分之百的热机是绝对不可能的。

【热力学第三定律】

此定律指出，设想通过几个有限的步骤使物体冷却到绝对零度，是不可能的。这一表述是能斯脱于 1912 年根据对低温现象的研究得出能斯脱定理的推论。

【准静态过程】

亦称平衡过程。在系统状态改变过程中的每一瞬间，系统都处于平衡状态这样的过程，就称为“准静态过程”。在状态转变的过程中，它所经历的所有中间状态也都接近于平衡状态。假如在无摩擦、无阻力的条件下，在每一个中间状态都停留一个较长的时间，过程进行得无限缓慢，这样的过程就是准静态过程。任何实际过程总是在有限时间内完成的，不可能是无限缓慢的，因此都不可能是严格的准静态过程。所以准静态过程是实际过程的理想化。一般情况下对实际过程作理论处理时常当作准静态过程来处理。

【P - V 图】

对于一个均匀系统，在不受外力场的作用下，如气体系统的压强 P 、体积 V 和温度 T 三个状态参量中，只有两个是独立的，或者说只要确定其中两个，就可以确定系统的一个平衡态。因此在以 V 为横坐标，以 P 为纵坐标的坐标系中，用一点可表示系统的一个平衡态，用一条线可表示系统的一种准静态过程，由此构成了 $P - V$ 图。但是非静态过程和非平衡态都不能在 $P - V$ 图中表示。

【循环】

一热力系统，从某一宏观状态出发，经过任意的一系列状态变化后，又恢复到原来的状态，如此周而复始的变化过程就组成了一个循环过程，称做“循环”。循环过程即为在过程的终点，系统又回到起始状态。

如果一个循环所包含的过程都是准静态过程，这一循环就可以在 P - V 图上表示为一条闭合曲线，如图 2 - 20 所示。在 P - V 图上，若系统沿过程 1 从 A 走到 B 是沿顺时针方向进行的，称为正循环；若循环过程 2 是从 B 走到 A 沿逆时针方向进行的，称为逆循环。在从 A 走到 B 时，其所作之功等于曲线 1 以下之面积，即 $A1BV_1V_2A$ 之面积；在从 B 返回 A 时，其所作之功等于曲线 2 下的负面积，即 $B2AV_1V_2B$ 之面积。在这一循环中，系统所作之净功，即为此循环之曲线所包围以内阴影部分之面积，即 $A1B2A$ 的范围。

【循环过程】

用一个单一的过程将热能转化为机械能是完全可以的，但是，要想只靠一个单独的变化过程连续地把热能转化为机械能，这不仅是不可行，而且也不切实际的。例如，当气缸中的气体作等温膨胀时，虽然可以把它由外界吸取的热量转化为对外做功，可是这一过程不能连续地进行下去，由于气缸长度的限制，因而活塞移动的范围总是有限的；另一方面，即使不切实际地将气缸做得长些，当活塞向外移动到一定的位置，使气缸内部气体的压强下降到和外界压强相等时，这时活塞也就不能继续运动下去，过程即刻结束，做功也就停止了。可见，只用一个单一的等温过程不能将热能连续转化为机械能。

要使一部机器能连续地将热转化为功，必须使它的工作物质能够从它做功后的状态再回到原来的状态，并且能重复进行下去。我们把工作物质经过若干个不同的过程之后又回到它原来状态的整个变化过程称为循环过程。由此可见，只有利用循环过程才能把热连续不断地转化为功。因为工作物质（即热力学系统）的内能是状态的单值函数，所以由一个初始状态经过一个循环回到原来的状态时，其内能没有发生变化，即 $dU = 0$ ，这是循环过程的基本特征。参阅循环。

【态函数】

系统的平衡态一般只需一组最少的，必要而又充分的独立状态参量即可完全确定。而系统的其他参量，则必由状态决定，它们统称为态函数，即系统状态参量的函数。温度、内能、焓、熵等均为态函数。

【摩尔热容量】

是 1 摩尔物质的热容量。在国际单位制中，摩尔热容量的单位为焦耳 / 摩尔 · 开。有时也采用卡 / 摩尔 · 开作为摩尔热容量的单位。

【焓】

亦称“热焓”。它是表示物质系统能量的一个状态函数，通常用 H 来表示，其数值上等于系统的内能 U 加上压强 P 和体积 V 的乘积，即

$$H = U + PV。$$

由上式可知，内能 U 是可加量，压强与体积的乘积 PV 也是可加量，所以焓 H 必然也是可加量。在等压的过程中，在系统温度升高时，不仅由于自身内能增大而吸收热量，而且由于体积的膨胀而对外做功，所以系统吸收的总热量应表示为

$$(Q)_p = \Delta U + P \Delta V = \Delta(U + PV) = \Delta H$$

由此说明，在等压过程中，系统温度升高所吸收的热量，等于系统的状态函数焓的增加。这就是态函数焓的最重要的特性。

态函数焓在热化学和热力工程中是非常有用的物理量。它是热力学系统的态函数之一，即焓变与过程无关。

【节流过程】

焦耳 - 汤姆孙实验，是为探索在真实气体的内能中是否有分子间相互作用势能而设计的。在这一实验中，恒定高压气体通过多孔性物质（多孔塞或针尖型节流阀）迁移到压力较小的空间，这个过程叫“节流过程”。节流过程是在气体和外界没有热交换的条件下进行的，因此它是一个绝热过程。故又称作绝热节流过程。在这个过程中，由于气体体积增大，故称节流膨胀。若节流前气体的内能为 U_1 ；压强为 P_1 。体积为 V_1 ，节流后气体的内能为 U_2 ，压强为 P_2 ，体积为 V_2 ，根据热力学第一定律可以得到

$$U_2 + P_2V_2 = U_1 + P_1V_1$$

即 $H_2 = H_1$

这表示，在节流的前后，态函数焓保持不变。利用它可获得低温和液态气体。

【焦耳 - 汤姆孙效应】

气体经过绝热节流过程后温度发生变化的现象，称为“焦耳 - 汤姆孙效应”。当气流达到稳定状态时，实验指出，对于一切临界温度不太低的气体（如氮、氧、空气等），经节流膨胀后温度都要降低；而对于临界温度很低的气体（如氢）经节流膨胀后温度反而会升高。气体经过节流膨胀过程而发生温度改变的现象，称为焦耳 - 汤姆孙效应。在通常温度下，许多气体都可以通过节流膨胀过程使温度降低，冷却而成为液体。工业上就利用这种效应制备液化气体。

【焦耳 - 汤姆孙系数】

它被定义为

$$a = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H$$

即在节流膨胀过程中，温度随压强的变化率。若 $a < 0$ 时，它表示气体通过绝热节流过程温度上升；当 $a > 0$ 时，则表示气体通过绝热节流过程温度下降。当 $a = 0$ 时，则表示气体通过节流温度不发生变化。实验表明由于在节流过程中所选取的温度与压强不同，对一定的气体，焦耳 - 汤姆孙系数 a 亦有不同的数值。对于理想气体， a 恒等于零。

【正焦耳 - 汤姆孙效应】

在焦耳 - 汤姆孙系数 $a > 0$ 时，气体通过节流，凡膨胀后温度降低者，称“正焦耳 - 汤姆孙效应”，亦称致冷效应。

【负焦耳 - 汤姆孙效应】

在焦耳 - 汤姆孙系数 $a < 0$ 时，气体通过节流，凡膨胀后温度升高者，称“负焦耳 - 汤姆孙效应”。

【转换温度】

在一定压强下与 $a = 0$ 时所对应的温度，就是该压强下的转换温度。可以在以压强 P 为横坐标，以温度

T 为纵坐标的坐标系中描绘出 $a = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right) = 0$ 的曲线。如图 2 - 21 所示。是描绘氮 $a = 0$ 的曲线，这条曲线将 $T - P$ 空间分成两部分，即 $a > 0$ 的区域和 $a < 0$ 的区域，必须使气体的温度和压强处于 $a > 0$ 的区域，才能得到致冷的效应。

【多方过程】

如果系统所经历的过程既不是绝热的，也不是等温的，而是介于两者之间的过程，称为“多方过程”。过程方程为

$$PV^n = \text{常量}$$

式中 n 为一常数，称为多方指数。当 $n=1$ ，表示的是等温过程；当 $n=\infty$ ，表示的是绝热过程；当 $n=0$ ，表示的是等压过程；当 $n=\infty$ ，表示的是等容过程。因此，等温、绝热、等压和等容过程都可看作多方过程的特例。

在热力工程中的许多过程，在大气中、在宇宙天体中进行的过程，都属于多方过程。因此多方过程有重要的实用价值。

【热源】

在热力学中所提到的热源，一般是指热容量很大的物体或装置。当从外界吸收热量时，它的温度并不上升；而向外放热时，它的温度并不降低，故常又称之为热库。

【热效应】

指物系在物理的或化学的等温过程中，只做膨胀功时所吸收或放出的热量。有等容热效应和等压热效应。而等压热效应等于过程中焓的增加量（ ΔH ），吸热为正而放热则为负（亦有相反者）。热效应随反应的性质不同而有生成热，中和热、燃烧热、溶解热、稀释热等名称。无论是生产还是理论，都广泛地应用这些数据。

【热力状态】

按热力学观点表示物系或物体所处的状态称为该物系或物体的“热力状态”。气体的热力状态，一般用气体的温度、压力等状态参数来表示。在一定的热力状态下物体具有一定的状态参数。

【热力循环】

凡热能动力装置或热力发动机中的工质为了完成将热量转换为机械能，它从某一状态经过一系列状态的变化重新又回复到初始状态的全部过程或途径，称作热力循环。研究热力循环的目的在于改进热机的循环过程和提高热效率。在热力学理论上最理想的循环是卡诺循环，实际上各种热能动力装置或热力发动机都各自有其相应的特殊循环，如奥托循环，狄塞尔循环等。在参数坐标图上，热力循环总是按顺时针方向进行。故一般又称正向循环。

【热水供暖】

用热水为媒质传递热量的一种供暖方式。散热器表面平均温度大约为 80℃，使空气不致过分干燥，适合卫生和舒适环境的要求。媒质传递热量的方式一般有两种方式：一种是用机械使水流动的称“机械循环系统”。它是利用水泵将散热后温度降低的水重新打入锅炉，或用高压泵将热水送入散热器等方式，这种机械循环系统多用在较大范围的供暖区域。另一种是借重力作用使热水在管内流动的称“重力循环系统”。它是靠热水膨胀、冷热水为密度差，靠自身的重力不同而形成循环流动。这种重力循环系统 20 年前在我国东北地区被广泛使用，近 10 多年来在华北地区已逐渐在城市中广泛的推广。北京有这种小锅炉厂家约十来家，这种装置俗称“土暖气”。靠重力循环供暖的装置关键之一是锅炉的设计，水套（内外炉体的两铁板间的水区）约 1~2 厘米的厚度，炉膛泥厚 1 厘米；关键之二是出水及回水管的倾斜角度；其三是补水方式；最后应注意装排气机构，防止发生爆裂危险。

热水供暖易于调节，室内气温稳定，管理方便，燃料比较节约，较煤球烟筒式火炉安全卫生，但设备投资较大。

【卡诺循环】

1824年，法国青年工程师卡诺研究了一种理想热机的效率，这种热机的循环过程叫做“卡诺循环”。这是一种特殊的，又是非常重要的循环，因为采用这种循环的热机效率最大。

卡诺循环是由四个准静态过程组成的，即两个等温过程和两个绝热过程。理想气体只在等温过程中把从热源吸收的热量转化为机械功，因此这个热机要求两个大热源来供给热量。进行卡诺循环的热机叫卡诺机，卡诺机是一种理想的热机。卡诺机以理想气体为工作物质（也可以用其他性质已知的物质为工作物质）。卡诺循环的四个过程如图 2-22 所示。第一个过程是在温度为 T_1 的情况下作等温膨胀，如图中 A B；第二个过程是绝热膨胀过程，温度从 T_1 下降到 T_2 ，如图中的 B C；第三个过程是在温度为 T_2 的情况下作等温压缩，如图中 C D；第四个过程是绝热压缩过程，温度从 T_2 上升到 T_1 ，并且系统又回到开始时的状态 A，如图中的 D A。卡诺采用以上四个过程组成循环，可使工作物质仅工作在两个一定温度的热源之间，这样，热源的情况就大大地简化了。又因为卡诺循环中的两个等温过程和两个绝热过程都是理想的过程，所以卡诺循环不仅是最简单，而且还是最理想的循环。

作卡诺循环的工作物质可以是气体，也可以是液体或固体；可以是理想气体，也可以是实际气体。为便于说明问题，还是用理想气体作为工作物质。设理想气体的质量为 M ，分子量为 μ ，将它放在一个由气缸与活塞所组成的容器中，并使理想气体作卡诺循环，下边简述其各个过程中的热功转换情况。

在第一个过程 A B 中，气体作等温膨胀，在此过程中，系统从高温热源吸取热量 Q_1 ，其对外做功为 A_1 ，因系等温过程，所以 $T = 0$ ，因此，内能不变，即 $U = 0$ 。根据热力学第一定律，其关系式：

$$Q_1 = A_1,$$

因在等温过程中系统所做的功

$$A_1 = \frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}。$$

式中 V_1 和 V_2 分别表示气体在状态 A 和状态 B 时的体积。此时，系统将所吸收的热量全部转化为对外做功。

在第二个过程 B C 中，气体作绝热膨胀，设此过程系统对外做功为 A_2 ，系统内能增加了 U_2 ，因为是绝热过程，系统与外界不发生热交换，即 $Q = 0$ 。根据热力学第一定律，得

$$U_2 = -A_2。$$

这说明系统内能实际上是减少了 U_2 。因为在绝热过程中内能的变化可写成

$$\Delta U_2 = \frac{M}{\mu} C_v \Delta T = \frac{M}{\mu} C_v (T_2 - T_1)$$

代入上式，即得

$$A_2 = -\frac{M}{\mu} C_v (T_2 - T_1)$$

这表示气体经过绝热膨胀后，其温度降到 T_2 ，这是因为系统对外做功使其内能减少的缘故。

在第三个过程 C D 中，气体作等温压缩，假设在此过程中外力对系统做的功为 A_3 ，并且系统向低温热源放出热量 Q_2 ，因过程是等温的（温度 $T_2 = \text{恒量}$ ），故系统的内能不变，即 $U = 0$ ，根据热力学第一定律，得

$$Q_2 = A_3。$$

因在等温过程中，外界对系统所做的功

$$A_3 = \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}。$$

代入上式得

$$Q_2 = \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}。$$

式中的 V_3 和 V_4 分别表示系统在状态 C 和状态 D 时的体积。这表明，在等温压缩过程中，外界对系统所做的功全部转化为热量放给了低温热源。

在第四个过程 D A 中，气体被绝热压缩，假设在此过程中，外力对系统所做的功为 A_4 ，系统内能的增加量为 U_4 ，因为是绝热过程，所以 $Q = 0$ 。根据热力学第一定律，得

$$U_4 = A_4$$

这表示外界对系统所做的功全部转化为内能的增加。因为绝热过程中内能的增加量

$$\Delta U_4 = \frac{M}{\mu} C_v (T_1 - T_2)。$$

代入上式，即可求得外界对系统做的功

$$A_4 = \frac{M}{\mu} C_v (T_1 - T_2)。$$

上述是对卡诺循环的每一过程所作的具体分析。从整个循环来看它的热功转化，系统从外界净吸收的热量为

$$Q = Q_1 - Q_2。$$

在整个循环中，系统对外所做的净功为

$$A = A_1 - A_3$$

因为 $A = A_1 + A_2 - A_3 - A_4$ 。而 A_2 和 A_4 的绝对值是相等的，故 $A = A_1 - A_3$ 。

把热力学第一定律应用到整个卡诺循环中去，可得

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_3。$$

由此可见，在一个卡诺循环中，系统从外界净吸收的热量为 $Q_1 - Q_2$ ，其对

外界所做的净功为 $A_1 - A_3$, 系统的内能不变。

【卡诺循环的效率】

无论工作物质进行任何形式的循环，它们的热机效率都可用下式表示：

$$= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}。$$

不同的循环是由不同的状态变化过程所组成的，所以不同的循环过程，其热量 Q_1 和 Q_2 的具体计算也不相同，所得到的热机效率的计算结果当然也就不同。若要求出卡诺循环的热机效率必先计算 Q_1 和 Q_2 。

因为在卡诺循环中，系统是在等温过程中从高温热源 T_1 处吸收热量

$$Q_1 = \frac{M}{\mu} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}。$$

而系统又是在等温过程中向低温热源 T_2 放出热量

$$Q_2 = \frac{M}{\mu} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}。$$

将 Q_1 ， Q_2 两计算式代入热机效率的表示式内，即得到下式：

$$= \frac{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}。$$

将上式，经过简化，最后得到

$$= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}，$$

这就是卡诺循环的效率。综上所述可看出：

1. 必须有高温、低温两个热源 T_1 和 T_2 ，才能完成一个卡诺循环；
2. 卡诺循环的效率 仅由高温热源的温度 T_1 和低温热源的温度 T_2 的大小决定，而与所用工作物质的性质无关。例如，在设计制造热机时，如能将高温热源的温度提高，或者将低温热源的温度降低，即可使热机的效率提高；
3. 由上述公式可看出，卡诺循环的效率永远小于 1。从能量角度看，在一个卡诺循环中，不可能把它从高温热源吸取的热量全部转化为对外做功，因此把一部分热量放给低温热源，并传到外界就成为不可避免的了。
卡诺热机的效率 $= 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 只能用在卡诺热机，对于其它循环的热机，如，

奥托循环热机、狄塞尔循环热机等，就不能用这一结果去计算它们的效率。

如果卡诺热机作逆循环，则就成为卡诺致冷机了，其致冷系数

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_3} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

由式中知：低温热源的温度 T_2 愈低，则致冷系数 愈小，此时要从低温热源中取出热量，就非常困难，要做更多的功。

【致冷系数】

它是致冷机效能的重要标志之一。是为从能量转化的角度研究各种致冷机的性质而引入的一个物理量。其致冷系数被定义为

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

式中 Q_1 是致冷机在一个逆循环过程中释放给外界高温热源的热量。 Q_2 是致冷机在一个逆循环过程中从外界吸收的热量， W 是外界对系统所作的功。

【逆向卡诺循环】

准静态逆向卡诺循环是由两条等温线和两条绝热线构成的逆循环过程。以 T_1 表示高温热源的温度，以 T_2 表示低温热源的温度，则这种逆循环的致冷系数为

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

【逆向斯特林循环】

准静态逆向斯特林循环是由两条等温线和两条等容线构成的逆循环过程，以 T_1 表示高温热源的温度， T_2 表示低温热源的温度。则这种逆循环的致冷系数为

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

由上式可见，逆向斯特林循环的致冷系数与逆向卡诺循环是相同的。回热式致冷机的工作过程，就是逆向斯特林循环。

【可逆过程】

一个系统，由某一状态出发，经一个过程，系统发生了变化，外界也要发生变化，经这一过程后达到另一状态。若存在另一过程，它能使系统和外界完全复原（即系统回到原来的状态，同时消除了原来过程对外界引起的一切影响），则原来的过程称为“可逆过程”。其逆过程亦为可逆过程。自然界一切实际过程都不可能是可逆过程，但可控制条件，如消除摩擦力、粘滞力和电阻等产生耗散效应的因素，以避免热效应，从而在系统达到平衡态后，作无限缓慢的变化，这样就可实现可逆过程。无摩擦的准静态过程是可逆过程。可逆过程的概念，是对实际过程的理想化。

【不可逆过程】

凡不满足可逆过程条件的过程均称不可逆过程。一切与热现象有关实际宏观过程都是不可逆的。自然界中各种不可逆过程都是互相关联的，即由某一过程的不可逆性，可推断另一过程的不可逆性。热力学第二定律的开尔文表述，说明功变热的过程是不可逆的。而克劳修斯表述，指出热传导的过程是不可逆的。这两种表述实际上分别挑选了一种典型的不可逆过程。由于各种不可逆过程都是互相关联的，所以每一个不可逆过程都可以选为表述热力学第二定律的基础。

【卡诺定理】

卡诺定理包括以下两条内容：

1. 在相同的高温热源和相同的低温热源之间工作的一切可逆卡诺循环，其效率都相等，而与工作物质无关。

2. 在相同的高温热源和相同的低温热源之间工作的一切不可逆卡诺循环，其效率都不可能大于可逆卡诺循环的效率。

卡诺定理中的高、低温热源都是温度均匀的恒温热源。若一可逆热机是在某一确定温度的热源处吸热，而在另一确定温度的热源处放热从而对外做功，可以肯定，这部可逆热机一定是一部卡诺热机，其循环必定是由两条等温线和两条绝热线所组成的卡诺循环。卡诺循环可以是可逆循环，也可以是不可逆循环，这取决于两个等温过程和两个绝热过程中是否有不可逆过程。

从卡诺定理可知，在两个温度恒定的高温热源和低温热源之间工作的一切可逆卡诺热机的效率都相等，与工作物质无关，所以它们的效率必然都等于工作物质为理想气体时的效率，即

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}。$$

卡诺定理告诉我们，在相同的高温热源和低温热源之间工作的一切热机，以可逆的卡诺热机的效率为最高，从而给提高热机的效率指明了方向和可能达到的限度。

利用卡诺定理可推导出物质的内能与状态参量之间的关系；可推导出克拉珀龙方程；还可在卡诺定理的基础上引出绝对温标，即热力学温标。

【克劳修斯等式】

系统在任意的可逆循环中，必定与一系列热源进行热的交换，如果其中任意一个热源传递给系统的热量为 dQ （表示系统在一无限小过程中所吸收的热量），而其温度为 T ，那么两者之比 $\frac{dQ}{T}$ （称为温比热量）对于整个可逆过程的代数和一定等于零，即

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

\oint 表示沿任一可逆循环过程（沿循环的封闭曲线）求积分。这个关系式称为克劳修斯等式。系统若从热源中吸收热量， $dQ > 0$ ；系统若释放热量给热源， $dQ < 0$ 。在可逆过程中，系统的温度，等于热源的温度 T 。

【克劳修斯不等式】

卡诺定理指出，任何一个热机的效率都不能大于工作在相同的两个高温热源和低温热源之间的可逆卡诺热机的效率，即

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

或

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}。$$

式中的等号只适用于可逆卡诺循环，不等号则适用于不可逆循环。由上式可得下面的关系式

$$\frac{Q_1}{T_1} \leq \frac{Q_2}{T_2},$$

或

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \leq 0。$$

上式中的 Q_1 和 Q_2 都是正的，若把吸收的热量记为 Q ，把放出的热量记为一 Q ，则上式便可写成如下形式：

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0。$$

式中 Q_1 是工作物质从温度为 T_1 的高温热源处所吸收的热量， Q_2 是从温度为 T_2 的低温热源处所吸收的热量。对可逆卡诺循环，上式应取等号；对不可逆循环，则上式应取不等号。

如果工作物质（即系统）的状态是连续改变的，则可以认为它与一系列连续改变温度的高温热源和低温热源进行热量交换，且每次交换微量的热量 dQ ，就可用下列积分形式：

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

这个公式称克劳修斯等式，不等式，其中取“=”时，即克劳修斯等式，取“<”号时即克劳修斯不等式。它是热力学第二定律最普遍的数学表达式。这里，热量不写成 dQ ，而写成 dQ 是因为传递热量与具体经历的过程有关。从数学上讲， dQ 不是一个全微分，故写成 dQ ，以此表示和全微分符号“d”的区别。符号 \oint 代表对循环全路径进行积分。对于可逆循环来说，这个积分等于零，对不可逆循环，这个积分小于零。

【熵】

是热力学中的一个重要的态函数，常用 S 表示，它是一个可加物理量。根据克劳修斯等式 $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ 可以证明，系统从平衡状态 A 经历一个可逆过程到达平衡状态 B ，其积分值 $\int_A^B \frac{dQ}{T}$ 只与初、终两平衡态有关，而与可逆过程的路径无关。由这个特性可引入态函数熵 S ，它的定义是

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

这里的 A 、 B 表示任意给定的两个平衡态， S_B 称为系统在平衡态 B 的熵， S_A 为系统在平衡态 A 的熵。上式给出了终、初两平衡态的熵之差。熵只与状态有关，是平衡态参量的函数，故也是一个态函数。它的单位是焦耳 / 开（或卡 / 开）而 $S_B - S_A$ 是熵的变化。熵的中文意义是热量被温度除的商；外文意义是转变，指热量转变为功的本领。

关于不可逆过程中熵的变化情况：如图 2 - 23 所示设有一个任意的不可逆过程，其初态为 A ，终态为 B ，且都是平衡态。如果存在一个任意的可逆过程恰好能使系统由终态 B 回到初态 A ，于是就完成了一个不可逆的循环过程，应用克劳修斯不等式，则有

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} + \int_B^A \frac{dQ_r}{T} < 0$$

式中 dQ 是不可逆过程中所吸收的热量； dQ_r 是可逆过程中所吸收的热量。利用熵定义式的关系，则有

$$\int_B^A \frac{dQ_r}{T} = S_A - S_B$$

代入上式得

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} + S_A - S_B < 0,$$

或

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} < S_B - S_A,$$

将上式与熵定义式联合起来，使得

$$S_B - S_A \geq \int_A^B \frac{dQ}{T}。$$

这个公式也是热力学第二定律的数学表达式。因为 $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$ 式只能用于循环过程，而上式则可用于 A 、 B 两状态间的任意过程，它具有更普遍的意义。如把上式应用到无限小的过程上，即应用到两个无限接近的状态之间的过程上，则有

$$dS \geq \frac{dQ}{T}。$$

综上所述，可给热力学第二定律普遍表述：可以找到这样一个态函数，

即熵，在可逆过程中熵的变化等于系统所吸收的热量与热源的绝对温度之比；在不可逆过程中，这一比值小于熵的变化。

熵是物质系统的状态函数，即状态参量的单值函数；一个热力学系统如果是由几部分组成的，整个系统的熵为各部分熵的总和，所以熵具有相加性；在绝热过程中，若过程是可逆的，则系统的熵不变；若过程是不可逆的，则系统的熵增加。不可逆绝热过程向熵增加方向进行。当系统达到平衡状态时，熵就达到最大值；在不绝热的可逆过程中，如果系统吸收热量，则它的熵增加，如果系统放出热量，则它的熵减少。熵函数就是对分子混乱度的量度，熵值增大，表示分子混乱程度的增加。

【熵增加原理】

当热力学系统从一平衡态经绝热过程到达另一平衡态，它的熵永不减少；如果过程是可逆的，则熵的数值不变；如果过程是不可逆的，则熵的数值增加，这叫“熵增加原理”。根据熵增加原理，可判断：凡不可逆绝热过程总是向着熵增加的方向进行的。而可逆绝热过程则总是沿着等熵线进行的。熵增加原理又常表述为：一个孤立系统的熵永不减少。

【原子量】

原子量表示的是原子的相对质量。通常用 A 表示。其意义是：一个原子的质量比另外一种元素的原子质量大若干倍或小若干倍。若取某一种元素的原子量作为标准，那么就可以表示出其它原子的相对质量。国际上规定以碳 (C^{12}) 原子质量的 $\frac{1}{12}$ 作为原子的质量单位，其它原子的质量与它的比值，就叫做该元素的“原子量”（过去，国际上曾规定用氧原子质量的 $\frac{1}{16}$ 作为质量单位）。例如，氧的原子量为 15.9994，这表示氧原子的质量是碳 (C^{12}) 原子质量的 $\frac{1}{12}$ 的 15.9994 倍。它是个比值，没有单位。

【分子量】

也是以碳 (C^{12}) 原子质量的 $\frac{1}{12}$ 作为质量单位计算出来的分子相对质量，

通常用 μ 表示。分子量等于构成分子的各个原子的原子量的总和。例如，水 (H_2O) 分子的分子量是两个氢 (H) 原子和一个氧 (O) 原子的原子量的总和，计算得

$$\mu = 2 \times 1.0078 + 15.9994 = 18.0150。$$

而氢的分子量 μ 为 2.0156；氧的分子量 μ 为 31.9988。分子量仅仅是个比值，它没有单位。

【摩尔质量】

常称为克分子量。一定质量的某种物质，如果用克作为质量的单位，其数值恰好等于该物质的分子量的大小时，那么，这一定数值的质量就叫做1“摩尔质量”。例如，碳是单原子分子，因此12克的碳就称为1摩尔质量的碳；氧是双原子分子，即由两个氧原子组成一个氧分子，因此，32克的氧就称为1摩尔质量的氧；氢也是双原子分子，因此2克的氢也称为1摩尔质量的氢。水是由氢和氧组成的，18克的水就是1摩尔质量的水，98克的硫酸(H_2SO_4)就是1摩尔质量的硫酸。由上例可看出，摩尔质量是表示物质质量的一种重要单位。

【气体分子运动论】

气体分子运动论是把分子运动论的概念具体运用于气体上，它是以气体中大量分子作无规则的热运动为基础，从气体微观结构的一些简化模型出发，根据力学定律和大量分子的热运动所表现出来的统计规律来说明气体的性质。这一理论阐明了气体对容器的器壁所产生的压强是由于大量分子与器壁发生碰撞而产生的，气体温度的升高是由于分子平均平动动能增加的结果；这个理论的初步揭示了气体的扩散、热传导和粘滞等现象的本质，解释了许多关于气体的实验定律。它不仅可以研究气体的平衡态，而且可以研究气体中由非平衡态向平衡态转变的过程。

【理想气体】

把严格服从波义耳-马略特定律、盖·吕萨克定律和查理定律的想象的气体，称为“理想气体”。气体分子运动论的研究对象主要是气体物质系统。在通常情况下，气体中的分子本身所占的体积，比起气体分子所能自由活动的空间，即气体的体积是小得多的，所以分子本身的大小可忽略不计。例如，在温度为摄氏 0、压强为 1 大气压下的气体，其密度约比液体的密度小 1000 多倍。在某种情况下忽略气体分子本身的大小对我们研究的问题影响并不大。若在高温低压的情况下，将气体分子本身的大小忽略掉，则影响就更小。至于气体分子之间的相互作用力，由于它随着分子之间距离的增大而迅速地减小，故在一般常温、常压下，也可忽略不计气体分子之间存在着分子力。也就是说，除了气体分子之间发生碰撞的瞬间之外，可认为气体分子之间是没有相互作用的。此外，也不考虑气体分子的内部结构，即认为分子在碰撞过程中不发生形变。若将气体分子视为刚体，而分子间的碰撞又是完全弹性碰撞，那么，气体分子就遵守动量守恒和动能守恒定律。符合上述要求的气体即称为理想气体。在通常的温度和压强下，理想气体和实际气体的性质差别并不太大。因此，所有的实际气体在温度不太低、压强不太大的情况下，都可近似地看作理想气体。

【实际气体】

就是实际存在的气体。为了区别于理想气体而引入的。两者区别在于，组成实际气体的分子具有一定的体积，分子之间存在着相互作用。这就使实际气体的行为与理想气体不同，特别是在低温和高压条件下，更需考虑它们的差别。而在通常条件下，特别是在高温、低压下，实际气体的行为与理想气体甚为接近。

【标准状态】

为比较气体体积和其他性质时有一统一的标准，通常规定温度为 0 和压强为 1 标准大气压的状态，为气体的标准状态。

【理想气体的实验定律】

实验指出，在温度不太低、压强不太大的情况下，气体将遵守下列三条基本定律：即玻意耳 - 马略特定律；盖·吕萨克定律和查理定律。

【玻义耳 - 马略特定律】

它反映气体的体积随压强改变而改变的规律。对于一定质量的气体，在其温度保持不变时，它的压强和体积成反比；或者说，其压强 P 与它的体积 V 的乘积为一常量，即

$$PV = C \text{ (常数) (T 不变时)}$$

或

$$P_1V_1 = P_2V_2 = \dots = P_nV_n。$$

式中常量的大小与气体系统的温度和气体的质量有关。实际气体只是在压强不太高、温度不太低的条件下才服从这一定律。

【盖·吕萨克定律】

它反映了气体体积随温度变化而变化的规律。一定质量的气体，在保持压强不变的情况下，它的体积变化与温度变化成正比，与0 时的体积成正比，即它的体积随着温度作直线变化，其数学表达式为

$$V = V_0 (1 + a_v t)。$$

式中 V 为气体在 t 时的体积， V_0 为 0 时的体积， a_v 是在压强不变时，气体体积随温度变化的系数，称做体膨胀系数。 a_v 可由实验测定，对各种气体， a_v 也都近似地等于 $\frac{1}{273.15}$ 度，即，温度每升高（或降低）1 时，增加（或减小）的体积等于它在 0 时体积的 $\frac{1}{273}$ 。实际气体只是在温度不太低，压强不太高的条件下才服从这一定律。若偏离这一条件，则实际气体的行为也将偏离这一定律所反映的规律。

【查理定律】

它反映了气体压强随温度变化而变化的规律。一定质量的气体，当其体积保持不变时，它的压强 P 变化与温度 T 的变化成正比，与 0°C 时气体的压强成正比，即压强随温度作直线变化，其数学表达式为

$$P = P_0 (1 + a_p t)。$$

式中 P 为气体在 t 时的压强； P_0 为气体在 0°C 时的压强； a_p 为体积不变时，气体压强随温度变化的系数，称作压强系数。根据实验的测定，一切气体的 a_p 都近似地等于 $\frac{1}{273.15^\circ\text{C}}$ ，即温度每升高（或降低） 1°C ，增加（或减小）的压强等于它在 0°C 时压强的 $\frac{1}{273}$ 。实际气体只是在温度不太低，压强不太高的条件下才服从这一定律，若偏离这一条件，则实际气体的行为亦将偏离这一定律所反映的规律。

【理想气体状态方程】

波义耳 - 马略特定律，盖 · 吕萨克定律及查理定律给出了一定质量的气体的三个参量 P 、 V 、 T 中有一个保持不变时，另两个状态参量的变化规律。但是，在实际中，这三个参量往往是同时变化的。对于一定质量的理想气体，在平衡状态下，压强 P 、体积 V 和温度 T 之间存有一定的关系，可用两种形式来表示。其一是

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} ,$$

式中角码 1 和 2 分别代表系统所处的两个平衡态。其二是

$$PV = \frac{M}{\mu} RT ,$$

或者写成

$$PV = RT .$$

式中 M 、 ν 和 μ 分别是气体的质量、摩尔数和摩尔质量， R 为普适气体常数。这种形式亦称为克拉珀龙方程。以上两种形式都是理想气体状态方程。理想气体状态方程表明；一定质量的气体，当其状态发生变化时，它的任意两个平衡态的状态参量之间的关系。对一定质量的气体， P 、 V 、 T 三个状态参量，并不全是独立的，任何两个参量确定之后，第三个参量也就唯一地确定了，只需两个独立参量，即可描述理想气体的状态。

【普适气体常数】

是表征理想气体性质的一个常数，由于这个常数对于满足理想气体条件的任何气体都是适用的，故称普适气体常数。亦称通用气体常数，或称气体常数。若 P_r 表示在三相点时的压强， V_r 表示 1 摩尔理想气体在三相点时的体积。其表达式为

$$R = \frac{P_r V_r}{273.15K}$$

上式也可以表示为

$$R = \frac{P_0 V_0}{273.15K}$$

式中 P_0 表示在摄氏零度时的压强，通常选 $P_0 = 1$ 标准大气压， V_0 表示 1 摩尔理想气体在摄氏零度和 1 标准大气压下的体积，等于 22.4138×10^{-3} 米³ / 摩尔。所以普适气体常数的数值为

$$\begin{aligned} R &= 8.31441 \text{ 焦耳 / 摩尔} \cdot \text{开} \\ &= 8.20568 \times 10^{-2} \text{ 大气压} \cdot \text{升 / 摩尔} \cdot \text{开} \\ &= 1.9872 \text{ 卡 / 摩尔} \cdot \text{开} \end{aligned}$$

【自由度】

为了确定一个运动物体的位置，所需要的独立坐标数。除单原子分子外，一般分子的运动并不只限于作平动，还有转动和分子内原子之间的振动等，因此，要确定一个分子的位置，究竟需要几个独立坐标，要做具体的分析。需要看分子是单原子分子，还是双原子分子或多原子分子，而后才能确定。

要确定一个质点在空间的位置，只需要用三个独立坐标就可以了，所以质点的自由度就是三个，即三个平动自由度。如果给一个质点的运动附加了限制条件，则其自由度就要减少。如果一个质点被限制在一个平面(或曲面)内运动，那么，质点在这个平面(或曲面)上的位置只要两个坐标就可以确定，故只有两个自由度；如被限制在一条直线上(或曲线上)运动，那么，此质点在这条线上的位置只需要一个坐标即可确定，故只有一个自由度。对于一个刚体，它的任何运动都可分解为质心的平动和绕通过质心的轴的转动，所以，要确定一个刚体的位置就得用三个独立坐标(如 x, y, z) 来决定其质心的位置，还要用两个独立坐标，如角 α, β (叫做欧拉角) 来确定其过质心的转动轴的方位。这是因为一个转轴应该用三个角 α, β, γ 来确定，这三个角的关系如下，即

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$$

因此三个方向角只有两个是独立的。另外，这个刚体还可以绕轴转动，为决定刚体绕轴转动的角度还要有一个变量 φ 。总之，要确定一个自由刚体的位置共需要六个独立变量，即自由刚体共有六个自由度，其中三个为质心平动的自由度，三个为绕质心转动的自由度。如果刚体的运动受到某种限制，那就不是一个自由刚体了，其运动的自由度也要减少。比如只能绕定点转动的刚体，就只有三个转动自由度；而绕定轴转动的刚体，就只有一个转动自由度。

【分子的自由度】

即分子运动的自由度。即决定一个分子在空间的位置所需要的独立坐标数目。对于单原子分子，可忽略其本身的大小，即忽略其自转，而将其看成一个自由质点，那么它就只有三个平动自由度了；而对双原子分子，如氮、氢、氧等，其两个原子是通过一根键链联在一起的，其质心的平动自由度有三个。而两个原子还可以绕与键链垂直的两个轴转动，故它有两个转动自由度。另外两个原子还可以沿键链方向上振动，所以还可以有一个振动自由度（其能量比较少）。所以双原子分子共有六个自由度即三个平动自由度，两个转动自由度，一个振动自由度。（也有的书上忽略了能量较小的振动自由度认为双原子分子只有五个自由度）；至于多原子分子，由于组成分子的结构情况各不相同，故必须按其具体的结构情况分析分子运动的自由度。一般说，一个分子若由 n 个原子组成，那么这个分子最多有 $3n$ 个自由度。而平动自由度总是 3 个，转动自由度最多也只能有 3 个，其余 $(3n-6)$ 个只能是振动自由度。当分子受到某种限制时，其自由度就会相应地减少。

【能量按自由度均分定理】

这是能量按分子各个运动自由度平

均分配的规律。它表明，在热平衡条件下，分子的平均平动动能 $\frac{3}{2}KT$ 是均匀地分配于每一个平动自由度上，每一个平动自由度上都具有相同的平均动能，其大小都等于 $\frac{1}{2}KT$ 。这就叫做“能量按自由度均分定理”，简称为“能量均分定理”。能量均分定理，也是对大量分子无规则热运动统计平均的结果。对于个别分子来说，它在任一时刻的总动能，完全可能与根据能量均分定理所得出的平均值有很大的差别，而且每一个自由度上的动能也不见得任何时刻都按自由度均分为 $\frac{1}{2}KT$ 。但是，如果对同一个分子长时间运动情况进行平均，其结果就会符合能量均分定理。也可在某一时刻，对大量分子的运动求平均，这和对一个分子长时间的运动求平均相同，这两种方法所得的结果是一样的。

动能之所以会按自由度均分，主要是因为大量分子无规则运动和相互碰撞的结果。在碰撞过程中，一个分子的能量可传递给另一个分子；一种形式的动能，也可以转化为另一种形式的动能。也就是说，一种运动的自由度，通过碰撞，可以转变成另一种运动的自由度。如果分配于某一种形式，或某一种自由度上的能量多了，那么在碰撞的过程中，能量大的运动形式或自由度，转化成其它运动形式的几率就比较大。因此，在达到热平衡时，动能就按自由度均匀分配了。在实际中，外界给予气体的能量，首先是加给器壁的，是器壁上的分子与气体分子的碰撞，并通过碰撞传递给气体分子的各个自由度的。可见碰撞是实现能量传递，并达到均匀分配的一个关键。

【理想气体的内能】

所谓气体的内能，就是气体分子全部能量的总和。气体分子可以具有各种动能，如平动动能。转动动能及振动动能。由于分子内部即构成分子的原子之间存在着相互作用力，所以还应有与这种分子力（指分子内部的力）相关联的势能，即振动势能。另外，分子和分子之间也存在着相互作用，这也对气体的内能产生影响。但对理想气体来说，由于分子间的相互作用可以忽略不计，故理想气体的内能只是所有上述分子运动的动能（平动、转动、振动）及分子内原子之间的振动势能的总和。

【分子间的碰撞】

分子间的碰撞是使气体内部能够达到热平衡，使分子按速度的分布具有规律性，并实现能量按自由度均分的主要原因。同样分子间的碰撞，也是气体能产生扩散、热传导和粘滞现象的主要原因。所谓分子间的碰撞，并不象我们通常见到的宏观物体间接触碰撞那样，实际上，分子间的碰撞是在分子力作用下分子间产生相互散射的结果。因为分子间的距离较近时分子力的性质是引力。但在分子间的距离近到一定程度时，分子力的性质就表现为斥力了，而且这种斥力会随距离的接近而迅速增大。在这种强大的分子斥力的作用下，迫使分子改变原来的运动方向，因而产生分子间的散射，这就是通常所说的分子间的“碰撞”。我们可把分子看作是具有一定体积的弹性球，而由于分子间的相互作用所产生的散射，就可以看成弹性球间的弹性碰撞过程。

【内摩擦现象】

内摩擦的出现是由于流体内部各层之间的整体运动速度不同，使分子在迁移过程中产生了动量的输运而造成的。当气体流动时，其定向的整体流速矢量要叠加在每个分子热运动的速度上；分子热运动的速度虽然很大，但因为是无规则的，所以热运动速度矢量的平均值为零。气体的流速虽然比分子的热运动速度小得多，但它却具有确定的方向和一定的数值。不论是在液体内部还是在气体内部，只要存在速度梯度，就会有内摩擦现象产生。

【真空度】

绝对真空的状态是不可能达到的，只能在某种程度上接近这种状态，我们把接近真空程度称为真空度。通常所指的真空是指十分稀薄的空间，在这里压强远小于正常的大气压强，残存的气体对所在空间进行的物理过程并无明显影响。至于低到何种程度，则应由过程的具体要求而定。真空度的高低是由气体压强的大小来量度。一般压强小于 13.33 帕 (10^{-1} 托) 的空间叫低真空， $0.13 \sim 0.13 \times 10^{-5}$ 帕 ($10^{-3} \sim 10^{-8}$ 托) 范围内的空间叫高真空，压强小于 0.13×10^{-5} 帕 (10^{-8} 托) 的空间称为超高真空。目前人工所能制造的最高真空压强约为 0.13×10^{-10} 帕 (10^{-13} 托)。

【真空泵】

为获得真空用的各种抽气机叫做“真空泵”。种类很多，如，前级泵，它能直接在大气压下工作。若需要在一定低压下工作，用以进一步提高真空度的真空泵，称为次级泵。从构造上分有机械泵、扩散泵、离子泵及吸气剂泵等。

【机械泵】

是最常用的前级泵，它可在大气压下工作，一般机械泵所能达到的极限真空度为 133.3×10^{-2} — 133.3×10^{-4} 帕（ $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 毫米汞柱）抽气率一般为每秒十分之几升到每秒十几升，最大的可达到每秒一千升以上。机械泵的种类也很多，主要有转片式、定片式和活门式等。

【转片式旋转真空泵】

它是较常用的一种，其结构如图 2 - 24 所示。在钢制圆筒形气缸内，金属偏心柱体 E 作为转子，它由电动机带动，可绕固定轴转动，并与气缸内表面密切接触于 D 点。沿转子的直径嵌入两个金属翼片 S_1 和 S_2 ，由于弹簧 C 的作用，使两翼片向外伸张，与气缸的内壁紧密接触。当电动机带动转子转动时，由于翼片 S_1 和 S_2 控制吸入及排出气体，在转子不断转动，使吸气及排气过程不断重复，从而达到抽气的目的，为避免漏气和减少摩擦，整个装置浸入油箱里，故有时又称为油抽气机。

【定片式旋转真空泵】

如图 2 - 25 所示。泵体内的气室 B 通过抽气管 A 和被抽的容器相连，以泵体空腔中心 O 为轴旋转的偏心圆柱体 C 按箭头所示的方向转动，圆柱体与空腔内壁的接触点的位置也以箭头所指示的方向旋转。滑片 D 受弹簧的压力总跟偏心圆柱体保持紧密接触。当偏心圆柱体的中心转过最高点，圆柱与空腔的接触点将把 A 管和 B 气室隔开，并随着 C 的旋转将 B 中的空气压缩到 E 处。当 E 处体积变小，气体的压强增大时，将阀门 G 顶开，空气进入起密封作用的泵油内呈气泡状而逸出。由于偏心柱 C 不停地旋转，容器中的空气逐渐减少。这种泵也只能达到 $133.3 \times 10^{-2} \sim 133.3 \times 10^{-4}$ 帕（ $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 毫米汞柱）的真空度。

【扩散泵】

是利用高速滚动的蒸气流，将被抽容器中的空气带走而获得真空的装置。这种真空泵一般不适于直接在大气压下工作，而是在一定的真空度下工作，即需要一种所谓预备真空，因此它要与机械泵连在一起使用。由于工作物质的不同又可分为水银扩散泵和油扩散泵。如图 2 - 26 所示为一油扩散泵的简图。泵底的工作物质 A 由电炉 B 加热成蒸气，高速流动的蒸气流在喷口 C 处将跟经抽气管 D 从被抽之容器中吸入的空气混合后由喷口喷出。被携带的空气由旋转油泵经 E 抽出泵体，而工作物质 A 则由于泵壁受循环水（F、G 分别为进、出水口）低温的作用，冷凝后从 U 形管 H 返回泵的底部，工作物质的不断循环，将使被抽容器中真空度达到 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ 毫米高水银柱。H 管称缓冲管，其中经常积存一段油，以防止 A 中的油被前级泵抽走。其工作原理是，当油的蒸气流由 C 处喷出时，就会将来自 D 处的气体分子带走，被带走的气体分子，在喷气口管外的下部积存，其压强要超过机械泵的极限压强，故被前级的机械泵抽走。如此不断地工作，直到存积在 C 管的气体分子的压强再也不能超过机械泵的极限压强为止，这样就使得与 D 联通的容器中的压强达 10^{-7} 毫米高水银柱的程度。由于扩散泵对预备真空的要求甚高，故单级扩散泵很难抽到很高的真空度。为降低对预备真空的要求和得到更大的抽气率，目前广泛采用多级扩散泵，即由多个喷口串联或并联起来的扩散泵，这种改良后的多级扩散泵，可达到 10^{-9} 毫米高水银柱的真空度。

各种蒸气扩散泵都有一个限制，即饱和蒸气压的限制，故蒸气扩散泵不可能得到比饱和蒸汽压更低的真空度。为克服这一缺点，除选择饱和气压尽量低的液体外，常在扩散泵和待抽容器之间，加一个液态空气或液态氮气的冷凝陷阱，在这种低温之下可使饱和蒸气压大大降低，从而可大大提高被抽容器的真空度。

因为油的饱和蒸气压很低，故用油作工作物质可不用冷凝陷阱，也能获得较高的真空度。所用的油一般为高分子油，但由于油液包含的成分都较复杂，并且在工作中容易受热分裂或发生氧化，所以对抽气效率会产生影响。另外，由于油的成分复杂，各种成分的蒸气压高低不同，因此泵的结构也要相应地改变，故一般油扩散泵上都有分馏装置，而没有冷凝陷阱的装置。

扩散泵中的工作物质如用水银，其工作原理与油略同。

【真空计】

它是测量真空度的量具，真空计的类型很多，其灵敏度，量程和用途各不相同，常用的有麦克劳真空计、皮喇尼真空计和热阴极电离真空计等。

【麦克劳真空计】

它是利用波义耳 - 马略特定律测量低气压的压力计。测量范围约为 1333.2 ~ 0.0133 帕 (10 ~ 10⁻⁴ 毫米高水银柱) 或更低些。其工作原理是把待测压强气体的一部分进行隔离并加以压缩, 直到压强增大到可以直接测量的程度, 然后根据波义耳 - 马略特定律求出原来待测的压强。如图 2-27 所示。真空计的一端 A 与待测容器连接, 另一端通过橡皮管与一可以上下移动的水银容器 R 相连。N₁ 和 N₂ 是直径相同、互相平行的两根毛细管, B 是容积已知 (设为 V) 的气体容器, m 是一标记, 它刻在 B 管和 C 管相连的地方。

用麦克劳真空计测量低气压的方法和原理是: 测量开始时, 先降低 R, 使水银面低于 m 点, 此时容器 B 中的气压与待测气压相同, 设为 P, 然后提高 R, 使水银面上升, 并使容器 B 与待测容器隔开。当水银面继续上升时, B 中的气体被压缩, 由于待测容器的容积比 G 管和 N₂ 管大很多, 所以当水银面沿 C 和 N₂ 上升时, 待测容器的气压基本上不受影响。调节 R 的高度使 N₂ 管中的水银面正好与 N₁ 管的顶端相齐。这时 N₂、N₁ 两管中水银面的高度差 h 可直接用标尺测定。若以毫米汞柱为压强的单位, 则被压缩气体的压强即为 h + p = h (因 p ≪ h)。设毛细管 N₁ 的内截面积为 a, 则压缩后气体的体积为 ah。设压缩前气体的体积, 亦即 B 和 N₁ 的总容积为 V (由于 N₁ 的容积很小, V 可近似地取为容器的容积), 则根据波义耳定律有

$$PV = h \cdot ah,$$

即

$$P = \frac{ah^2}{V},$$

式中 a 和 V 是仪器常数, 因此测出 h 就可确定 P 的数值。麦克劳真空计可以有不同量程。它所能测量的最高真空度决定于容器 B 的容积 V 和毛细管 N₁、N₂ 的截面积 a, 由上式可看出, V 越大, a 越小, 真空计可以测量的真空度就越高。实际使用的麦克劳真空计, 一般可以测量到 10⁻⁶ 毫米高的水银柱。

由于一般蒸汽在压缩时会凝结, 不遵从波义耳定律, 所以麦克劳真空计不能用来测量蒸汽压。另外麦克劳真空计也不能连续测定气压的变化, 即不能连续地指示出真空系统在抽气过程中压强的变化情况, 故它的主要用途是用来校正其它的真空计。

【皮喇尼真空计】

根据在低气压下气体的导热系数与压强成正比的原理，制成了皮喇尼真空计。其结构如图 2-28 示意。在玻璃管 A 中焊入金属支架 B，支架上连接着极细金属丝 C，其中通以电流加热。在使用时开口 A 与待测的真空系统相连接，因此真空计内的气压与待测的气压相同。当真空系统的气压改变时，与之相联接的真空计中的气压也一定改变。此时气体的导热系数也要改变，所以在加热电流恒定的情况下，金属丝的温度也要随之变化，而温度的变化又会引起其电阻的改变，金属丝电阻的改变量可以用联接在支架 B 下端的测量电路（可用惠斯登电桥等）来精确地测出。因此测量金属丝电阻的变化，即可计算出待测的气体压强。由于各种气体的导热性质不同，故在使用之前，应先用绝对真空计加以校正才能进行计算。它一般用来测量 $13.3 \sim 0.013$ 帕（ $10^{-1} \sim 10^{-4}$ 毫米高水银柱）的真空度。它的最大优点在于能够连续地记录待测的压强。这种真空计的电阻丝，都是用温度系数较高的金属材料制成。这些年来，由于半导体材料和技术的发展，往往利用热敏电阻作为这种真空计的受热元件，从而使真空计的灵敏度大大提高。

图 2—28

【热阴极电离真空计】

当气体导电时，电子与气体分子的碰撞频率跟气体分子的密度有关。密度大，碰撞的频率就高，产生的离子也越多，气体中的电流就越强。又由于气体分子的密度与气体的压强是直接相关的，因此，测定了气体中电流的大小，即可确定气体的压强。根据上述原理即可制成热阴极电离真空计。最简单的热阴极电离真空计就是一只三极管，如图 2-29 所示。图中 F 是灯丝电路，通电流后使灯丝受热向外发射电子。在栅极上加一约为 150~200 伏特的正电压，这一正电压可吸引和加速由灯丝发射出来的电子。被加速的电子穿过栅极后，因板极 B 的电压对栅极为低的负电压，因此电子又被板极推回，再加速向栅极返回。这样，电子在往返的运动中就与其中的气体分子碰撞，使分子电离，变成正离子和二次电子，而正离子将被板极所吸引，在板极电路中形成电流。

使用时，开口 A 与待测的系统联接，真空计中的气压就与待测系统相同，气体的压强越大，气体的密度也就越大，碰撞产生的离子也就越多，因此板极电流 I_p 也就越大。利用 $P=KI_p$ 的关系，可求出待测系统的压强，即真空度数值。式中 K 是一个比例常数，它是给定的表征仪器特性的一个恒量。板流 I_p 可从接在板极电路中的检流计上给出，使用这种电离真空计也要先进行校正，它的测量范围为 $0.133 \sim 0.133 \times 10^{-4}$ 帕 ($10^{-3} \sim 10^{-7}$ 毫米高水银柱) 这种真空计指示灵敏，使用方便。但是，由于不同气体分子，被电离的难易程度不同，因此在使用时，对不同的气体要分别进行校正才行。此外，电极面积较大，会发生释气现象，这对测量的准确度会有影响。

图 2—29

【测超高真空的真空计】

普通电离真空计只能测量到 133.3×10^{-7} 帕 (10^{-7} 毫米高水银柱) 当气压再降低时, 它的离子流读数不再降低。经证明, 这是由于灯丝发射的电子在轰击到栅极上时能产生 X 光, 它投射到板极上引起光电发射, 因而出现一种与离子流同样性质的本底电流, 其数值约相当于

图 1-20

真空度为 10^{-7} 毫米高水银柱时的离子流, 当气压再降低时它仍然存在, 因此, 上述电离真空计不能指示更低的真空度。改进后的超高真空电离真空计的极板 (离子收集极) 为细丝状。这样, 它接受 X 光的面积减小, 本底电流也相应减小, 因此它所能测量的真空度伸延到 133.3×10^{-11} 帕 (10^{-11} 毫米高水银柱) 的数量级, 利用类似原理制成的新型磁放电式电离真空计可测到 133.3×10^{-13} 帕 (10^{-13} 毫米高水银柱)。

【统计规律】

统计规律是对大量偶然事件整体起作用的规律，它表现了这些事物整体的本质和必然的联系。通过对大量微观粒子运动规律的研究，来解释物质的宏观性质称为统计物理学。通过观测发现，在一定宏观条件下，大量的微观粒子的集体运动却遵循着一种规律，人们把这种规律性叫做统计规律性。它不仅对研究热现象有重要的意义，而且在其他自然现象中也是普遍存在的，统计规律是对大量偶然事件整体起作用的规律。它表现了这些事物整体的本质和必然的联系，在这里个别事物的特征和偶然联系退居次要地位。需指出的是，这里所说的个别事物的偶然性是相对于大量事物整体的统计规律而言的，这并不意味着偶然性是无原因的。一切偶然性都有自己的原因。统计规律是以动力学规律为基础的，它不可能脱离由动力学规律所决定的个别事件而存在。但当体系中所包含的粒子数目极多时，就导致在质上全新的运动形式的出现，在这里运动形式发生了从量到质的飞跃。其最重要的特点就是在一定宏观条件下的稳定性，这是由统计规律所制约的。统计规律的另一个特点是永远伴随着涨落现象，统计规律与涨落现象是不可分割的，这正反映了必然性与偶然性之间相互依存的辩证关系。

【涨落现象】

当对所研究系统的某一宏观物理量进行测量时，每次测得的实际数值必然会表现出相对于它的统计平均值的偏差，这种现象称为“涨落”。统计规律与涨落现象是不可分割的。有关涨落现象的例子很多，如布朗运动就是一典型例子。布朗运动是分子运动论的重要实验基础，布朗运动的研究对涨落理论的建立起了重要作用。又如液体中的临界乳光现象和光在空气中的散射现象，都是由于媒质密度的涨落引起的。在各种电路中也可以观察到由于带电粒子的热运动而引起的电流涨落现象。由于电学仪器已达到很高的精度，而涨落现象会严重地影响仪器的工作。例如，在电子管、半导体晶体管和光电管中电流涨落所引起的“噪音”是限制无线电电子学接受仪器、电视和自动控制等方面仪器灵敏度的基本原因之一；又如，当用电流计测量微弱的电流时，如果待测的电流小于涨落电流，或待测电流引起的电流计线圈的偏转小于线圈本身的布朗运动，则这种测量将无法进行。因此研究涨落现象已具有重要的实际意义。

三、电磁学

【电磁学】

电学与磁学的统称，是物理学中的一个重要部门。研究电磁现象的规律和应用的科学。研究对象包括静电现象、磁现象、电流现象、电磁感应、电磁辐射和电磁场等。磁现象和电现象本质上是紧密联系在一起，变化的磁场能够激发电场，变化的电场也能够激发磁场。它是电工学和无线电电子学的基础。

【电】

人类在很早以前就知道琥珀摩擦后，具有吸引稻草片或羽毛屑等轻小物体的特性。物体具有吸引其它物体的这种性质叫作“物体带电”或称“物体有了电荷”，并认识到电有正负两种；同性相斥，异性相吸。当时并不知道电是实物的一种属性，认为电是附着在物体上的，因而把它称为电荷，并把具有这种斥力或引力的物体称为带电体。习惯上经常也把带电体本身简称为电荷。近代科学证明：构成实物的许多基本粒子都是带电的，如质子带正电，电子带负电，质子和电子具有的绝对电量是相等的，是电量的最小单位。一切物质都是由大量原子构成，原子又是由带正电的原子核和带负电的电子组成。通常，同一个原子中的正负电量相等，因此在正常情况下表现为中性的或不带电的。若由于某些原因（如摩擦、受热或化学变化等）而失去一部分电子，就带正电，若得到额外的电子时，就带负电。用丝绸摩擦玻璃棒，玻璃棒就失去电子而带正电，丝绸得到电子而带负电。

【摩擦起电】

两种不同物体相互摩擦后，分别带有正电和负电的现象。其原因是，当物体相互摩擦时电子由一个物体转移到另一个物体上，因此原来两个不带电的物体因摩擦而带电，它们所带的电量数值上相等，性质上相异。

【静电感应】

在带电体附近的导体，受带电体的影响在其表面的不同部分出现正负电荷的现象叫作“静电感应”。因为，在带电体电场作用下，导体中的自由电子进行重新分布，造成导体内的电场随之而变化，直到抵消了带电体电场的影响，使它的强度减小到零为止。结果靠近带电体的一端出现与带电体异号的电荷，另一端出现与带电体同号的电荷。如果导体原来不带电，则两端带电数量相等；如果导体原来带电，则两端电量的代数和应与导体原带电量相等。在带电体附近的导体因静电感应而表面出现电荷的现象称为“感生电荷”。

【电荷守恒定律】

在任何物理过程中，各个物体的电荷可以改变，但参与这一物理过程的所有物体电荷的代数和是守恒的，也就是说：电荷既不能创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。例如中性物体互相摩擦而带电时，两物体带电量的代数和仍然是零。这就是电荷守恒定律。

【库仑定律】

表述两个静止点电荷间相互作用力的定律。是法国物理学家库仑于1785年发现的。概述为：在真空中两个静止点电荷之间的相互作用力 F 的大小和它们的电量 Q_1 和 Q_2 的乘积成正比 和它们之间的距离 r 的平方成反比；作用力的方向沿着它们的连线，同号电荷相斥，异号电荷相吸。它的数学表示式为： $F = \frac{KQ_1Q_2}{r^2}$ 。其中比例常数 K 在静电单位制中为1，式中 F 的单位是达因， Q 的单位是静电单位制的电量（1静库 = $\frac{1}{3} \times 10^{-9}$ 库仑）， r 的单位是厘米。在国际单位制时，式中 F 的单位是牛顿， Q 的单位是库仑， r 的单位是米，这时比例系数 K 等于 9×10^9 牛顿·米²/库仑²。为了简化电学中许多常用公式，往往将比例常数写成 $\frac{1}{4 \epsilon_0}$ ，式中的 ϵ_0 为 8.85×10^{-12} 库仑²/牛顿·米²，所以在很多书中常见的库仑定律的公式表示为 $F = \frac{1}{4 \epsilon_0} \frac{Q_1Q_2}{r^2}$ 。

【库仑】

(Charles-August indeCoulomb ,1736 ~ 1806)法国工程师、物理学家。1736年6月14日生于法国昂古莱姆。他曾在美西也尔工程学校读书，这是一座新型的讲授理论和应用知识的学校。离开学校后，进入皇家军事工程队当工程师。他在西印狄兹工作了9年，因病而回到法国。法国大革命时期，库仑辞去一切职务，到布卢瓦致力于科学研究。法皇执政统治时期，他回到巴黎，成为新建研究院成员。库仑在1773年发表有关材料强度的论文，他提出使各种物体经受应力和应变直到它们的折断点，然后根据这些资料就能计算出物体上应力和应变的分布情况。这种方法沿用至今，是结构工程的理论基础。1777年库仑开始研究静电和磁力问题。当时法国科学院悬赏，征求改良航海指南针中的磁针问题。库仑认为磁针支架在轴上，必然会带来摩擦，要改良磁针的工作，必须从这一根本问题入手，他提出用细头发丝或丝线悬挂磁针。他又发现线扭转时的扭力和针转过的角度成比例关系，从而可利用这种装置算出静电力或磁力的大小。这导致他发明定量扭称。扭称能以极高的精度测出非常小的力。1779年库仑分析摩擦力，并提出有关润滑剂的科学理论。他还设计出水下作业法，类似于现代的沉箱。1785~1789年，库仑用扭称测量静电力和磁力，导出了有名的库仑定律。1806年8月23日库仑在巴黎逝世。

【点电荷】

点电荷并不是指带电体非常小的电荷实体，而是在所讨论的问题中可以不考虑其大小和分布状况的带电体。例如，当带电体的线度在所讨论的问题中远小于其他距离和长度时。这时的电荷分布也可看作为点电荷。点电荷只是一个为讨论问题方便而引入的理想概念，这一点与研究力学时引入质点的概念相似。

【电介质】

不导电的物质称为“电介质”，又叫做“绝缘体”。组成电介质的原子或分子中的正负电荷束缚得很紧，在一般条件下不能相互分离，因此在电介质内部能作自由运动的电荷（电子）极少，电导率均在 10^{-8} 西门子/米以下。当外电场超过某极限值时，电介质被击穿而失去介电性能。电介质在电气工程上大量用作电气绝缘材料、电容器的介质及特殊电介质器件（如压电晶体）等。在电介质中的两个点电荷之间的库仑定律

表示为 $f = K \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}$ 。其中 ϵ 叫做物质的介电常数，每种电介质都有它自身的 ϵ ，不同物质的介电常数各不相同。

【介电常数】

又称为“电容率”或“相对电容率”。在同一电容器中用某一物质作为电介质时的电容与其中为真空时电容的比值称为该物质的“介电常数”。介电常数通常随温度和介质中传播的电磁波的频率而变。电容器用的电介质要求具有较大的介电常数，以便减小电容器的体积和重量。

【电场】

存在于电荷周围，能传递电荷与电荷之间相互作用的物理场叫做电场。在电荷周围总有电场存在；同时电场对场中其他电荷发生力的作用。观察者相对于电荷静止时所观察到的场称为静电场。如果电荷相对于观察者运动时，则除静电场外，同时还有磁场出现。除了电荷可以引起电场外，变化的磁场也可以引起电场，前者为静电场，后者叫做涡旋场或感应电场。变化的磁场引起电场。所以运动电荷或电流之间的作用要通过电磁场来传递。

【电场强度】

电场强度是用来表示电场的强弱和方向的物理量。电场强度矢量，常用 \vec{E} 来表示，电场中某一点的电场方向可用试探点电荷（正电荷）在该点所受电场力的方向来确定；电场强弱可由试探电荷所受的力 F 与试探点电荷带电量 q 的比值（ F/q ）来确定，也就是说某点电场的强弱等于单位电荷在该点所受力的的大小。试探点电荷应该满足两个条件：(1)它的线度必须小到可以被看作点电荷，以便确定场中每点的性质；(2)它的电量要足够小，使得由于它的置入不引起原有电场的重新分布。电场强度的实用单位为伏特/米或牛顿/库仑。常用的单位还有伏特/厘米。由库仑定律和电场强度的定义可知，点电荷 q 在电场中某一点所受的电场力 \vec{F} ，等于该点电场强度 \vec{E} 和电荷 q 的乘积，即 $\vec{F} = q\vec{E}$ 。如果是正电荷， \vec{F} 和 \vec{E} 同方向，如果是负电荷， \vec{F} 和 \vec{E} 反方向。电场强度和电场力虽然有着密切的联系，但它们是两个不同的概念，电场强度完全由电场本身的性质所决定，而电场力是由电场和电荷之间的相互作用所产生。尽管 $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ 中包含有试探电荷 q ，但 \vec{E} 的量值与 q 无关，因为电荷在电场中某一指定点所受的力 \vec{F} 是和电荷的电量 q 成正比。所以对指定点来说， \vec{F} 与 q 的比值是不变量。

【电动力学】

研究电磁运动一般规律的科学。它以麦克斯韦方程组和洛仑兹力公式为出发点，运用数学方法，结合有关物质结构的知识，建立完整的电磁理论，分别从宏观和微观的角度来阐明各种电磁现象。同量子理论结合又产生了量子电动力学。

【电子的发现】

19世纪末，电学兴起，这提供了破坏原子的方法。在低压气体下放电，原子被分为带电的两部分。1897年，美国的汤姆逊在研究该两部分电荷时，发现其一带负电（称为电子），而另一个较重要的部分则带正电。这一事实说明原子不再是不可分割的。1895年，德国的伦琴发现X光，接着贝克勒及居里夫妇相继发现放射性元素。放射性元素就是可放出“某些东西”的原子。这些东西后来被称为α、β粒子，飞行很快。可穿透物质。这一穿透能力很快应用于探讨原子内部构造的工具，实验结果有时粒子毫无阻碍地通过，有时则又发生猛烈的碰撞。用汤姆逊的原子模型不能解释。1911年卢瑟福为了解释这一实验结果，提出一个新的原子模型。他证明：原子中带正电的部分必须集中于一个非常小而重的原子核里，而电子则如行星绕日般地围着原子核转动，原子核与电子间是有很大的空隙的。用这一模型算出的数值，正是实验结果。

【场的迭加原理】

如果一个电场是由 n 个点电荷共同激发时，那么电场中任一点的总场强将等于 n 个点电荷在该点各自产生场强的矢量和

即 $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum \vec{E}_i$ ，这就是场的迭加原理。

【电力线】

电力线是描述电场分布情况的图像。它是由一系列假想的曲线构成。曲线上各点的切线方向和该点的电场方向一致，曲线的疏密程度，跟该处的电场强度成正比。电力线比较形象地表示出电场的强弱和方向。在静电场中电力线从正电荷开始而终止于负电荷，不形成闭合线也不中断。在涡旋电场中，电力线是没有起点和终点的闭合线。由于电场中的某一点只有一个电场方向，所以任何两条电力线不能相交。电力线上各点的电势（电位）沿电力线方向不断减小。

【法拉第】（Faraday, Michel, 1791 ~ 1867）

法拉第是著名的英国物理学家和化学家。他发现了电磁感应现象，这在物理学上起了重要的作用。1834年他研究电流通过溶液时产生的化学变化，提出了法拉第电解定律。这一定律为发展电结构理论开辟了道路，也是应用电化学的基础。1845年9月13日法拉第发现，一束平面偏振光通过磁场时发生旋转，这种现象被称为“法拉第效应”。光既然与磁场发生相互作用，法拉第便认为光具有电磁性质。1852年他引进磁力线概念。他主张电磁作用依靠充满空间的力线传递，为麦克斯韦电磁理论开辟了道路，也是提出光的电磁波理论的前驱，他的很多成就都是很重要的、带根本性的理论。他制造了世界上第一台发电机。所有现代发电机都是根据法拉第的原理制作的。法拉第还发现电介质的作用，创立了介电常数的概念。后来电容的单位“法拉”就是用他的名字命名的。法拉第从小就热爱科学，立志献身于科学事业，终于成为了一个伟大的物理学家。

【麦克斯韦】Maxwell James Clerk

英国物理学家（1831~1879）。阿伯丁的马里查尔学院和伦敦皇家学院、剑桥大学教授，并且是著名的卡文迪什实验室的奠基人。皇家学会会员。在汤姆逊的影响下进行电磁学的研究，提出了著名的麦克斯韦方程式是电磁学中场的最基本的理论。麦克斯韦从理论上计算出电磁波传播速度等于光速，他认为：光就是电磁波的一种形态。对于统计力学、气体分子运动论的建立也作出了贡献。引进了气体分子的速度分布律以及分子之间相互碰撞的平均自由程的概念。著有《论法拉第力线》、《论物理力线》、《电磁场运动论》、《论电和磁》、《气体运动论的证明》、《气体运动论》。还著有《热理论》、《物质与运动》等教科书。

【超距作用】

一些早期的经典物理学者认为对于不相接触的物体间发生相互作用，如两电荷之间的作用力以及物体之间的万有引力都是所谓的“超距作用力”。这种力与存在于两物体间的物质无关，而是以无限大速度在两物体间直接传递的。但是，电磁场的传播速度等于光速的这一事实说明电的作用力和电场的传播速度是有限的。因此“超距作用”论便自然被否定了。实际上，电磁场就是物质的一种形态，因此不需借助其他物质传递。

【导体】

在外电场作用下能很好地传导电流的物体叫做导体。导体之所以能导电，是由于它具有大量的可以自由移动的带电粒子（自由电子、离子等）。电导率在 10^2 （欧姆·厘米）⁻¹ 以上的固体（如金属），以及电解液等都是导体。金属和电解液分别依靠自由电子和正负离子起导电作用。

【自由电荷】

存在于物质内部，在外电场作用下能够自由运动的正负电荷。金属导体中的自由电荷是带负电的电子，因为金属原子中的外层电子与原子核的联系很弱，在其余原子的作用下会脱离原来的原子而在整块金属中自由运动，在没有外电场时这种运动是杂乱无章的，因此不会形成电流。在外电场作用下，电子能按一定方向流动而形成电流。电解液或气体中的离子也都是自由电荷。

【束缚电荷】

电介质中的分子在电结构方面的特征是原子核对电子有很大的束缚力，即使在外电场的作用下，这些电荷也只能在微观范围有所偏离。但它们一般不会彼此相互脱离。例如，电介质在外电场作用下从微观上看是分子发生电极化，微观电极化的宏观效果就是沿电场方向，在电介质的两端出现两种等量而异号的感应电荷。研究电介质的电性质时，应主要考虑束缚电荷的作用。

【电量】

物体所带电荷的多少叫做电量。在国际单位制中，电量的单位是库仑。静电系单位制的电量为静库。物体所带电荷的量值是不连续的。单个电子的电量是电量的最小单元，其值为 1.6×10^{-19} 库仑，一切带电体所带电量的数值都必须是电子电量 e 的整数倍。

【电离】

原子是由带正电的原子核及其周围的带负电的电子所组成。由于原子核的正电荷数与电子的负电荷数相等，所以原子是中性的。原子最外层的电子称为价电子。所谓电离，就是原子受到外界的作用，如被加速的电子或离子与原子碰撞时使原子中的外层电子特别是价电子摆脱原子核的束缚而脱离，原子成为带一个（或几个）正电荷的离子，这就是正离子。如果在碰撞中原子得到了电子，则就成为负离子。

【静电平衡】

在静电感应过程中，随着导体两端的正负电荷的不断积累，所产生的附加电场不断增强，直至跟导体内的外电场完全抵消。这时导体中的总电场处处为零，自由电荷不受电场力的作用，不再移动，导体两端的电荷不再增加。此时导体达到静电平衡状态。静电平衡状态的导体有如下的性质：

- (1) 导体内部场强处处为零。
- (2) 导体是个等势体，导体表面是个等势面。
- (3) 导体表面上任何一点的场强都垂直于该点的表面。
- (4) 电荷只能分布在导体的表面上。导体内部不存在净电荷。

【静电屏蔽】

为了避免外界电场对仪器设备的影响，或者为了避免电器设备的电场对外界的影响，用一个空腔导体把外电场遮住，使其内部不受影响，也不使电器设备对外界产生影响，这就叫做静电屏蔽。空腔导体不接地的屏蔽为外屏蔽，空腔导体接地的屏蔽为全屏蔽。空腔导体在外电场中处于静电平衡，其内部的场强总等于零。因此外电场不可能对其内部空间发生任何影响。若空腔导体内有带电体，在静电平衡时，它的内表面将产生等量异号的感生电荷。如果外壳不接地则外表面会产生与内部带电体等量而同号的感生电荷，此时感应电荷的电场将对外界产生影响，这时空腔导体只能对外电场屏蔽，却不能屏蔽内部带电体对外界的影响，所以叫外屏蔽。如果外壳接地，即使内部有带电体存在，这时内表面感应的电荷与带电体所带的电荷的代数和为零，而外表面产生的感应电荷通过接地线流入大地。外界对壳内无法影响，内部带电体对外界的影响也随之而消除，所以这种屏蔽叫做全屏蔽。为了防止外界信号的干扰，静电屏蔽被广泛地应用科学技术工作中。例如电子仪器设备外面的金属罩，通讯电缆外面包的铅皮等等，都是用来防止外界电场干扰的屏蔽措施。

【电势能】

与重力场一样，静电场是一个有势场。在静电场中所以能引入电势能的概念，是因为静电场具有势场的性质。所谓的势场，就是当点电荷 q 在任意静电场中运动时，电场力所做的功只取决于运动的始末位置而与路径无关。这种性质叫做有位性（有势性），具有这种性质的场叫做位场（势场）。在静电场中任意选取一个参考点，将正电荷 q 从该点移到静电场中的另一点 p 在此过程中，如果是外力

图 3-1

反抗电场力作功，则所作的功等于 q 从参考点移到 P 点所增加的电势能。若从参考点到 P 点是电场力作正功则所作的功等于 q 所减少的电势能。假如电荷 q 在参考点的电势能为零，则将正电荷 q 由参考点反抗电场力使之移到 P 点所作的功就等于 q 在 P 点时所具有的电势能。通常把无穷远处定义为电势能的零点。实用上常把地球表面作为电势能的零点。在静电场中将电荷 q 放在由点电荷 Q 所激发的场中，如图 3 - 1 所示，设点电荷 q 从场中的 P_1 点沿某一路径移到另一点 P_2 ，任取一元位移 \vec{dl} ，设 q 在位移前后与 Q 的距离分别为 r 和 r' 。场力 \vec{F} 在这一元位移上所作的元功 $dA = Fdl\cos\theta$ 其中

是 \vec{dl} 与 \vec{F} 的夹角。由图可知 $dl\cos\theta = dr$ ，由库仑定律 $F = \frac{KqQ}{r^2}$ ，故 $dA = \frac{KqQdr}{r^2}$ ，电场力在把 q 从 P_1 移到 P_2 的过程中所作的总功 $A = \int_{r_1}^{r_2} K \frac{qQdr}{r^2} = KqQ(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2})$ 。此式说明，当电荷 q 在点电荷 Q 的场中运动时电场力所作的功

只取决于运动电荷的始末位置，而与路径无关。任何电荷在静电场中的电势能的数值是由该电荷和电源电荷以及它们之间的相对位置所决定。电荷在匀强电场中移动时，场力所作的功可以从功的定义直接计算，即 $W = FS\cos\theta = qFS\cos\theta$ 。也可以根据电势能的变化来计算，即 $W = U_{始} - U_{终}$ ，对不均匀场，一般采用电势能的变化来计算比较方便。由于电势能等于电量 q 和电势 U 的乘积，所以电场力所作的功也可以写成为

$$W = qU_{始} - qU_{终} = q(U_{始} - U_{终})。$$

【电势】

电势是描写电场的物理量，也称为“电位”。静电场中某点的电势等于单位正电荷在该点时所具有的势能。理论上常把“无穷远”处作为电势零点，实用上则常取地球表面为电势零点。故某点的电势在数值上也等于单位正电荷从该点移到无穷远（或地面）时电场对它所作的功。这功与所经路径无关，所以场中各点的电势各有一定数值。如果这

功是负的，电势也取负值。实用单位为伏特1伏特 = $\frac{1\text{焦耳}}{1\text{库伦}}$ 。例如由正电荷

所激发的场中的单位正电荷，从场中的某点移到无穷远时，电场力作正功，则该点的电势为正。如果是负电荷所激发的场，场中某点的单位正电荷移到无穷远处，电场力所作的功为负，则该点的电势也为负。和电势能一样，电势的概念也是因为静电场具有“功和路程无关”的性质而引入的，但电势能和试探电荷的正负大小有关，而电势完全取决于电场本身，它的数值只和场源电荷的电性、电量大小及所考虑的点的位置有关，和试探电荷的数值及存在与否无关。因为对电场中指定点来说，电势能和试探电荷 q 成正比关系，所以比值 U 是一个常数 $U = \frac{\epsilon}{q}$ ，电势的单位就是由此公式

规定的。正点电荷 q_0 的电场中各点电势都是正值，即 $U = \frac{\epsilon}{q} = K \frac{q_0 q}{r q} = \frac{K q_0}{r}$ 。

电势和电场强度都是用来表征电场特性的物理量，但电势和电场做功相联系，场强和电场力相联系，所以前者是标量，后者是矢量。在计算场的迭加问题时，电势取标量和，场强用矢量和。在匀强电场中，电荷 q 沿电场方向移动距离 d ，电场力所作的功 $W=qEd$ ，而电势能改变量为 qU ， a 、 b 为电荷 q 的始点和终点。根据功能关系，二者应该相等，即 $qEd=qU_{ab}$ ，所以 $E = \frac{U_{ab}}{d}$ 。由此可见，在匀强电场中，场强大小等于沿电场方向每单位距离

的电势差（电压），方向指向电势降落的方向。对于非均匀场，如果取电场反方向以 n_0 表示，场强和电势之间的关系为 $\vec{E} = -\frac{dU}{dn} n_0$ ，式中 $\frac{dU}{dn}$ 叫做电

势梯度，所以场强是电势梯度的负值，它说明场强是指向电势降落的方向。这一关系非常重要，因为在实践中一般能直接测量的是各个导体的电势，求得电势后就可利用求导数而计算场强。直接求解含有电场强度的矢量方程是比较困难的，而求解含有电势的标量方程，相对说来较为方便（理论物理中的泊松方程和拉普拉斯方程就是电势解场的实例）。

【等势面】

亦称为“等位面”。在有势场中，势的数值相等的各点所联成的面。一般规定每隔一定数值的势画一等势面，场较强的地方等势面较密，较弱的地方较疏，因此等势面是描述场分布情况的一种直观图象。例如点电荷产生的静电场，等势面是以点电荷为中心的一组同心球面，且内密外疏。电荷沿同一等势面移动时，电场力不作功，所以等势面与电场方向永远是垂直的。静电场中的任何导体的表面都是等势面；又因其内部不存在电场，它同时也是一个等势体。静电场中的电力线处处和等势面相垂直，并指向电势降落的方向。

【电势差】

静电场中或直流电路中两点间电势的差值，也称为“电位差”或“电压”。数值上等于电场力使单位正电荷从一点移动到另一点时所作的功。在交流电路中，两点间的电势差在正负极大值之间作周期性变化，所以电势差只有瞬时值的意义，常用有效值表示，一般交流电的有效值等于峰值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ，其实用单位为伏特。正电荷在电场力的作用下总是从电势高的地方走向电势低的地方。假定 A 点的电势为 U_A ，B 点的电势为 U_B ，而 $U_A > U_B$ ，把正电荷 q 从 A 点移到 B 点， q 的电势能减少量为 $qU_A - qU_B$ 即 $W = q(U_A - U_B) = qU_{AB}$ ， U_{AB} 就是 AB 两点间的电势差（或电压）。

【电子伏特】

在研究原子、原子核、基本粒子等微小粒子时，往往用电子伏特作为能量单位。1 电子伏特，就是带有单个电子电量的带电粒子，在电压为 1 伏特的两点间，在电场力作用下粒子所增加的能量。它是带电粒子加速器中的能量单位，用起来比较方便。比如说这台加速器是 1 亿电子伏的能量，就是说，他能把单位电荷的粒子加速而得到 1 亿电子伏的能量。国际通用的符号是 eV。1 电子伏特=1eV=1.6 × 10⁻¹⁹ 库仑 × 1 伏=1.6 × 10⁻¹⁹ 焦耳。

【匀强电场】

在电场中，各个点的电场强度的大小和方向均相同的场叫匀强电场。在匀强电势中的等势面是垂直于电力线的一族互相平行的平面。在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电势差等于场强和这两点间距离的乘积。即场强在数值上等于沿场强方向每单位距离上的电势降落。

它们的数学表示式分别为 $U = Ed$ ， $E = \frac{U}{d}$ 。实质上，匀强电场说明：电势在电场方向上的变化是均匀的。

【电场强度与电势差】

在匀强电场中，电场强度与电势差之间的关系为 $U_{AB}=Ed$ ，其中 d 是 AB 两点间沿电场方向的距离。如图 3-2 所示。对于非匀强电场，单位正电荷从 P 点移到参考点 P_0 时电场力所作的功，叫做 P 点的电位（或电势），记作 U 。既然场力所做的功与场强有关。就应找到电位与场强的关系。点电荷 q 从 P 到 P_0 点时场力所做的功为 A ，则 P 点

的电位 $U = \frac{A}{q} = \frac{1}{q} \int_P^{P_0} F \cos \alpha dl = \frac{1}{q} \int_P^{P_0} \vec{F} \cdot d\vec{l}$ ，其中 α 是力 \vec{F} 与元位移 $d\vec{l}$ 的夹角。

上式可写成 $U = \int_P^{P_0} \vec{E} \cdot d\vec{l}$ 。（其中 $\vec{E} \cdot d\vec{l}$ 是电场强度 \vec{E} 与元位移向量的标量积）。

对场中任意两点电位之差（电压）与电场强度之间显然

图 3-2

有； $U_A - U_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$ 。电位和电压是两个不同的概念，(1) 电位是点函数，电压不是点函数。应该养成“对一点谈电位，对两点谈电压”的习惯；(2) 在许多情况下不但要关心两点电压的绝对值，而且要关心这两点的电位谁高谁低。一般以 U_{AB} 表示 $U_A - U_B$ ，（称为“ A 对 B 的电压 ”），于是从 U_{AB} 的正负便表示了 A、B 电位的高低；(3) 静电场力所作的功与路径无关，所以当电场确定时，两点的电压就完全确定，但电位却与参考点的位置有关。因此说到某点的电位时，一定要明确指出参考点。只要在同一问题中选定一个参考点，电位就有确定的意义，正如选定海平面为参考点后高度有确定意义一样。 $U = \int_P^{P_0} \vec{E} \cdot d\vec{l}$ ，称为电位与场强的积分关系。而在“电势”词目中的 $\vec{E} = -\frac{dU}{dn} \vec{n}_0$ 式所表示的为电位与场强的微分关系。此式说明，(1) 一点的场强与过该点的等位面垂直，而且指向电位减小的方向；(2) 某点场强的大小等于该点电位沿等位面法向的变化率（沿法向的方向导数）。

【电场中的带电粒子】

在静电场中的带电粒子总是沿着电场方向或逆着电场方向受到电场力的作用。带正电荷的粒子所受的力是沿电场方向的，带负电荷的粒子所受的力则沿着电场的反方向。也就是说，带正电荷的粒子从电势高的地方向电势低的地方做加速运动。而带负电荷的粒子则从电势低的地方向电势高的地方做加速移动。例如带正电粒子从高电位开始运动到低电位。如果高电位与低电位之间的电势差为 U ，则在这段运动期间，电场力作功为 W ，则 $W=qU$ 。到达低电位时质量为 m 的正电荷粒子

所具有的动能为 $\frac{1}{2}mv^2$ ，所以 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ 。因此 q 达到低电位时的速度 $v = \sqrt{2qU/m}$ 。粒子在电场中加速过程所得到的能量只与带电粒子所带的电量，以及运动始末的电位差值有关。对同样的电位差，粒子带电量增加 1 倍其能量也增加 1 倍。公式 $v = \sqrt{2qU/m}$ 无论是对匀强场或非匀强场均适用，因为电场力所作的功总是 qU 。如果我们在垂直于带电粒子前进的方向上加一个匀强电场，则运动的带电粒子将要发生偏转。

【加速器】

加速器是用人工方法把带电粒子加速到较高能量的装置。利用这种装置可以产生各种能量的电子、质子、氘核、 α 粒子以及其它一些重离子。利用这些直接被加速的带电粒子与物质相作用，还可以产生多种带电的和不带电的次级粒子，象 β 粒子、中子及多种介子、超子、反粒子等。目前世界上的加速器大多是能量在100兆电子伏以下的低能加速器，其中除一小部分用于原子核和核工程研究方面外，大部分用于其他方面，象化学、放射生物学、放射医学、固体物理等的基础研究以及工业照相、疾病的诊断和治疗、高纯物质的活化分析、某些工业产品的辐射处理、农产品及其他食品的辐射处理、模拟宇宙辐射和模拟核爆炸等。近年来还利用加速器原理，制成各种类型的离子注入机。以供半导体工业的杂质掺杂而取代热扩散的老工艺。使半导体器件的成品率和各项性能指标大大提高。很多老工艺不能实现的新型器件不断问世，集成电路的集成度因此而大幅度提高。

【密立根】

Millikan, Robert Andrews (1868 ~ 1953 年) 美国物理学家。1910 ~ 1917 年，应用带电油滴在电场和重力场中运动的方法，精确测定单个电子的荷电量，从而确定了电荷的不连续性这就是著名的密立根油滴实验。1916 年曾验证爱因斯坦的光电效应公式，并测定普朗克常数。在宇宙射线方面也做了一些工作。

【基本电荷】

原子中的电子和原子核中的质子带有等量异种电荷。它们所带的电量都是 $e=1.602 \times 10^{-19}$ 库仑，这一电量是不可分割的最小电量，称之为基本电荷，也是电量的基本单位，这是密立根通过他的油滴实验验证的结果。不同离子本身可以带有 e ， $2e$ ， $3e$ ， 的电量。

【电容器】

电路中用以积储电能的基本元件。实际上用得最多的是由两个导体组成的电容器，常见的电容器有平行板电容器以及圆柱电容器两种。在两个导体间由电介质相隔。所有的电介质有固体的、气体的（包括真空）和液体的。按型式分，电容器有固定的、可变的和半可变的三类。按极片间使用的介质分，则有空气电容器、真空电容器、纸介电容器、塑料薄膜电容器、云母电容器、陶瓷电容器、电解电容器等。电容器在电力系统中是提高功率因数的重要器件；在电子电路中是获得振荡、滤波、相移、旁路、耦合等作用的主要元件。电容器电量与电压的比值只与电容器本身有关。

【电容】

表征导体由于带电而引起本身电势改变的物理量。一个导体的电势，非但与其本身的电荷有关，且与周围的介质和其他导体的电荷有关。当其他导体的电势都维持一定（例如接地）时，一个导体的电势正比于其本身的电量，这个导体的电容就以其电量与电势的比值来量度；电容器的电容以一个极板的电量与两极板间电势差的比值来量度。电容的大小取决于极板的形状、大小、相对位置以及极板间电介质的介电常数。若

把电容记作 C 。即有 $C = \frac{q}{U}$ 。它说明，为了使电容器的电压升高，就要给它提

供电量（充电），使电压升高一个单位所需的电量，在数值上等于它的电容。要注意，电容器和电容是两个不同的概念。前者是两个导体的组合。

后者是描写该组合性质的物理量。对平行板电容器的电容为 $c = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ 。圆柱

电容器的电容 $C = \frac{2 \epsilon_0 L}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$ 。球形电容器的电容为 $C = \frac{4 \epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}$ 。其中 $\epsilon_0 =$

$\frac{1K}{4}$ ， S 为平行板的面积， d 为两平行板之间的距离， L 为圆柱电容器的长度，

R_1 和 R_2 是圆柱和球的内外径。在电容器的两个导体之间充入电介质可以使电容增大。实用中常利用这个方法增大电容器的电容。充入均匀介质后，上述的三种形式的电容都要乘以一个大于1的常数（由电介质的性质决定），即电容增至 倍。

【电容器的串联】

多个电容器串联时，流入电容器组的电量 q 全部进入第一个电容器的左边板（设 A 端接电池正极），其右边板因感应而带 $-q$ ，于是第二个电容器左板带 $+q$ ，右板带 $-q$ 。见图 3 - 3 所示，故串

$$\begin{aligned} \text{联总电容 } C &= \frac{q}{U} = \frac{1}{\frac{U_1}{q} + \frac{U_2}{q}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} \text{ 所以 } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \text{ 即串联总电容的倒数等于每个电容的倒数之和。} \end{aligned}$$

【电容器的并联】

如图 3-4 所示为两个电容器并联，其中 U 表示两端 A 与 B 之间的电压（绝对值）， q 表示充电时流入电容器的总电量。

并联时， q 等于每个电容器电量之和： $q = q_1 + q_2$ ，所以 $C = \frac{q}{U} = \frac{q_1}{U} + \frac{q_2}{U} = C_1 + C_2$ ，即并联总电容等于每个电容器电容之和。电容器并联时电容增大，串联时电容减小。实用中可根据需要而选用并联和串联。

【电容器的击穿】

串联时总电压分配于各电容器上，这时电容器的电容减小，却提高了耐压能力。耐压能力是指电容器忍受外加电压的能力。每个电容器的电压都有一个界限，超过此界限时，会产生过大的内部场强，从而使所充的绝缘材料(电介质)变为导体以致于损坏电容器，这种现象叫“电容的击穿”。

【电流】

带电粒子的运动叫做“电流”。例如金属中自由电子在电场作用下的定向运动，液体或气体中正负离子相互沿相反方向流动。在电流发生的同时，还会伴生出其他效应：电池的周围存在着磁场；电流通过电路时使电路发热；通过电解质时引起电解；通过稀薄气体时，在适当条件下导致发光等等。由于电流形成过程的不同，除传导电流外，还有对流电流和位移电流。所谓的对流电流也称为“运流电流”。带电介质或介质中的带电部分不是由于电场作用而在空间运动时所形成的电流。同一般电流一样，对流电流的周围也存在着磁场。例如当带电的平行板电容器绕垂直于板面的轴急速旋转时就出现磁场。由于带电体在原来没有电磁场的空间中匀速运动不须外力维持（如果不计空气阻力），所以对流电流不需要电势差来维持，它不引起热效应。至于位移电流被定义为电位移矢量随时间的变化率。麦克斯韦首先提出这种变化将产生磁场的假设，故称“位移电流”。实际上位移电流只表示电场的变化率，与传导电流不同，它不产生热效应、化学效应。继电磁感应现象发现之后，麦克斯韦的这一假设更深入一步揭露了电现象和磁现象之间的紧密联系。位移电流是建立麦克斯韦方程组的重要依据。在中学课本中主要讨论的是传导电流。在导体中存在持续电流的条件，是保持导体两端的电势差（电压）。

【电流强度】

单位时间内通过导体某一横截面的电量为该截面处的电流强度。即通过导体某一横截面的电量 q ，跟通过这些电量所用的时间

的比，写成 $I = \frac{q}{t}$ ，其中 I 就是电流强度。在国际单位制中，电流强度的单

位是安培或简称安，通常用“ A ”表示。常用的单位还有毫安（即 $10^{-3}A$ 表示为 mA ）、微安（即 $10^{-6}A$ 表示为 μA ）。金属导体中的电流是自由电子在外电场作用下漂移运动的结果。真空中的电子流，是由灼热的金属或金属氧化物表面发射出来的电子，在真空中由外加电场加速作定向运动而形成电流。如阴极射线就是真空中的高速电子流。气体中的电流，是在稀薄气体中，两端电极上加有足够高的电压时，从阴极表面逸出电子必向阳极运动。在电子向阳极运动的过程中，由外加电压作用可获得较大的动能，这些电子与中性气体分子相碰，使其电离（碰撞电离），同时正离子还能向阴极运动，再次从阴极表面击出电子（二次电子发射）。所以碰撞电离和二次电子发射都使气体中出现离子和大量电子，它们在外电场作用下定向移动，形成气体中电流。当对电解质溶液的两极加上电压时，将使溶液中作热运动的正负离子迭加一个漂移运动而形成电流。注意，由于在溶液中有正负两种电荷沿相反方向运动，所以总电流应该是正离子电流和负离子电流的绝对值的和。

【稳恒电流】

在恒定电阻的电路中，加上电压恒定的电源，便产生大小和方向都不随时间改变的电流，称为“稳恒电流”。

【电流密度】

描述电路中某点电流强弱和流动方向的物理量。其大小等于单位时间内通过垂直于电流方向单位面积的电量，以正电荷流动的方向为正方向。注意电流密度和电流强度都是描写电流的物理量。然而电流强度是一个标量，是描写导体中通过一个截面的电流量（不是点函数）；电流密度是一个矢量点函数，是描写导体中某一点的电流方向和通过该点垂直截面的电流强度。

【欧姆定律】

欧姆定律是研究在稳恒电流通过的电路中，电流、电压和电阻间的相互关系。这个关系可表示为两种形式：部分电路欧姆定律和全电路（闭合电路）的欧姆定律。当一段导体两端存在电压时，导体内部就出现电场，载流子就要在电场力的作用下发生定向运动，形成电流。关于电流与电压之间的定量关系，德国科学家欧姆通过大量的实验得出：

流过导体的电流 I 与导体两端的电压 U 成正比。写成 $I = \frac{1}{R}U$ ， R 的数值取决

于导体的材料，形状、长短、粗细及温度等。当这些因素不变时 R 为常数，只有当 R 为常数时才可以说 I 与 U 成正比。导体的 R 值越大流过它的电流 I 越小，可见 R 值反映导体对电流的阻碍程度，称为导体的电阻。在学习欧姆定律时应注意的是：(1)欧姆定律对金属导体及通常情况下的电解液都很好地成立，但对半导体二极管、真空二极管以及许多气体导电管等元件都

不适用。(2)当导体内部含有电源时， $I = \frac{U}{R}$ 所表达的欧姆定律也不再适用，其电流与电压的关系服从全电路的欧姆定律。

【电动势】

电源内部非静电力移送单位正电荷，将其从电源的负极移至正极所作的功，叫做电源的电动势。电动势的单位是伏特。电源提供电能必须通过非静电力对电荷做功的方式从其他形式能量转变而来。例如，在具有一定负载的直流电路中，若要维持电路中的电流恒定不变，就必须设法维持电路两端有恒定的电势差（电压）。这就必须有非静电力不断对电荷做功来实现。在外电路电流是由高电势的正极流向低电势的负极。则在电源内部必须由非静电力将负电荷移到负极上，并将正电荷送到正极上。才能达到维持电路两端的恒定电势差。

【电阻定律】

对于由一定材料制成的横截面积均匀的导体，在一定的温度下，它的电阻 R 和导体的长度 l 成正比，和横截面积 S 成反比。即

$R = \rho \frac{l}{S}$ 。式中 ρ 为电阻率，电阻定律是确定导体电阻值的定律。若导体的横

截面积不均匀，或者电阻率 ρ 不均匀时，可将其沿长度 l 的垂直方向截取无穷多个电阻元，对一个电阻元 dR 有 $dR = \rho \frac{dl}{S}$ 。整个导体的电阻 $R = \int \rho \frac{dl}{S}$ 。

【电阻率】

表征物质导电性能的物理量。也称“体积电阻率”。电阻率越小导电本领越强。用某种材料制成的长1厘米、横截面积为1平方厘米的导体电阻，在数值上等于这种材料的电阻率。也有取长1米、截面积1平方毫米的导体在一定温度下的电阻定义电阻率的。此两种定义法定义的电阻率在数值上相差4个数量级。如第一种定义，铜在20℃时的电阻率为 1.7×10^{-6} 欧姆·厘米。而第二种定义的电阻率为0.017欧姆·毫米²/米。电阻率的倒数称为电导率。电阻率不仅和导体的材料有关，还和导体的温度有关。在温度变化不大的范围内，几乎所有金属的电阻率随温度作线性变化，即 $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ 。式中 t 是摄氏温度， ρ_0 是0℃时的电阻率，

α 是电阻率温度系数。由于电阻率随温度的改变而改变，所以对某些电器的电阻，必须说明它们所处的物理状态。如220伏、100瓦电灯的灯丝电阻，通电时是484欧姆，未通电时是40欧姆。另外要注意的是：电阻率和电阻是两个不同的概念。电阻率是反映物质对电流阻碍作用的属性，电阻是反映物体对电流阻碍作用的属性。电导率是电阻率的倒

数，即 $\sigma = \frac{1}{\rho}$ 。在国际单位制中电导率的单位是西门子/米。

【超导体】

在温度和磁场都小于一定数值的条件下，许多导电材料的电阻和体内磁感应强度都突然变为零的性质。具有超导性的物体叫做“超导体”。1911年荷兰物理学家卡曼林-昂尼斯（1853~1926年）首先发现汞在4.173K以下失去电阻的现象，并初次称之为“超导性”。现已知道，许多金属（如、锡、铝、铅、钽、铌等）、合金（如铌—锆、铌—钛等）和化合物（如 Nb_3Sn 、 Nb_3Al 等）都是可具有超导性的材料。物体从正常态过渡到超导态是一种相变，发生相变时的温度称为此超导体的“转变温度”（或“临界温度”）。现有的材料仅在很低的温度环境下才具有超导性，其中以 Nb_3Ge 薄膜的转变温度最高（23.2K）。1933年迈斯纳和奥森费耳德又共同发现金属处在超导态时其体内磁感应强度为零，即能把原来在其体内的磁场排挤出去；这个现象称之为迈斯纳效应。当磁场达到一定强度时，超导性就将破坏，这个磁场限值称为“临界磁场”。目前所发现的超导体有两类。第一类只有一个临界磁场（约几百高斯）；第二类超导体有下临界磁场 H_{c1} 和上临界磁场 H_{c2} 。当外磁场达到 H_{c1} 时，第二类超导体内出现正常态和超导态相互混合的状态，只有当磁场增大到 H_{c2} 时，其体内的混合状态消失而转化为正常导体。现在已制备上临界磁场很高的超导材料（如 Nb_3Sn 的 H_{c2} 达22特斯拉， $Nb_3Al_{0.75}Ge_{0.25}$ 的 H_{c2} 达30特斯拉），用以制造产生强磁场的超导磁体。超导体的应用目前正逐步发展为先进技术，用在加速器、发电机、电缆、贮能器和交通运输设备直到计算机方面。1962年发现了超导隧道效应即约瑟夫逊效应，并已用于制造高精度的磁强计、电压标准、微波探测器等。近两年来，中国、美国、日本在提高超导材料的转变温度上都取得了很大的进展。1987年研制出YBaCuO体材料转变温度达到90~100K，零电阻温度达78K，也就是说过去必须在昂贵的液氦温度下才能获得超导性，而现在已能在廉价的液氮温度下获得。1988年又研制出CaSrBiCuO体和CaSrTiCuO体，使转变温度提高到114~115K。近两三年来，超导方面的工作正在突飞猛进。

【欧姆】

Ohm. Georg Simon(1787 ~ 1854 年)德国物理学家。1787 年生于欧蓝格 , 毕业于欧蓝格大学。1826 年发现导体的电阻、电流与电动势之间的关系定律现称欧姆定律。此定律先未受重视 , 直到 1933 年欧姆在纽仑堡任物理学教授时才渐为人所知。1849 年欧姆任慕尼黑大学物理学教授。后人为纪念其对电学贡献 , 以其名做为电阻的单位。

【电功】

电流通过电路时，电场力对电荷作的功叫做电功。在国际单位制中，电功的单位是焦耳。有时用千瓦·小时（即通常所说的“度”）。

计算电功常用： $W = IUt$ ， $W = I^2Rt$ ， $W = \frac{U^2t}{R}$ 三种形式。这三个式子，只有

当电路是纯电阻电路，并没有反电动势存在时才成立。如果电路负载中存在反电动势，要分清三种形式公式的适用范围以及它们的物理意义。当电路负载中有反电动势时，则 $W=IUt$ 为整个负载的总功，而 $W=I^2Rt$ 则仅表示负载所消耗热的那部分功。

【电功率】

每单位时间内电场力所作的功叫做电功率。在国际单位制中，电功率的单位是瓦特（常用的单位还有马力、千克力·米/秒）。电

功率常用的三个计算公式为 $P = IU$ ， $P = I^2R$ ， $P = \frac{U^2}{R}$ 。当电路是纯电阻，

没有反电动势存在时上列各式都成立。如果电路负载中存在反电动势，则要分清此三公式的适用范围及其物理意义。若电路负载中存在反电动势，则 $P=IU$ 为整个负载的总功率，而 $P=I^2R$ 则仅表示负载所消耗热的那部分功率。例如，当电路中接有直流电机时，如果加在电机两端电压为 U ，正常工作时通过电流为 I 。则当电枢线圈转动时作切割磁力线运动而产生感生

电动势，这一感生电动势和外加电压方向相反，因而有 $I_{\text{正}} = \frac{U - \varepsilon_{\text{反}}}{R}$ （ $I_{\text{正}}$ 为

正常工作电流）；所以 $I_{\text{正}}R = U - \varepsilon_{\text{反}}$ ， $U = \varepsilon_{\text{反}} + I_{\text{正}}R$ ，则 $I_{\text{正}}U = I_{\text{正}}\varepsilon_{\text{反}}$

+ I^2R 。式中的 $I_{\text{正}}U$ 为直流电机的总功率（输入功率）， $I_{\text{正}}\varepsilon_{\text{反}}$ 为克服反

电动势所消耗的功率，即转变为机械能的功率（输出功率）， I^2R 为电枢线圈中发热而损耗的功率。由此可见，只有在纯电阻电路中，三个公式可以通用，而在有反电动势的电路中（含源电路）三者不能混淆。

【焦耳定律】

导体在通过电流时会有热量发出。英国物理学家焦耳通过实验总结出如下的规律：电流通过导体时放出的热量 Q 与电流 I 的平方、导体的电阻 R 以及通电时间 t 成正比，即 $Q=KI^2Rt$ ，这就是焦耳定律。电流通过导体时按这一规律所放出的热量叫做焦耳热。若分别以焦耳、安培、欧姆及秒等为国际制单位测量热量、电流、电阻及时间，实验测得 $K=1$ 焦耳/欧姆·安培²·秒。故上式变为 $Q=I^2Rt$ 。焦耳定律除了用 $Q = KRI$

2t 表示外，还可用 $Q = K \frac{U^2}{R} \cdot t$ 表示。当 n 个导体串联时，由于通过所有导体的电流都相等，用前式来比较个别导体所放出的热量较为方便。当 n 个导体并联时，在各个导体上的电流各不相同，但它们两端的电压都相等，在这种情况下用后式较为方便。必须再次强调说明的是，当电路上有电流通过时，不但产生热的效应，而且还可以产生其他不同的效应。例如，在一般的电路中，除有纯电阻外还有电动机，电解槽等用电器，那么电能除部分转化为热（内能）外，还要转化为机械能、化学能等。因此，只有当电路为纯电阻，而且整个电路不能运动时，电流所做的功才全部变为热，否则 $W=UIt$ 总要大于电流在纯电阻上产生的热量 $Q=I^2Rt$ 。

【串联电路】

多个电阻按图 3 - 5 所示方式的联接叫做串联。串联电路的基本特征是只有一条支路，由此出发可以推出串联电路有如下五个特点：（1）流过每个电阻的电流相等。

因为直流电路中同一支路的各个截面有相同的电流强度。（2）总电压（串联电路两端的电压）等于分电压（每个电阻两端的电压）之和，即 $U=U_1+U_2+\dots+U_n$ 。这可由电压的定义直接得出。（3）总电阻等于分电阻之和。把欧姆定律分别用于每个电阻可得 $U_1=IR_1$ ， $U_2=IR_2$ ，……， $U_n=IR_n$ 代入 $U=U_1+U_2+\dots+U_n$ 并注意到每个电阻上的电流相等，得 $U=I(R_1+R_2+\dots+R_n)$ 。此式说明，若用一个阻值为 $R=R_1+R_2+\dots+R_n$ 的电阻元件代替原来 n 个电阻的串联电路，这个元件的电流将与原串联电路的电流相同。因此电阻 R 叫原串联电阻的等效电阻（或总电阻）。故总电阻等于分电阻之和。（4）各电阻分得的电压与其阻值成正比，因为 $U_i=IR_i$ 。（5）各电阻分得的功率与其阻值成正比，因为 $P_i=I^2R_i$ 。

【并联电路】

多个电阻按图 3 - 6 所示方式的联接叫并联。由 n 个电阻并联而成的那部分电路有两个节点，n 条支路。并联电路有如下五个主要特点：（1）每个电阻两端电压相等。这是很明显的，因为每个电阻两端都是 A 点和 B 点。（2）总电流等于各分电流之和，即 $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ 。因为从节点 A 流入的电流一定等于从节点 B 流出的电流。（3）总电阻的倒数等于分电阻的倒数之和。因 $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ， $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ， \dots ， $I_n = \frac{U}{R_n}$ ，又因总电流 $I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}$ ，所以 $I = U(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n})$ 。这就说明，若要用一个电阻元件等效代替原并联电路，该元件的阻值 R 必须满足 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ 。满足上式的 R 叫做并联电路的等效电阻（或总电阻），可见总电阻的倒数等于分电阻的倒数和。对两个电阻并联的简单情况，总电阻可以写成 $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 。对三个电阻并联时，总电阻 R 可写成 $R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$ 。多个电阻则可依此类推。图 3-7 所示是一个电阻 R 等效代替两个并联电阻的情况。（4）各电阻分得的电流与其阻值成反比。这一点可由 $I_i = \frac{U}{R_i}$ 看出。（5）各电阻分得的功率与其阻值成反比，因为 $P = \frac{U^2}{R}$ 。由以上的几个特点，不难得出结论：（1）并联电阻必小于每个参与并联的电阻的阻值。（2）当两个并联电阻的阻值 R_1 和 R_2 悬殊时（ $R_1 \ll R_2$ ），并联总电阻 R 近似等于小电阻的阻值（ $R \approx R_1$ ）。特别是，如果用一条导线（ $R_1 = 0$ ）与一个电阻 R_2 并联，总电阻就近似为零。这种情况称为“ R_2 被短路”或“ R_2 被短接”。（3）当两个电阻相等时，并联总电阻等于其中一个电阻的一半。例如，图 3 - 8 所示的混合电路的总电阻为多少。这是一个混联电路。计算总电阻时，关键是正确判断两个电阻是串联、并联，还是既非串联又非并联。每个电阻都有两个端点。如果两个电阻各有一端相联，而且联接点上不再引出导线接其他元件，这两个电阻就是串联。串联时两电阻通过的电流必相等。如果一个电阻的两端分别与另一电阻的两端相联，而且联接点上还引出导线联接其他元件，这两个电阻就是并联。并联时两电阻的电压必相等。例如图 3 - 8 中的 R_1 与 R_4 的联接方式既不保证它们的电流相等又不保证它们的电压相等，所以它们既非串联又非并联。而 R_3 和 R_5 的接法却满足并联定义，故可先把它们的并联总电阻求出（30 欧姆），以一个 30 欧姆的电阻代替 R_3 和 R_5 画成图 b，依次一步步简化，最后便可求得 $R_{AB} = 30$ 欧姆。

【电流表】

用以测量电流的仪表叫做电流表。常用的电流表是磁电式电流表（亦称磁电式表头）。它的主要组成部分是一块永久磁钢及一个可动线圈。当被测电流流过线圈时，它将受磁场的力矩而偏转。电流的大小由偏转的角度来反映，可由固定在线圈的指针在刻度盘上的位置读出。因为偏转角度与电流成正比，所以刻度盘上的刻度是均匀的。由于测量的需要不同，电流表分为安培表，毫安表和微安表。当被测电流超过电流表的量程时，指针的偏转将超出刻度的界限，不但不能读出电流的数值，还会把指针碰弯，电流太大时甚至会因过量的焦耳热而把线圈烧断。所以，每个表头所能测量的范围都有一个限度，这就是表头的量程（或称满刻度电流）。

【电流表的分流】

电流表本身线圈能够承受的电流不超过毫安级。为了扩大其量程，可以对表头进行改装，使之能够测量几安培，甚至更大的电流。设表头的量程为 100 微安，欲要测 500 微安的电流，可以在表头上并联一个电阻 r 如图 3 - 9 所示。

适当选择 r 值，可使被测电流的 $1/5$ （即 100 微安）流过表头，这样指针就恰好指在刻度的最右端。当被测电流为 500 微安以下的任一数值 I 时，由并联电路的计算可知，流过表头的电流 I_G 恒与 I 成正比，因此只需把刻度盘的读数乘以 5 便得被测电流的数值。因为电阻 r 起到分流作用，所以叫做分流电阻。表头与分流电阻的总体组成一个量程扩大了的新电流表（亦称毫安表，安培表等，视扩大后的量程而定）。一般地说，如果要把量程扩大 n 倍（在上例中 $n = \frac{500}{100} = 5$ ），分流电阻应取 $r = \frac{R_G}{n-1}$ 。此公式证明很简单。

只要利用 $I_G R_G = I_r r$ ，得 $r = \frac{R_G}{n-1}$ 。若将量程扩大 n 倍，则流过 R_G 的电流为 I_G ，

则流过 I_r 的电流应为 $(n-1) I_G$ ，所以 $r = \frac{R_G}{n-1}$ 。其中 R_G 是表头线圈的电阻

（也称表头的内阻）。

【电压表】

用以测量电压的仪表叫做电压表。电压表所能测量的最大电压叫做电压表的量程。表头本身可以看作一个电压表，因为表头两端加上被测电压时，线圈就有电流通过，指针就有偏角。由于线圈的电阻一定，其电流与电压成正比，因此指针的偏角可以反映被测电压的数值。只要把刻度盘接电压标定，就可以把表头当作电压表使用。然而这种电压表的量程很小。例如，一个电流量程为 100 微安、电阻为 2000 欧姆的表头，最多只能测量 $100 \text{ 微安} \times 2000 \text{ 欧姆} = 0.2 \text{ 伏特}$ 的电压。在实际测量中，被测电压往往大大超过表头允许的电压。要测量这种电压就需对表头进行改装。每个表头之所以都有一个电压量程，关键在于当电压超过这个量程时流过表头的电流就超过了它的电流量程。如果用适当的电阻与表头串联来减小流过表头的电流，那么串联而成的电压表就允许承受较大的电压，或者说这个表头与电阻 R 串联构成一个量程较大的电压表。图 3 - 10 所示是用这种改装后的电压表测量电路中 A、B 两点电压的电路图。对同一个表头来说，要改装成量程大的电压表，所需串联的电阻 R 也越大。设表头的电流量程为 I_{Gm} ，内阻为 R_G ，欲改装成量程为 U_m 的电压表。因为串联电路

的总电压 $U_m = I_{Gm} R + I_{Gm} R_G$ ，所以所需的串联电阻 $R = \frac{U_m}{I_{Gm}} - R_G$ 。电压表

有伏特表，毫伏表之分。

【线路上的电能损失】

在日常生活中常会发现，家庭中用电，在用电高峰时，显得灯不很亮，甚至有时洗衣机等都不能正常运转。这就是因为电路里并联使用的用电器越多，在干路里的总电流越大，而干路输电的导线总要有一定大小的电阻，电流越大，在导线的电阻上降下越多，因而加在用

电器上的电压就越小。故而产生电灯不很亮。机器不能正常运转的情况。

例如，如图 3-11 所示的为 100 盏“220 伏，40 瓦”的电灯并联在 220 伏的线路电压上。其线路电阻为 $2r=2$ 欧姆（即图中的 $r=1$ 欧姆）。（1）在只打开其中 10 盏灯时每盏灯的电压和功率；（2）100 盏灯全部打开时每

盏灯的电压和功率。在只打开 10 盏灯时，每盏灯的电阻 $R = \frac{U_2^2}{P} = \frac{220^2}{40} =$

1210（欧姆），10 盏灯并联电阻 $R_{并} = \frac{1210}{10} = 121$ （欧姆）。电路中的总电

阻 $R_{总} = R_{并} + 2r = 123$ （欧姆），电路中的总电流强度 $I = \frac{U}{R_{总}} = \frac{220}{123} = 1.8$

（安培），两根输电线的电压降为 $2U_2 = 1.8 \times 2 = 3.6$ （伏特）。这时加在

电灯上的电压为 $(220 - 3.6)$ 伏 = 216 伏。若 100 盏电灯全部打开则 $R_{并} = \frac{R}{100}$

= 12 欧姆， $R_{总} = 14$ 欧姆，电路中电流强度 $I = \frac{U}{R_{总}} = \frac{220}{14} = 16$ 安培，两根输

电线上的电压降为 $2U_r = 2 \times 16 \times 1 = 32$ 伏，这时电灯上的电压只有 $(220 - 32)$

伏 = 188 伏。每盏灯的功率 $P = \frac{188^2}{1210}$ 瓦 = 29 瓦。而只开 10 盏灯时每盏灯的功率

$P = \frac{216^2}{1210}$ 瓦 = 39 瓦。从这个例子中可知，用电量也是要有限度的，不能像

有人认为是的那样，只要有电路可随使用。从此例中也应更明确节约用电的道理和重要性。

【闭合电路的欧姆定律】

通过闭合电路的电流 I 跟电源的电动势 \mathcal{E} 成正比，跟电路电阻和电源的内阻和 $R+r$ （即闭合电路的总电阻）成反

比，即 $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ 。当负载和电源组成一闭合回路时，就有电流通过。通常

称电源以外的电路叫外电路，电源以内的电路叫内电路。当电流流过电阻时，电能将转化为热能，而当电流流过电源时，电源中的非静电力作用将其其他形式能转化为电能。从能量守恒定律可以写出 $I dt = I^2 R dt + I^2 r dt$ ，

因而有 $\mathcal{E} = IR + Ir = I(R+r)$ ， $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ 。路端电压、内电压、电动势三者

既有区别，又有联系。当外电阻 $R \rightarrow \infty$ 时，即外电路开路，电流为零，内电压为零，则路端电压等于电动势。当 $R \rightarrow 0$ 时，即电路短路，电流达到最大值，电流的大小 $I = \frac{\mathcal{E}}{r}$ ，外电压为零，则内电压等于电动势。从微观上

看。金属中存在着大量的自由电子，自由电子和振动着的晶格原子发生碰撞，碰撞非常频繁，一般情况下，每秒可达 10^{14} 次。在无外电场作用下，自由电子在任一方向上的运动几率均相等，因此这些自由电子的运动可看作热运动，其速度矢量以及其平均值都等于零。如果加上外电场，那么在相邻两次碰撞之间的一般时间内，电场对自由电子起加速作用，这时形成的速度除热运动外还有沿电场反方向的漂移运动，漂移的速度为 $v_d = \frac{Ee}{m} t$ ，

t 为电场对电子加速的时间。所以金属导体中存在电场时，自由电子的平

均速度就等于由电场所产生的漂移速度的平均值，即 $\bar{v} = \frac{1}{2}(0 + v_d) = \frac{1}{2} \frac{Ee}{m} J$ ，式中 J 为各个自由电子最后一次碰撞到观察的这一时刻间的平均时间，因为

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{n \cdot e \Delta s \cdot \Delta l}{\Delta t} = n \cdot e \Delta s \frac{\Delta l}{\Delta t} = n \cdot e \cdot \Delta s \cdot \bar{v}$$
，式中 n 为每单位体积内

具有的自由电子数，所以 $\frac{\Delta I}{\Delta S} = n \cdot e \cdot \bar{v}$ 。而 $\frac{\Delta I}{\Delta S} = j$ ， j 为电流密度，故 $j =$

$$n e \bar{v} = n \cdot e \left(\frac{Ee}{2m} \right) t = \left(\frac{n t e^2}{2m} \right) E = \quad E, \quad = \frac{n J e^2}{2m}, \quad j = \quad E \text{ 为欧姆定律的}$$

微分形式。其中 $J = \frac{\bar{\lambda}}{v}$ ， $\bar{\lambda}$ 为两次碰撞之间的平均自由程，所以 $= \frac{n e^2 \bar{\lambda}}{2 m v}$ 。

由于比值 $\frac{n e^2 \bar{\lambda}}{2 m v}$ 对金属中的同一点是一个正常数，故 $j = \frac{n e^2 \bar{\lambda}}{2 m v} E$ 说明 j 与 E 同

方向，大小成正比。对不同金属，比值 $n e^2 \bar{\lambda} / 2 m v$ 一般不同，这表明不同金属在同一场强作用下出现不同的电流密度，即不同金属的导电性能不同。

实际上这个比值就是金属的导电率。对闭合电路来讲。我们可以写出

$$\vec{j} = (\vec{E} + \vec{E}_{\text{非}}), \text{ 又可写成 } \frac{\vec{j}}{\sigma} = \vec{E} + \vec{E}_{\text{非}}, \text{ 以 } d\vec{l} \text{ 点乘上式并从电源负极 } B \text{ 经}$$

电源内部到正极 A 积分： $\int_B^A \frac{\vec{j}}{\sigma} \cdot d\vec{l} = \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_B^A \vec{e}_{\text{非}} \cdot d\vec{l}$ ， $\int_B^A \frac{\vec{j}}{\sigma} d\vec{l} = I \int_B^A \frac{d\vec{l}}{\sigma S}$

$= I \int_B^A p \frac{d\vec{l}}{S}$ 。由此可以看到： $\int_B^A \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l} = U_{AB} + I r$ ，因为 $\vec{j} \cdot d\vec{l} = \sigma \vec{E} \cdot d\vec{l}$ ，所

以 $\frac{\vec{j} \cdot d\vec{l}}{\sigma} = \frac{I d\vec{l}}{\sigma} = \vec{E} \cdot d\vec{l}$ 而 $\int_B^A \frac{\vec{j} d\vec{l}}{\sigma} = \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{l}$ ，又因 $\frac{j d\vec{l}}{\sigma} = \frac{I d\vec{l}}{\sigma S}$ 。由此可见。欧姆定

律的微分形式可以变换为一般形式。即 $= U + I r$ 。

【路端电压】

简称“端电压”。电路接通时，电源两极间的电压。它等于电源的电动势减去内电路的电压，即 $U = \mathcal{E} - Ir$ 。一般来说，电源的电动势和内阻都是定值。所以外电路的端电压是随着电流的大小而变的。电流大 U 就减小，由此可见端电压是随着负载的变化而变化的。当没有电流，即外电路切断时， $Ir=0$ ，这时端电压就等于电源的电动势。当外电路负载电阻 $R=0$ 时，路端电压为零，这时电流强度为 \mathcal{E}/r 。这种现象叫做“短路”。在使用电器时要严防这种现象发生。

【基尔霍夫定律】

确定电路中有关量的两个定律。第一定律：在任一时刻流入电路中某一分节点的电流强度的总和，等于从该点流出的电流强度的总和。第二定律：在电路中任取一闭合回路，并规定正的绕行方向，其中电动势的代数和，等于各部分电阻（在交流电路中为阻抗）与电流强度乘积的代数和。这两个定律是德国物理学家基尔霍夫首先提出的。两个定律的数学式分别为 $\sum I=0$ ， $\sum E - \sum IR=0$ 。在应用节点电流方程时，通常规定流进节点的电流为正，流出节点的电流为负。节点电流方程不仅对节点适用，还可把它推广到任意假定的封闭面。可以把几个元件放入一个假想的封闭面中，也可把一部分电路划入。这时流进封闭面的电流和流出的电流相等。在应用回路电压方程时，必须先选定沿回路绕行的方向，以便定出电阻上电压降或电源的电动势的正负。当绕行方向和流过电阻的电流方向一致时，电流应取正值，即减去正的 IR ，反之，取负值；当绕行方向从电源负极到正极时，电动势应取正值，反之取负值。

【电池】

是将化学能直接转变为电能的装置。主要部分包括正负两个电极和电解质。使用时，用导线把两个电极和外电路联接，即有电流流过，称为放电，从而获得电能。放电到一定程度后，经过直流电源给其充电，能复原续用的称蓄电池，如汽车中常用的铅蓄电池；不能复原蓄用的称“原电池”，如手电筒中常用的锌干电池。除了化学电池外，还有从其他形式的能转为电能的电池，如温差电池、太阳能电池（光电池）、原子电池等。

【电池组】

把两个或多个电池连接起来作为电源使用的一种组合。如果将电池串联使用，则串联电池组的电动势等于各个电池电动势之和，串联电池组的内电阻等于各个电池内电阻之和。对 n 个电动势一样的电池串联而成的电池组，有 $\mathcal{E}_{\text{串}}=n\mathcal{E}$ ， $r_{\text{串}}=nr$ 。对相同电动势的 n 个电池并联

则有 $\mathcal{E}_{\text{并}}=\mathcal{E}$ ， $r_{\text{并}}=\frac{r}{n}$ 。人们利用串联电池组，一般是利用它能供给较高的电压。而并联电池组不能给出高电压，但可以供给较强的电流。有时为了两者兼而有之，把电池按不同的需要组成一定形式的串并联混用的电池组。

【电流表的测量误差】

如果我们用电流表测量某电路中的电流。必须把电流表串在这个电路中，因为电流表有内阻（等于表头内阻与分流电阻 r 的并联总电阻），它的串入必然使电路的电流变小，而电流表的读数只能反映这个变小后的电流，这就带来了误差。显然，电流表内阻 R_i 越小误差越小。 R_i 等于表头内阻 R_g 与分流电阻 r 的并联值，因 r 与 R_g 成正比，可见 R_g 越小 R_i 就越小。所以在量程相同的表头中，由内阻较小的表头改装成的电流表有较小的内阻，因而由于内阻带来的测量误差也就越小。

【电压表测量的误差】

在用电压表测量电路两端的电压时，必须将电压表与被测电压段并联。并联的结果将影响被测段的电压和其它段的电压分配，因此测出的电压只能是接入电压表后的电压值，显然，电压表内阻越大误差越小。电压表的内阻等于表头内阻 R_g 与串联电阻 R 之和。由

公式 $R_g + R = \frac{U_m}{I_{gm}}$ 得知，当电压表量程 U_m 一定时，其内阻 $(R_g + R)$ 与所用表头的量程 I_{gm} 成正比。因此在实用中，为了减小误差，应尽可能采用 I_{gm} 较小的表头。

【欧姆表的测量原理】

欧姆表是测量电阻的仪表。图 3—12 所示为欧姆表的测量原理图。虚线方框内是欧姆表的内部结构（简化），它包含表头 G、直流电源（常用于电池）及电阻 R。当被测电阻 R_x 接入电

路后，通过表头的电流值为 $I = \frac{U}{R + R_G + R_x}$ 。其中 U 为干电池两端的电压

（测量时基本上不变）。由上式可知，对给定的欧姆表，I 与 R_x 是一一对应的关系，所以由表头指针的位置可以知道 R_x 的大小。为了读数方便，事先在刻度盘上直接标出欧姆值。

【欧姆表的刻度特点】

由 $I = \frac{U}{R + R_G + R_x}$ 可以看出，与电流表和电压表不同，欧姆表的刻

度有三方面的特点：（1）电流表及电压表的刻度越向右数值越大，欧姆表则相反，这是由于 R_x 越小 I 越大造成的。每个欧姆表刻度盘的最右端都标以“0”的数值，因为总可以选择 R 的值以保证 $R_x=0$ 时流过表头的电流恰好等于它的满刻度电流 I_{Gm} 。（2）磁电式电流表及电压表是均匀的，欧姆表的刻度都很不均匀，越向左越密。这是

因为刻度的疏密程度取决于电流对电阻的变化率，即取决于 $\frac{dI}{dR_x} =$

$-\frac{U}{(R + R_G + R_x)^2}$ ，该式表明 R_x 越大 $\frac{dI}{dR_x}$ 越小，故向左边刻度越密。

（3）电流表及电压表的刻度都是从 0 到某一确定的值，因此每个表都有一个确定的量程。但欧姆表的刻度却总是从 0 到 ∞ 欧姆。

【欧姆表中值电阻】

当 $R_x=0$ 时表头电流等于它的满刻度电流 I_{Gm} ,

所以当 $R_x = 0$ 及 $I = I_{Gm}$ 时, $I_{Gm} = \frac{U}{R + R_G}$, 故 $\frac{I}{I_{Gm}} = \frac{R + R_G}{(R + R_G) + R_x}$ 。

$(R + R_G)$ 是一个定值, 所以每个 R_x 值都对应一个确定的 I/I_{Gm} 值。 I/I_{Gm} 这个数值是很有实际意义的, 正是它唯一地决定着表针的位置。例如, 当 $I/I_{Gm} = 1$ 时, $I = I_{Gm}$, 表针指向最右端; 当 $I/I_{Gm} = 1/2$ 时 $I = \frac{1}{2} I_{Gm}$, 表针指在刻度盘的中间, 等等。即每个 R_x 值决定一个 I/I_{Gm} 值, 而每个 I/I_{Gm} 值又决定表针的一个位置。如果两个欧姆表有不同的 $(R + R_G)$ 值, 同一 R_x 就对应不同的 I/I_{Gm} , 即对应不同的表针位置, 它们的刻度情况就不一样。反之, 只要两个欧姆表的 $(R + R_G)$ 值相等, 它们的刻度情况就完全相同 (可以共用一个刻度盘。欧姆表的 $(R + R_G)$ 叫做它的“中值电阻”, 因为当 $R_x=R + R_G$ 时, 则 $I/I_{Gm}=1/2$, 表针恰指正中。也就是说: 中值电阻唯一地决定了欧姆表的刻度。

【欧姆表的测量范围】

虽然任何欧姆表的刻度都从 0 到 ∞ 欧姆，但因为越向左边刻度越密，所以当被测电阻 R_x 很大时就难以得到准确读数。这时就应换用一个中值电阻较大的欧姆表。若此表的中值电阻是原表的中值电阻的 100 倍，则该表刻度盘的中值位置的电阻值即为原表的 100 倍。人们通常用的万用表的电阻档都是有几个中值电阻，以便取不同的档次。例如，最常用的欧姆表有 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1000$ 等档。

【欧姆表的调零】

干电池在使用一段时间后两端电压有所下降,于是当 $R_x=0$ 时表针不能指零。为了解决这一问题是用一个可变电阻 R_0 与

表头串联,由于 R_0 的串入则 $I = \frac{U}{(R + R_G + R_0) + R_x}$, 中值电阻相应地变为

$(R + R_G + R_0)$ 。当电池电压改变后,调整 R_0 可以保证当 $R_x=0$ 时表针指零。但 R_0 的改变会导致中值电阻的改变,因此使实际刻度情况改变。然而刻度盘的刻度却无法改变,这就带来误差(除 $R_x=0$ 以外,测量任何 R_x 都有误差)。

【惠斯通电桥】

惠斯通电桥是一种可以精确测量电阻的仪器。图 3—13 所示是一个通用的惠斯通电桥。电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 叫做电桥的四个臂， G 为检流计，用以检查它所在的支路有无电流。当 G 无电流通过时，称电桥达到平衡。平衡时，四个臂的阻值满足一个简单的关系，利用这一关系就可测量电阻。平衡时，检流计所在支路电流为零，则有，（1）流过 R_1 和 R_3 的电流相同（记作 I_1 ），流过 R_2 和 R_4 的电流相同（记作 I_2 ）。（2） B, D 两点电位相等，即 $U_B = U_D$ 。因而有 $I_1 R_1 = I_2 R_2$ ； $I_1 R_3 = I_2 R_4$ 故

$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 。此式为电桥平衡的必要条件。若四个臂中的三个阻值已知，便可

求得第四个电阻。测量时，选择适当的电阻作为 R_1 和 R_2 ，用一个可变电阻

作为 R_3 ，令被测电阻充当 R_4 ，调节 R_3 使电桥平衡，便可由 $R_4 = \frac{R_2}{R_1} R_3$

求得被测电阻 R_4 。由于 R_1, R_2, R_3 可以选用很精确的电阻而且可利用高灵敏度的检流计来测零，故用电桥测电阻比用欧姆表精确得多。注意，

$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 是电桥平衡的必要条件，实际上它也是充分条件。电桥不平衡时，

G 的电流 I_G 与 R_1, R_2, R_3, R_4 有关。利用这一关系也可根据 I_G 及三个臂的电阻值求得第四个臂的阻值，因此不平衡电桥原则上也可测量电阻。在不平衡电桥中， G 应从“检流计”改称为“电流计”，其作用而不是检查有无电流而是测量电流的大小。可见，不平衡电桥和平衡电桥的测量原理有原则上的区别。利用电桥还可测量一些非电学量。例如，为了测量温度变化，只需用一种“热敏元件”把它转化为电阻的变化，然后用电桥测量。

不平衡电桥往往用于测量非电学量，此外还可用于自动控制和远距离联动机构中。下面用基尔霍夫定律，求惠斯通电桥中电流计的电流 I_G 与电源电动势及各臂电阻的关系（忽略电源的内阻）。先规定各支路电流 I_1, I_2, I_3, I_4, I_G 及 I 的正方向如图 3 - 14 所示，因为节点 $n=4$ ，故可列出三个节点方程，即节点 A： $I = I_1 + I_2$ ；节点 B： $I_1 = I_3 + I_G$ ；节点 C： $I_3 + I_4 = I$ 。又因支路数 $P=6$ ，故独立回路数 $m=P - n + 1=3$ 。选图中、
、
三个独立回路，

约定其绕行方向如图 3 - 14 中箭头所示，列入回路方程。回路：
 $I_1 R_1 + I_G R_G - I_2 R_2 = 0$ ；回路：
 $I_3 R_3 - I_4 R_4 - I_G R_G = 0$ ；回路：
 $I_2 R_2 + I_4 R_4 =$ 。这样得到的 6 个方程联立求解得到：

$$I_G = \frac{(R_2 R_3 - R_1 R_4) \varepsilon}{R_1 R_3 (R_2 + R_4) + R_2 R_4 (R_1 + R_3) + R_G (R_1 + R_3) (R_2 + R_4)}$$

由此式可以看出，当 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ 时， $I_G = 0$ ，当 $I_G = 0$ 时必然有 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ 。可见 $R_1/R_2 = R_3/R_4$ 是电桥平衡的充分必要条件。当 $R_2 R_3 - R_1 R_4 > 0$ 时， $I_G > 0$ ，电流 I_G 的实际方向与图 3 - 14 中所设的正方向一致（向下）；当 $R_2 R_3 - R_1 R_4 < 0$ 时， $I_G < 0$ ， I_G 的实际方向与所设的正方向相反（向上）。

【电源】

使其他形式的能量转变为电能的装置。如发电机、电池等。发电机是将机械能转变为电能；干电池、蓄电池是将化学能转变为电能；光电池是将光能转变为电能；原子电池是将原子核放射能转变为电能；在电子设备中，有时也把变换电能形式的装置，如整流器等，作为电源看待。

【电压】

静电场或电路中两点间的电势差（电位差）。实用单位为伏特简称为伏或写为“V”。在交流电路中，电压有瞬时值、平均值和有效值之分。交流电压的有效值有时就简称电压。例如电力系统的输电电压有 220 000 伏特和 330 000 伏特等，工业用电电压为 380 伏特，照明用电的电压为 220 伏特都是指电压的有效值。

【绝缘体】

在外电场作用下不容易传导电流的物体叫做“绝缘体”也称为非导体（电介质）。如松香、陶瓷、玻璃、电木、橡皮、石蜡、塑料等都是绝缘体。绝缘体之所以导电能力弱是由于它的分子中正负电荷束缚得很紧（形成一对对的束缚电荷），在一般条件下不能相互分离，因而在其内部能作自由运动的电荷极少，电导率约在 10^{-8}S/m 以下，S/m 为西门子/米。

【太阳能电池】

把太阳能直接转变为电能的装置。一般是在电子型硅单晶的小片上用扩散法或离子注入法渗入一薄层的硼或磷，以得到 p-n 结，再加上电极而成。当光照射到薄层表面时，两极间就产生电动势，一些小型电器如计算器等用灯光照射即可工作，但主要还是用太阳光做为能源，因此也称为“日光电池”或“阳光电池”。可用作人造卫星上仪表的电源。除硅外，化合物半导体砷化镓等也是制作太阳能电池的好材料。

【原子电池】

将原子核放射能直接转变为电能的装置。常用的一种其结构与太阳能电池相类似，利用辐射到半导体上的带电粒子能量，使内部部分束缚电子受激发而导电，从而送出电能。有的原子电池则利用带电粒子在两电极间的定向运动，来产生通过外电路的电流。

【电子论】

根据物质是电荷系所构成，亦即物质电结构的假设以解释各种物理现象的理论。经典电子论认为：当金属内部没有电场时，自由电子的无规则运动类似于理想气体分子的无规则热运动，因此金属中自由电子的整体常又称为电子气。电子在热运动过程中经常与金属骨架碰撞并改变运动方向，其轨迹是一条不规则的曲折的折线，洛伦兹用经典统计力学算出电子气热运动的平均速度 \bar{v} 为 10^5 （米/秒）。这虽然是一个很大的速率，但由于热运动的无规则性，从宏观上看，单位时间内通过金属中任一面元的电量为零，因此宏观电流处处为零。当金属内部存在电场时，每个自由电子都将在原有热运动的基础上附加一个逆场强方向的定向运动，正是这个定向运动而构成电流。这时每个电子的速度可以分为两个部分——热运动速度和定向运动速度。虽然定向运动的平均速率 \bar{u} 比热运动的平均速率 \bar{v} 小得多，然而在考虑大量电子运动的宏观效应时，所有电子热运动的平均效果为零，而所有电子的定向运动由于方向相同而造成宏观电流。可见正是电子的定向运动平均速度 \bar{u} 决定着电流密度的数值和方向。在词目“闭合电路欧姆定律”中的微观解释就是用电子论的观点解释和推导的。经典电子论是1885年由洛伦兹首先提出的，所以也称为“洛伦兹电子论”。它也把电磁波经过物质时所呈现的各种宏观现象，归结为电磁波与物质中在准弹性力作用下的电子相互作用的结果。这一理论能够解释物质中一系列电磁现象，以及物质在电磁场中运动的一些效应，获得了相当的成功。经典电子论后来为相对论和量子论所扩充，成为现代物理学的基础。

【自由电子】

对于金属原子来说，它的最外层的电子受到原子核的束缚比较弱，当这些原子组成金属导体时，一个原子的最外层电子由于受其他原子的影响，不再束缚在某个原子核周围运动，而是在整块金属中“自由”地运动着。这些电子就是金属导体中的自由电子。以常见的金属铜为例，假定每个铜原子在组成导体时，最外层有一个电子成为自由电子，则在一立方厘米的金属铜里，大约就有 10^{25} 个自由电子。所以，金属中的自由电子的数目是非常可观的。金属导线中的电流正是导线中的自由电子在外加电压的作用下作定向运动的结果。由于历史上的原因通常将正电荷运动的方向规定为电流的方向。在金属导线中，既然电流是带负电的自由电子定向运动的结果，因此其电流的方向正好与自由电子的漂移运动方向相反。

【量子理论】

探索微观粒子运动所遵从的量子规律的初步理论，量子力学的先驱，是从普朗克在物理学中引入量子概念开始，特别是在玻尔提出氢原子理论以后发展起来的。量子论仍然以经典物理规律为基础，但加上了一些反映微观运动具有量子特性的附加条件（量子条件）。它指出，在物体大、运动范围广（相当于量子数很大）的极限情形下，微观运动规律应该趋近于宏观运动规律；并且两种运动规律应该具有相互对应关系（对应原理）。量子论能够解释一些简单的原子、分子所发射的光谱和黑体辐射等现象，但由于它的半经典性质，其结果在数量方面往往不能与实验符合。量子论本身还包含着很大矛盾，在解释许多实验事实时都遇到严重困难。它的进一步发展导致量子力学的建立（1924~1926年），现在这一理论虽然被量子力学所代替，故有时称之为旧量子论。但由于它直观性强，它的部分方法在解释某些现象（如复杂的光谱）时，还常被采用。人们有时也把研究微观运动的整个学科系统称为量子论或量子物理学。

【电解质】

在水溶液中或在熔融状态下能导电的化合物，如酸类、碱类和盐类等。因为电解质能离解成离子，故能导电。一般依据电离度的大小，可分为强电解质和弱电解质。

【液体导电】

由电解质在溶液中离解出的正负离子导电是液体导电的特点（不包括液态金属）。例如，硫酸铜分子在通常情况下是电中性的，但它在溶液里受水分子的作用就会离解成带正电的铜离子（ Cu^{2+} ）和带负电的硫酸根离子（ SO_4^{2-} ）。它们是硫酸铜溶液能导电的内在原因。当极板没有和外接电源相联时，铜离子和硫酸根离子与水分子一起在作杂乱的热运动，因而其总电流等于零。但当与一直流电源接通后，正负极板间的外加电压就使铜离子 Cu^{2+} 和硫酸根离子 SO_4^{2-} 在热运动上迭加了一定方向的漂移运动。铜离子向负极运动；硫酸根离子向正极运动。这样溶液内发生了电荷沿一定方向的迁移，即形成了电流。由于在溶液中有两种电荷沿相反方向运动，所以在液体内的电流应是正负离子电流的绝对值总和。由此往往错误地认为，在到达正负极板上离子数都等于 N 时，液体中任一截面所通过的正负离子总数为 $2N$ ，因而液体通过电流，将是外电路通过电流的两倍。其实不然，假设在 t 时间内液体中正负离子迁移总数为 $2N$ ，由于均匀分布，则取中央面为界，两边各具有相等的正负离子数 N ，即两边各具有 $\frac{N}{2}$ 个正离子和 $\frac{N}{2}$ 个负离子。当两极板接电源时，两边的正负离子（各为 $\frac{N}{2}$ 个）都向负正极板作定向迁移，通过中央截面正负离子的总数为 N 个。另外，两边还各自有 $\frac{N}{2}$ 个正负离子无须通过中央截面而移向极板。到达一块极板的正或负的离子总数也是 N 个。通过电解液任一截面正、负离子的总数和到达一块极板上正或负的离子总数是相同的。故电解液内所通过的电流强度和外电路通过的电流强度是相等的。

【电解】

在电解质溶液或熔液电解质中通入电流，则在两个电极上（或电极旁）同时产生化学反应的过程叫作“电解”。通电时，溶液或熔体中的正离子向阴极迁移，负离子向阳极迁移；同时，在阴极上起还原反应，产生新物质；在阳极上起氧化反应，产生新物质。决定产生何种新物质的因素甚多，主要为所用电极及电解质的性质、溶液的浓度等等。例如，用炭极电解浓的食盐溶液，阴极上放出氢气，极旁产生苛性钠，阳极上放出氯气。如用炭极电解淡的食盐溶液，阴极上仍放出氢气，极旁产生苛性钠，阳极上则放出氧气而在极旁产生盐酸。又如用白金极电解硫酸铜溶液，阴极上析出铜，阳极上放出氧气，极旁产生硫酸。

【法拉第电解定律】

这是英国物理学家法拉第在 1833 年所发现的两条电解定律：（1）电解时在电极上析出或溶解的物质的质量和电流强度，通电时间成正比，或在电极上析出的物质的质量和通过电解液的总电荷量成正比。这就是法拉第电解第一定律。它说明在电极上分离出来的物质质量 m 和电流强度 I 以及通电时间 t 的乘积成正比。即 $m \propto I t$

$$m = k I t = K Q$$

式中 Q 为析出质量为 m 的物质所需要的电量。 K 为电化当量，电化当量的数值随着被析出的物质种类而不同。某种物质的电化当量在数值上等于通过 1 库仑电量时析出的该种物质的质量。其单位为千克/库。（2）物质的电化当量 K 和它的化学当量成正比，就叫做“法拉第电解第二定律”。某物质的化学当量是该物质的摩尔质量 M （克原子量）和它的化合价 n 的比值，即 $K \propto \frac{M}{n}$ ， $K = \frac{1}{F} \frac{M}{n}$ ， F 为“法拉第常数”，它的数值等于在电极上析出 1 克当量物质时，通过电解质电量的库仑数。 $F = 96500$ 库/摩尔对于任何物质都相同。将两个定律联立可得：

$$m = \frac{M}{F n} Q$$

【电镀】

利用电解作用，在物件之表面镀以一层金属以防止生锈，并使部件美观的加工工艺。电镀时以被镀之物件作为阴极，并以欲镀金属的盐或酸溶液为电解质，通以电流则溶液分解，金属附着于物体表面。阳极为欲镀金属逐渐被溶解，以保持溶液的浓度一定。用这种方法可以将各种金属镀在物体表面，在金、银、镍、铬等金属，不易生锈又比较光亮，所以很多机件和生活日用品往往都是电镀件。电镀时析出的金属皆为结晶体，晶体越细越均匀越好。在通常电镀工艺中的注意之点有：（1）电镀时电镀液里的金属离子浓度越低越好。而液体中的金属盐浓度则大些为宜；（2）要有适当的添加剂，添加少量的明胶等胶状物质。此种物质与金属共同被阴极吸收，可使被电镀的金属结晶变小；（3）电流密度不宜过大，因为电流密度小时结晶核的生成较迟，故结晶的成长甚佳，电镀比较均匀。电流密度过大结晶核多，各部分离子浓度不均匀，以致发生树脂状海绵状等；（4）要搅拌使电镀液均匀，以得到平滑的电镀；（5）温度要适当高一点，因为温度高可以使电镀液浓度增高，因而减少含氢现象；（6）酸性不宜过强，否则生氢而妨碍电镀；（7）电镀前应把金属件的锉痕、生锈或油污等弄平滑和清洗干净，再行电镀。

【气体导电】

在通常情况下气体分子是电中性的，但在地面放射性元素的辐照以及紫外线和宇宙射线等的作用下，或多或少总有一些气体分子或原子被电离，即原来是电中性的气体分子或原子分离为一个电子和一个带正电的离子。此外，在有些灯管内，通电的灯丝也会发射电子。当在灯管两端的电极间加上一定的电压时，外加电压迫使这些电子和正离子各向阳极和阴极运动，不过此时灯管内的正离子和电子为数甚少，故所形成的电流十分微弱，在通常情况下可以忽略不计。但是，若灯管中的气体相当稀薄但不是真空，灯管两端电极上加的电压足够高，则电子在向阳极运动的过程中可以得到很大的动能，它们和中性气体相碰撞时，可以使中性分子电离，即所谓碰撞电离。同时，在正离子向阴极运动时，由于以很大的速度撞到阴极上，还可能从阴极表面上打出电子来，这种现象称为二次电子发射。碰撞电离和二次电子发射使气体中在很短的时间内出现了大量的电子和正离子。在外电压作用下这些电子和正离子向相反的方向运动。气体中就有了电流通过。常见的气体放电灯，如日光灯、霓虹灯、高压汞灯、氙灯等的灯管中都充有一定量的气体，当两端加上一定电压时，在气体中就有电流流过。在常压下的气体是不易导电的，像空气就是很好的绝缘物质，一般情况下是不导电的。使这些气体由不导电变为导电的过程称为气体击穿。雷雨时天空中的闪电就是空气被击穿形成的。通常情况气体导电是在稀薄气体中发生。常压气体不易导电，在比较高的真空中因为电子和离子不易碰到中性粒子，故也不能发生气体电流。上述的气体电离导电均属自激放电。但只靠这种碰撞电离不能长久维持自激放电，因为碰撞产生的所有电子都要向阳极运动，到了阳极便停止了。要想长久地维持放电，必须使阴极不断地提供电子。一般阴极均装有能发射电子的灯丝。

【光电子】

光子与原子中的电子碰撞，可使电子脱离原子，被撞而离开原子的电子称为“光电子”。20世纪初，雷纳对这种效应作了一番有系统的实验。其结果是：（1）光电子的能量和入射线的能量无关。（2）增加辐射的强度可使光电子数目增加。（3）光电子的能量与入射光线的颜色有关，波长较短的辐射，所生光电子的能量较高。

【热电子发射】

热阴极是将金属丝加热到高温（一般在 2000 ~ 3000K），使金属内部的自由电子获得能量，克服金属对电子的束缚力而飞出真空空间。一个处于绝对零度的电子，从金属内部飞向真空无场空间所必须供给的最低能量，叫做功函数。不同元素具有不同的功函数。功函数用符号表示，可写成：

$$=E_a - E_i$$

E_i 代表金属内处于绝对零度时电子可能具有的最大能量值， E_a 是金属边界上的势垒高度或叫做总功函数。见图 3 - 15 所示。热阴极发射电子密度可表示为：

$$j = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \text{ (安培 / 厘米}^2\text{)}$$

图 3—15

其中 A 是常数=60（安培/厘米²度²）；T 为金属的绝对温度（K）；K 为玻耳兹曼常数 = 8.62×10^{-5} （电子伏/度）； ϕ 为金属的功函数（电子伏）。为了获得高密度的电子发射电流，阴极材料要选择熔点较高和功函数较低的材料。经常选用的有钨、钽等材料。

【场致电子发射】

金属在强电场作用下，有电子发射现象，这种现象称为场致电子发射，或称为金属冷电子发射。势致电子发射与金属热电子发射不同。后者是由于电子跨越势垒而造成，金属冷电子发射则由于电子穿透势垒而引起。因为在阴极表面具有很强的电场，于是在真空中电子的势能曲线随着远离阴极表面而降低，如图 3 - 16 所示，图中曲线 a 代表电场为零的情况；b 曲线代表有弱外电场的情况；c 曲线代表有强外电场的情况。外电场越强，则势垒的宽度越窄。根据量子力学的观点，电子不仅具有粒子性，而且还具有波动性。并非只具有足够动能（在数值上等于功函数 ϕ ）的电子才能越过势垒高度飞出金属表面，而是具有任意动能的电子都有一定的几率穿透金属边界的势垒，进入真空空间。势垒宽度越窄，穿透的几率越大。这种现象叫做“隧道效应”。在给定条件下（外电场 E，功函数 ϕ ，势垒高度等）解薛定谔方程，可得到场致发射的电流密度为

$$j = C_1 E^2 e^{-\frac{C_2}{E}}$$

这里 $C_1 = \frac{e}{2h} \cdot \frac{E_i^{1/2}}{E_a \phi^{1/2}}$ ； $C_2 = \frac{8}{3h} \sqrt{2m_e \phi^3}$ 。其中 h 是普朗克常数。从上式

可以看出，外电场 E 越强，功函数 ϕ 越小时，这种冷发射电流越大。场致电子发射与温度无关。

【正离子轰击发射电子】

当冷阴极放电后，就有离子在电场的加速下打到阴极，这些离子轰击阴极将会打出电子，这叫做次级电子发射。次级电子发射，是冷阴极发射电子的主要过程。如果不考虑离子复合，由冷阴极次级发射产生自持放电的稳定条件是

$$N=1$$

这里 N 是次级发射系数，即一个离子打到阴极可能打出的电子数； N 是从阴极打出来的一个电子，在放电区域可能产生的离子数。显然这时放电电流应该是

$$I_a = I_+ \times (1 + N)$$

这里的 I_+ 是打到阴极上的正离子流。

【电子枪】

电真空器件中产生聚焦电子束的电极系统。一般电子枪由三部分组成，包括热阴极、控制电极及一个或数个加速阳极。从阴极发射出的电子受各电极的静电场控制，被聚成向同一方向运动的、密集的、截面很小的电子束。也可以利用磁场使电子束聚焦，常常在真空外部加上电磁铁代替第二阳极来加强对电子束的聚焦。控制极的电压是可调的，改变控制极的电压，可以控制通过这个电极引出孔的电子数因而改变电子束的电流密度。电子枪的用途很广，像阴极射线管、示波器、电视机显象管，电子加速器等都要有发射电子的电子枪作为电子源。

【辉光放电】

在低压气体中显示辉光的放电现象。例如，在低压气体放电管中，在两极间加上足够高的电压时，或在其周围加上高频电场，就使管内的稀薄气体呈现出辉光放电现象，其特征是需要高电压而电流密度较小。辉光的部位和管内所充气体的压强有关，辉光的颜色随气体的种类而异。荧光灯、霓虹灯的发光都属于这种辉光放电。稀薄气体辉光放电的机理见辞目“气体导电”。

【弧光放电】

产生高温的气体放电现象，它能发射出耀眼的白光。通常是在常压下发生，并不需要很高的电压，而有很强的电流。例如把两根炭棒或金属棒接于电压为数十伏的电路上，先使两棒的顶端相互接触，通过强大的电流，然后使两棒分开使两端间保持不大的距离，这时电流仍能通过空隙，而使两端间维持弧形白光，称之为“电弧”。维持电弧中强大电流所需的大量离子，主要是由电极上蒸发出来的。电弧可作为强光源（如弧光灯）、紫外线源（太阳灯）或强热源（电弧炉、电焊机等）。在高压开关电器中，由于触头分开而引起电弧，有烧毁触头的危害作用，必须采取措施，使之迅速熄灭。在加速器的离子源中，也有用弧放电的源。这种弧放电机制是：电子从加热到白炽的阴极发射出来，在起弧电源的电场加速下，获得一定能量后与气体原子碰撞，产生激发与电离而引起的放电也称为“弧放电”。

【火花放电】

在电势差较高的正负带电区域之间，发出闪光并发出声响的短时间气体放电现象。在放电空间内，气体分子发生电离，气体迅速而剧烈发热，发出闪光和声响例如，当两个带电导体互相靠近到一定距离时，就会在其间发生火花和声响（它们的电势差愈大，则这种现象愈显著），结果两个导体所带的电荷几乎全部消失。实质上分立的异性电聚积至足量时，电荷突破它们之间的绝缘体而中和的现象就是放电。而中和时发生火花的就叫“火花放电”。在阴雨天气，带电的云接近地面，由于感应作用，在云和地的中间发生火花放电即为“落雷”。由于它们之间电势差非常之大，所以这种放电的危害特别大，它可以破坏建筑物，打死人和牲畜。高大建筑物均装有避雷针就是为了对落雷的防范。在日常生活中，我们往往看到运送汽油的汽车，在它的尾部，总是有一根铁链在地上拖着走。这根铁链不是多余的而是起着很重要的作用。运汽油的车中装载的是汽油，汽车在开动的时候，里面装着的汽油也不停地晃动，晃动的结果，会使汽油跟油槽的壁发生碰撞和摩擦，这样就会使油槽带电。因为汽车的轮胎是橡胶，是绝缘体，油槽里发生的电荷不可能通过轮胎传到地下，这样电荷就会积聚起来，甚至有时会发生电火花、遇到火花，汽油很容易发生爆炸。为了防止这一危险，采用拖在汽车后面的铁链来作电导工具，使产生的电荷不能积聚。

【电晕放电】

带电体表面在气体或液体介质中局部放电的现象，常发生在不均匀电场中电场强度很高的区域内（例如高压导线的周围，带电体的尖端附近）。其特点为：出现与日晕相似的光层，发出嗤嗤的声音，产生臭氧、氧化氮等。电晕引起电能的损耗，并对通讯和广播发生干扰。例如，雷雨时尖端电晕发电，避雷针即用此法中和带电的云层而防止雷击。我们知道，电晕多发生在导体壳的曲率半径小的地方，因为这些地方，特别是尖端，其电荷密度很大。而在紧邻带电表面处，电场 E 与电荷密度 ρ 成正比，故在导体的尖端处场强很强（即 ρ 和 E 都极大）。所以在空气周围的导体电势升高时，这些尖端之处能产生电晕放电。通常均将空气视为非导体，但空气中含有少数由宇宙线照射而产生的离子，带正电的导体会吸引周围空气中的负离子而自行徐徐中和。若带电导体有尖端，该处附近空气中的电场强度 E 可变得很高。当离子被吸向导体时将获得很大的加速度，这些离子与空气碰撞时，将会产生大量的离子，使空气变成极易导电，同时借电晕放电而加速导体放电。因空气分子在碰撞时会发光，故电晕时在导体尖端处可见亮光。

【霓虹灯】

即氖灯。是一种冷阴极放电管，把直径为 12 ~ 15 毫米的玻璃管弯成各种形状，管内充以数毫米汞柱压力的氖气或其他气体，每 1 米加约 1000 伏特的电压时，依管内的充气种类，或管壁所涂的荧光物质而发出各种颜色的光，多用此作为夜间的广告等。若把电容器接在霓虹灯的两极上，则可做成时亮时灭的霓虹灯广告。电容器的电容大，亮灭循环的时间长；电容器电容小，则亮灭的时间较短。霓虹灯需要电压较高。灯管越细，越长需要的电压就越高。

【日光灯】

亦称“荧光灯”。一种利用光致发光的照明用灯。灯管用圆柱形玻璃管制成，实际上是一种低气压放电管。两端装有电极，内壁涂有钨酸镁、硅酸锌等荧光物质。制造时抽去空气，充入少量水银和氙气。通电后，管内因水银蒸气放电而产生紫外线，激发荧光物质，使它发出可见光，不同发光物质产生不同颜色，常见的近似日光（荧光物质为卤磷酸钙）。荧光灯光线柔和，发光效率比白炽电灯高，其温度约在 40~50℃，所耗的电功率仅为同样明亮程度的白炽灯之 1/3~1/5。广泛用于生活和工厂的照明光源。

【水银灯】

利用汞蒸气放电的发光灯。也称为“汞灯”。按照使用时水银气压之高低分为低压、高压与超高压水银灯。低压汞灯能辐射出较窄的汞特征谱线，在紫外线，可见光与红外线区有以下几条：(1) 紫外区波长(毫微米) 253.7 ; 313.2 ; 365.0 ; 366.3。可见区波长(毫微米) 404.7(紫) ; 407.8(紫) ; 435.8(蓝) ; 491.6(蓝绿) ; 546.1(绿) ; 577.0(黄) ; 579.0(黄) ; 612.3(红)。红外区波长(微米) 1.014 ; 1.129 ; 1.305 ; 1.604 ; 1.813 ; 1.970。这些特征谱线可用于光谱仪的波长定标。低压汞灯在医药学上作为杀菌用灯。高压水银灯、超高压水银灯为双管构造，其内管由石英制成，直径约为 2.5 毫米左右，在管内封入适量的水银和氙，通电时全部水银都蒸发而能保持一定蒸气压。电极为涂上碱土金属氧化物的钨或加钽的钨。开始氙先放电，温度上升，引起水银蒸汽的放电。因气压高，原子间作用力强，因而连续光谱相当强。高压水银灯为 1~3 气压，超高压水银灯为 10~200 气压。高压灯各谱线的辐射强度大，可作为仪器光源，由于有相当比例的谱线是在不可见的紫外区域，若再加上一只荧光外泡后可使这部分不可见光变为可见光而作为较强的照明光源。超高压水银灯是一种体积小、亮度高、辐射很强的红外、可见及紫外光的点光源，可作为荧光显微镜、高亮度照相记录器等仪器及投影器的光源，也可作为红外光源。

【钠灯】

利用钠蒸气放电的发光灯。在可见光波段辐射两条黄色谱线，其波长分别为 5890×10^{-10} 米和 5896×10^{-10} 米，是目前所知发光效率最高的电光源之一。用作路灯的钠灯，在夜间可产生良好的路面能见度。这种桔黄色的灯光，在雾天的透射力强而且柔和，在这种灯光下的物体，可以看得很清楚。所以不少交通要道和人工照明上，都使用钠气灯来减少汽车的交通事故。钠灯光源可以作为单色光源用于玻璃折射率测定或平面检查。发光管则以耐钠玻璃制作且封入数毫米汞柱气压的氖、钠与微量的氩。因氖的气体放电温度上升，而引起钠气压的上升，发生放电，而发出原子光谱 5890×10^{-10} 米和 5896×10^{-10} 米的光线。其波长在视觉敏锐度最高点附近。一开始点灯时将发出氖光谱，在 250 温度附近，钠放电最大。

【氙灯】

氙灯是一种高辉度的光源。它的颜色成分与日光相近故可以做天然色光源、红外线、紫外线光源、闪光灯和点光源等，应用范围很广。其构造是在石英管内封入电极，并充入高压氙气而制成的放电管。在稀有气体中，氙的原子序数大，电离电压低，容易产生高能量的连续光谱，并且因离子的能量小，电极的寿命长达数千小时。因点灯需要高电压，要使用附属的起动器、安定器、点灯装置等。使用时应当注意：（1）小心高电压注意绝缘；（2）因灯泡内有高压的氙气，小心不要过分的振动；（3）不要用眼直接看直射光；（4）灯泡要把阳极向上使用并要保持竖直；（5）固定一端另一端要呈自由状态留有热膨胀的的余地；（6）因发热量很大应注意通风，必要时要实行强制通风。

【阴极射线】

在抽成 1.33 帕 (10^{-2} 托) 以下真空的气体放电管或电子管中，由阴极发射出的电子在电场加速下所形成的电子流通称为“阴极射线”。在放电管中，阴极由于受到管内剩余气体中正离子的撞击而发射电子。在电子管中则由于受到电流的加热而发射电子。阴极射线应用很广，它能使被照射的某些物质（如硫化锌）发出荧光，而且在外加电磁场中又能迅速随着场的变化而发生偏折，电子示波器中的示波管和电视机中的显像管，均依此原理制成；在适当的电磁场中可以发散，也能够聚焦，所以也应用于电子显微镜中；高速的阴极射线照射金属板时，能产生 X 射线；利用电子的波动性阴极射线还可用于研究物质的结晶构造。

【汤姆逊】

Thomson, Joseph John 约瑟夫·约翰·汤姆逊 (1856 ~ 1940 年)。英国物理学家。世界著名的卡文迪什研究所所长。1891 年用法拉第管开始了原子核结构的理论研究。他研究了阴极射线在磁场和电场中的偏转,作了比值 e/m (电子的电荷与质量之比) 的测定,结果他从实验上发现了电子的存在。他把电子看成原子的组成部分,用原子内电子的数目和分布来解释元素的化学性质。提出了原子模型,把原子看成是一个带正电的球,电子在球内运动。他还进一步研究了原子的内部构造和阳极射线。1912 年与阿斯顿共同进行阳极射线的质量分析,发现了氖的同位素。1906 年他因在气体导电研究方面的成就获得了诺贝尔物理学奖。另有,威廉·汤姆逊 (1824 ~ 1907 年)。亦译为汤姆生。英国物理学家。1892 年封为凯尔文(又译开耳芬)勋爵。在他的研究工作中,以热学和电学及它们的应用等方面最有成就。1848 年创立绝对温标(亦称开氏温标);以后,他把热力学第一定律和热力学第二定律具体应用到热学、电学和弹性现象等方面,对热力学的发展起了一定作用。此外,还制成静电计、镜式电流计、双臂电桥等很多电学仪器。1866 年起,他领导完成了横越大西洋海底电缆的安装工作。1853 年证明了电容放电是一种振荡。19 世纪末论述了原子的构造。坚持用力学模型来解释一切物理现象。曾任格拉斯哥大学教授(1846)和校长(1904)。

【示波器】

显示某些随时间变化的物理量（如电压、电流等）波形的电子仪器。一般有电子（阴极射线）示波器、脉冲示波器、电磁（磁电式）示波器三种。（1）阴极射线示波器：此种示波器为应用最广的一种示波器，用以观察变化物理量的过程，是一个阴极射线管，是显示电压波形的电子仪器。它主要由示波管、放大器、锯齿波发生器等部分组成。通过加在示波管垂直偏转板上的信号电压和加在水平偏转板上的锯齿波电压的联合控制，使电子束在荧光屏上描出所欲研究的电压波形以便观察、记录或拍摄照片。各种非电的物理量（如压力、温度等）的变动，在转换为相应的电压变动后，也可用这种示波器观察。把两个信号电压各自加在两对偏转板上，荧光屏上即显示利萨如图形（同时在两个互相垂直的方向上作谐振动的点所描出的轨迹，形状同两个谐振动的振幅之比、频率之比和周相差有关）。这样，就能由一已知信号电压的频率来测定另一个信号电压的频率或相位。阴极射线示波器不但可以用来显示波形，还可用于测量频率、相位、电压、电流，研究电子管和晶体管的特性曲线以及其它专门用途，是一种应用非常广泛的电子仪器；（2）脉冲示波器：它也是阴极射线示波器的一种，但它是研究非常短暂的和不重复的过程。例如雷电放电、绝缘体被击穿（试验时）等。显示和测量脉冲的一种宽带阴极射线示波器。它具有特殊的扫描装置，可以显示单个脉冲或一串脉冲。在雷达、电视、计算技术和核子物理等运用脉冲技术的方面，都广泛应用这种仪器；（3）电磁示波器或称光束示波器：此种示波器适于观察和记录比较缓慢的过程，例如频率在数十千周以下的振荡，一般应用电磁示波器。此种示波器，在磁场中安放一个用细丝作成的小圈，上面装有一个小镜子，过程的观察和记录就是利用这个小圈和小镜来进行的。在小圈内有电流通过时，便在磁场中转动，圈上的小镜以及由小镜反射出来的细小光束也就发生偏转。由于小圈具有这样的可动性，故其偏转以及与之相随的光束偏转便重复小圈中的电流强度的变化。为了得到扫描，由小镜出来的光束射到一个转动的多面镜上，多面镜使光束以恒定的速度在另一个方向（垂直于光束因小圈振动而发生偏转的方向）内偏转。这样一来，光束在屏上产生的亮点便画出一条曲线，此曲线便表示小圈内所通过的电流强度的变化。为了把过程记录下来，可使光束投射到感光胶片上。

【阴极射线管】

利用电子束在荧光屏上聚焦，并改变其位置及强度以产生图象的电子束管。一般由电子枪、双方向偏转系统及荧光屏三部分组成。从电子枪射出的电子束在荧光屏上聚焦，产生一个很小的亮点。调节电子枪内控制电极（调制极）的电压，可改变束内电子流密度，因而改变亮点的亮度。电子束打在屏上的位置，可随偏转系统所加的电压（或电流）而移动。偏转系统有两种：一种是利用两对相互垂直的偏转板构成的静电偏转式；一种是利用两对偏转线圈构成的磁偏转式。常见的阴极射线管有示波管、电视显像管及雷达指示管等。

【示波管】

它是阴极射线管的一种。在一个抽成真空的管状玻璃泡中装有一系列金属制的电极。管的一端是阴极。它的外形是一个圆筒，中间有加热用的灯丝。阴极顶部涂有发射电子效率高的金属氧化物，通常是氧化钡(BaO)、氧化锶(SrO)、氧化钙(CaO)的混合物。阴极外面套有中间开小孔的圆筒状电极，称为栅极。阴极受热后发射的电子就从栅极小孔中出来。相对于阴极来说，栅极上加的是负电压。改变栅极和阴极间的负电压可以调节通过栅极小孔的电子数，所以通常又称它为“调制栅”。调制栅后面是加速极，它是一个和栅极形状相似的圆筒。加速极后面是半径略大的圆柱面状的电极，称为第一阳极。第一阳极后面还有一个半径略小的圆筒状电极，称为第二阳极。相对于阴极来说，加速极、第一阳极和第二阳极上加的都是正电压。调节这些极上的电压就可使从栅极小孔出来的电子加速，并会聚到管轴附近形成很细的一束电子流，打到管子的荧光屏上。这一段过程称为电子束的加速和聚焦。阴极、栅极、加速极、第一阳极、第二阳极这五个部分通常用镍或无磁性不锈钢制成，并由四根玻璃棒同轴地固定在一起构成一个“电子枪”，它专门发射射向荧光屏的电子束。荧光屏是一块涂有荧光物质的玻璃屏，当电子打上去时，就会发光。采用不同的荧光物质可以发出不同颜色的光，例如用钨酸钙(CaWO_4)可发蓝光，用锰激活的硅酸锌($\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$)可发绿光等。经过聚焦的电子束射到荧光屏上时，就在屏上打出一个很小的亮点。在电子枪和荧光屏之间有两组平板，相互垂直地安置着，分别称为水平和垂直偏转板。从电子枪出来的电子束在到达荧光屏之前要穿过这两组偏转板。改变加在偏转板上的电压可以使电子的运动方向发生相应的变化，从而改变荧光屏上亮点的位置。从屏上亮点的轨迹可以看出加在偏转板上电压的变化情况。从屏上反回来的电子，则通过管壁上的石墨层汇集到第二阳极而流出管外，和示波管外边的供电电路构成闭合回路，示波管中的电子流就成为整个回路电流的一个组成部分。

【半导体】

导电性能介于导体和绝缘体之间非离子性导电的物质。室温时其电阻率约为 $10^{-3} \sim 10^9$ 欧姆·厘米。一般是固体，例如锗 (Ge)、硅 (Si) 以及一些化合物半导体，如碲化铅 (PbTe)、砷化镓 (InAs)、硫化铅 (PbS)、碳化硅 (SiC) 等。与金属材料不同，半导体中的杂质含量和外界条件的改变 (如温度变化、受光照射等)，都会使半导体的导电性能发生显著变化。纯度很高，内部结构完整的半导体，在极低的温度下几乎不导电，接近绝缘体。但随着温度的升高半导体的电阻迅速减小。含有少量杂质，内部结构不很完整的半导体通常可分为 n 型和 p 型两类。半导体的 p-n 结以及半导体同某些金属相接触的边界层，都具有单向导电或在光照下产生电势差的特性。利用这些特性可以制成各种器件，如半导体二极管、三极管和集成电路等。半导体之所以具有介于导体和绝缘体之间的导电性，是因为它的原子结构比较特殊，即其外层电子既不象导体那样容易挣脱其原子核的束缚，也不象绝缘体中的电子被原子核紧紧地束缚着。这就决定了它的导电性介于两者之间。

【能带】

研究固体物理学中的一种理论。虽然所有的固体都包含大量的电子，但有的具有很好的电子导电性能，有的则基本上观察不到任何电子导电性。这一基本事实曾长期得不到解释。在能带理论的基础上，首次对为什么有导体、绝缘体和半导体的区分提出了一个理论上的说明，这是能带论发展初期的重大成就。在物理学中往往形象化地用水平横线表示电子的能量值，能量越大，线的位置越高。一定能量范围内的许多能级（彼此相隔很近）形成一条带，称为“能带”。各种晶体的能带数目及其宽度等均不相同。相邻两能带间时能量范围称为“能隙”或“禁带”，晶体中的电子不能具有这种能量。完全被电子占据的能带称为“满带”，满带中的电子不会导电；没有电子占据的带称为“空带”；部分被占据的称为“导带”，导带中的电子才能导电，价电子所占据的能带称为“价带”。能量比价带低的各能带一般都是满带。价带可以是满带也可以是导带；如在金属中是导带，所以金属能导电，在绝缘体和半导体中是满带，所以它们不能导电。但半导体很容易因其中有杂质或受外界影响（如光照、加热等），使价带中的电子数减少，或使空带中出现一些电子而成为导带，因而也能导电。

【本征半导体】

不含杂质且结构非常完整的半导体单晶，其中参与导电的电子和空穴数目相等。温度极低时，其中阻率很大，极难导电；随着温度升高，电阻率急剧减小。当硅、锗等半导体材料制成单晶体时，其原子的排列就由杂乱无章的状态变成非常整齐的状态。其原子之间的距离都是相等的，约为 2.35×10^{-4} 微米。每个原子最外层的 4 个电子，不仅受自身原子核的束缚，而且还与周围相邻的 4 个原子发生联系。这时，每两个相邻的原子之间都共有一对电子。电子对中的任何一个电子，一方面围绕自身原子核运动，另一方面也时常出现在相邻的原子所属的轨道上，这样的组合叫做“共价键”结构。硅、锗共价键结构的特点是它们外层共有的电子所受到的束缚力并不象在绝缘体中那样紧，在一定的温度下，由于热运动，其中少数电子还是可能挣脱束缚而成为自由电子，形成电子载流子。当共有电子在挣脱束缚成为自由电子后，同时留下了一个空位。有了这样一个空位，附近的共有电子就很容易来进行填补，从而形成共有电子的运动。这种运动，无论是效果上还是现象上，都好像一个带正电荷的空位子在移动。为了区别于自由电子的运动，就把这种运动叫做“空穴”运动，空位子叫做“空穴”。由此可见，空穴也是一种载流子。当半导体处于外加电压作用之下，通过它的电流可以看作是由自由电子的定向移动所形成的电子流，另一部分是带正电的空穴定向移动。所以半导体中，不仅有电子载流子还有空穴载流子，这是半导体导电的一个特点。这种纯单晶半导体，虽然多了一种空穴载流子，但是载流子的总数离开实际应用的要求，也就是从具有良好导电能力的要求来看，还相差很远，所以这种本征半导体的实际用处不大。

【杂质半导体】

在纯单晶的本征半导体中，掺杂一些有用的杂质，使其导电特性得到很大的改善。而其导电性能取决于杂质的类型和含量。这样的半导体即称为“杂质半导体”。大多数半导体都是这一种类型。将半导体材料提纯，再用扩散或用离子注入法掺入适当的杂质，可以制成 n 型半导体或 p 型半导体。利用不同类型的杂质半导体，可以制成整流器，半导体二极管、半导体三极管和集成电路等重要部件。由此可以看到，只有杂质半导体才是最有用的。

【n 型半导体】

“n”表示负电的意思，在这类半导体中，参与导电的主要是带负电的电子，这些电子来自半导体中的“施主”杂质。所谓施主杂质就是掺入杂质能够提供导电电子而改变半导体的导电性能。例如，半导体锗和硅中的五价元素砷、锑、磷等原子都是施主杂质。如果在某一半导体的杂质总量中，施主杂质的数量占多数，则这种半导体就是 n 型半导体。如果在硅单晶中掺入五价元素砷、磷。则在硅原子和砷、磷原子组成共价键之后，磷外层的五个电子中，四个电子组成共价键，多出的一个电子受原子核束缚很小，因此很容易成为自由电子。所以这种半导体中，电子载流子的数目很多，主要靠电子导电，叫做电子半导体，简称 n 型半导体。

【p 型半导体】

“p”表示正电的意思。在这种半导体中，参与导电的主要是带正电的空穴，这些空穴来自于半导体中的“受主”杂质。所谓受主杂质就是掺入杂质能够接受半导体中的价电子，产生同数量的空穴，从而改变了半导体的导电性能。例如，半导体锗和硅中的三价元素硼、镉、镓等原子都是受主。如果某一半导体的杂质总量中，受主杂质的数量占多数，则这半导体是p型半导体。如果在单晶硅上掺入三价硼原子，则硼原子与硅原子组成共价键。由于硼原子数目比硅原子要少很多，因此整个晶体结构基本不变，只是某些位置上的硅原子被硼原子所代替。硼是三价元素，外层只有三个价电子，所以当它与硅原子组成共价键时，就自然形成了一个空穴。这样，掺入的硼杂质的每一个原子都可能提供一个空穴，从而使硅单晶中空穴载流子的数目大大增加。这种半导体内几乎没有自由电子，主要靠空穴导电，所以叫做空穴半导体，简称p型半导体。

【p - n 结】

在一块半导体中，掺入施主杂质，使其中一部分成为 n 型半导体，其余部分掺入受主杂质而成为 p 型半导体，当 p 型半导体和 n 型半导体这两个区域共处一体时，这两个区域之间的交界层就是 p-n 结。p-n 结很薄，结中电子和空穴都很少，但在靠近 n 型一边有带正电荷的离子，靠近 p 型一边有带负电荷的离子。这是因为，在 p 型区中空穴的浓度大，在 n 型区中电子的浓度大，所以把它们结合在一起时，在它们交界的地方便要发生电子和空穴的扩散运动。由于 p 区有大量可以移动的空穴，n 区几乎没有空穴，空穴就要由 p 区向 n 区扩散。同样 n 区有大量的自由电子，p 区几乎没有电子，所以电子就要由 n 区向 p 区扩散。随着扩散的进行，p 区空穴减少，出现了一层带负电的粒子区；n 区电子减少，出现了一层带正电的粒子区。结果在 p-n 结的边界附近形成了一个空间电荷区，p 型区一边带负电荷的离子，n 型区一边带正电荷的离子，因而在结中形成了很强的局部电场，方向由 n 区指向 p 区。当结上加正向电压（即 p 区加电源正极，n 区加电源负极）时，这电场减弱，n 区中的电子和 p 区中的空穴都容易通过，因而电流较大；当外加电压相反时，则这电场增强，只有原 n 区中的少数空穴和 p 区中的少数电子能够通过，因而电流很小。因此 p-n 结具有整流作用。当具有 p-n 结的半导体受到光照时，其中电子和空穴的数目增多，在结的局部电场作用下，p 区的电子移到 n 区，n 区的空穴移到 p 区，这样在结的两端就有电荷积累，形成电势差。这现象称为 p-n 结的光生伏特效应。由于这些特性，用 p-n 结可制成半导体二极管和光电池等器件。如果在 p-n 结上加以反向电压（n 区加在电源正极，p 区加在电源负极），电压在一定范围内，p-n 结几乎不通过电流，但当加在 p-n 结上的反向电压越过某一数值时，发生电流突然增大的现象。这时 p-n 结被击穿。p-n 结被击穿后便失去其单向导电的性能，但结并不一定损坏，此时将反向电压降低，它的性能还可以恢复。根据其内在的物理过程，p-n 结击穿可分为雪崩击穿和隧道击穿两种。由于 p-n 结具有这种特性，一方面可以用它制造半导体二极管，使之工作在一定电压范围之内作整流器等；另一方面因击穿后并不损坏而可用来制造稳压管或开关管等器件。

【晶体二极管】

亦称为“半导体二极管”。一种由半导体材料制成的，具有单向导电特性的两极器件。早期的半导体二极管是用金属丝尖端触在半导体晶片上制成的，称为点接触二极管，通常在较高的频率范围内作检波、混频器用。目前大多数的晶体二极管都是面结型的，它是由半导体晶片上形成的 $p-n$ 结组成，或由金属同半导体接触组成，可用于整流，检波、混频、开关和稳压等。除一般用途的二极管外，还有一些用于特殊用途，利用特殊原理制成的二极管。例如：（1）肖特基二极管（又称为金属-半导体二极管）：用某些金属和半导体相接触。在它们的交界面处便会形成一个势垒区（通常称为“表面势垒”或“肖特基势垒”），产生整流，检波作用。在这种二极管中，起导电作用的是热运动能量比较大的那些载流子，所以又叫“热载流子二极管”。这种二极管比 $p-n$ 结二极管有更高的使用频率和开关速度，噪声也比较低，但工作电流较小，反向耐压较低。目前它主要用作微波检波器和混频器，已在雷达接收机中代替了点接触二极管；（2）隧道二极管：它是一种具有负阻特性的半导体二极管。目前主要用掺杂浓度较高的锗或砷化镓制成。其电流和电压间的变化关系与一般半导体二极管不同。当某一个极上加正电压时，通过管的电流先将随电压的增加而很快变大，但在电压达到某一值后，忽而变小，小到一定值后又急剧变大；如果所加的电压与前相反，电流则随电压的增加而急剧变大。因为这种变化关系，只能用量子力学中的“隧道效应”加以说明，故称隧道二极管。它具有开关、振荡、放大等作用，应用在电子计算机和微波技术中；（3）变容二极管：它是利用 $p-n$ 结的电容特性来实现放大、倍频、调谐等作用的一种二极管。由于它的结电容随外加电压而显著变化，所以称为“变容二极管”。制造变容二极管所用的半导体材料主要用硅和砷化镓。在作微波放大时，它的优点是具有很低的噪声；（4）雪崩二极管：亦称为“碰撞雪崩渡越时间二极管”。是一种在外加电压作用下可以产生超高频振荡的半导体二极管。它的工作原理是：利用 $p-n$ 结的雪崩击穿在半导体中注入载流子，这些载流子渡越过晶片流向外电路。由于这一渡越需要一定的时间，因而使电流相对于电压出现一个时间延迟，适当控制渡越时间，在电流和电压的关系上会出现负阻效应，因而能够产生振荡。雪崩二极管主要用在微波领域作为振荡源；（5）发光二极管：一种在外加正向电压作用下可以发光的二极管。它的发光原理是：在正向电压作用下， $p-n$ 结中注入很多非平衡载流子，这些载流子复合时，多余的能量转化为光的形式发射出来。发光二极管经常用作电子设备中的指示灯、数码管等显示元件，也可用于光通讯。它的优点是工作电压低，耗电量小体积小、寿命长。制造发光二极管所用的半导体材料主要是磷砷化镓、碳化硅等。

图 3—17

【晶体三极管】

亦称为“半导体三极管”或简称“晶体管”。它是一种具有三个电极，能起放大、振荡或开关等作用的半导体器件。按工作原理不同，可分为结型晶体管和场效应晶体管。结型晶体管是在半导体单晶上制备两个 $p-n$ 结，组成一个 $p-n-p$ (或 $n-p-n$) 的结构，中间的 n 型 (或 p 型) 区叫基区，边上两个区域分别叫发射区和集电区，这三部分都有电极与外电路联接，分别称为“发射极”以字母 e 表示、“基极”以字母 b 表示和“集电极”以字母 c 表示。在电子线路中，用符号代表 $p-n-p$ 型和 $n-p-n$ 型晶体管如图 3—17 所示。晶体管用作放大

器时，在发射极和基极之间输入电信号，以其电流控制集电极和基极 (或集电极和发射极) 之间的电流，从而在负载上获得放大的电信号。同电子管相比晶体管具有体积小、重量轻、耐震动、寿命长，耗电小的优点，但受温度影响较大。目前常用的晶体管主要是用锗或硅晶体制成。场效应晶体管是利用输入电压的电场作用控制输出电流的一种半导体器件。场效应晶体管又分为结型场效应晶体管和金属—氧化物—半导体场效应晶体管两大类。金属—氧化物—半导体场效应晶体管简称为 MOS 晶体管，它的结构如图 3 - 18 所示，其中 1 为栅极；2 为绝缘层；3 为沟道；4 为源，5 为漏。制作过程为在 n 型 (或 p 型) 晶片上扩散生成两个 p 型 (或 n 型) 区，分别称为源和漏，从上面引出源极 (接电压正端) 和漏极 (接负端)，源和漏之间有一个沟道区，在它上面隔一层

图 3—18

金属—氧化物—半导体场效应晶体管的示意图氧化层 (或其它绝缘层) 制作一层金属电极称为“栅极”。在场效应晶体管工作时，栅极电压的变化会引起沟道导电性能的变化，也就是说栅极电压变化控制了源漏之间的电流变化。场效应晶体管的特点是输入阻抗高和抗辐射能力强。

金属—氧化物—半导体场效应晶体管的示意图

【集成电路】

它是一种微型电子器件或部件。是采用一定的工艺，把一个电路中所需要的晶体管、电阻、电容和电感等，制作在一小块或几小块晶片或陶瓷基片上，再用适当的方法进行互连而封装在一个管壳内，成为具有所需功能的微型电路结构。集成电路已打破了传统的电路设计概念，因为集成电路中的晶体管、二极管、电阻、电容、电感等各元件在结构上已组成一个整体，这样整个电路的体积大大缩小，且引出线和焊接点的数目也大大减少，从而使电子元件向着微小型化，低功耗和高可靠性方面迈进了一大步。用集成电路来装配电子设备，其装配密度比用分立式晶体管等元器件组装的电子设备提高几十倍到上百倍，设备的稳定工作时间也可大大提高。因此集成电路在电子计算机、通讯设备、导弹、雷达、人造卫星和各种遥控、遥测设备中占据了非常重要的地位。根据制造工艺的不同，目前集成电路主要有半导体集成电路、薄膜集成电路、厚膜集成电路和混合集成电路等几类。根据性能和用途的不同，又可分为数字集成电路、线性集成电路和微波集成电路等。近年来集成电路的发展极为迅速。早期半导体集成电路的集成度是每个晶片上只有几十个元件，目前集成度已高达每片包含几千个甚至上万个元件。习惯把由一百个以上的门电路或一千个以上的晶体管集成在一块晶片上，并互连成具有一个系统或一个分系统功能的电路称为“大规模集成电路”。

【半导体集成电路】

亦称“固体电路”或“单块集成电路”，它是在一块半导体单晶片（一般是硅片）上，用氧化、扩散或离子注入，光刻、蒸发等工艺做成晶体管、二极管、电阻和电容等元件，并用某种隔离技术使它们在电性能上互相绝缘，而在晶片表面用金属薄膜使有关元件按需要互相连接，最后被封装在一个管壳里而构成一个完整电路。半导体集成电路制造方法比较简便，成本低廉、可靠性高、体积也比较小，是目前集成电路中生产和应用最多的一种。

【磁性】

能够吸引铁、钴、镍等物质的属性叫做“磁性”。古代就已发现一种称为“磁石”的天然矿石(Fe_3O_4)具有磁性。我国古代四大发明之一的指南针即利用磁石制成。后来发现,磁体和电流之间,电流和电流之间也具有相斥相吸的作用,因而逐步确定了磁和电有密切的联系。磁性起源于电流或实物内部电荷(电子、原子核)的运动。

【磁学】

研究物质磁性及其应用的学科。它以电子论和统计物理学为基础来阐明物质的抗磁性、顺磁性和铁磁性。由于物质的磁性起源于物质内部电子和核子的运动，而且它们的运动都遵从量子规律和量子统计法，现代磁学的研究同量子理论密切有关。在这基础上，磁学又有了很大的发展，目前已从电磁学中分出而成为独立的科学。

【永磁体】

永磁体有天然磁体和人造磁体两种。天然磁体是直接从自然界得到的磁性矿石。人造磁体通常是用钢或某些合金，通过磁化、充磁制成的。永磁体是能够长期保持磁性的磁体。永磁体可以制成各种形状，常见的有条形磁铁、针形磁铁和马蹄形磁铁。永磁铁用处很多，如在各种电表，扬声器、耳机、录音机、永磁发电机等设备中都需要永磁体。

【磁极】

磁体上磁性最强的部分。针形、条形、马蹄形磁铁的磁极，都是在接近两端处。若将条形磁铁置于铁屑中，取出后会观察到磁铁的两端吸引的铁屑最多。若将一个条形磁铁悬挂起来，使它可以在水平面内自由转动，静止时它将沿南北方向取向；指北的一端称北(N)极，指南的一端称南(S)极。磁体的同各极相斥，异各极相吸。在任何一个磁体上，南极和北极总是成对出现，而且它们的强度相等。若将一条磁棒分为两段，每段磁棒均有一对N、S极，且无论将磁棒分为多少段，其每小段必存在N极和S极。这说明磁体不存在独立的N极或S极，两极总是相伴而生的。表示磁极强弱的物理量称为“磁极强度”简称“磁强”。两个强弱相同的磁极，在真空中相距1厘米时，如果它们之间相互作用力为1达因，则每个磁极的强度就规定为一个电磁系单位制的磁极强度单位。

【磁化】

使原来不显磁性的物体在磁场中获得磁性的过程称为“磁化”。最容易磁化的铁磁性物质，如软铁、硅钢等。由于电流能够引起很强的磁场，且便于控制，所以常利用电流产生的磁场使铁磁性物质磁化而制成永久磁铁或电磁铁。若用磁铁的 N 极靠近铁棒，则靠近磁铁的一端磁化为 S 极，远离磁铁的另一端为 N 极，即靠近磁铁一端的极性与磁铁该端的极性恰好相反。如果被磁化的物质是软铁，当磁化磁场撤消后，铁的磁性也几乎全部消失这种类型的材料称之为软磁材料。制造电磁铁必须用软磁材料这样才能通过电流控制磁铁的磁力。若被磁化的是碳素钢，则当磁化磁场撤消后，钢仍然有磁性，说明钢能保持磁性，这类材料称之为硬磁材料。故常用碳素钢制造永磁体。

【磁力】

磁场对电流、运动电荷和磁体的作用力。电流在磁场中所受的力由安培定律确定。运动电荷在磁场中所受的力就是洛伦兹力。但实际上磁体的磁性由分子电流所引起，所以磁极所受的磁力归根结底仍然是磁场对电流的作用力。这是磁力作用的本质。

【磁场】

在永磁体或电流周围所发生的力场，即凡是磁力所能达到的空间，或磁力作用的范围，叫做磁场；所以严格说来，磁场是没有一定界限的，只有强弱之分。与任何力场一样，磁场是能量的一种形式，它将一个物体的作用传递给另一物体。磁场的存在表现在它的各个不同的作用中，最容易观察的是对场内所放置磁针的作用，力作用于磁针，使该针向一定方向旋转。自由旋转磁针在某一地方所处的方位表示磁场在该处的方向，即每一点的磁场方向都是朝着磁针的北极端所指的方向。如果我们想像有许许多多的小磁针，则这些小磁针将沿磁力线而排列，所谓的磁力线是在每一点上的方向都与此点的磁场方向相同。磁力线始于北极而终于南极，磁力线在磁极附近较密，故磁极附近的磁场最强。磁场的第二个作用便是对运动中的电荷所产生的力，此力恒与磁场及电荷运动方向垂直。磁场是一个矢量场。通常磁场都是由磁感应强度 \vec{B} 来量度。

【磁场强度】

表示磁场强弱和方向的矢量。由于磁场是电流或运动电荷引起的，而磁介质在磁场中发生的磁化对磁场也有影响。因此磁场强度有两种表示法：在充满均匀磁介质的情况下，包括介质因磁化而产生的磁场在内，用磁感应强度矢量 \vec{B} 表示；单独由电流或运动电荷所引起的场则用磁场强度矢量 \vec{H} 表示。磁感应强度决定电流或运动电荷在磁场中所受的力（参见“洛伦兹力”）。磁场强度则与产生磁场的电流强度相联系（参见“安培定律”）。在各向同性的磁介质中， \vec{B} 与 \vec{H} 的比值为介质的磁导率 μ 。磁感应强度的电磁系单位为特斯拉。磁场强度的电磁系单位为安培/米。 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 是描写各向同性非铁磁质中同一点的磁感应强度与磁场强度之间的重要关系。一般各向同性非铁磁质的 μ 都是正的常数，所以在各向同性非铁磁质中每点的 \vec{B} 与 \vec{H} 方向相同，大小成正比。其 μ 叫做磁介质的绝对磁导率，是描写磁介质性质的宏观标量点函数。

【磁力线】

描写磁场分布情况的曲线。这些曲线上各点的切线方向。就是该点的磁场方向。曲线越密的地方表示磁场强，曲线稀的地方表示磁场弱。磁力线永远是闭合的曲线，永磁体的磁力线，可以认为是由N极开始，终止于S极。实际上永磁体的磁性起源于电子和原子核的运动，与电流的磁场没有本质上的区别，磁极只是一个抽象的概念，在考虑到永磁体内部的磁场时，磁力线仍然是闭合的。

【磁通量】

表征磁介质（或真空）中磁场分布情况的物理量。通过磁场中任何一面积元 S 的磁通量等于磁感应强度矢量在该面积之法线方向上的分量与面积的乘积，即 $\Phi = B_n S = BS \cos \theta$ ，其中 θ 为面元的法线与磁感应强度的夹角。 $\theta = 90^\circ$ ， $\cos \theta = 0$ ， $\Phi = 0$ 这时磁场方向与面元平行。 $\theta = 0^\circ$ ， $\cos \theta = 1$ ， $\Phi = BS$ 这时磁场方向与面元垂直。在国际单位制中磁通量的单位为韦伯。在电磁感应现象中，感生电动势的大小取决于磁通量的变化率。

【地球磁场】

是由地球本身具有磁性，而在其周围形成的磁场。它的两极接近于地球两极，但并不完全重合。两者之间的偏差还随着时间有所变化。指南针在静止时沿地球南北方向取向，这表明地球是一个大磁体。地球磁体的N极（北极）位于其地理南极附近。地球磁体的S极（南极）位于地理北极附近。指南针正是借助于地球是个大磁体和利用磁的相互作用规律而制成的。

【磁偏角】

地磁场强度矢量所在的垂直平面与地理子午面之间的夹角。不同地点的磁偏角一般是不同的，同一地点的磁偏角也因时而变。磁子午线北端在真子午线以东为东偏，以西为西偏；一般规定东偏为正，西偏为负，指南针就是一个磁偏角指针。它不但能指出各地磁偏角每日的微小变化，也能显示在较长时间内所发生的较强的变化。如 1649 年，哥本哈根的磁偏角尚为 $1\frac{1}{2}$ 度偏东。1800 年到达其最大偏西值 $18\frac{1}{2}$ 度。1890 年又减至约 11 度偏西。各地磁偏角资料，为航海者必不可少。航海者使用的一种特殊地图上标有各地磁偏角，图上磁偏角相等的地方均用线连接起来，即所谓“等偏线”。等偏线极不规则，其线路与地理子午线全不相合。

【磁倾角】

地球表面任何一点的地磁场总强度矢量和水平面之间的夹角。地磁场强度方向在水平面之下的，磁倾角定义为正；在水平面之上的，磁倾角为负。

【磁感应强度】

描写磁场强弱和方向的物理量。它的数值反映该点磁场的强弱，它的方向为该点的磁场方向。磁感应强度的大小为：当运动电荷以速度 \vec{v} 垂直于磁场方向（ $\vec{v} \perp \vec{B}$ ）时，运动电荷所受的力最大，用 \vec{F} 表示。而以相同速率沿其它方向运动时，所受的力较小（沿平行于磁场方向运动时，受力为零）。对不同电量（ $q > 0$ ），以不同的速度在垂直于磁场的方向通过某点 p ，得到各自不同的 F ，但其 F 与乘积 qv 之比相同。即

$$\frac{F_1}{q_1 v_1} = \frac{F_2}{q_2 v_2} = \dots = \frac{F_i}{q_i v_i}$$

式中的 F_i ；表示 q_i 以垂直于磁场方向的速度 v_i 通过 p 点时所受到的磁场力。可见比值 F/qv 是一个与运动电荷无关的量。在磁场中的不同点，这个比值一般不相同，但对场中一确定点，它是一个确定值。可是这个比值反映了该点磁场的特性。在电磁学上定义这一比值为磁感应强度，用 \vec{B} 来表示，即

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{F}{qL}$$

B 为该点磁感应强度的数值。它反映了该点磁场的强弱。磁场力总是既垂直于 \vec{B} 又垂直于电荷的运动速度 \vec{v} ，即 \vec{F} 垂直于 \vec{B} 和 \vec{v} 所决定的平面。所以规定： $\vec{v} \times \vec{B}$ （ \vec{v} 与 \vec{B} 的矢量积）所决定的矢量方向与 \vec{F} 的方向一致。因为 \vec{v} 是给定的， \vec{F} 是实验可测，则场点 P 的 \vec{B} 的方向也可确定。 \vec{v} 、 \vec{B} 、 \vec{F} 方向之间的关系具有矢量矢积的右手关系：右手半握，四个弯曲手指的方向由 \vec{v} 转向 \vec{B} ，这时大拇指指示 \vec{F} 的方向如图3-19所示。如果 \vec{v} 不垂直于 \vec{B} ，按照矢积定义力 $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ ，其方向由矢量矢积的右手关系确定、其数值大小 $F = qvB\sin\theta$ ，其中 θ 为 \vec{v} 与 \vec{B} 之间的夹角。

图 3—19

【磁现象的本质】

丹麦科学家奥斯特于 1820 年发现电流的磁效应,第一次揭示了磁与电存在着联系,从而把电学和磁学联系起来。为了解释永磁和磁化现象,安培提出了分子电流假说。安培认为,任何物质的分子中都存在着环形电流,称为分子电流,而分子电流相当于一个基元磁体。当物质在宏观上不存在磁性时,这些分子电流做的取向是无规则的,它们对外界所产生的磁效应互相抵消,故使整个物体不显磁性。在外磁场作用下,等效于基元磁体的各个分子电流将倾向于沿外磁场方向取向,而使物体显示磁性。安培的假说还说明了磁体的 N、S 两种磁极不能单独存在的原因,因为基元磁体的两个极对应于环形电流所在平面的两个侧面,显然这两个侧面是不能单独存在的。近代物理表明:原子核外电子除绕核运动外,电子自身还有自旋。分子、原子等微观粒子内这些电子的运动均构成等效的分子电流。按照近代的观点,电荷在(不论其运动与否)其周围激发电场。而运动电荷(电流)在其周围激发磁场。与电场是一种特殊的物质一样,磁场也是一种特殊物质,在磁场中的运动电荷(电流)受到该磁场给予的作用力(磁场力)。电流 I_1 和 I_2 之间的相互作用,是 I_1 的磁场给其场中的电流 I_2 以作用;反过来 I_2 的磁场又给其场中电流 I_1 以作用。电流之间的相互作用是通过磁场来传递的。永磁体之间的磁现象,来源于永磁体中分子电流所激发的磁场和磁场给永磁体内分子电流的作用力。

【毕奥—萨伐尔定律】

简称毕萨定律，说明电流元与其所产生的场的磁感应强度关系的定律，其数学表示式为

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \hat{r}}{4\pi r^2}$$

$d\vec{B}$ 为电流元 $I d\vec{l}$ 在P点所产生的元磁感应强度， r 为 dL 到P点的距离， \hat{r} 为由 dL 指向P点的单位矢，其数值关系为

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \theta}{4\pi r^2}$$

为 $d\vec{l}$ 与 \vec{r} 的夹角， $d\vec{B}$ 的方向由 $d\vec{l}$ 与 \vec{r} 的矢量积所确定。可见 $d\vec{B}$ 垂直于 $d\vec{l}$ 与 \vec{r} 所决定的平面。可见以 $I d\vec{l}$ 为轴线的一系列同心圆是电流元 $I d\vec{l}$ 的磁场的磁感应线。若以右手握电流元，姆指伸直代表电流方向，则弯曲的四指就指向 B 线的围绕方向。此法即右手螺旋法。式中的 μ_0 为毕萨定律在MKSA（国际单位）制中所具有的系数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ （韦伯/安培·米）或（牛顿/安培²）。式中其它各量的单位分别为 I ——安培， r 、 dl ——米， B ——特斯拉。和电场一样，磁感应强度 \vec{B} 遵从迭加原理。毕萨定律和磁场的迭加原理成为计算任意电流的磁场的出发点。

图 3—20

【直线电流的磁场】

图 3—20 所示为一载流直长导线，设其电流强度为 I ，试计算离导线距离为 a 的场点 P 的磁感应强度 \vec{B} 。利用毕萨定律可知，电流元 $I dl$ 在 P 点的元磁感应强度为

$$dB = \frac{\mu_0}{4} \frac{I dl \times \hat{r}}{r^2}$$

因直导线上所有电流元在 P 点的磁感应强度方向相同，所以求 $d\vec{B}$ 的矢量和归结为一个线积分即

$$B = \int dB = \int \frac{\mu_0}{4} \frac{I dl \sin\theta}{r^2}$$

积分要遍及整个直线。先把被积函数化为 θ 的函数，设 $OC=L$ ，则

$$L = -a \cot \theta$$
$$r = \frac{a d\theta}{\sin^2 \theta}$$

而

$$r = \frac{a}{\sin \theta}$$

所以

$$B = \frac{\mu_0}{4} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{I \sin \theta d\theta}{a}$$
$$= \frac{\mu_0 I}{4 a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

式中 θ_1, θ_2 分别为直导线两端的电流元与其到场点的矢径的夹角。如果导线为无限长，则 $\theta_1=0, \theta_2=\pi$ ，则

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{a}$$

现行中学教科书中的 $B = K \frac{I}{r}$ 中的 K 即为 $\frac{\mu_0}{2}$ ，而 r 即为 a 。

【安培力】

它是指磁场对电流的作用力。一段通电直导线放在磁场中，通电导线所受力的方向和导线的长度 l 、导线中的电流强度 I 、磁感应强度 B 以及电流方向和磁场方向之间的夹角 θ 的正弦成正比。安培力 $F=KlIB\sin\theta$ 。该力的方向一般用左手定则，也可用右手螺旋法则来确定。这一规律只在匀强磁场中适用。因为只有匀强磁场中的各点的磁感应强度

矢量 \vec{B} 才是一个常量。否则，只有当导线长 L 非常短才可近似使用。当导线的长度、导线中的电流强度、磁感应强度的单位都采用国际单位米、安培、特斯拉时，比例常数 $K=1$ 。两条平行通电直导线间的作用力，可应用安培力的公式计算。通有电流 I_1 的直线导线在距其为 r 处的 P 点，产生的

磁感应强度的大小 $B_1 = K \frac{I_1}{r} = \frac{\mu_0}{2} \frac{I_1}{r}$ ，如果在该处再放一根同相平行的通电流 I_2 的直导线，那么，它所受的安培力为

$$\begin{aligned} F &= I_2 L B_1 = I_2 L K \frac{I_1}{r} = K \frac{I_1 I_2}{r} L \\ &= \frac{\mu_0}{4} \frac{I_1 I_2}{r} L. \\ \frac{F}{L} &= \frac{\mu_0}{4} \frac{I_1 I_2}{r}. \end{aligned}$$

$\frac{F}{L}$ 为每单位长度通电导线所受的力，它的大小和两条导线通过的电流乘积成正比，和它们之间的距离成反比，其方向由左手定则而定。左手定则，是伸开左手使拇指和其余四指成垂直并且在同一平面上，让四指指向电流的方向，而磁场方向由手心穿过，这时拇指所指方向，便是安培力的方向。

【安培】

Ampere, Andre-Marie (1775~1836年)。1775年元月22日生于法国里昂附近的波勒米。1801年在布尔学院教授物理学和化学。他最大的贡献是电磁学，首先发现两平行电流同向流动则互相吸引，异向流动则互相排斥。他还发现了电磁学的基本定律之一，即安培定律。他以数学理论描述这一现象，成为发展电动力学的基础。为了纪念他，以安培为电流的国际单位制基本单位。安培单位的定义为：处于真空中相距1米的两无限长而圆截面积可忽略的平行直导线内，通过恒定电流时，当两导线之间产生的力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿时，则其电流强度为1安培。

【电流天平】

又称“安培秤”。用以测量两平行通电导体之间的力或用以测量磁感应强度的仪器。若把与天秤托盘平行的两条导线如图 3-21 所示的情况绝缘固定在托盘上。这时把天平两端调平。当电路如图所接的情况导线 AB 段和 CD 段通以相同方向的电流，使其彼此相互吸引，因为是同一回路所以电流相等，AB 段所受的力（即天平托盘所受力）其大小为

$$F = 2 \times 10^{-7} \frac{I^2 L}{R}$$

在天平的另一盘中加砝码使天平仍回到平衡状态。由 $F=mg$ 、 L 和 R 是可测量的，即可求出电流 I 的数值。

【安培定律】

“安培环路定律”的简称。这个定律指出在磁场中磁感应强度 \vec{B} 沿任何闭合环路 L 的线积分（环流）等于穿过这个环路的所有电流的 μ_0 倍，其数学表示式为

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I$$

上述关系称为安培环路定理。在闭合曲线包围一载流直导线如图 3-22a 所示。在垂直于通电导线的平面上取一包围导线

图 3—21

的闭合曲线 L 如图 3-22b 所示。计算 \vec{B} 沿此曲线的积分，因为

图 3—22

$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2a} \hat{i}$ 令式中 \hat{i} 为 \vec{B} 的单位矢，于是有

$$\vec{B} \cdot d\vec{L} = \frac{\mu_0 I}{2a} dL \cos \theta$$

为 \vec{B} 与 $d\vec{L}$ 的夹角。 $dL \cos \theta = dS$ 为 d 所对的弧长，而

$$d\alpha = \frac{dS}{a}$$

所以 $\vec{B} \cdot d\vec{L} = \frac{\mu_0 I}{2} d\alpha$

则 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \frac{\mu_0 I}{2} \int_0^{2\pi} d\alpha$

所以 $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I$

如果闭合曲线不包围载流直导线，如图 3-23a 所示。图 3-23b 中，纸面为直导线垂直的平面，曲线 L 为平面上电流 I 之外的任意闭合曲线。由 I 作闭合曲线 L 的切线，切点分别为 A 、 B ，点 A 、 B 将闭合曲线分为 L_1 、 L_2 。取沿图所示方向 \vec{B} 的闭合曲线的积分，则有

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{L} = \int_{L_1} \vec{B} \cdot d\vec{L} + \int_{L_2} \vec{B} \cdot d\vec{L}$$

注意到在 L_1 段中有 $\cos \theta < 0$

$$\begin{aligned} \text{所以 } \oint \vec{B} \cdot d\vec{L} &= \frac{\mu_0 I}{2} I \left(\int_{L_2} d\alpha - \int_{L_1} d\alpha \right) \\ &= \frac{\mu_0 I}{2} I (\alpha - \alpha) = 0 \end{aligned}$$

可见环路不包围导线的磁感应强度 \vec{B} 的环流为零。对闭合曲线包围多根载流导线时则有

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 (I_1 + I_2 + \dots + I_n)$$

我们所熟悉的安培定则（右手螺旋定则），则是指出磁场环流的方向与通电流方向的关系。

【螺线管】

用导线沿着圆筒侧面绕成的螺旋形线圈。它就是最原始的电磁铁，设螺线管远比其直径长。螺线管的磁场为其每匝所产生磁场的矢量和。从图 3-24 所示情况可以看出，如果螺线管的匝间间隔较大，显示导线之间的磁场有相抵消之势，并显示在螺线管外距导线较远之点 P 的磁场与螺线管平行，在线管内的中央附近地带的磁场也与其轴平行。

图 3—23

在导线紧密绕制的极限情况下，螺线筒实际上变为筒状电流层。当螺线管很长时（当趋于无限长时），其筒状电流层在管外各点的磁场趋近于零。如果实际螺线管的长度远大于直径，在远离两端时取外部磁场为零是可以的。整个螺线管外部磁场要比其内部磁场弱得多。应用安培定律

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu_0 I$$

于图 3-25 之理想螺线管的长方路径 abcd，将积分 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{L}$ 写

成 4 个积分之和，则

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{L} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{L} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{L} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{L}$$

图 3—24

图 3—25

右边第一个积分为 Bh ， h 为路径 a 至 b 的长度。路径 ab 虽与管轴平行，但不必与轴重合。对于第二和第四积分来说，因路径上每一点 \vec{B} 与 $d\vec{L}$ 成直角，致使其 $\vec{B} \cdot d\vec{L} = 0$ ，故积分也为零。第三积分包含长方形在管外的部分，因对理想螺线管外所有点之 \vec{B} 均取为零，故此积分亦为零。因此对整个长方形路径之 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = Bh$ 。通过积分路径所包围之面积内的净电流 I 与螺线管内的电流 I_0 不同，因为积分路径所包围的不止一匝。令 n 为单位长度之匝数，则

$$I = I_0(nh)$$

安培定律即变为

$$Bh = \mu_0 I_0 nh$$

$$B = \mu_0 I_0 n$$

虽然上式是就无限长之理想螺线管推导而来的，但对实际螺线管靠近中央内部诸点而言是适用的。它说明磁感应强度 B 与螺线管的直径或长度无关，且在螺线管截面上的 B 不变。为得到实验用的给定的匀强磁场，用螺线管为可行的方法，就像欲产生已知之匀强电场用平行板电容器为可行的方法一样。

【螺线环】

图 3-26 所示为一螺线环，此环可看成一有限长度之螺线管弯成环状。因对称关系在螺线管内磁感应强度

图 3—26

\vec{B} 线形成同心圆，如图所示。再对半径为 r 的圆路径应用安培定律：

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = \mu I$$

即 $B \cdot 2\pi r = \mu_0 I_0 N$

I_0 为螺线环内的电流强度， N 为总匝数。由此得

$$B = \frac{\mu_0 I_0 N}{2\pi r}$$

由于 r 选的不同、 B 也不同。因此 B 在螺线环截面内并非不变，此点与螺线管不同。由安培定律也可以证明，在理想的螺线环外各点的磁感应强度 B 等于零。证明从略。

【左右手定则】

左手定则亦称“电动机定则”。它是确定通电导体在外磁场中受力方向的定则。其方法是：伸开左手，使拇指与其余四指垂直，并都与手掌在同一平面上。设想将左手放入磁场中，使磁力线垂直地进入手心，其余四指指向电流方向，这时拇指所指的方向就是磁场对电流作用力的方向如图 3-27 所示。右手定则亦称“发电机定则”。确定导体在

图 3—27

图 3—38

磁场中运动时导体中感生电流方向的定则。伸开右手，使拇指与其余四指垂直，并都和手掌在同一平面内。假想将右手放入磁场中，让磁力线垂直地从手心进入，使拇指指向导体运动的方向，这时其余四指所指的方向就是感生电流的方向。如图 3-28 所示

【右手螺旋定则】

表示右手螺旋柄的旋转方向和螺旋前进方向之间相互关系的定则。例如在笛卡儿右手坐标系中，以从 x 轴经过 90° 转到 y 轴的方向为旋转柄旋转方向， z 轴就沿着旋转的前进方向。又如用矢量表示角速度时，如果转动的方向沿着螺旋柄旋转方向，螺旋的前进方向就表示角速度矢量的方向。洛仑兹力 \vec{f} 的方向总是垂直于运动电荷的速度 \vec{v} 和磁感应强度 \vec{B} 所构成的平面。而且对正电荷来说 \vec{v} 、 \vec{B} 与 \vec{f} 三者之间的方向关系可用右手螺旋定则来描述：握紧右手，伸直拇指，当卷曲的四指表示由 \vec{v} 方向转向 \vec{B} 方向时，则与四指垂直的拇指的指向恰是螺旋旋进的方向。即为运动电荷受到的洛仑兹力 \vec{f} 的方向如图 3-29 所示。确定通电导体在外磁场中受力方向的左手定则，也可以用右手螺旋定则代替。若弯曲的四指从电流方向转向磁感应强度 \vec{B} 的方向，而与四指垂直的拇指的指向就是导体受到的磁场力的方向。

【洛仑兹力】

运动电荷在磁场中所受的力，它和电荷的电量、磁感应强度、电荷运动的速度及两者之间的夹角的正弦成正比，方向由左手定则确定。用右手螺旋法则也可确定。有时也把只受磁场部分的力称为“洛仑兹力”。由实验我

图 3—29

们知道磁场施于运动中的电荷的磁力恒与电荷的运动方向和磁场方向所确定的平面相垂直。假设运动电荷在电磁场中受到的磁场作用力为 \vec{f}_m 。因此运动电荷在磁场中受到的力可表示为矢量积，即

$$\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B}$$

\vec{F} 的大小为

$$F = qVB \sin\theta$$

为电荷运动的速度 \vec{V} 和磁感应强度 \vec{B} 之间的夹角。令运动电荷在电磁场中受的电场力为 F_e ，则它所受的总力为，

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

运动电荷在电磁场中所受的洛仑兹力 F 为

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$$

此式称为洛仑兹关系式，式 $\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B}$ ，是运动电荷在磁场中受力的基本公式。

磁场力的一个重要特征是，无论磁场中运动电荷的速度 \vec{V} 怎样，洛仑兹力 \vec{F} 总是与 \vec{V} 垂直，因而磁场力对运动电荷不作功：

$$\vec{F} \cdot \vec{V} = 0 \quad (FV \cos\theta \text{ 中的 } \cos\theta = 0)$$

磁场力只改变运动电荷速度的方向，而不改变其速率数值。

【洛伦兹】

Lorentz, Hendrik Antoon (1853 ~ 1928 年) 荷兰物理学家。创立经典电子论,对经典电磁理论有一定贡献。确定了电子在电磁场中所受的力(洛伦兹力),并预言了正常的塞曼效应。为了解释迈克耳孙—莫雷实验的结果,提出了在以太中运动的物体在运动方向上缩短的假说,因与爱尔兰物理学家斐兹杰惹同时提出,称为洛伦兹—斐兹杰惹收缩;并在以太学说的基础上提出高速运动的参考系与静止参考系之间时间、空间坐标的变换形式,后被称为洛伦兹变换。这些工作与相对论的建立有关。

【电荷的圆周运动】

设一质量为 m ，电量为 q 的粒子以速度 \vec{V} 沿垂直于磁场方向进入一匀强磁场 \vec{B} 中，图3-30所示，其中 $q = -e$ （即电子）， \vec{B} 垂直进入纸面。因为 $\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B}$ ， \vec{F} 只改变速度的方向，而不改变速度的数值，因而作用在运动电荷上的力 \vec{F} 的大小恒定不变。其次， $\vec{F} \perp \vec{V}$ 并且 \vec{V} 、 \vec{F} 均在垂直于 \vec{B} 的纸平面内。由力学知识可知，这是一个向心力， $F_{\text{向}} = qVB$ ，故带电粒子作位于纸平面内的匀速圆周运动。

因为 $F_{\text{向}} = qVB$

$$\text{又} \quad F_{\text{向}} = ma_{\text{向}} = m \frac{V^2}{R}$$

$$\text{所以} \quad qVB = m \frac{V^2}{R}$$

$$R = \frac{mV}{qB}$$

R 为粒子作圆周运动的半径。

又粒子的角速度 $= \frac{V}{R}$ ，所以

$$\omega = \frac{q}{m} B$$

q/m 为带电粒子的电量与其质量之比，叫荷质比。由此可见，荷质比(q/m)一定的带电粒子在匀强磁场中作圆运动时，不论其速度有多大，其角速度均相同，因而这些粒子在相同的时间内转过相同的角度，故必有相同的周期 T 。而周期为

$$T = \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi R}{\frac{qBR}{m}} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$\text{粒子的频率} \quad f = \frac{Bq}{2\pi m}$$

说明荷质比相同的粒子，当其在匀强磁场中作垂直于 \vec{B} 的运动时，其圆运动的周期 T 和频率 f 与速度无关。这是因为粒子的速度增大时，其圆运动的半径也正比地增大。带电粒子运动的这些特点具有重要的实际意义。回旋加速器、磁聚焦理论都要用到这一结论。注意，在同一磁场中，正、负带电粒子圆周运动的转动方向相反。

【质谱仪】

是一种分析各种同位素并测量其质量及含量百分比的仪器。当一束带电的原子核通过质谱仪中的电场和磁场时，凡其荷质比不相等的，便被分开。图 3-31 为质谱仪的示意图。图中 I 为离子源， S_1 和 S_2 为两个狭缝，从离子源引出的离子受到施于 S_1 及 S_2 间的电位差，在通过 S_1 到 S_2 的路径上被加速，成为具有一定速度的离子束，进入磁感应强度为 B 的匀强磁场区。进入磁场时的速度由下式

$$v^2 = 2\left(\frac{q}{m}\right)V \quad (1)$$

决定。正离子在这一磁场中运动时其轨道如图中所示半径为 r 的圆。当离子走过一半圆而抵达照相底片 P 时会在它上面留下痕迹。由轨道半径 $r = mv/qB$ （见洛仑兹力），得

$$v = \frac{q}{m} B r \quad (2)$$

合并(1)、(2)式，消去 v ，即得

$$\frac{q}{m} = \frac{2v}{B^2 r^2}$$

因为 V 、 B 及 r 可直接测量得到，所以如果我们能够用其他方法决定离子所带的电荷 q ，则由上式便可求出离子的质量。

图 3—31

我们可以用质谱仪将电荷相同而质量不同的离子分开。科学家应用这种仪器在 1920 年左右发现了同种化学元素的原子其质量可以不相同，这些质量不同的同一种元素的原子被称为同位素。汤姆逊首先利用电磁场测定电子的荷质比的原理，同样可运用到带正电的离子，从荷质比很容易算出该离子的质量。正离子通常带电量等于一个电子（称为单电荷离子）。但有时也带有两个、三个甚至四个电子电量（称为多电荷离子）。目前应用的质谱仪是非常精确的仪器，它不但可以测量出每种同位素之准确质量，并可测定每种同位素在元素中所占的百分比。如将这种仪器略加修改，也可应用到同位素分离。质谱仪的形式很多，但所应用的主要原理及结构却大同小异。图 3-32 所示是一台现代用质谱仪的主要装置部分。这装置是在真空中，正离子流自离子源引出经过窄隙 S 进入一曲圆形之电场 C_1C_2 ，调节 C_1C_2 之间的电压，可选择一定能量之正离子，这些正离子随着电场之形状弯曲 90° 而进入一个半圆形的匀强磁场中，磁场的方向与图面垂直且指向纸内，进入磁场之正离子受磁力作用而沿半圆形轨道进行。因正离子 e/m 之大小不同，轨道形成大小不等的半圆。分别落在底片上的不同位置也就是说元素将按其质量大小的顺序而排列，故称之为“质谱”。如果我们分别测出每种粒子的电流。就能从这些电流大小的比例中，得出该种在离子源中被电离的物质的各种同位素的成分比例。它也可以把化合物中的不同物质的离子分开和成分分析。

图 3—32

【回旋加速器】

回旋加速器是自己加速质子、氘核、 α 粒（氦的原子核）等使之获得高能量的装置。它是核物理研究的重要工具。图 3-33 为回旋加速器的示意图。 D_1 、 D_2 为装于同一水平面上的半圆形中空铜盒（又称 D 形盒）。两盒间留有一定宽度的间隙，置于真空中。由大型电磁

铁产生的匀强磁场 \vec{B} 垂直于 D 形盒。由高频振荡器产生的交变电压加于两 D 形盒间，这个电压将在两盒空隙间产生电场以加速带电粒子，而盒内由于电屏蔽效应其电场强度趋近于零。在加速器中心有离子源。产生的离子通过离子源的引出孔而进入回旋加速器中。假设此时 D_2 正好处于高电位，则离子将被两 D 形盒间的电场加速而进入 D_1 盒中。 D_1 盒中不存在电场，但却存在由电磁铁产生的匀强磁场。因而离子以不变的速率在 D_1 盒中作匀速

圆周运动，当离子的荷质比和 B 一定时，该圆周运动的周期 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ （见词

目“电荷的圆周运动”）是确定值，它与速度 v 和半径 r 的数值无关。因而经过 $\frac{T}{2}$ 后，离子绕过半个圆周从 D_1 穿出。若设计使得振荡电源的周期

$T_0 = T$ ，这时两 D 形盒的电位差的方向与前者相反， D_1 处于高电位状态。离子

在 D 形盒空隙中再次被加速获得新的能量。按相同原理，离子经 $\frac{T}{2}$ 后又从 D_2 穿出，继续被加速而进入 D_1 盒中，如此不断，直至被加速到所需的能

量。由于离子圆运动半径 $R = \frac{mv}{qB}$ （见词目“电荷的圆周运动”）随 v 值增大

而增大。最后当被加速离子趋于 D 形盒

图 3—33

的边缘时，借助于一个有静电电势的偏转板可以控制粒子的运动，使粒子打在内靶或外靶上。假如 D 形盒的半径为 R_0 ，则 R_0 是离子作圆周运动的最大半径，此时离子速率值最大。

$$\text{由} \quad R = \frac{mv}{qB}$$

$$\text{可知,} \quad v_{\max} = \frac{R_0 q B}{m},$$

$$\text{则} \quad \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \frac{1}{2} \frac{R_0^2 q^2 B^2}{m}$$

这就是回旋加速器径加速后离子所获得的最大动能。回旋加速器的优点在于以不很高的振荡电压对离子不断加速而得到高能离子流。若采用一次加

速以获得如此能量，其加速电压U必定很高，因 $\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = qU$ ，即 $qU =$

$\frac{1}{2} \frac{R_D^2 q^2 B^2}{m}$ ，所以

$$U = \frac{1}{2} \left(\frac{q}{m} \right) B^2 R_D^2$$

假如离子是氦核其荷质比 $\frac{q}{m} = 4.8 \times 10^7$ （库仑/千克）。

设回旋加速器半径 $R_D = 0.48$ （米）， $B = 1.8$ （韦伯/米²），

$$\begin{aligned} \text{则} \quad U &= \frac{1}{2} \times 4.8 \times 10^7 \times (1.8)^2 \times (0.48)^2 \\ &= 1.8 \times 10^7 \text{（伏特）} \end{aligned}$$

即 $R_D = 0.48$ （米）， $B = 1.8$ （特斯拉）的回旋加速器所获得的氦核能量，等效于直线加速器具有一千八百万伏特加速电压所得到的结果。由于相对论可知，物体的质量与速度有 $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 的关系。其中 m_0 为 $v = 0$ 时的质量， c 为光速。而回旋加速器必须满足 $f_0 = f$ （或 $T_0 = T$ ）的条件，而

$$f = \frac{qB}{2m}$$

当 m 随 v 增大而增大时， f （粒子旋转频率）必然随之减小。若 f_0 恒定，则破坏了 $f_0 = f$ 的条件，甚至可能起到减速粒子的作用。若使电子和氦核具有相同能量，由于电子质量远小于氦核，其速度就应远大于氦核，它将很快受到上述相对论效应的限制。因而回旋加速器一般用来加速较大质量的粒子，而不用以加速电子。加速电子可利用“电子感应加速器”。

【电子感应加速器】

电子感应加速器是回旋式加速器的一种，它是利用变化的磁场而激发的感生电场而达到加速电子的目的。在圆形电磁铁的两极间，有一环形真空室，在交变电流激励下，两极间出现交变磁场，这交变磁场又激发一感生电场。从电子枪射到真空室的电子受到两个作用力：(1)受感生电场沿切向的加速力；(2)受磁场沿径向的洛仑兹力，充当维持圆周运动的向心力。

【磁流体发电机】

当热游离气体很快地通过磁场时，如果磁场很强，将很快将热游离气体中的正、负带电粒子在洛仑兹力的作用下分别集聚在流体管道两侧的两个极上，这样将热能直接转变为电能，而不需要锅炉或涡轮发电机，这种发电装置称为“磁流体发电机”，简称 MHD。MHD 需要很强的磁场，一般只有超导磁铁才能做到。此外，MHD 管子本身并不是一个完全的发电机，电浆离开管子后，还要经过压缩、加热、再回到管子，才完成一个循环，所以必须发展能耐高温的材料，才能更进一步地改良 MHD。同时此材料必须能在极高的温度下，具有抗碱金属腐蚀之特性，这给人们带来了材料方面的难题，当此问题解决后，MHD 将能以极高的效率，供给可靠的电流。

【电磁感应】

通过闭合回路面的磁通量发生变化而产生电动势的现象。这样产生的电动势称为“感应电动势”。这一现象首先由法拉第于 1831 年发现的。磁通量的变化在线圈中产生的电流，称为“感应电流”。感应电流的产生可用导体中自由电子受到磁场的洛仑兹力来说明。麦克斯韦认为磁场变化时，即使导体不存在，也将引起电场，因而在任何闭合路径中形成电动势。电磁感应现象继奥斯特实验（电流引起磁场）之后进一步揭示了磁现象和电现象之间的紧密依存关系。麦克斯韦方程组以此为主要依据之一。在电机工程中，也有很重大应用，例如发电机、变压器等都是以电磁感应现象为根据而制成的。若一导线在 1 秒钟内切割 1 韦伯的磁感应通量时，此导线两端可产生 1 伏特的感应电动势。欲使感应电动势增强，可采取如下的方法：(1)加快导线与磁场相对运动之速度；(2)加强磁感应强度；(3)将单根直导线加长，或用多根单直导线单向同时切割磁力线后串联起来；(4)采用最大的切割磁力线的角度（即垂直切割）。在无数的实验中证明，只要在闭合线圈中磁通有变化就会出现感应电流，不管这个变化是由什么原因引起的。它可以是磁场与线圈的相对运动，也可以是电流的变化所引起的。

【楞次】

Lenz, HeinrichFriedrichEmil(1804 ~ 1865 年)1804 年 2 月 12 日生于俄国爱沙尼亚,最初攻读神学,后转学习物理学。1834 年任圣彼得堡大学(后为列宁格勒大学)教授,俄国科学院院士。1834 年发表楞次定律,说明了感应电流的方向。1835 ~ 1838 年又找出电阻和温度的关系。

【楞次定律】

当导线在磁场中运动时，或磁场在线圈中变化时，由导线上感应电流的磁效应所形成的另一磁场作用，在反抗导线或磁铁与原有磁场间的相对运动。即感应电流的方向为阻止磁场的变化方向，也就是感生电流的磁通总是力图阻碍引起感生电流的磁通变化，这就是“楞次定律”。应该注意，楞次定律是判断感应电动势方向的定律，它是通过感应电流的方向来表述的。按照这个定律，感应电流必定采取这样一个方向，使得它所激发的磁通阻碍引起它的磁通变化。所谓阻碍一个磁通的变化是指：当磁通增加时，感应电流激发的磁通与原来磁通方向相反（阻碍它的增加）；当磁通减小时，感应电流的磁通与原来磁通方向相同（阻碍它的减小）。按照上述的情况可以确定被感生电流所激发的磁场的方向，在根据右手螺旋法则，可知线圈或螺线管中的感应电流的方向。楞次定律实际是能量守恒定律在电磁感应现象中的反映。为了理解这点，可从功和能的角度分析。比如，当磁铁插入线圈时，线圈出现感应电流。按照楞次定律，感应电流所激发的磁感应线的方向如图 3-34 中虚线所示。如果把这个线圈看作磁铁，其右端相当于 N 极，它正好与向左插入的 N 极相斥。为使磁铁匀速向左插入（强调匀速是使其动能不变，否则分析时还要考虑动能变化），必须借助于外力

克服这个斥力做功。另一方面，感应电流流过线圈及电流计时必然要发热，这个热量正是外力做功转化而来的。可见楞次定律符合能量守恒和转化这一普遍规律。设想感应电流的方向与楞次定律的结论相反，图 3-34 线圈的右端就相当于 S

图 3—34

极，它与向左插入的磁铁左端的 N 极相吸，磁铁在这个吸引力的作用下将加速向左运动（无需其它向左的外力），线圈的感应电流越来越大，线圈与磁铁的吸力也就越来越强。如此下去，一方面磁铁的动能越来越大，另一方面是感生电流放出越来越多的焦耳热，而在这一过程中竟没有任何外力做功，这显然是违反能量守恒定律的。可见，能量守恒定律要求感应电动势的方向遵循楞次定律。再如，图 3-35 中 abcda 是一个闭合电路（简称线框），“ \times ”表示外加恒定均匀磁场 \vec{B} 的方向指向纸面里边、线框的磁通 Φ 等于 B 与线框所围面积 S 的乘积。当可动边 ab 在外力作用下向右平移时，线框面积增加。由楞次定律可知感应电流 I 的方向为逆时针，如图中箭头所示。从功和能的角度分析。载有感应电流的导体段 ab 既然处在磁场之中，自然受到磁场的作用力（安培力）。应用左手定则这个力向左，因此它是 ab 段导线向右平移的阻力。为使 ab 边向右匀速平移，就要用外力克服这个阻力做功，正是这个功转化为感应电流放出的焦耳热。如果感应电流的方向与楞次定律的结论相反，ab 边所受的安培力不是阻力而是动

力，这显然也要导致违反能量守恒定律的结论。由此楞次定律也可以描述为：当导体在磁场中运动时，导体中由于出现感应电流而受到的磁场力（安培力）必然阻碍此导体的运动。这可以称为楞次定律的第二种表述。楞次定律的两种表述有一个共同点，就是感应电流的后果总与引起感应电流的原因对抗。在第一

图 3—35

种表述中，“原因”指引起感应电流的磁通变化，“后果”指感应电流激发的磁通。在第二种表述中，“原因”指导体的运动，“后果”则指导体由于其中出现感应电流而受到的安培力。

【感应电流】

未接入电流的闭合导线，受外加变化磁场影响而产生的电流称为“感应电流”或“感生电流”。一般产生感应电流的方法有三种：(1)移动邻近导线的磁铁。(2)变化邻近导线电路中的电流。(3)移动邻近通有电流的导线电路。根据楞次定律，感应电流的方向为反对产生磁通量变化的方向。

【感应电动势】

因磁通量 Φ_B 的改变而产生的电动势，称为感应电动势。其大小与磁通量的变化量成正比例。如图3-36，设某人施力 \vec{F}_a ，使导线以速度 \vec{v} 向右作等速直线运动，因有感应电流 I 产生，则导线上所受的磁力 $\vec{F}_m = I\vec{L}\vec{B}$ 。导线作等速运动

图 3—36

$$F_a = -F_m$$

施力 \vec{F}_a 在 t 时间内所作的功

$$\begin{aligned} W &= p \cdot t = (F_a v) \cdot t \\ &= (-F_m v) \cdot t = -ILBv \cdot t \end{aligned}$$

在 t 时间内，通过此电路任一点的电荷为 $q = I \cdot t$ ，推动此电荷所需的能量为

$$q\epsilon = I \cdot t$$

依照能量不灭定律及 t 时间内长 L 的导线所扫过的面积 $Lv \cdot t$

$$\begin{aligned} W &= -ILBv \cdot t = -I \cdot t \\ \epsilon &= -\frac{B(Iv\Delta t)}{\Delta t} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \end{aligned}$$

感应电动势的方向，恒使回线产生一感应电流，此感应电流产生一感应磁通量，以阻止磁通量的变化。 $\epsilon = \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$ 中的负号即表示感应电动势所产生感应磁通量之方向，即反抗原有磁通量变化的方向。

【法拉第电磁感应定律】

当穿过回路的磁通量发生变化时，回路

中的感生电动势 $\varepsilon_{\text{感}}$ 的大小和穿过回路的磁通量变化率 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 成正比，即

$$\varepsilon_{\text{感}} = K \frac{d\phi}{dt}$$

这就是法拉第电磁感应定律，这个定律清楚地表明，决定感电动势的大小不是磁通本身而是磁通随时间的变化率 $d\phi/dt$ ，当磁铁插在线圈内部不动时，线圈的磁通虽然很大，但并不随时间而变化，故仍然没有感应电动势及感应电流。法拉第定律使我们能够根据磁通的变化率直接确定感应电动势。至于感应电流，则还要知道闭合电路的电阻才能求得。在更复杂的情况下，电路中还可能接有其他电源，确定电流时还必须考虑到它们的影响。此外如果线路并不闭合（或说电阻为无限大），则虽有感生电动势却没有感生电流。可见，在理解电磁感应现象时，感应电动势是比感应电流更为本质的东西。只是由于感应电流比感应电动势易于显示，所以法拉第在这个方面的第一个实验是通过感应电流发现电磁感应现象的。象其他一些科学家一样，法拉第起先也做过许多实验，企图发现恒定电流在其附近的闭合线圈中“感应”出电流来，但都遭到失败。然而；他不放过实验中的每一个细节，终于在一次实验中注意到在一个电路中电流接通和切断的瞬间，其附近的闭合线圈内出现了一短暂的感应电流。由此他敏锐地意识到：电路接通或切断时的电流变化之所以在其附近线圈引起感应电流，很可能是由于它使该线圈的磁通发生变化所致。如果令电路的电流不变但与线圈作相对运动，也有希望在线圈中引起感应电流。他沿着这一思路反复实验，终于取得了伟大成果。在国际单位制中， ε 的单位为伏特， ϕ 的单位为韦伯， t 的单位为秒，这时，实验测得的 $K=1$ ，故法拉第定律此时的形式为

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt}$$

此式确定了感生电动势的大小，其方向由楞次定律确定，为了在运算中不但考虑到电动势的大小而且考虑到它的方向，最好把这两个定律统一表述为一个数学式子。为此，必须把磁通 ϕ 和感生电动势 ε 看成代数量，并对它们的正负赋予确切的含义，要给代数量的正负赋予意义就要事先给它约定一个“正方向”。当实际方向与正方向相同时，该量数值为正（ >0 ），否则为负（ <0 ）。各量正方向均可任意约定，但同一定律对不同正方向可有不同的表达式（差别在于式中的正负号）。当约定感应电动势 ε 与磁通 ϕ 的正方向互成右手螺旋关系时，如图 3—37 所示，考虑到楞次定律后法拉第定律应写成

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt}$$

式中负号正是楞次定律在这种正方向约定下的体现。证明的方法是把所有可能情况举出，并逐一验证，由 $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ 得出的 ε 的实际方向与楞次定律一致。可有情况有下列四种：(1) $\phi > 0$ 且 $d\phi/dt > 0$ (图 3—38a)。 $\phi > 0$ 说明磁通实际方向与图 3—37 的正方向相同，即向左，如图 3—38_a 的虚箭头 ϕ 所示

图 3—38

(按习惯，在必须同时画出正方向和实际方向时，正方向以实箭头表示，实际方向以虚箭头表示)。 $d\phi/dt > 0$ 表明这个向左的磁通绝对值随时间增大，由式 $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ ，则 $\frac{d\phi}{dt} > 0$ ，得到 $\varepsilon < 0$ ，即 ε 的实际方向与图 3—37 的正方向相反，如图 3—38a 的虚线箭头 ε 所示。由 ε 的实际方向可得感应电流 I 的实际方向 (与 ε 相同)，故 I 激发的磁通 ϕ' 向右。既然 ϕ 本身向左而且在增加，向右的 ϕ' 自然是阻碍 ϕ 的变化，可见由 $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ 得出的结论与楞次定律一致。(2) $\phi < 0$ 且 $d\phi/dt > 0$ (图 3—38b)。

$\phi < 0$ 说明磁通实际方向向右， $\frac{d\phi}{dt} > 0$ 表明后一时刻的 ϕ 大于前一时刻的 ϕ ，但两 ϕ 都小于零，故后一时刻的 $|\phi|$ 小于前一时刻的 $|\phi|$ 。可见 $\phi < 0$ 及 $d\phi/dt > 0$ 合起来表明 ϕ 的绝对值在减小。根据式 $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ ，由 $\frac{d\phi}{dt} > 0$ 得 $\varepsilon < 0$ ，因而 I 激发的磁通 ϕ' 向右，既然 ϕ 向右且绝对值在减小，向右的 ϕ' 就是阻碍原磁通减小。可见 $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ 得出的结论仍与楞次定律一致。(3) $\phi < 0$ 且 $d\phi/dt < 0$ (图 3—38c)。(4) $\phi > 0$ 且 $d\phi/dt < 0$ (图 3—38d)。(3)、(4)两种情况也均使 $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ 得出的结论与楞次定律一致。

对 $\phi = 0$ 且 $d\phi/dt > 0$ 或 $\phi = 0$ 且 $d\phi/dt < 0$ ，其结果也都符合楞次定律。当磁通量增加时， $\frac{d\phi}{dt} > 0$ 时，这时 $\varepsilon < 0$ ，即感生电流产生的磁场和原磁场方向相向；当磁通量减少时， $\frac{d\phi}{dt} < 0$ ，这时 $\varepsilon > 0$ (为正值)，即感生电流产生的磁场和原磁场方向相同。要注意，在中学阶段，物理量的大小和方向常常是分开讨论的。如 $\varepsilon = \frac{d\phi}{dt}$ ，仅反映了感应电动势的大小，其方向由楞次定律或右手定则来确定。

【动生电动势】

只要闭合电路的磁通有变化就有感应电动势，并不问这种变化的起因。事实上，磁通是磁感应强度 \vec{B} 对某一曲面的通量，磁通变化的原因无非是：(1) \vec{B} 不随时间变化（恒定磁场）而闭合电路的整体或局部在运动。这样产生的感应电动势叫做“动生电动势”。(2) \vec{B} 随时间变化而且闭合电路的任一部分都不动。这样产生的感应电动势叫做“感生电动势”。(3) \vec{B} 随时间变化且闭合电路也有运动。这时的感应电动势是动生电动势和感生电动势之迭加。

【动生电动势与洛仑兹力】

法拉第定律作为一个整体是一个实验定律，但其中的一部分，即 \vec{B} 不变而闭合电路运动所引起的动生电动势所服从的规律，却可由理论推导。电荷在磁场中运动时要受到洛仑兹力，这正是动生电动势产生的原因。设图 3—39 中导线 ab 以速度 v 向右平移，它里面的电子也随之向右运动。由于线框处在外加磁场中，向右运动的电子就要受到洛仑兹力。根据洛仑兹力的公式

$$\vec{f} = -e\vec{v} \times \vec{B}$$

其中 e 是电子电量绝对值，可知 \vec{f} 向下，它促使自由电子向下运动，闭合线框中便出现逆时针方向的电流。产生这个电流的动生电动势存在于 ab 段中，因此运动着的 ab 段可看成一个电源，其非静电力就是洛仑兹力。反过来，我们从洛仑兹力出发，则因为 \vec{v} 与 \vec{B} 垂直，所以每个电子所受的洛仑兹力（绝对值）

$$f = evB$$

单位正电荷所受洛仑兹力（绝对值）

$$\frac{f}{e} = vB$$

动生电动势（绝对值）

$|\varepsilon| =$ 单位正电荷从 b - a 时洛仑兹力的功 $= \int_b^a vBdl = vBl$ 式中 l 是导线 ab 的长度， v 是 ab 在单位时间内移动的距离，故 $v|$ 是它在单位时间内所扫过的面积，即线框 abcd 的面积的变化量，于是 vBl 便是线框的磁通在单位时间的变化量，即磁通变化率 $d\phi/dt$ ，可见

$$|\varepsilon| = \frac{d\phi}{dt}$$

这与法拉第定律一致，另外根据洛仑兹力的方向判断出的动生电动势方向也与楞次定律一致。以上虽然是从一个特例证明了由洛仑兹力可以推出关于动生电动势的法拉第定律（及楞次定律）。可以证明，这个结论对任意形状的闭合导线在任意恒定磁场中作任意运动造成的动生电动势都成立。这就表明，关于动生电动势的法拉第定律是洛仑兹力公式的必然结果。因此，一般情况下的动生电动势可由下式计算：

$$\varepsilon_{\text{动}} = \int \frac{\vec{f}_L}{-e} \cdot d\vec{l} = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

积分遍及整条导线。若为闭合导线，上式结果与法拉第定律结果相同；若为非闭合导线，法拉第定律不能直接使用（因 \oint 对非闭合曲线无意义），但上式仍然成立。

【磁场中的带电粒子】

当带电粒子束以速度 v 进入使它偏转的匀

强磁场区 B 时，将受磁场力 $f = qvB$ （当 \vec{v} 与 \vec{B} 垂直时） $= mv^2 / r$ ，所以 $r = \frac{mv}{dB}$ ，

如图3—40所示，为一电子束垂直进入一匀强磁场。设电子束偏转的夹角为 θ ，偏转量为 D ，偏转磁场中心到荧光屏距离为 L ，

$$\text{tg } \theta = \frac{D}{L}, \quad l = r \theta,$$
$$\therefore \frac{1}{r} = \frac{\theta}{L}.$$

$$\frac{D}{L} = \frac{1}{r}, \quad \text{即 } D = \frac{Ll}{r} = \frac{eL}{mv} B.$$

从该式中得知磁偏转量 D 和电子速率的一次方成反比，而电偏转量将和电子速率的平方成反比 $D = \frac{eL}{mv^2} E$ （假设电场方向垂直向上）。在加速电

压高，电子速率大的情况下，采用磁偏转比较合适。如果被偏转的是某种带正电的离子，则偏转方向将与电子的偏转方向相反。又因离子总比电子质量大很多，就是质量最小的氢离子（ H^+ ）（即质子）的质量也是电子质量的 1840 倍。所以离子偏转要比电子小得多。

【霍尔效应】

当电流垂直于外磁场方向通过导体时，在垂直于电流和磁场的方向的导体两侧产生电势差的现象。电势差的大小与电流和磁场强度的乘积成正比，而与物体沿磁场方向的厚度成反比。比例系数称霍尔系数，它同物体中载流子的符号和浓度有关。一般说来，金属和电解质的霍尔效应都很小，但半导体则较显著。因此，研究固体的霍尔效应可以确定它的导电类型以及其中载流子的浓度等；利用半导体的霍尔效应可以制成测量磁场强度的磁强计、微波技术及电子计算机中的元件等。如图 3—41a 所示，有一个厚度为 d 、宽为 l 的导电薄片，沿 x 轴通有电流强度 I 。当在 y 轴方向加以匀强磁场 B 时，在导体薄片两侧（图中的 A, A' ）产生电势差 $U_{AA'}$ 。这就是霍尔效应。假设所讨论导电薄片的载流子（参与导电的带电粒子）电量为 q 。若 $q > 0$ 时，其定向漂移速度 \vec{v} 。薄片中的这些正电荷的载流子在磁场 \vec{B} 中将受到洛伦兹力 $f_{洛} = + |q| \vec{v} \times \vec{B}$ ，由图 3—41a 可知，这些正电荷的载流子所得到的力沿 $+z$ 轴方向。若薄片中的载流子为负电荷， $q < 0$ ，则

其定向漂移速度 \vec{v}' 与 \vec{v} 的方向相反、受的洛伦兹力 $f_L = - |q| \vec{v}' \times \vec{B}$ 。虽然此力前有负号，但 \vec{v}' 与 \vec{v} 方向相反，所以 f_L 也沿 $+z$ 轴方向见图 3—41b。可见，由于 \vec{B} 的存在，定向运动的载流子（无论 $q > 0$ 或 $q < 0$ ）都将受到 $+z$ 轴方向的洛伦兹力

$$f_L = qvB$$

设载流子为正电荷，由于洛伦兹力的作用，正电荷将在 A 侧堆积，而在 A' 侧出现负电荷，并产生由 A 指向 A' 的横向电场 E_t 。显然 E_t 对 q 的作用力 $f_e = qE_t$ ，与 $f_L = qvB$ 反向，当

$$qE_t = qvB$$

或当电场 E_t 满足

$$E_t = vB$$

时，定向运动的载流子所受合力为零。这时载流子将回到与磁场 \vec{B} 不存在时相同的运动状态，同时 A, A' 两侧停止电荷的继续堆积，从而在 AA' 两侧建立一个稳定的电势差 $U_{AA'}$

$$U_{AA'} = \int_A^{A'} E_t dl = \int_0^L vB dl$$

所以

$$U_{AA'} = vBL$$

又电流强度 $I = nqvL \cdot d$ ， n 为单位体积的载流子数。则载流子的漂移速度

$$v = I/nqLd$$

将其代入 $U_{AA'} = vBL$ 得

$$U_{AA'} = \frac{1}{nd} \cdot \frac{IB}{d}$$

若载流子为负电荷，作与前相同的讨论，仍然得到上式，不过式中 $q < 0$ ，因而 $U_{AA}' < 0$ 即 A' 点的电势高于 A 点。只要我们将式中的 q 理解为代数

量，则 U_{AA}' 是霍耳效应电势差 $U_{AA}' = \frac{1}{nd} \frac{IB}{d}$ 的一般表达式。今式中

$$\frac{1}{nq} = k \quad \text{则}$$

$$U_{AA}' = k \frac{IB}{d}$$

k 称为霍耳系数，与所测材料的物理性质有关。当载流子 $q > 0$ 时， $k > 0$ ，所以 $U_{AA}' > 0$ ；当 $q < 0$ 时， $k < 0$ ，所以 $U_{AA}' < 0$ 。由 $U_{AA}' = k \frac{IB}{d}$ 可

由实验测得霍耳系数 k ，从而确定该材料的载流子浓度 n ，以及载流子的电性能 ($q > 0$ 或 $q < 0$)。霍耳效应广泛应用于半导体材料的测试和研究中。例如用霍耳效应以确定一种半导体材料是电子型 (n 型——多数载流子为电子) 还是“空穴”型 (p 型——多数载流子为空穴)。半导体内载流子的浓度受温度、杂质以及其它因素的影响很大，因此霍耳效应为研

究半导体载流子的浓度的变化提供了重要方法。 $k = \frac{1}{nq}$ 的形式，这只对单

原子价的金属符合，而对双原子价的金属以及半导体材料，霍耳系数不能写成这种形式，必须用量子理论来说明。但半导体材料的霍耳系数 k 与其载流子浓度 n 之间仍有反比关系。利用霍耳效应的霍耳元件有很多方面的用途：例如测量磁场；测量直流和交流电路中的电流强度和功率；转换信号，如把直流电流转换成交流电流并对它进行调制，放大直流或交流讯号等。

【磁单极子】

一种尚未发现的基本粒子。狄拉克在 1931 年将电磁场加以量子化，同时预测磁单极的存在。在指出磁单极所带的磁荷必须是 hc/e 的整数倍（正或负）。磁单极的存在可用以解释为何一切粒子的电荷总是 e 的整数倍（正或负）。一切已知的磁性物质都有两个磁极，但“磁单极”却是只有一个磁极的物质。

【电动机】

电动机也称为“马达”，把电能转变为机械能的机器。利用电动机可以把发电机所发生的大量电能，应用到生产事业中去。构造和发电机基本上一样，原理却正好相反，电动机是通于转子线圈以引起运动，而发电机则是借转子在磁场中之运动产生电流。为了获得强大的磁场起见，不论电动机还是发电机，都以使用电磁铁为宜。电动机因输入的电流不同，可分为直流电动机与交流电动机：(1)直流电动机——用直流电流来转动的电动机叫直流电动机。因磁场电路与电枢电路连结之方式不同，又可分为串激电动机、分激电动机、复激电动机；(2)交流电动机——用交流电流来转动的电动机叫交流电动机。种类较多，主要有：整流电动机——使串激直流发电机，作交流电动机用，即成此种电动机，因交流电在磁场与电枢电路中，同时转向，故力偶矩之方向恒保持不变，该机乃转动不停。此种电动机因兼可使用交、直流，故又称“通用电动机”。吸尘器、缝纫机及其他家用电器等多用此种电动机。同步电动机——电枢自一极转至次一极，恰与通入电流之转向同周期的电动机。此种电动机不能自己开动，必须用另一电动机或特殊辅助绕线使到达适当的频率后，始可接通交流电。倘若负载改变而使转速改变时，转速即与交流电频率不合，足使其步调紊乱，趋于停止或引起损坏。因限制多，故应用不广。感应电动机——置转子于转动磁场中，因涡电流的作用，使转子转动的装置。转动磁场并不是用机械方法造成的，而是以交流电通于数对电磁铁中，使其磁极性质循环改变，可看作为转动磁场。通常多采用三相感应电动机(具有三对磁极)。直流电动机的运动恰与直流发电机相反，即其电枢之定向旋转，由其上方向交变的电流产生的力偶所形成。交流电动机中的感应电动机，其强大的感应电流(涡流)产生于转动磁场中，转子上的铜棒对磁力线的连续切割，依楞次定律，此应电流有反抗磁场与转子发生相对运动的效应，故转子乃随磁场而转动。不过此转子转动速度没有磁场变换之速度快，否则磁力线将不能为铜棒所切割。

【电动机的反电动势】

由电动机的转子切割磁力线而产生，其方向与外加电压相反，故称为“反电动势”。此时通过电枢线圈的电流，正比于外加电压与反电动势之差。设 V 为外加电压， ϵ 为反电动势， R 为直流电动机之内电阻，则通过直流电动机的电流：

$$I = \frac{V + (-\epsilon)}{R} = \frac{V - \epsilon}{R}$$

$$V = \epsilon + IR$$

电动机在开始启动时，反电动势极小，故通入的电流很大。为避免将转子烧坏，可于电路中串联一个变阻器，当电机从启动到正常运转时其电阻逐渐减小，最后到达一个正常值。大型电动机中之启动器，就是此种装置。因直流电动机在开始转动时，反电动势极小，转子内有很大电流，因而能发出很强的转动力，因此电车推动器常用此种直流电动机。在电流通过电解槽时，由于电极或电解质发生化学变化，也有反电动势发生。

【自感】

电路中因自身电流变化而引起感应电动势的现象。在具有铁心的线圈中特别显著。如果在原线圈中通有电流，当电流发生变化时，不仅仅是付线圈因此而产生感生电动势，而且原线圈本身也造成自感电动势，有时这种电动势也被称为反电动势，因为它总是反抗本身电流的变化，这种现象在只有一个线圈的情况下，也是如此。如图 3—42 所示，线圈 1 和线圈 2 分别流有电流且电流随时间缓慢地改变，则穿过任何线圈的磁通量，除了由另外线圈所产生的以外，尚需考虑到自身的磁通量。故在线圈 2 的感生电动势，可被写成

$$\varepsilon_2 = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} - L_{22} \frac{dI_2}{dt}$$

同理线圈 1 的感生电动势除了决定于线圈 2 之电流变化，也决定于自身电流的改变，即

$$\varepsilon_1 = -L_{11} \frac{dI_1}{dt} - M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

如果只有一个线圈，则只剩下自感电动势

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$$

L 被称为自感，由线圈的几何性质而定。

【自感系数】

自感系数也叫做电感，或直接称为线圈的自感，常以符号 L 代表，是用来表示各种电器用具（如线圈）在自感现象方面之特性的一个物理量。线圈的自感系数，就是在线圈中电流强度每秒改变 1 安培时所产生的自感电动势来表示的。自感系数的单位为：当导体中电流强度每秒钟改变 1 安培时，若产生的自感电动势为 1 伏特，那么这导体的自感系数，就是 1 “亨利”。

【自感电动势】

沿导体流通的电流在导体周围建立起磁场，这个磁场穿过此导体所连成的电路。当导体中的电流强度发生变化时，穿过回路的磁通量就发生变化，由于电磁感应现象，回路中就有电动势发生，这就是所谓的自感电动势。这个电动势永远与产生这个电动势的电流变化方向相反（楞次定律）。即当电流增大时，自感电动势的方向和电路中电流方向相反；而在电流减小时，和电流流通的方向相同。由于这个缘故，当电路中有电流发生时，自感电动势作负功（因为它的方向与电流相反）。相反，当电路中电流消逝时，自感电动势作正功（因为它的方向与电流相同）。

【互感】

由于一个电路中电流变化，而在邻近另一个电路中引起感生电动势的现象。也就是相互感应，是两个电路间磁力的相互作用。如果两个电路的位置排列得使一个电路内的电流所产生的磁场能够贯穿另一个电路，则第一个电路内电流强度的变化会使这个磁场发生变化，而由于电磁感应现象，也就使第二个电路内发生了电动势。第一个电路的磁场贯穿第二个电路的部分越大，则两个电路之间的互感越强。如果线圈 1 与线圈 2 共轴地套在一起。当线圈 1 输入电流时，它所建立的磁场亦包含在线圈 2 内，因此线圈 1 磁通量的变化即等于线圈 2 内的变化。如果线圈 1 之螺线管长为 L ，总圈数为 N_1 ，横截面积为 A ；线圈 2 总圈数为 N_2 ，当线圈 1 输入缓变电流 I_1 ，则线圈 2 之感应电动势为

$$\varepsilon_2 = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

互感的实用单位为亨利，即

$$1 \text{ 亨利} = 1 \frac{\text{伏特}}{\text{安培 / 秒}} = 1 \text{ 欧姆秒}$$

相反地，如果电流输入线圈 2，则在线圈 1 的电动势即利用线圈 2 建立的磁场，计算线圈 1 之磁通量变化率，线圈 1 的感应电动势也与线圈 2 之电流变化率成正比，故

$$\varepsilon_1 = -M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

对任意两线圈总有 $M_{12}=M_{21}$ ，简记作 M 。 M 叫做两线圈间的互感系数（简称互感），它表征两线圈间互感耦合的强弱。互感系数与自感系数有相同的单位。可以证明，与自感系数类似，互感系数也只取决于两线圈的几何因素（形状、大小、匝数、相互配置等）及磁介质的特性而与电流无关（有铁心时除外）。互感在电工电子学技术中应用很广，变压器就是一个重要例子。变压器中有两个匝数不同的线圈，由于互感耦合，当在一个线圈两端加上交流电压时，另一个线圈两端将感应出数值不同的电压。但变压器不能用来变换直流电压，因为线圈在直流电压作用下出现直流电流，其磁场不随时间变化，故另一线圈不会出现感生电动势（因而不会出现电压）。在实验室中，为了方便地从低压直流电源获得很高的电压，可以使用感应圈。感应圈由套在同一铁心上的两个匝数悬殊的线圈及一个断续器构成，有无断续器是感应圈与变压器的主要差别所在。由于断续器的作用，原线圈 1 在接通直流电源时将出现变化电流，从而在副线圈 2 中感生出很高的电动势。互感现象在某些情况下也要带来不利的影 响。在电子仪器中，元件之间不希望存在的互感耦合会使仪器工作质量下降甚至无法工作。在这种情况下就要减少互感耦合，例如把容易产生不利的互感耦合的元件远离或调整方向以及采用“磁场屏蔽”的措施等。

【涡流】

“涡电流”的简称，也称为“傅科电流”。迅速变化的磁场在导体（包括半导体内引起的感应电流，其流动的路线呈涡旋形，故称“涡流”。磁场变化越快，感应电动势越大，因而涡流也就越强。涡流能使导体发热。在磁场发生变化的装置中，往往把导体分成一组相互绝缘的薄片（如变压器的铁心）或一束细条（如感应圈的铁心），以减低涡流强度，从而减少能量损耗。但在需要产生高温时，又可利用涡流来取得热量，如高频电炉就是根据这一原理设计的。这种金属内部出现的涡流，是由于电磁感应情况下的洛仑兹力或感生电场力在整块金属内部引起的感应电流。涡流流动情况可用电流密度描述，由于多数金属的电阻率很小，因此不大的感应电动势往往可以在整块金属内部激起强大的涡流。当一个铁心线圈通过交变电流时在铁心内部激起涡流。它和普通电流一样要放出焦耳热。利用涡流的热效应进行加热的方法叫做感应加热。冶炼金属用的高频感应炉就是感应加热的一个重要例子。当线圈通入高频交变电流时，在线圈中的坩埚里的被冶炼金属内出现强大的涡流，它所产生的热量可使金属很快熔化。这种冶炼方法的最大优点之一，就是冶炼所需的热量直接来自被冶炼金属本身，因此可达极高的温度并有快速和高效的特点。此外，这种冶炼方法易于控制温度，并能避免有害杂质混入被冶炼的金属中，因此适于冶炼特种合金和特种钢等。涡流的热效应对变压器和电机的运行极为不利。首先，它会导致铁心温度升高，从而危及线圈绝缘材料的寿命，严重时可使绝缘材料当即烧毁。其次，涡流发热要损耗额外的能量（叫做“涡流损耗”），使变压器和电机的效率降低。为了减小涡流，变压器和电机的铁心都不用整块钢铁而用很薄的硅钢片迭压而成。

【趋肤效应】

亦称为“集肤效应”。交变电流通过导体时，由于感应作用引起导体截面上电流分布不均匀，愈近导体表面电流密度越大。这种现象称“趋肤效应”。趋肤效应使导体的有效电阻增加。频率越高，趋肤效应越显著。当频率很高的电流通过导线时，可以认为电流只在导线表面上很薄的一层中流过，这等效于导线的截面减小，电阻增大。既然导线的中心部分几乎没有电流通过，就可以把这中心部分除去以节约材料。因此，在高频电路中可以采用空心导线代替实心导线。此外，为了削弱趋肤效应，在高频电路中也往往使用多股相互绝缘细导线编织成束来代替同样截面积的粗导线，这种多股线束称为辫线。在工业应用方面，利用趋肤效应可以对金属进行表面淬火。

【电磁阻尼】

当一块可在磁铁两极间摆动的铜板（付科摆），电磁铁未通电时，铜板要摆动多次才停止；电磁铁一旦通电，摆动的铜板很快停下。这种现象叫做“电磁阻尼”。电磁阻尼现象不难用楞次定律来解释。按照楞次定律的第二种表述：导体在磁场中运动时由于出现感应电流（在此就是涡流）而受到的安培力必然阻碍导体的运动。图 3—43 所示为

一付科摆在磁场中摆头的示意图。近似地认为两极间的磁场集中在虚线所围的矩形内。“X”表示磁场方向垂直纸面且背离读者。由于摆的前半部分磁通在减小，涡流的磁场应与磁铁磁场同向；摆的后半部分磁通在增大，涡流的磁场应与磁铁磁场反向。因此，涡流方向大致如图中箭头所示，以涡流线 abcd 为例分析受力情况。ab 边和 cd 边受力不是向上就是向下，对摆动没有影响。ad 边尚未进入磁场，故不受力。由左手定则可知 bc 边受力方向向右，即为阻力。电磁阻尼在实际中应用很广。使用电学测量仪表时，为了便于读数，希望指针能迅速稳定在应指的位置上而不左右摇摆。为此，一般电学测量仪表都装有阻尼器。它就是用电磁阻尼的原理来得到阻尼作用的。此外，磁电式电流计的线圈常绕在一个封闭铝框上，测量时，铝框随线圈在磁场中转动，铝框由于感应电流面受到安培力，同样起到电磁阻尼作用。除了仪表之外，电磁阻尼作用还常用于电气机车的电磁制动器中。

【电磁驱动】

在磁场运动时带动导体一起运动，这种作用称为“电磁驱动”作用。如图 3—44 所示，当磁铁转动时，设

图 3—44

某时刻磁铁的 N 极处在金属圆盘的半径 $0a$ 处 根据楞次定律此时在圆盘上将产生如图所示的涡流，结果在该半径处形成由 a 流向 0 处的感应电流。该感应电流处于旋转磁场中，将受到磁场的作用力。此力将产生一个促使金属圆盘按磁场旋转方向发生转动的力矩。此时从磁铁 S 极处产生的感应电流所受的力而产生的力矩，同样是促使金属圆盘按磁场旋转的方向发生转动。结果金属圆盘按磁场的转动方向发生旋转。但是如果圆盘的转速达到了与磁场转速一样，则两者的相对速度为零，感应电流便不会产生，这时电磁驱动作用便消失。所以在电磁驱动作用下，金属圆盘的转速总要比磁铁或磁场的转速小，或者说两者的转速总是异步的。感应式异步电动机就是根据这个原理制成的。电磁驱动作用可用来制造测量转速的电表，这类转速表常称为磁性式转速表。我们知道在发电机中为了保证产生的交流电频率 $f = 50 \text{ 秒}^{-1}$ ，就必须控制转子的转速。在其他情况中，为了充分发挥机器的效率和正确地使用机器，也常需测量其转速，然后进一步加以控制和调节。用磁性式转速表测量转速时，将被测机器的转轴通过连接器和传动机构与转速表中的永久磁铁的转轴相连，永久磁铁一般是由一块充以四个极的磁钢制成，这便形成一个旋转磁场。在永久磁铁的上方有一个金属圆盘，称为感应片。感应片与永久磁铁间有很小的气隙，两者互不接触。当永久磁铁随着机器的转轴旋转时，感应片上将产生涡流。这涡流又将受到这旋转磁场的作用力，结果感应片被驱动，从而沿永久磁铁的旋转方向运动。感应片的转动将带动与感应片转轴相连的弹簧，将其扭紧，从而产生弹性恢复转矩。最后，当感应片转过一定的角度，由电磁驱动作用产生的转矩刚好与弹性恢复的转矩抵消时，便达到一个暂时平衡状态。由机器带动转动的永久磁铁转速越快，感应片受到的电磁驱动作用所产生的转矩越大，因而指针的偏转角度就越大。这样，便可通过指针的偏转角度来显示机器的转速。

【交流电】

简称“交流”。一般指大小和方向随时间作周期性变化的电压或电流。它的最基本的形式是正弦电流。我国交流电供电的标准频率规定为 50 赫兹。交流电随时间变化的形式可以是多种多样的。不同变化形式的交流电其应用范围和产生的效果也是不同的。以正弦交流电应用最为广泛，且其他非正弦交流电一般都可以经过数学处理后，化成为正弦交流电的迭加。正弦电流（又称简谐电流），是时间的简谐函数

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi_0)$$

图 3—45 表示上式的电流 i 随时间的变化规律，由此看出：正弦交流电需用频率、峰值和位相三个物理量来描述。交流电

所要讨论的基本问题是电路中的电流、电压关系以及功率（或能量）的分配问题。由于交流电具有随时间变化的特点，因此产生了一系列区别于直流电路的特性。在交流电路中使用的元件不仅有电阻，而且有电容元件和电感元件，使用的元件多了，现象和规律就复杂了。

【交流电的频率和周期】

频率是表示交流电随时间变化快慢的物理量。即交流电每秒钟变化的次数叫频率，用符号 f 表示。它的单位为周/秒，也称赫兹常用“Hz”表示，简称周或赫。例如市电是 50 周的交流电，其频率即为 $f=50$ 周/秒。对较高的频率还可用千周 (kC) 和兆周 (MC) 作为频率的单位。

$$1 \text{ 千周 (kC)} = 10^3 \text{ 周/秒}$$

$$1 \text{ 兆周 (MC)} = 10^3 \text{ 千周 (kC)} = 10^6 \text{ 周/秒}$$

例如，我国第一颗人造地球卫星发出的讯号频率是 20.009 兆周，亦即它发出的是每秒钟变化 20.009×10^6 次的交变讯号。交流电正弦电流的表示式中 $i = I_m \sin(\omega t + \phi_0)$ 中的 ω 称为角频率，它也是反映交流电随时间变化的快慢的物理量。角频率和频率的关系为

$$\omega = 2\pi f。$$

交流电随时间变化的快慢还可以用周期这个物理量来描述。交流电变化一次所需要的时间叫周期，用符号 T 表示。周期的单位是秒。显然，周期和频率是为倒数的，即

$$f = \frac{1}{T} \text{ 或 } T = \frac{1}{f}。$$

例如，频率为 50 周的市电，其周期 $T = \frac{1}{f} = 0.02$ 秒；频率为 20.009 兆周的

讯号，其周期 $T = \frac{1}{f} = 5 \times 10^{-8}$ 秒。由此可见，交流电随时间变化越快，

其频率 f 越高，周期 T 越短；反之，频率 f 越低，周期 T 越长。

【交流电流的峰值】

简谐函数（又称简谐量）是时间的周期函数。其简谐电流

$$=I_m \sin(\omega t + a)$$

中的 I_m 叫做电流的峰值， i 为瞬时值。应该指出，峰值和位相是按上式中 I_m 为正值的要求定义的。如对下面形式的函数

$$i = -5 \sin(\omega t + a)$$

不应认为峰值为 -5、初相为 a ，而应把函数先写成

$$i = 5 \sin(\omega t + a + \pi)$$

从而看出其峰值为 5，初位相为 $a + \pi$ 。

【交流电流的有效值】

在交流电变化的一个周期内，交流电流在电阻 R 上产生的热量相当于多大数值的直流电流在该电阻上所产生的热量，此直流电流的数值就是该交流电流的有效值。例如在同样两个电阻内，分别通以交流电 $i(t)$ 和直流电 I ，通电时间相同，如果它们产生的总热量相等，则说这两个电流是等效的。交流电的有效值通常用 U 或 (I) 来表示。 U 表示等效电压， I 表示等效电流。设一电阻 R ，通以交流电 i ，在很短的一段时间 dt 内，流经电阻 R 的交流电可认为是恒定的，因此在这很短的时间内在 R 上产生的热量

$$dW = i^2 R dt$$

在一个周期内交流电在电阻上产生的总热量

$$W = \int_0^T dW = \int_0^T i^2 R dt$$

而直流电 I 在同一时间 T 内在该电阻上产生的热量

$$W = I^2 RT$$

根据有效值的定义有

$$I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt.$$

所以有效值

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

根据上式，有时也把有效值称为“平均根值”。对正弦交流电，有 $i = I_m \sin \omega t$ ，故

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}$$

而其中

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$$

所以

$$\begin{aligned} I &= I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt} \\ &= I_m \sqrt{\frac{1}{2T} \left(t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right) \Big|_0^T} \\ &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \end{aligned}$$

可见正弦交流电的有效值等于峰值的 0.707 倍。通常，交流电表都是按有效值来刻度的。一般不作特别说明时，交流电的大小均是指有效值。例如市电 220 伏特，就是指其有效值为 220 伏特，它的峰值 $U_m = \sqrt{2}U = 311$ 伏特。

【交流电的平均值】

交流电在半周期内，通过电路中导体横截面的电量 Q 和某一直流电在同样时间内通过该电路中导体横截面的电量相等时，这个直流电的数值就称为该交流电在半周期内的平均值。若以 I 来表示交流电 i 的平均值，则有

$$\bar{I} = \frac{Q}{T/2} = \frac{\int_0^{T/2} i dt}{T/2} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt$$

对正弦交流电流，即 $i = I_m \sin \omega t$ ，则平均值与峰值的关系为

$$\bar{I} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{T} I_m \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = \frac{2}{T} I_m = 0.637 I_m$$

故，正弦交流电的平均值等于峰值的 0.637 倍。对正弦交流电来说在上半周期内，一定量的电量以某一方向流经导体的横截面，在下半周期内，同样的电量却以相反的方向流经导体的横截面。因而在一个周期内，流经导体横截面的总电量等于零，所以在一个周期内正弦交流电的电流平均值等于零。如果直接用磁电式电表来测量交流电流，将发现电表指针并不发生偏转。这是因为交流电流一会儿正，一会儿为负，

磁电式电表的指针无法适应。如果附有整流器的磁电式电表（例如万用电表中的交流档）接入交流电路中如图 3 - 46 所示。那么在一周期内，只有正半周的电流通过电表，如图 3 - 47 中

的实线所示，负半周期电流则过二极管 D_2 不通过表，图 3—47 中的虚线所示。在一周期内通过电表的电流平均值为

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T i dt$$

因为 $\int_{T/2}^T i dt = 0$ （没有电流流过表）所以

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{T}$$

即半波整流后交流电的平均值和最大值的的关系为

$$\bar{I} = \frac{I_m}{T}$$

而交流电的有效值和最大值的的关系为

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, I_m = \sqrt{2}I$$

所以

$$\bar{I} = \frac{I_m}{T} = \frac{\sqrt{2}}{T} I = 0.45I$$

即正弦交流电经半波整流后的平均值只有有效值的 0.45 倍。

【位相】

交流电中 $i = I_m \sin(\omega t + a)$ 中的 $(\omega t + a)$ 叫做位相（位相角）。它表征函数在变化过程中某一时刻达到的状态。例如，在上式表

示的简谐函数，当 $\omega t + a = \frac{\pi}{2}$ 时达到取正峰值的阶段，当 $\omega t + a = 0$ 时达到取

零值的阶段，等等。 a 是 $t=0$ 时的位相，叫初相。在实际问题中，更重要的是两个交流电之间的位相差。图 3—48 画出了电压 u_1 和 u_2 的三种不同的位相差。图 3 - 48a 中可看到两个电压随时间而变化的步调是一致的，同时到达各自的峰值，又同时下降为零。故称这两个电压为同位相，也就是说它们之间的位相差为零。图 3 - 48b 中两个电压随时间变化的步调是相反的， u_1 为正半周

时， u_2 为负半周， u_1 达到正最大值时， u_2 达到负的最大值，则这两个电压的位相相反，或者说它们之间的位相差为 π 。图 3—48c 中两个电压的变化步调既不一致也不相反，而是有一个先后，它们之间的位相差介于 0 与 π 之间。从图 3 - 48c 中可以看出 u_1 和 u_2 之间的位相差是 $\pi/2$ 。总之，两个交流电压或电流之间的位相差是它们之间变化步调的反映。

【交流电路中的电阻】

纯电阻电路是最简单的一种交流电路。白炽灯、电炉、电烙铁等的电路都可以看成是纯电阻电路。虽然纯电阻的电压和电流都随时间而变，但对同一时刻，欧姆定律仍然成立，即

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

式中 $I_m = \frac{U_m}{R}$ 为电流的峰值。纯电阻电路中的电压和电流的波形如图

3—49b 所示。对纯电阻电路有：（1）通过电阻 R 的电流和电压的频率相同；（2）通过电阻 R 的电流峰值和电压峰

值的关系是 $I_m = \frac{U_m}{R}$ 以及有效值之间的关系为 $I = \frac{U}{R}$ ；（3）通过电阻 R 的电流和电压同位相。图 3 - 49a 为纯电阻电路示意图。

【交流电路中的电感】

如图 3—50 所示，一个忽略了电阻的空心线圈和交流电流源组成的电路称为“纯电感电路”。在纯电感电路中，电感线圈两端的电压 u 和自感电动势 e_L 间（当约定它们的正方向相同时）有

$$u = -e_L$$

因自感电动势

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

故有

$$u = L \frac{di}{dt}$$

如果电路中的电流为正弦交流电流 $i = I_m \sin \omega t$ ，则

$$\begin{aligned} u &= L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt} (I_m \sin \omega t) = I_m L \omega \cos \omega t \\ &= I_m L \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ &= U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

其中 $U_m = I_m L$ 为电感两端电压的峰值。纯电感电路中的电压和电流波形如图 3 - 51 所示。由此可见，对于纯电感电路：(1)通过电感 L 的电流和电压的频率相同；(2)通过电感 L 的电流峰值和电压峰值的关系是

$$U_m = I_m L$$

其有效值之间的关系为

图 3—51

$$U = I L$$

由上式可知，纯电感电路的电压大小和电流大小之比为

$$\frac{U}{I} = \omega L$$

L 称为电感元件的阻抗，或称感抗，通常用符号 X_L 表示，即

$$X_L = L = 2 \pi f L。$$

式中，频率 f 的单位为赫兹，电感 L 的单位为亨利，感抗 X_L 的单位为欧姆。

这说明，同一电感元件（ L 一定），对于不同频率的交流电所呈现的感抗是不同的，这是电感元件和电阻元件不同的地方。电感元件的感抗随交流电的频率成正比地增大。电感元件对高频交流电的感抗大，限流作用大，而对直流电流，因其 $f=0$ ，故 $X_L=0$ ，相当短路，所以电感元件在交流电路中的基本作用之一就是“阻交流通直流”或“阻高频通低频”。各种扼流圈就是这方面应用实例；(3)在纯电感电路中，电感两端的电压位相超前其电流位相 $\frac{\pi}{2}$ 。这是因为电感的基本规律是 $u = L \frac{di}{dt}$ ，即电压和电流的变化率成正比，而不是和电流的大小成正比。对于正弦交流电，当电流 i 为最

大值时，其变化率 $\frac{di}{dt} = 0$ ，因此电感两端的电压 u 为零。当电流为零时，其变化率为最大，电压也最大。所以两者的相位差为 $\frac{\pi}{2}$ 。

【交流电路中的电容】

当把正弦电压 $u=U_m \sin \omega t$ 加到电容器时，如图 3-52 所示，由于电压随时间变化，电容器极板上的电量也随着变化。这样在电容器电路中就有电荷移动。如果在 dt 时间内，电容器极板上的电荷变化 dq ，电路中就要有 db 的电荷移动，因此电路中的电流

$$i = \frac{dq}{dt}$$

图 3—52

对电容器来说，其极板上的电量和电压的关系是

$$q=CU$$

因此有

$$\frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CU) = C \frac{du}{dt}$$

将此关系式及电压 u 的表示式代入 $i = C \frac{du}{dt}$ ，得

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{d}{dt}(U_m \sin \omega t) = U_m C \omega \cos \omega t \\ &= U_m \omega C \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

其中 $I_m=U_m \omega C$ 为电路中电流的峰值。纯电容电路中的电压和电流波形如图 3-53 所示。由此可见，对于纯电容电路：(1)通过电容 C 的电流和电压的频率相同；(2)通过电容 C 的电流

图 3—53

峰值和电压峰值的关系是

$$I_m = U_m \omega C$$

其有效值之间的关系为

$$I = U \omega C$$

由上式可知，纯电容电路中的电压大小与电流大小之比为

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C}$$

$\frac{1}{\omega C}$ 称为电容元件的阻抗，或简称为容抗，通常用符号 X_c 表示，即

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

式中频率 f 的单位为赫兹，电容 C 的单位是法拉，容抗 X_c 的单位为欧姆。可见，同一电容元件 (C 一定)，对于不同频率的交流电所呈现的容抗是不同的。由于电容器的容抗与交流电的频率成反比，因此频率越高，容抗就越小，频率越低，容抗就越大。对直流电来讲 $f=0$ ，容抗为无限大，故相当于断路。所以电容元件在交流电路中的基本作用之一就是“隔直流，通交流”或“阻低频，通高频”；(3)在纯电容电路中，其电流的位相超前

于电容两端的电压 $\frac{\pi}{2}$ 。这是因为电容的基本规律是 $i = C \frac{du}{dt}$ ，即电流 i 和电压 u 的变化率成正比，而不是和电压的大小成正比。对于正弦交流电，当电压为零时，其变化率 $\frac{du}{dt}$ 为最大，故电流为最大，当电压为最大值时，其变化率为零，故电流为零。可见两者的位相差 $\frac{\pi}{2}$ 。

【交流电路中的欧姆定律】

在交流电路中，电压、电流的峰值或有效值之间的关系和直流电路中的欧姆定律相似，其等式为 $U=IZ$ 或 $I =$

$\frac{U}{Z}$ ，式中 I 、 U 都是交流电的有效值， Z 为阻抗，该式就是交流电路中的

欧姆定律。应该注意的是（即与直流电路欧姆定律不同的地方）：由于电压和电流随元件不同而具有位相差，所以电流和电压的有效值之间一般不是简单的数量的比例关系。下面分两种基本电路来分析：（1）在串联电路中，如图 3 - 54 所示， R 、 L 、 C 上的总电压不等于各段分电压的和，即

$$U \neq U_R + U_L + U_C。$$

因为电感两端的电压相位超前电流相位 $\frac{\pi}{2}$ ，电容两端电压相位落后电流相

位 $\frac{\pi}{2}$ 。所以， R 、 L 、 C 上的总电压，决不是各个元件上电压的代数和而

是矢量和。在电阻 R 上

$$i_R = \frac{U_R}{R} = \frac{U_R}{X_R}$$

在电感 L 上， $Z_L = \omega L$

$$i_L = \frac{U_L}{\omega L} = \frac{U_L}{X_L}$$

在纯电容上， $Z_C = \frac{1}{\omega C}$

$$i_C = \frac{U_C}{1/\omega C} = \frac{U_C}{X_C}$$

合成总电压 $U_m = \sqrt{(I_m X_L - I_m X_C)^2 + (I_m R)^2}$

$$= I_m \sqrt{(X_L - X_C)^2 + R^2} = I_m Z。$$

则 $Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2 + R^2}$ ，得 $I_m = \frac{U_m}{Z}$ ，而电压和电流的相位差

$$\phi = \arctg \frac{X_L - X_C}{X_R}$$

图 3 - 55 所示；（2）在并联电路中，如图 3 - 56 所示，在 R 、 L 、 C 上每个元件两端的瞬时电压都相等为 U 。每分路之间的电流和两端电压之间的关系为

$$i_c = \frac{U_c}{X_c} = \frac{U}{X_c}$$

$$i_L = \frac{U_L}{X_L} = \frac{U}{X_L}$$

$$i_R = \frac{U_R}{X_R} = \frac{U}{R}$$

不同元件上电流的相位也各有差异。纯电感上电流相位落后于纯电阻电流相位 $\frac{\pi}{2}$ ，纯电容上电流相位超前纯电阻电流相位 $\frac{\pi}{2}$ 。所以分电流的矢量和即总电流

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{i_R^2 + (i_c - i_L)^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_c} - \frac{U}{X_L}\right)^2} \\ &= U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right)^2} = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \end{aligned}$$

$$\text{令 } \frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}, \text{ 得 } I = \frac{U}{Z}。$$

【交流电功率】

在交流电中电流、电压都随时间而变化，因此电流和电压的乘积所表示的功率也将随时间而变化。交流电功率可分为：瞬时功率、有功功率、视在功率（又叫做总功率）以及无功功率。(1)瞬时功率 (P_t)。由瞬时电流和电压的乘积所表示的功率 $P_t=i(t) \cdot u(t)$ ，它随时间而变。对任意电路， t 与 u 之间存在着相位差 $i(t)=I_m \sin \omega t$ ， $u(t)=U_m \sin(\omega t + \phi)$ 。即

$$P_t=iu=I_m \sin \omega t \cdot U_m \sin(\omega t + \phi) \\ =IU[\cos \phi - \cos(2\omega t + \phi)]$$

在纯电阻电路中，电流和电压之间无相位差，即 $\phi=0$ ，瞬时功率 $P_t=IU(1-\cos 2\omega t)$ 。(2)有功功率 (\bar{P})。用电设备平均每单位时间内所用的能量，或在一个周期内所用能量和时间的比。在纯电阻电路中，

$$\bar{P}_R = \frac{\int_0^T P_R(t) dt}{T} = \frac{\int_0^T IU(1 - \cos 2\omega t) dt}{T} = IU$$

纯电阻电路中有功功率和直流电路中的功率计算方法表示完全一致，电压和电流都用有效值计算。在纯电感电路中（电压超前电流 $\frac{\pi}{2}$ ），

在纯电容电路中（电流超前电压 $\frac{\pi}{2}$ ），

$$\bar{P}_C = \frac{1}{T} \int_0^T P_C dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \cos \omega t \sin \omega t dt = 0$$

以上说明电感电路和电容电路中能量只能在电路中互换，即电容与电源、电感与电源之间交换能量，对外无能量交换，所以它们的有功功率为零。对一般电路的平均功率为

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P_t dt = \frac{1}{T} \int_0^T IU[\cos \phi - \cos(2\omega t + \phi)] dt。$$

(3)视在功率 (S)。在交流电路中，电流和电压有效值的乘积叫做视在功率，即 $S=IU$ 。它可用来表示用电器本身所容许的最大功率（即容量）。(4)无功功率 (Q)。在交流电路中，电流、电压的有效值与它们的相位差的正弦的乘积叫做无功功率，即 $Q=IU \sin \phi$ 。它和电路中实际消耗的功率无关，而只表示电容元件、电感元件和电源之间能量交换的规模。有功功率，无功功率和视在功率之间的关系，可由图 3 - 57 所示的“功率三角形”来表示。

图 3—57

【功率因数】

它是发电机输送给负载的有功功率和视在功率的比，即

$$\frac{\bar{P}}{S} = \frac{IU \cos\phi}{IU} = \cos\phi$$

可见功率因数 $\cos\phi$ 是反应电能利用率大小的物理量。提高用电设备的功率因数就可以提高发电机总功率中的有功功率。

【变压器】

两个（或多个）有互感耦合的静止线圈的组合叫做变压器。变压器的通常用法是一个线圈接交变电源而另一线圈接负载，通过交变磁场把电源输出的能量传送到负载中。接电源的线圈叫做原线圈，接负载的线圈叫做副线圈。原、副线圈所在的电路分别叫做原电路（原边）及副电路（副边）。原、副线圈的电压（有效值）一般不等，变压器即由此得名。变压器可分为铁心变压器及空心变压器两大类。铁心变压器是将原、副线圈绕在一个铁心（软磁材料）上，利用铁心的高 μ 值加强互感耦合，广泛用于电力输配、电工测量、电焊及电子电路中。空心变压器没有铁心，线圈之间通过空气耦合，可以避免铁心的非线性、磁滞及涡流的不利影响，广泛用于高频电子电路中。图 3 - 58 是变压器原理图。设变压器的原、

图 3—58

副线圈中的电流所产生的磁感应线全部集中在铁心内（即忽略漏磁），因此铁心中各个横截面上的磁感应通量 都一样大小。由于 的变化，将使绕制在铁心上的每一匝线圈中都产生同样的感应电动势 $-\frac{d\phi}{dt}$ 。设变压器的原线圈共有 N_1 匝，则原线圈中总感应电动势

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

副线圈共有 N_2 匝，总感应电动势

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

电源电压是按正弦函数规律变化的，因此铁心中的磁感应通量 也将按正弦规律变化，设

$$\phi = \phi_m \sin \omega t$$

其中 ϕ_m 为铁心中交变磁感应通量的峰值。因此

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -\omega N_1 \phi_m \cos \omega t \\ &= \omega N_1 \phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \varepsilon_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

其中 $\varepsilon_{1m} = N_1 \phi_m$ ，为 ε_1 的峰值。其有效值为

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \phi_m}{\sqrt{2}}$$

同样

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = \varepsilon_{2m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

其中 $\varepsilon_{2m} = N_2 \phi_m$ ，为 ε_2 的峰值。有效值为

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_2 \phi_m}{\sqrt{2}}$$

所以

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_{1m}}{\varepsilon_{2m}} = \frac{N_1}{N_2}$$

即变压器的原、副线圈中感应电动势的有效值（或峰值）与匝数成正比。在实际的变压器中，原、副线圈都是用漆包线绕制的，其电阻 r 很小，故可略去由于线圈电阻而引起的电压降 I_r 。这样线圈两端的电压在数值上就等于线圈中的感应电动势。原线圈两端的电压即是变压器的输入电压 U_1 ，故

$$U_1 = \varepsilon_1$$

同样副线圈两端的电压就是加在负载上的变压器的输出电压 U_2 ，即

$$U_2 = \varepsilon_2$$

因此

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

上式说明：变压器的输入电压与输出电压之比，等于它的原、副线圈匝数之比。这是变压器的最重要的一个特性。当 $N_2 > N_1$ 时 $U_2 > U_1$ ，这时变压器起升压作用；当 $N_2 < N_1$ 时， $U_2 < U_1$ ，这时变压器起降压作用。变压器在改变电压的同时，还起着改变电流的作用。在变压器空载时，副线圈中只有感应电动势，没有电流。但在原线圈中都有一定的电流 I_{10} ， I_{10} 称为励磁电流，它的作用是在铁心中激发一定的交变磁感应通量 Φ ，从而在原线圈中引起一定的感应电动势 ε_1 ，以平衡输入电压 U_1 ，即 $U_1 = \varepsilon_1$ 得到满足。当副线圈与负载接通出现电流 I_2 时， I_2 将在铁心中产生一附加的磁感应通量 Φ_2' 。根据楞次定律， Φ_2' 将削弱铁心中原有的磁感应通量 Φ 的变化，从而使原线圈中的感应电动势 ε_1 变小。但由于输入电压 U_1 是不因变压器有无负载而改变，改变小的 ε_1 便不再与 U_1 平衡，结果将使原线圈中的电流比空载时大，设电流增大了 I_1' ，这一电流也在铁心中产生一附加磁感应通量 Φ_1' ，以补偿 Φ_2' 对原线圈电路的影响。当 Φ_1' 和 Φ_2' 两者的数值相等时，铁心中的磁感应通量又恢复到原来的值 Φ ，原线中的感应电动势也恢复到原来的值 ε_1 ，于是 ε_1 又和 U_1 相平衡，整个电路又恢复到平衡状态。因为 Φ_1' 是由磁通势 $N_1 I_1'$ 引起的， Φ_2' 是由磁通势 $N_2 I_2$ 引起的，故只有当

$$N_1 I_1' = N_2 I_2$$

Φ_1' 和 Φ_2' 才能相互抵消。这时原线圈中的总电流 $I_1 = I_{10} + I_1'$ 。当变压器接近满载（即负载电阻较小、变压器接近它的额定电流）时， $I_1' \gg I_{10}$ ，故 $I_1 \approx I_1'$ 。于是

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

上式说明：变压器接近满载时，原、副线圈中的电流与它们的匝数成反比。对于升压变压器来说 $N_2 > N_1$ ，故 $I_2 < I_1$ ，即电流变小；对于降压变

压器，由于 $N_2 < N_1$ ，故 $I_2 > I_1$ ，即电流变大。通常所说“高压小电流，低压大电流”就是这个道理。这也符合能量守恒定律。其变压器的输入功率应等于输出功率。电压升高，电流必然以相应的比例减小。否则便破坏了能量守恒与转化定律。变压器的种类很多，常用的几种是：电力变压器，电源变压器，耦合变压器，调压变压器等。

【电力变压器】

这种变压器是用于输电网路。因为输电线上的功率损耗正比于电流的平方，所以远距离输电时，就要利用变压器升高电压以减小电流。这种高电压经高压输电线传送到城市、农村后，再用降压变压器逐级把电压降到380伏特和220伏特，供一般的用电户使用。电力变压器的容量通常较大。都是一些大型的变压器。

【电源变压器】

不同的电子仪器和设备以及同一仪器电路的不同部位往往需要各种不同的电压，如电子管的灯丝电压是 6.3 伏特，其板极电压需要 300 伏特；各种晶体管的集电极工作电压是几伏至几十伏；示波管的加速极电压达 3000 伏特等等。通常都用电源变压器将 220 伏特的市电电压变到各种需要电压。

【耦合变压器】

所谓耦合，在物理学上指两个或两个以上的体系或两种运动形式之间通过各种相互作用而彼此影响以至联合起来的现象，例如两个线圈之间的互感是通过磁场的耦合。无线电线路中常用作极间耦合的变压器，如收音机的中周、输入变压器、输出变压器都属于这一类，称为耦合变压器。耦合变压器的作用是多方面的，它还可以用来达到阻抗匹配等。

【调压变压器】

亦称为“自耦变压器”在生产和科学研究中，常需要在一定范围内连续调节交变电压，供这种用途的变压器叫做调压变压器。通常调压变压器就是一个带有铁心的线圈，线圈由漆包线绕成，以便滑动触点 c 能在各匝上移动，从而在 c、b 两端获得可调的交流电压。如图 3 - 59 所示。大容量的调压变压器也用于输电网路，以调节电网中的电压。

图 3—59

【互感器】

互感器也是一种变压器，一般它用于测量高电压和大电流。这是因为高电压和大电流均不能用交流伏特表和安培表直接去测量。而是借助于互感器把高电压变成低电压，或把大电流变成小电流，而把电压表或电流表接在副线圈一边（即低电压或小电流线圈的一边）测出低电压或小电流。根据伏特表或安培表测出的电压数值或电流的数值，再利用已知的变压比或电流比可计算出高压线路中的电压或电

图 3—60

流。其接法如图 3 - 60 所示。从图中可以看出，在测量电压时是把原线圈并联在高电压电路中，副线圈上接入交流伏特表。且原线圈的线圈圈数多，副线圈的线圈圈数少。而测量电流时是把原线圈串联在被测电路中，副线圈接交流安培表，而原线圈的线圈圈数少，副线圈的线圈圈数多。这正是变压器的性质所决定的。

【隔直电容】

利用电容器的容抗与交流电的频率成反比的特性，在电路中用于隔离直流电，而只允许交流电通过的电容，在此电路中叫“隔直电容器”。例如，在放大器线路中的输入端和输出端，常设置这种电容，一方面隔断放大器的输入端与信号源之间，输出端与负载之间的直流通道，保证放大器的静态工作点不因输入、输出的连接而发生变化，另一方面又要保证需要放大的交流信号可以畅通地经过放大器放大，沟通信号源—放大器—负载三者之间的交流通道。隔直电容的名称是指电容器在电路中的作用而言。

【旁路电容】

可将混有高频电流和低频电流的交流电中的高频成分旁路掉的电容，称做“旁路电容”。例如当混有高频和低频的信号经过放大器被放大时，要求通过某一级时只允许低频信号输入到下一级，而不需要高频信号进入，则在该级的输出端加一个适当大小的接地电容，使较高频率的信号很容易通过此电容被旁路掉（这是因为电容对高频阻抗小），而低频信号由于电容对它的阻抗较大而被输送到下一级放大。旁路电容的大小一定要选择适当，若电容量大就有可能低频信号也被旁路，因为容抗

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ ，C值大则容抗小。如果电容量小，又不能充分的旁路高频。

【远程输电】

因为输电线上的功率损耗正比于电流的平方，所以在远距离输电时就要利用大型电力变压器升高电压，以减小电流，方能有效地减少电能在输电线路上的损失。由发电厂发出的电功率是一定的，它决定于发电机组的发电能力。经过升压变压器可以把电压升高，但变压器却不能改变其功率，由

$$P=IU$$

得

$$I = \frac{P}{U}$$

由此看出，电压升高，电流减小。这一点也是和变压器的原理相一致的。对升压变压器来讲初级的电压低，电流大，而次级的电压高而电流小。这正是 $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$ ， $\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$ 的必然结果。这样的结果正是远程输电所需要的。

因为在输电线路上的能量损失以其功率表示，即

$$P_{\text{损}}=I^2R$$

当电流减小 n 倍时，其功率损失将减小 n^2 倍。故采取升压减流是减少电能损失的有效办法。设想我们用减小电阻 R 的方法来减少电能损失是不太有效的。因为远程输电路程较长，要减小电阻 R ，对同种材料来说就必须增加导线的横截面积。其截面增大 n 倍，也只能把电能损失减少 n 倍，这样导线就变得很粗，造成材料的浪费。显然，它远不如高压输送来得经济。当用高电压把电能输送到用电区后，需要逐次把电压降至 380 伏特和 220 伏特供给用户。这要靠降压变压器的功能。远程输电是变压器的一大功能。

【交流电的整流】

将交流电变成直流电的过程叫做“交流电整流”。整流可分为半波整流、全波整流、桥式整流等几种形式。通常的整流装置都是利用电子管和晶体二极管的单向导电的性能来整流的。例如，用锗、硅等半导体材料做成的整流器，已在许多方面得到广泛应用。为了适应较高电压的整流，可将许多单个整流器串联在一起封在一块绝缘材料中，称之为“硅堆”。整流器可将交流负半周的波形除去，使交流变成脉动直流。因此通过整流后的输出波形，只含有正弦波的正半周波形。一个理想的整流器可视为一个开关，正半周的交流输入时，就有电压输出，如同开关接通一样；反之，如果负半周交流输入，则无电压输出，也就相当于开关切断一样。所以当正半周的交流输入，此开关的有效电阻为零；而在负半周的交流输入时，有效电阻为无穷大。实际上的整流器，不可能这样理想，但相差不远。电子管整流器未导电时，其电阻极大，此时的电阻称为逆向电阻；整流器导电时，其电阻很小，此时的电阻为顺向（正向）电阻。无论任何情况，所有的整流器都只允许一个方向导电。此种特性称为单向传导或单向特性，二极管（包括晶体管）就具有此种单向特性。任何含有射极或阴极及集极或阳极的电子元件，都称为二极管（包括电子二极管和晶体二极管）。因为二极管中的电子只能向一个方向流。故所有二极管都有整流特性。

【半波整流】

整流时，通过整流器的只是交变电流的一个半周。半波整流是最简单的整流器，但效率很低，欲想将其整流出的电流波形变为平滑也比较困难。图 3 - 61 所示是一个简单的晶体管整流电路。半波整流器的输入波形和输出波形如图 3 - 62 所示。从图 3 - 62 中的半波整流器的输出波形，与输入交流波形的比较可知。当有电流流动的正半周时，输出波形的瞬时振幅，完全随输入交流波形的正半周的波形而变。所以在交流输入电压的正半周时，通过晶体管电流的波形，完全与交流输入电压的波形相同。由于只有输入交流电压的正半周输出，输入电压的一半就被损失了。因此半波整流的效率较低，半波整流器的另一缺点，就是输出的脉冲电压及电流的频率与交流输入电压的频率相同。要消除其脉动，必须要加滤波器，使整流器的输出成为平稳的直流。

【全波整流】

一种对交流整流的电路。在这种整流电路中，在半个周期内，电流流过一个整流器件（比如晶体二极管），而在另一外一个半周内，电流流经第二个整流器件，并且两个整流器件的连接能使流经它们的电流以同一方向流过负载。如图 3 - 63 所示即为一个全波整流的电路。图 3 - 64 为其整流前后的波形。与半波整流所不同的，是在全波整流中利用了交流的两个半波，这就提高了整流器的效率，并使已整电流易于平滑。因此在整流器中广泛地应用着全波整流。在应用全波整流器时其电源变压器必须有中心抽头。图 3 - 63 中的 0 点为中心抽头，于是 a 对 0，与 b 对 0 的电压，具有 180° 相差，当变压器的输出电压处于正半周时（a 正 b 负，0 点的电势介于 a、b 之间，此时 D₁ 管因加的是正电压而导通，D₂ 因加的是反向电压而截止，此时电流方向是由 a 线过 D₁、R 到 0，如图中实线箭头方向所示。当变压器输出的交变电压处于负半周时，则 a 端为负，b 端为正，二极管 D₁ 截止而 D₂ 导通。这时电流方向是由 b 经 D₂、R 到 0，如图中虚线箭头所示。可见，无论正半周或负半周，通过负载电阻 R 的电流方向总是相同的。图 3 - 64 是全波整流的波形。全波整流使交流电的两半周期都得到了利用。其各项整流因数则与半波整流时不同。设变压器次极每边电压为 U_m 则有

$$\bar{U} = \frac{2}{\pi} U_m = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} = 0.636U_m = 0.9U$$

$$\bar{I} = \frac{2}{\pi} I_m = \frac{2U_m}{\pi R} = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi R} = 0.636I_m = \frac{0.9U}{R}$$

其中 \bar{U}_R 、 \bar{I}_R 分别为通过负载 R 的电压和电流的平均值。

【桥式整流】

桥式整流为一全波整流，可变交流电压为较高直流电压，它不需要变压器有中心抽头。四个晶体管如图 3 - 65 所示的接法便构成一个桥式整流电路。四个整流器（晶体管）将输入交流电和负载连接在一起。当交流输入电压为正时，电流由输入的一边，经一个整流器、负载，再经另一个整流器，流至输入的另一边。当交流输入电压的负半周时，电流流经另一对整流器和负载。在这输入电压正和负的半周时，经过负载的电流方向相同。所以可在负载上产生脉冲直流电压。在实际的桥式整流电路中，四个整流器连接成一个整体，由外面联成桥式电路（即只要外面留出四个接线点，其中两头接电源，两头接负载）。桥式整流克服了半波整流和全部整流的利用率不高的缺点。在无线电技术和电气工程中广泛采用桥式整流电路。

【滤波电路】

虽然整流器输出电压的极性永远一定，把交流电变为直流电，但此种电压是脉动的，并不能作为直流电压使用（如作电子管的直流电源），这是因为整流器本身输出的电压是脉冲或称涟波状。此种具有涟波状的整流器输出电压，在加于电子管的板极，栅或控制栅电路前，必须先将涟波消除，使此电压平稳而几乎无脉动才行。为使整流器输出电压平稳，必先通过滤波器网路予以滤波，滤波电路是由电容器及扼流圈所构成，如图 3 - 66 所示。当电容器的外加电压增加时，电容器靠储存其内的静电场能量，以抵抗此增

加的外加电压。但当外加电压降低时，电容器就将其蓄存的静电场的能量变为电压或流动的电流，作为外加电压降低时的补偿。整流器所输出的脉冲能量可蓄存于电容器的电场中，而在整流器所输出的两脉冲间，电容器缓慢的放电，因而经此电容器所输出的电压，其不稳定的涟波大为减小。这就是滤波电路要把一个电容器和整流器负载电阻并联的原因。当加于电感线圈（扼流圈）的电流增大，扼流圈靠存于其中磁场的能量以抵抗此电流的增加。但当流过扼流圈的电流减小时，扼流圈就将其磁场中所储存的能量变为电流，以继续维持电流的流动。因此将扼流圈与整流器的输出端及负载串联，可减小负载电流及电压的突然变化。与整流器输出端相串联的扼流圈，其作用也可由另一观点看：扼流圈对直流电而言，电阻（所谓的直流电阻）低，然而对交流电流（整流器输出电流带有变化的涟波电流）而言，阻抗（所谓的交流阻抗）非常高，因此直流较易于通过扼流圈，而在交流涟波通过时，涟波则被减小。

【滤波器】

滤波器是由电感器和电容器构成的网路，可使混合的交直流电流分开。电源整流器中，即借助此网路滤净脉动直流中的涟波，而获得比较纯净的直流输出。最基本的滤波器，是由一个电容器和一个电感器构成，称为 L 型滤波。所有各型的滤波器，都是集合 L 型单节滤波器而成。基本单节式滤波器由一个串联臂及一个并联臂所组成，串联臂为电感器，并联臂为电容器，如图 3 - 67 所示。在电源及声频电路中之滤波器，最通用者为 L 型及 π 型两种。就 L 型单节滤波器而言，其电感抗 X_L 与电容抗 X_C ，对任一频率为一常数，其关系为

$$X_L \cdot X_C = K^2$$

故 L 型滤波器又称为 K 常数滤波器。倘若一滤波器的构成部分，较 K 常数型具有较尖锐的截止频率（即对频率范围选择性强），而同时对此截止频率以外的其他频率只有较小的衰减率者，称为 m 常数滤波器。所谓截止频率，亦即与滤波器有尖锐谐振的频率。通带与带阻滤波器都是 m 常数滤波器，m 为截止频率与被衰减的其他频率之衰减比的函数。每一 m 常数滤波器的阻抗与 K 常数滤波器之间的关系，均由 m 常数决定，此常数介于 0~1 之间。当 m 接近零值时，截止频率的尖锐度增高，但对于截止频的倍频之衰减率将随着而减小。最合于实用的 m 值为 0.6。至于那一频率需被截止，可调节共振臂以决定之。m 常数滤波器对截止频率的衰减度，决定于共振臂的有效 Q 值之大小。若达 K 常数及 m 常数滤波器组成级联电路，可获得尖锐的滤波作用及良好的频率衰减。

【三相交流电】

一般家庭用电均为单相交流电，然而电流的大规模生产和分配以及大部分工业用电，则都是以三相交流电路的形式出现。高压输电线，通常是四根线（称为三相四线，其中有一条线为中线）。本质上还是三根导线载负着强度相等、频率相同、而相互间具有 120° 相位差的交流电。所以代表这三根导线电压变化的曲线为相同频率的正弦波，位相互相错开三分之一周期。对这三根导线分别对接地线的电压叫做“相电压”，图 3 - 68 中以实线 R、S 和 T 代表。三

线中每两根线之间的电压叫做“线电压”，图 3 - 68 中虚线 S - T、T - R 和 R - S 所示。相电压和线电压对时间的变化以正弦曲线表示，峰值和有效值之间的关系完全与单相交流电之关系相同，即

$$U_m = \sqrt{2}U$$

图中零线以上至两条水平细线的高度表示相电压和线电压的有效值 U_f 及 U_L 。它们之间的关系为

$$U_L = \sqrt{3}U_f$$

三相输电线的电压值常指线路电压的有效值。三相系统的主要优点在于三相电动机的构造简单而坚固。全世界均由这种电动机作为机械动力。

【三相发电机】

图 3 - 69 是三相交流发电机的结构示意图。这种发电机由定子和转子两部分组成。转子是一个电磁铁。定子里有三个结构完全相同的绕组，这三个绕组在定子

上的位置彼此相隔 120° ，三个绕组的始端分别用 A、B、C 来表示，末端分别用 X、Y、Z 来表示。当转子匀速转动时，在定子的三个绕组中就产生按正弦规律变化的感应电动势。因为转子产生的磁场是以一定的速度切割三个绕组，所以三个绕组中交变电动势的频率相同。由于三个绕组的结构和匝数相同，所以电动势的最大值相等。但由于三个绕组在空间相互位置相差 120° ，它们的电动势的最大值不在同一时间出现，所以这三个绕组中的电动势彼此之间有 120° 的相位差，其数学表示为

$$e_A = E_m \sin$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

电动势变化的曲线如图 3 - 70 所示。发电机中的每个绕组称为一相。AX 绕组为 A 相绕组，BY 绕组称为 B 相绕组，CZ 绕组称为 C 相绕组，在电气工程中，通常用黄、绿、红三种颜色分别标出。图 3 - 69 中的发电机定子有三个绕组，能产生三个对称的交变电动势，所以称为三相交流发电机。

【单相交流电】

在电路中只具有单一的交流电压，在电路中产生的电流，电压都以一定的频率随时间变化。比如在单个线圈的发电机中（即只有一个线圈在磁场中转动）。在线圈中只产生一个交变电动势

$$e = E_m \sin \omega t$$

这样的交流电便是单相交流电。

【三相电源绕组的连接法】

对于三相交流发电机所发出的三相电必须采取适当的连接方法才能发挥三相交流电的功效。如果把三相发电机的每一相都用两根导线分别和负载相连，如图 3 - 71 所示，则每一相均不与另外两个相发生关系。这样使用的三相电路称为互不联系的三相电路，它总共需要六根导线来输送电能。这与单相制比较，既不节约导线，也没有任何优越之处，在实际应用中并不采取这种方法。常用的接法有：（1）星形接法；（2）三角形接法。

【电源绕组的星形接法】

把三相电源三个绕组的末端、XY、Z 连接在一起，成为一公共点 O，从始端 A、B、C 引出三条端线，这种接法称为“星形接法”又称“Y 形接法”。如图 3 - 72 所示。从每相绕组始端引出的导线叫做“相线”，又称“火线”。

图 3—72 中的 O 称为“中性点”。从中性点引出的导线称为“中性线”，简称“中线”。这种具有中线的三相供电系统称为“三相四线制”。每相相线与中线间的电压称为“相电压”，其有效值分别用 V_{AO} 、 V_{BO} 、 V_{CO} 表示。每两根相线之间的电压称为“线电压”，其有效值分别用 V_{AB} 、 V_{BC} 、 V_{CA} 表示。相电压的正方向规定为自始端到中性点。线电压的正方向，例如 V_{AB} 的正方向，规定为自始端 A 到始端 B。如图 3 - 73 中的箭头所示。星形接法，相电压和线电压显然是不同的，且各相电压之间的相位不同，故在计算相电压和线电压之间的关系时应用

矢量方法计算。例如，线电压 \vec{V}_{AB} 应该等于相电压 $\vec{V}_{AO} + \vec{V}_{OB}$ （由图 3 - 73 中可见）。但由于 $\vec{V}_{OB} = -\vec{V}_{BO}$ ，故 $\vec{V}_{AB} = \vec{V}_{AO} - \vec{V}_{BO}$ 。同理有； $\vec{V}_{BC} = \vec{V}_{BO} - \vec{V}_{CO}$ 、 $\vec{V}_{CA} = \vec{V}_{CO} - \vec{V}_{AO}$ 。图 3 - 73 表示相电压与线电压的矢量图，它表示了相电压和线电压之间方向和数量关系。由该图可以看出

$$V_{AB} = 2V_{AO} \cos 30^\circ = \sqrt{3}V_{AO} ,$$

$$V_{BC} = 2V_{BO} \cos 30^\circ = \sqrt{3}V_{BO} ,$$

$$V_{CA} = 2V_{CO} \cos 30^\circ = \sqrt{3}V_{CO}。$$

如果用 V_L 表示线电压，用 V_ϕ 表示相电压，则线电压的大小与相电压的关系可写为

$$V_L = \sqrt{3}V_\phi$$

即星形接法时，线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。既然星形接法的相电压与线电压不等，因此采用三相四线制供电时，可以从三相电源获得两种电压。例如，我们所用的市电，其相电压为 220 伏特，线电压为 $\sqrt{3} \times 220 = 380$ 伏特，前者可供照明用，后者可供动力用。图 3 - 74 表示了三相四线制的市电供电情况。

【电源绕组的三角形接法】

将一相绕组的末端与另一相绕组的始端相接，组成一封闭三角形，再由绕组间彼此连接的各点引出三根导线作为连接负载之用。这样的连接法称为“三角形接法”，也称“ Δ 接法”。如图 3 - 75 所示。由图中可见，在 Δ 接法中，端线之间的线电压也就是电源每相绕组的相电压，因此有

$$V_{AB}=V_{AX}$$

$$V_{BC}=V_{BY}$$

$$V_{CA}=V_{CZ}$$

即

$$V_L=V$$

电源绕组的三角形接法和星形接法不同。在连接负载以前，三角形接法就已经构成了闭合回路。这一闭合回路的阻抗是很小的。所以三角形接法只有在作用于闭合回路的电动势之和为零时才可以。否则，在闭合回路中会有很大的电流产生，结果将使电源绕组过分发热而烧毁。三角形接法若接线正确，就能保证闭合回路中的电动势之和为零。从图 3—76 中可以看出，代表 A 相绕组和 B 相绕组的电动势之和的矢量 $\vec{E}_A + \vec{E}_B$ 正巧与代表 C 相绕组的电动势矢量 \vec{E}_C 大小相等，但方向相反。所以这三个电动势之和应应为零。但如果三相中有一相被接反，例如 C 相接反了，则由图 3 - 77 可知，这时闭合回路内的总电动势不仅不等于零，而且等于 C 相电动势的两倍。所以三相电源作三角形接法时，绝不容许接错。星形接法比起三角形接法来具有如下的优点：星形接法时，发电机绕组的电压可以比三角形接法的低，结构上易于绝缘。例如同样输出 380 伏特的电压，星形接法时，绕组电压是 220 伏特，三角形接法的绕组电压则为 380 伏特。再有，采用星形接法时，可引出中性线，构成三相四线制供电系统，对用户可提供两种不同的电压，以适应不同的需要。但是三角形接法的绕组电流较小，因此绕组的导线可以细一些。这一点是星形接法所不及的。

【负载的星形接法】

三个负载的 Z_a 、 Z_b 、 Z_c 的一端连接在一起，成为负载中点 O ，并接于三相电源的中线上，三个负载的另一端分别与三根端线（相线）A、B、C 相接。如图 3 - 78 所示的接法就是负载的星形接法。在三相电路中，各相负载的电流称为“相电流”，如图 3 - 78 中的 I_a 、 I_b 、 I_c 相电流正方向的规定与相电压的正方向一致。各端线中的电流称为“线电流”，如图中的 I_A 、 I_B 、 I_C 线电流的正方向规定为由电源到负载。负载作星形接法时，一条端线连接一个负载，从图 3 - 78 可以看出，线电流就是相电流，即

$$I_A = I_a, I_B = I_b, I_C = I_c。$$

如果用 I_L 表示线电流， I 表示相电流，即

$$I_L = I$$

在三相四线制中，忽略输电线阻抗时，负载的线电压就是电源的线电压，并且负载中点 O 的电位就是电源中点 O 的电位。所以每相负载的相电压就等于电源的相电压。由于电源的相电压和线电压是对称的，因此，负载的相电压和线电压也是对称的，且线电压的大小等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$V_L = \sqrt{3}V$$

在负载是对称情况下 $Z_a = Z_b = Z_c$ 。由于相电压是对称的，所以各相电流相等，而且是对称的，每一相的电流与对应的相电压之间的相位差都相同。可以证明，此时中性线中的电流为零。既然星形连接对称负载时，中性线上的电流为零，因此，有无中性线都对电路毫无影响，故可将中性线取去。这样就构成“三相三线制”。例如三相电动机就是三相对称负载，因此可用三相三线制星形接法。然而，在负载不对称的情况下，中性线上的电流 I_0 将不等于零，在各相负载的差别不太大时，中性线中的电流比端线电流小得多，所以中性线可以用较细的导线。但此时中性线绝不能取消或让它断开，否则将使各相电压失去平衡，产生严重的后果。日常照明用的单相交流电源，就是三相供电系统中的一相。通常把三相电源的各相按星形连接，分配给用电量大体相等的三组用户。所以每家用户的两根导线中，一根是端线（火线），另一根是从中性线引出的。中性线通常接地，所以又称为地线。由于同一时刻各组用户的用电情况不可能完全一样，所以，一般说来三个相的负载是不对称的。如果一旦中性线断开，各相的电压就会偏离其正常值，以致有的用户的电压不足，有的用户的电压过高。由此可见，在负载不对称的情况下，星形接法的中线是不能断开的。保险丝和开关不允许装在中线上，中线需要用较坚韧的铜线做中性线，以免其自行断开而造成事故。

【负载的三角形接法】

图 3 - 79 所示为负载三角形接法的

连接图。因为每相负载接于两根端线（相线）之间，所以负载的相电压就等于电源的线电压，即

$$V_L = V$$

通常电源的线电压是对称的，不会因负载是否对称而改变，所以三角形连接时，负载不论对称与否，其相电压总是对称的。然而，负载的相电流与线电流却不相等。各负载中相电流的正方向分别规定从 A 到 B、从 B 到 C、从 C 到 A。线电流的正方向仍规定从电源到负载。如图 3 - 79 中箭头所示。各负载中相电流的计算方法与单相电路完全相同。如果负载是对称的，则各相电流大小相等，即

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA}$$

且各相电流与对应的相电压有相同的相位差，所以三个相电流也是对称的，如图 3 - 80 所示。在该图中还画出了代表线电流的矢量。对线电流 \dot{I}_A 来说，由图 3 - 80 可知，它应等于相

电流 \dot{I}_{AB} 和 \dot{I}_{CA} 的差（因为 $\dot{I}_{AB} = \dot{I}_A + \dot{I}_{CA}$ ）。线电流 \dot{I}_B 和 \dot{I}_C 也如此。由图 3 - 80 可知线电流的大小与相电流大小的关系为

$$\begin{aligned} I_A &= 2I_{AB} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{AB} \\ I_B &= 2I_{BC} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{BC} \\ I_C &= 2I_{CA} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{CA} \end{aligned}$$

若用 I_L 表示线电流，用 I 表示相电流，则

$$I_L = \sqrt{3}I$$

由此可见，对称负载作三角形接法时，线电流的大小等于相电流大小的 $\sqrt{3}$ 倍。线电流的位相比相应的相电流落后 30° 。

【三相电功率】

三相交流电的功率等于各相功率之和。在对称负载的情形下，各相的电压均为 U 、相电流 I 以及功率因数 \cos 都相等。因此三相电路的平均功率可写为

$$P = 3U I \cos$$

若对称负载作星形连接，则有 $U = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$ ， $I = I_L$ ；若作三角形连接，则

有 $U = U_L$ ， $I = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$ 。因而无论用哪种联接方式，平均功率都等于

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos。$$

但必须注意，计算三相电功率的公式，虽然对星形接法和三角形接法具有同一形式，却并不等于说同一负载在电源的线电压不变的情况下，由星形接法改为三角形接法时所消耗的功率也相等。

【感应电动机】

又称“异步电动机”，即转子置于旋转磁场中，在旋转磁场的作用下，获得一个转动力矩，因而转子转动。转子是可转动的导体，通常多呈鼠笼状。定子是电动机中不转动的部分，主要任务是产生一个旋转磁场。旋转磁场并不是用机械方法来实现。而是以交流电通于数对电磁铁中，使其磁极性质循环改变，故相当于一个旋转的磁场。这种电动机并不像直流电动机有电刷或集电环，依据所用交流电的种类有单相电动机和三相电动机，单相电动机用在如洗衣机，电风扇等；三相电动机则作为工厂的动力设备。

【电磁振荡】

由电路本身所具有的电场和磁场能量之间交互变化而产生的振荡，称为“电磁振荡”。电磁振荡的过程也是电路中的电流以及电容器极板上的电压，在最大值和最小值之间随时间作周期性往复变化的过程。能产生振荡电流的电路叫做“振荡电路”。最简单的振荡电路是由一个自感线圈和一个电容器串联而组成的回路，简称 LC 回路。如图 3 - 81 所示。即由电感 L 和电容 C 组成的振荡回路。振荡回路主要作用是使振荡器产生频率一定的正弦波。把图 3—81 中的开关 K 倒向“1”，电池先向电容 C 充电，经过一段时间之后，把 K 从“1”移开倒向“2”，这时，回路中就发生了电磁变换现象，如图 3 - 81b 所示，其过程是先由充了电的电容 C 向电感 L 放电，

在电容器向电感放电的时间内，原来充在电容器中的电能逐渐变成电感中的磁能。当电容器上的电荷放完时，C 两端电压降至零，这时虽然 C 上不再放电了，但是我们知道通过电感线圈的电流是不能突变的，或者说，流过线圈的电流不可能一下子消失，因此电流仍按原方向继续流动。维持电流继续流动的是线圈中所贮存的磁场能量。当电流在回路中继续流动时，L 就反过来向 C 充电，于是在电容器两端重新出现电荷，但电容器上的电压极性和原来相反，如图 3 - 81c 所示，在 L 向 C 反向充电的过程中，L 中的电流逐渐减小，C 上的电压逐渐增大，线圈的磁能又逐渐变成电容器的电能。当 L 中的电流减小到零时，线圈周围的磁场消失，磁能全部转变为电能，之后 C 又向 L 放电，如图 3 - 81d。与前一过程比较，只是此时电容放电电流的方向相反了，其余过程与前一过程一样，回路中电流如此反复循环的现象，就是回路中产生的电磁振荡。由此可见振荡实际上是回路中的电磁交替变换过程。通过这种过程，回路把原来的直流电能变换成交流电能，回路两端就有正弦交流电压产生，称为振荡电压，如图 3—81 所示。LC 电路在振荡过程中，如果不再从外界获得能量，就会以一个固有的频率作振荡，该振荡频率称为振荡电路的固有频率；所对应的周期称为固有周期。电路的固有周期和固有频率，只和 LC 回路的电容和电感的大小有关，即

$$T = 2\sqrt{LC}$$
$$f = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$$

如果要改变振荡电路的周期和频率，可以通过改变电容和电感的方法来实现。振荡电路的固有频率 $f = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$ 。LC 电路方程为

$$L\frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = 0$$

式中 q 为电容器上的电荷， i 为电路中瞬时电流。由于 $i = \frac{dq}{dt}$ ，因此前式可写成

$$q = Q_0 \cos\left(\frac{1}{\sqrt{LC}}t + \varphi\right)$$

这是一个二阶微分方程，它的解是

$$q = Q_0 \cos\left(\frac{1}{\sqrt{LC}}t + \varphi\right),$$

位相 $\left(\frac{1}{\sqrt{LC}}t + \varphi\right)$ 中的 $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ 就是角频率，所以

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}。$$

其中 T 、 f 、 L 、 C 的单位分别是秒、赫兹、亨利、法拉。

【电磁场】

任何随时间而变化的电场，都要在邻近空间激发磁场，因而变化的电场总是和磁场的存在相联系。当电荷发生加速运动时，在其周围除了磁场之外，还有随时间而变化的电场。一般说来，随时间变化的电场也是时间的函数，因而它所激发的磁场也随时间变化。故充满变化电场的空间，同时也充满变化的磁场。二者互为因果，形成电磁场。这说明，电场与磁场并不是两个可分离的实体，而是由它们形成了一个统一的物理实体。所以电与磁的交互作用不能说是分开的过程，仅能说是电磁交互作用的两种形态。在电场和磁场之间存在着最紧密的联系。不仅磁场的任何变化伴随着电场的出现，而且电场的任何变化也伴随着磁场的出现。所以在电磁场内，电场可以不因为电荷而存在，而由于磁场的变化而产生，磁场也可以不是由于电流的存在而存在，而是由于电场变化所产生。因此，交变电磁场可以存在于这样的空间范围内，该处既没有电荷，也没有电流，而且也没有任何物体。电场与磁场之间的联系，不仅使电磁场在没有电荷和电流时能够存在，而且使这个场能够在空间传播。交变电场在相邻空间范围内激励起交变磁场，交变磁场又在毗邻的空间范围内激励起交变电场，交变的电磁场就是这样在空间传播。交变电磁场可以不通过导体而在空间传播，人们就利用这个特点进行无线电通信。由电流（即一连续运动电荷）产生磁场的事实说明，一个单独运动的电荷必定也能产生磁场。设想一个电荷以速度 \vec{v} 运动，且当它的运动速度比光速小得多时此运动电荷在与它相距为 r 的A点处的磁场为

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q \vec{v} \times \vec{u}_r}{4 r^2} (\vec{u}_r \text{ 为单位矢量})$$

B的大小为

$$B = \frac{\mu_0 q v \sin\theta}{4 r^2}$$

如图3-82所示。 \vec{B} 的方向与 \vec{r} 及 \vec{v} 垂直，磁力线为一闭合的圆环形，注意沿电荷运动方向磁场的大小为零，而在垂直于运动且通过电荷的平面上之磁场有一极大值。在A点由电荷 q 所产生的电场为

$$\vec{E} = \frac{q \vec{u}_r}{4 \epsilon_0 r^2}$$

所以可将 $\vec{B} = \frac{\mu_0 q \vec{v} \times \vec{u}_r}{4 r^2}$ 写成

$$\vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \dot{\vec{v}} \times \vec{E} = \frac{1}{c^2} \dot{\vec{v}} \times \vec{E}$$

上式就是运动电荷产生的电场与磁场之间的关系式，令

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.9979 \times 10^8 \text{ 米 / 秒。}$$

式中 c 为光的速度或真空中电磁信号的速度。其值可以近似写成

$$c=3.0 \times 10^8 \text{ 米/秒。}$$

所以，虽然电荷在静止时只产生电场，但运动的电荷，可以同时产生电场和磁场。二者间的关系为

$$\vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \vec{v} \times \vec{E} = \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}$$

故电场及磁场不过是物质基本性质的两种形态。在沿载有电流的导线上，我们测得磁场 B ，但测不出电场 E ，这是因为在导体中除掉含有产生磁场的运动电荷外，尚有固定的金属正离子，这些正离子相对于观察者而言均为静止的，故它们并不建立磁场，但却产生电场，此电场与电子所建立的电场大小相等方向相反，所以净电场为零。然而，当离子沿一直线加速器的轴线运动时，我们得到一磁场及一电场。二者的关系为 $\vec{B} = \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}$ 。

【电磁波】

在高频电磁振荡的情况下，部分能量以辐射方式从空间传播出去所形成的电波与磁波的总称叫做“电磁波”。在低频的电振荡中，磁电之间的相互变化比较缓慢，其能量几乎全部返回原电路而没有能量辐射出去。然而，在高频率的电振荡中，磁电互变甚快，能量不可能全部返回原振荡电路，于是电能、磁能随着电场与磁场的周期变化以电磁波的形式向空间传播出去。电磁波为横波。电磁波的磁场、电场及其行进方向三者互相垂直。如图 3—83 所示。电磁波的传播有沿地面传播的地面波，还有从空中传播的空中波。波长越长的地面波，其衰减也越少。电磁波的波长越长也越容易绕过障碍物继续传播。中波或短波等空中波则是靠围绕地球的电离层与地面的反复反射而传播（电离层在离地面 50~400 公里之间）。振幅沿传播方向的垂直方向作周期性交变，其强度与距离的平方成反比，波本身带动能量，任何位置之能量功率与振幅的平方成正比。其速度等于光速（每秒 3×10^{10} 厘米）。光波就是电磁波，无线电波也有和光波同样的特性，如当它通过不同介质时，也会发生折射、反射、绕射、散射及吸收等等。在空间传播的电磁波，距离最近的电场（磁场）强度方向相同和量值最大两点之间的距离，就是电磁波的波长。电磁波的频率 即电振荡电流的频率，无线电广播中用的单位是千赫，速度是 c 。根据

$= c$ ，就可求出波长 $\lambda = \frac{c}{\gamma}$ 。广播用的波长在 10~3000 米之间，分长波、中

波、中短波、短波等几种。传真（电视）用的波长是 3~6 米；雷达用的波长更短，3 米到几厘米。电磁波有红外线、可见光、紫外线、x 射线、射线等。各种光线和射线，也都是波长不同的电磁波。其中以无线电的波长最长，宇宙射线的波长最短。

无线电波	3000 米 ~ 0.3 毫米。
红外线	0.3 毫米 ~ 0.75 微米。
可见光	0.7 微米 ~ 0.4 微米。
紫外线	0.4 微米 ~ 10 毫微米
X 射线	10 毫微米 ~ 0.1 毫微米
射线	0.1 毫微米 ~ 6.001 毫微米
宇宙射线	小于 0.001 毫微米

麦克斯韦于 1865 年从理论上证明电磁波的传播速度应等于光速。因此他认为光波就是电磁波。1890 年经赫兹于火花放电的实验中发现谐振现象后，证实电磁波的存在，并证实无线电波与光波，仅由之间的区别仅仅在于其频率的高低，无线电波频率较低。麦克斯韦关于光的电磁波学说，只是从波动的角度描述了光的波动性，对于波长较长的电磁波，如微波和无线电波等，主要表现为波动性、但对于波长短的光波则在表现出其波动性的同时，也表现出粒子性。20 世纪初爱因斯坦进一步提出了光的粒子性——

光子的概念，直到 20 世纪 20 年代在光的波动和粒子二重性的基础上，又发展出一门新的理论——量子力学。

【爱因斯坦】

Einstein, Albert (1879 ~ 1955 年) 物理学家。生于德国, 1933 年迁居美国。在物理学的许多部门中都有重要贡献。其中最重要的是在二十世纪初的一些新发现的推动下, 建立了狭义相对论 (1905 年); 并在这基础上推广为广义相对论 (1916 年)。还提出了光的量子概念, 并用量子理论解释了光电效应, 他在阐明布朗运动、辐射过程、固体比热和发展量子统计等方面也有很多贡献。爱因斯坦曾访问过中国, 正当他在上海时得知, 由于他在理论物理和对量子理论方面的贡献而被授予 1921 年诺贝尔物理学奖, 但由于当时对相对论还有争议, 而在授奖时并未提及他这一伟大贡献后期致力于相对论“统一场论”的建立, 企图把电磁场和引力场统一起来, 但无成效。爱因斯坦的理论, 特别是相对论, 揭示了空间—时间的辩证关系, 加深了人们对物质和运动的认识, 具有重要的历史意义。他的理论反映了自然科学唯物主义的倾向。

【赫兹】

Hertz, Heinrich Rudolph (1857 ~ 1894 年) 德国物理学家, 生于汉堡。初习工程, 后改物理学。入柏林大学随赫尔姆霍兹研习物理, 后为其助手。麦克斯韦在 1864 年预言电磁波的存在。赫兹在 1886 年至 1888 年之间, 用振荡的电火花产生高频电磁波, 使这种电波在一定距离处不与它相联的导线回路中产生相同的电磁振荡, 又证实光波与电磁波相同。因此发现电磁波, 从而证实了麦克斯韦电磁理论, 并开创了无线电、电视和雷达的发展途径。自 1889 年起赫兹在波昂大学任物理学教授, 1894 年元旦因患毒血症病逝波昂, 年仅三十七岁。人们为纪念赫兹在电磁波方面的成就, 用其名作为频率之单位。称之为赫兹常用英文字母 Hz 表示, 简称为赫。

【赫兹振荡器】

赫兹振荡器如图 3—84 中左端所示，变压器 T 使金属板 C 与 C' 充电，这对金属板经由空隙 P 放电，空隙便成为偶极振荡器。电磁波沿 PX 方向传播，电场矢量将

平行于 Y 轴，磁场矢量则平行 Z 轴。为了接收电磁波，赫兹利用一短导线，作成圆形，并留一小空隙；此项设计称为共振器。用在这类实验上的共振器直径必须比波长小，若放置一共振器，使其面与波的磁场垂直，变化的磁场在共振器中感应一电动势，结果在共振器空隙间产生火花。如果共振器之平面平行于磁场，则不能感应电动势，因此在空隙中无火花。欲产生电磁驻波，赫兹置一反射面（由良导体制成）于 Q，在这样的情况下，当共振器位于磁场之节点上时，无论其方向如何，将表现有无感应电动势（或火花）。然而在磁场的反节点上，当共振器垂直磁场时火花最大。沿直线 PQ 移动共振器，赫兹发现节点与反节点之位置及磁场方向。借量度两相邻节点间距离，赫兹能计算波长，因已知振荡器之频率，利用方程式 $c = \lambda \nu$ ，能计算出电磁波之速度。由此方法，赫兹为电磁波传播速度求得第一个实验值。

【赫兹实验】

赫兹在柏林大学随赫尔姆霍兹学物理时，受赫尔姆霍兹之鼓励研究麦克斯韦电磁理论，当时德国物理界深信韦伯的电力与磁力可瞬时传送的理论。因此赫兹就决定以实验来证实韦伯与麦克斯韦理论谁的正确。依照麦克斯韦理论，电扰动能辐射电磁波。赫兹根据电容器经由电火花隙会产生振荡原理，设计了一套电磁波发生器，见图 3 - 85。

赫兹将一感应线圈的两端接于产生器二铜棒上。当感应线圈的电流突然中断时，其感应高电压使电火花隙之间产生火花。瞬间后，电荷便经由电火花隙在锌板间振荡，频率高达数百万周。由麦克斯韦理论，此火花应产生电磁波，于是赫兹设计了一简单的检波器来探测此电磁波。他将一小段导线弯成圆形，线的两端点间留有小电火花隙。因电磁波应在此小线圈上产生感应电压，而使电火花隙产生火花。所以他坐在一暗室内，检波器距振荡器 10 米远，结果他发现检波器的电火花隙间确有小火花产生。赫兹在暗室远端的墙壁上覆有可反射电波的锌板，入射波与反射波重叠应产生驻波，他也以检波器在距振荡器不同距离处侦测加以证实。赫兹先求出振荡器的频率，又以检波器量得驻波的波长，二者乘积即电磁波的传播速度。正如麦克斯韦预测的一样。电磁波传播的速度等于光速。1888 年，赫兹的实验成功了，而麦克斯韦理论也因此获得了无上的光彩。赫兹在实验时曾指出，电磁波可以被反射、折射和如同可见光、热波一样的被偏振。由他的振荡器所发出的电磁波是平面偏振波，其电场平行于振荡器的导线，而磁场垂直于电场，且两者均垂直传播方向。1889 年在一次著名的演说中，赫兹明确的指出，光是一种电磁现象。第一次以电磁波传递讯息是 1896 年意大利的马可尼开始的。1901 年，马可尼又成功的将讯号送到大西洋彼岸的美国。20 世纪无线电通讯更有了异常惊人的发展。赫兹实验不仅证实麦克斯韦的电磁理论，更为无线电、电视和雷达的发展找到了途径。

【无线电波的传播】

由于频率不同，无线电波（电磁波）从发射天线向外发射的途径，最重要的有地波或地面波、地面反射波、直线波或视线波。地波只能传播较短的距离，而不能传送很远。如果需要接收地波，只能接收从近距离处发射来的无线电波。而发射角度较大的部分天波，都消失在较外层的天空；部分发射角度较小的电波，受带电荷的电离层的反射，返回不到地面而被接收。

【无线电波】

无线电波（即赫兹波）。赫兹波除微波波段兼用厘米表示它的波长外，一般均用频率代替波长，其单位为赫（Hz）。频率范围约在 30 千赫（kHz）~ 30000 兆赫（MHz）之间。其波长范围在 10^{-3} ~ 10^4 米之间。当赫兹发现电磁波以后，首先被用于无线电信之传递试验。最早的无线电信，借控制火花放电时间，构成电码讯号。火花放电是一种波长很短的减幅波，它的振幅衰减极快，且干扰极大，故不能用它做长距离通信。后经改良用电弧放电以获得长波的等幅波，使通信距离稍增，但其副波干扰仍不能免，且能量较小不能作远距离通信。后来俄国人波波夫与意大利业余无线电家马可尼同时独立地发明天地线制，马可尼且于天线中加接调谐电路，试验越过大西洋电码通信获得成功，至此无线电通信开始进入实用阶段。由于弧光放电的影响，误认为波长越长，电力越大，通信距离越远；事实上在短波通信特性未发现以前，确实如此。欧洲各国甚至竟用波长 10000 米以上，耗费巨资建设电台，并用频率很低的交流发电机供应电磁波能直接发射。长波无线电之传递，以地波为主。其折射率在海面与平原之吸收率均较小。在传播途中的衰减大致与距离成正比，因受气候影响甚微，在有效距离内通信可靠，故迄今仍在使用中，不过波长已减至 1000 米左右。长波无线电特别适宜于极地通信及海上导航，因短波无线电在极地失去电离层反射作用，无法达成远距离通信。长波通信须高大之天线。自超短波及微波通信实现后，已可利用轻便之转继站构成通信网，故长波通信已在淘汰。中波波段为标准广播波段，其波长自 200 ~ 545 米。适用于国内及邻接地区间作广播之用。国土广大之国家均规定其最大电力及广播服务区。最大电力以天线发射之电场强度为标准。中波广播波段自 540 ~ 1650 千赫（kHz）。中波广播也可用于空中导航。短波通信之特点是：即使是不太强的无线电波也能跨越大洋，而完成极远距离通信。短波无线电信，由于频率较高，其电磁波由天线发出后，因地球表面矿物质之吸收率甚高，故不论发射电力多大，不出百里以内，其沿地面进行的电磁波即被吸收以尽，其衰减率以对数率随距离而加快。但在数百里以外的地区，因向空发射之天波受高空电离层的反射而再度出现。这种高空反射波的反射体是天空中大气因受紫外线辐射所形成的离子化气体层。围绕地球的这一层离子化气体称之为“电离层”。无线电波也和光波一样有四种特性：它可能被物体吸收、反射、散射及折射。当电磁波前进时，遇金属物，则有一部分被吸收，有一部分即反射，且金属物与电子线波在不垂直又不平行之方向者，电磁波就发生散射。当电磁波经过不同的介质时，将发生折射的现象。

【无线电通信】

在电子学方面，无线电通信和无线电广播的地位是非常重要的。现代的无线电通信及广播系统，依照无线电报的电码，发射出周期性的断续无线电波（等幅波），此种系统称为无线电报。发出经语言或音乐的调变后的无线电波，这种系统称为无线电话。无线电系统所必须的最基本的元件有：（1）产生无线电频率段的电波（即射频电波）发射机。（2）控制射频电波的电键，使所发射出的电波随所需传递的信息变化。（3）发射天线将电波送至天空。（4）接收天线接收电波。（5）无线电接收机，用来选择及放大发射机所发来的信号，并将射频信号予以检波。（6）扬声器或耳机将已经检波的电波变为声波，如此可得到所得的信息。

【无线电发射机】

无线电发射机可产生一定频率的射频能量，然后天线以电磁波的形式发射出去。为使发射机所发射的电波能为人所用，需将信息附于此发射电波上。在无线电报方向，发射机送出等幅波，同时依照无线电码使等幅电波时断时续，如此将所欲传出的信息加在所发射出的射频电波上。无线电话发射机是借调频或调幅方式，将所欲送出的语言或音乐信号，加在发射机所发出的载波上。无线电发射机的种类很多，按信号的特性的不同，可分为无线电报发射机、无线电话发射机、无线电广播发射机、电视广播发射机等。

【无线电广播】

发出的无线电波能携带语言或音乐等声音讯号为广大听众服务，叫无线电广播。在无线电播音时。无线电广播电台，利用一种无阻滞的电波作为载波，并使播音管栅极电路中的线圈，与播音电路的线圈耦合。因此，语言音乐就被携带于载波上。利用所谓栅极转调的声波外差法，可将载波变成不等幅且随声波变化的电波。即好像在高频上驮着音频信号。收音机将此种电波接收并放大后，再加以检波。使之收到所需要的音频信号。然后输入到扩音器（或耳机）变成声音。

【电视】

电视是将分成无数因素的一系列静止图像，连续传送出。由于人类的视觉暂留功能，使连续出现的系列静止图像呈现景物移动的感觉。电视摄影机，在外观上和电影摄影机一样，可是内部却大不相同。电视摄影机里不是用电影底片而是录像带记录影像的动作。它主要是利用一种特殊的真空管（摄像管）。把被拍摄的像投影到管内的幕或像屏上。屏上覆有异常灵敏的感光层；它是由几十万个叫做“象素”的小点组成，就像眼睛中的视网膜是由无数个视神经细胞组成一样。为了把投影到感光屏上的影像变成电讯号并被传送出去，在摄像管内有一电子束从左到右、从上到下地扫过。这些象素，当电子束扫过某一点时，这点就能把它感受光的强弱，变成不同强弱的电讯号。在我国的电视系统中，最普通的电视画面是由 600 多行，每行又有 800 多个小点组成的。在播送电视时，每秒钟要播出 25 幅画面。可见图象所产生的电讯号的变化是极为迅速的。电讯号的强弱又对传送讯号的无线电波进行调制。调制好的无线电载波，就从电视发射天线发射出去。当你打开电视机，选送这些调好的电波时，就是利用这些电波来控制显像管里的电子束。显像管荧光屏内层的表面上，涂有一层荧光物质的膜。电子束扫过这层荧光膜时，电子束在每秒钟内多次自上而下地扫过荧光屏的每一部分。由电波携带的电视图象讯号控制着扫描电子束的强弱。强弱变化着的电子束打到荧光屏上，产生亮暗不同的光点，从而扫出各种图象。所以屏面上的画景，就和若干里外摄像机所拍摄的画景完全一致。电视的发声和收音机的原理是相同的。

【调制】

把一种波动变化特征加载到另一个波上，此种过程或所产生的结果称为调制。受调制的波称为载波，调制之波称为调制波。一般地说，就是高频振荡的某种性质随着某一低频信号的变化而变。这些变化的最简单情况，是高频振荡的幅度不为定值，而随作用于它的低频振荡而变化，这种情况叫做“调幅”，以区别于使频率发生变化的调制，即所谓“调频”或使相位发生变化的调制称之为“调相”。调制的用途，是借助于高频振荡以将某种信号发送出去。低频调制振荡相当于某种信号（如电报信号或某些声音），所以已调制的振荡便携带着这些信号传播出去。利用复原过程（检波），这些信号就可以从高频已调振荡中分离出来。调制由专门的调制装置或调制器来实现，在无线电广播中，一般是应用调幅制，但在我国的许多地区也建立了调频制的广播。电视广播则是利用调频。振荡的幅度变化越大，则调制度越大。调制度 m 通常用百分率

$$m = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \times 100\%$$

来度量，且式中的 I_1 和 I_2 分别表示振荡的最大幅度和最小幅度。

【调制器】

对振荡进行调制的设备。调制器的作用原理随着所用调制的型式而不同。如果是调幅，调制器应当随着调制电压的变化而改变高频振荡的幅度。为了这个目的，通常应用单独的电子管。电子管的工作，犹如一个高频振荡的放大器，不过它所给出的放大是随管子上所接调制电压的作用而变化。由于这样，经过电子管以后的振荡便是已经调幅的振荡。在三极电子管里，调制电压或是加到栅极（栅极调制），或是加到屏极（屏极调制）。在多极电子管里，调制电压常常是加在电子管的其他电极上。如果是调频，调制器应按调制电压的变化而改变高频振荡的频率。为了这个目的，通常都是应用所谓电抗管。该管是一个电抗，在调制电压的作用下，这个电抗的大小将发生变比。这个电子管接在被调振荡器的振荡回路中，当它本身的电抗发生变化时，就会使被调振荡器的振荡频率发生变化，同时也就使发射机所发射的振荡频率发生变化。有时也采用一些别的比较复杂的调制设备来进行调频。

【调幅】

调幅是借声频信号或视频信号的强度（大小）变化迫使射频载波的振幅随之变化。由单一声频电波所形成的振幅调制，如图 3 - 86 所示。假设图 3-86a 为 1 兆赫的载波，图 3 - 86b 为 1 千赫的单音。如果将载波及单音的声频电波同时加在一个电阻上，其合成的波形则如图 3 - 86c 所示，此时载波的振幅完全没有改变，只是其每周电波之瞬间极性有连续的改变而已，显然，这不是振幅调制，一无线电收音机无法判定这种信号的瞬时极性，所以也无法播出声音信号来。图 3 - 86a 是所要调幅的信号的载波，此种已调幅的载波是将载波与声频电波同时加在一电路上，但电路的电流与所加的电压不是正比关系，也就是此电路是非线性的，不能用欧姆定律来解释。为了达到调幅的目的必须利用非直线型电路。当电子管作用于特性电线的非直线部分时，电子管可说是一个理想的调制器。功率放大器的失真，是由非直线的电子管特性曲线所引起的。在某种意义上看，也可将振幅调制当作振幅失真来看，所以造成失真或调制，必须要一个非直线型电路。当电子管作用于特性曲线的非直线部分时，电子管可说是一个理想的调幅器。图 3 - 86d 是仅由两个额外频率的电波所形成的调幅载波，一个是 1001 千赫，也就是等于载波频率 1000 千赫与声频电波频率 1 千赫的和；另一个是 999 千赫，也就是载波频率 1000 千赫与声频电波频率 1 千赫的差，1001 千赫的频率，称为高旁频率，999 千赫的频率被称为低旁频率。在无线电波广播方面，调制载波的声频电波频率范围可达 10000 赫（10 千赫），每一声频电波频率都能产生一个高旁频率及一个低旁频率，因此各声频频率所产生的总高旁频率与总低旁频率，就形成两个频带，一为高旁频带的最高频达 1010 千赫（对 10 千赫声频电波而言，低旁频带的最低频率达 990 千赫。因此借 1000 千赫载波以传送声频频率达 10 千赫范围内的电波时，发射频道之频带宽度必须有 20 千赫（从 990 ~ 1010 千赫），这不只对声频电波而言，就是对视频电波的传送，也是如此。就一般频道的总频带宽度言，也都是所需传送信息电波频率宽度的二倍。由此可知发射机及接收机的调谐放大器，不只通过射频载波一个频率，必须能通过整个频带宽度方可。为了能从已调幅的载波获得信息，所有的发射机及接收机电路，必须能通过具有高旁频带及低旁频带的全部频带。调谐电路必须具有选择能力，使所需的频带通过，并排斥不需要的频带。只讨论一些对载波振幅变化的原理还是不够。调制的程度是一个非常重要的因素，因为正是调制程度决定被传送的信号强度及特性。图 3 - 87 是各种不同程度的调幅载波。图 3 - 87a 是声频调制信号电波。图 b 是未被调幅的载波。调制深度很低的已调载波则示于图 3 - 87c，已调载波的振幅大小变化，完全随声频调制信号的变化而改变。但其振幅变化的程度较小。接收机的检波器之输出，只对载波的振幅变化有相应变化，而对载波的绝对大小无关。已调制载波的调幅程度很小时，声频信号将不会太大，并且此信号可能会被较

强的杂波所湮没。如果调制深度大，声频信号一定非常强而又清晰。图 3 - 87d 的射频载波，已经被调制到最大的可能强度，振幅的最大值，是原来未经调制前载波振幅值的二倍，称为百分之百的调幅。如果调幅信号(即声频信号)电波的振幅再增大的话，所接收的信号电波，将产生失真的现象。

【调频】

频率调制是借改变载波的频率变化而成，载波的振幅保持恒定，因此在接收后，已调载波振幅的变化，根本不必再出现于声频电波中，所以电杂波引起的振幅变化，完全没有作用。这也表示不受杂波影响的频率调制信号杂波比值，比振幅调变小得多，因此频率调制发射机的功率虽低，也可以得到相同音质的接收。再者，因为频率调制载波的频道，包括所传送 20 ~ 15000 赫的整个声频频带，所以频率调变具有高度传真性。频率调制所需频道的频带宽，比振幅射频调制大。在发展频率调制的同时，很宽的特高频率的频带从（30 ~ 300 兆赫）内的信息传送，已经可得到了。频率调制广播所规定的总频带为 83 ~ 108 兆赫（即总频带宽为 20000 千赫），每一广播电台所允许频道的频带宽为 200 千赫；这表示在同一地区，可以同时有 100 家电台存在。调频也有它的缺点，如要达到调频的作用，发射机的载波频率必须要在—较宽的频率波段内偏移。虽然优良调频广播，并不需要发射机的频率偏移达最高允许限度（指定中心频率上下各 75000 赫），但高传真度性能的调频广播电台差不多都能接近这个限度。这样宽的频率范围在通用无线电广播波段是无法容纳的，故通用调频发送指定于 88 ~ 108 兆赫之间。在这频率波段中，调频遭遇到和电视观众所习知的同样缺陷，这便是调频的接收主要只限于离发射天线视线距离内，边远区的接收效果，在每天内的变化极大。调频的另一缺点是每一发射机需要—较宽的频率波段，在波段重叠的情形下便只能收到最强的发射机。这样便需要把全国各地发射机的工作频率，仔细地加以分配，以避免任何可能的重叠。

【谐振电路】

由于天线线圈中有各种广播电台的射频波通过，所以必须选择所希望的频率，这种功能叫谐振，具有这种作用的电路叫谐振电路。这种电路是由线圈与电容器构成。当有高频电流经过天线时，因电磁感应而在谐振线圈中也有高频电流通过。这时，在天线与地线电路中，虽有各种频流振荡电流通过，可是，在谐振电路中，由于线圈与电容器的作用，只有某一种固定频率的振荡电流通过特别多，这种现象叫电振荡。某一特定线圈和特定电容器仅能谐振一个频率，改变调谐电路中的电感和电容值均可改变谐振频率。了解此特性，就容易明白谐振电路如何选择电台。事实上没有一个调谐系统是完美的，和谐振频率很接近的信号也将进入收音机，到达扬声器。不过收音机调谐的频率信号，其声音略比其他频率为强。在射频放大器的选择性，是由它的调谐电路决定的，调谐电路中线圈的电阻越是比它的电抗低，则选择性越高，线圈的选择性通常以 Q 来表示称之为品质因数，它等于线圈的电抗除以电阻。谐振回路一般作为收音机的输入回路。

【检波】

将接收电路中之高频交变电流整流，便成为单向之脉动直流，以引起膜片振动。这种把无线电波讯号变成声音信号的手段，称为检波。凡具备单向传导或一方向导电优于另一方向的工具，都可以担任检波工作。解调制或检波的程序正与调制的程序相反，检波就是将在已调制载波所含的信号分出。关于对已调频载波的检波比较复杂，通常先使已调频载波成为等幅已调频载波，以减低杂波，后将已调载波的频率变化，转变成声频信号波幅变化。通常接收电波听筒膜片具有惯性，不能随振动电流之频率而振动（即使随之振动也超出听力范围而无法觉察）；故需另置检波器于谐振电路中，以使调幅波变为单向脉动电流通入收话器中，再由此变为声波传入人耳。最常用的检波器有晶体检波器，二极管检波器和真空管检波器等。

【传真】

利用电线或通过无线电发送不动图象（信件、图片、照片、报纸等）。传真的原理与电视相似，不过因为不动图象的发送可以延续足够长的时间，所以图像的分解速度及信号的发送速度都不要求很快。这种对图象的复合与分解，都可以采用机械装置；对于发送，可以采用相当窄的频带，也就是可以利用普通的通信线路，例如利用电话线路就可以传真。宇航中拍摄的照相，都是采用电视的传真照相，这些照片是利用电波传送回来的“传真照片”。传真的照片是把传送的照片改为电讯信号播放，由受信接收站收取这些“电讯信号”，再改成照片，同时也可收取世界各地的传真广播，遇有重大新闻时，可以收取照片，再行转印成的新闻照片分发，这种照片的价值及其功用是很高的。它的传送方法如图 3 - 88 所示。发放照片传真的地方，是先把照片卷在一个圆形筒上，这个圆筒以一定的速度旋转，在旋转的画面上，依靠一个很细小的光点，以扫描的方式扫过整个画面。照片的影像可以看做是由无数个深浅不同的小点组成，所以当扫描的光点扫到照射照片上的某个小点时，小点较浅的地

方反射强，而在较暗地方反射弱。其光线反射的亮度不同，便由光电管（把光线变成电信号的电子管）反射光的强弱转变为电流的变化。于是，照片的图象被转变为电讯号。电讯信号再通过发信机将电波传播到很远的地方。受信一方的设备，恰好和发信地相反，把电流的变化改做强弱的光线，就可以在感光胶片上得到画片的底片，所以，受信的一方也要有如发信地方的那样圆筒，用同样速度旋转；在圆筒上套上感光片，为防止其他光线的干扰，圆筒必须装在暗箱里。受信的接收机收到发来的电信时，把强弱不同的电信号变为扫描光点的强弱变化，光点扫到感光的不同部位，产生不同的曝光效果，从而得到从远方传送来的传真照片。

【雷达】

雷达是利用无线电技术进行侦察和测距的设备。它可以发现目标，并可决定其存在的距离及方向。雷达将无线电波送出，然后经远距离目标物的反射，而将此能量送回雷达的收发机。收发机与目标物间的距离，可由无线电波传雷达的目标物，再由目标物回到雷达所需的时间计算出。雷达的基本原理与无线电通讯系统的原理同时被人所发现。赫兹与马可尼两人都曾用超短波试验其反射情形，这也就是所谓雷达回波。赫兹用金属平面及曲面证明，电波的反射完全合乎光的反射定律。同时赫兹度量脉冲的波长及频率，并且计算其速度也发现与光相同，这也就是所谓的电磁辐射。雷达送出短暂的电波讯号的程序，称为脉冲程序。雷达的基本作用原理有些相似于声波的回声。唯一与声波测量距离的不同点，在于雷达系统具有一指示器，指示器中包含有一个与电视收像管相同的观察管。此管可将雷达所发出的脉冲及回波，同时显示于其标有距离的基线上。还有其他指示器，使雷达借天线所搜索的资料，制成一个图，从图上立即可以定出目标物的区域距离及方向。因为雷达的作用完全是借电波的反射原理而成，所以必须用频率在 1000 兆赫到 10 000 兆赫的类光微波方行。雷达所发射的电波可借抛物面形的反射器，使其成为极度聚焦的波束，这就像探照灯所射出的光束一样。此波束借旋转天线及抛物体形反射器的精密控制，有系统地空间进行搜索。当波束从目标物反回来时，天线所指的方向，就表示目标物对天线的水平方位角。以角度为单位所表示的水平方位角，通常都显示于指示器上。为了决定目标物与雷达间的距离，雷达的发射脉冲距接收到回波的时间，必须精确测定。因为雷达电波在空中以每秒约 30 万公里的光速进行，因此在每微秒的时间内，电波行进约为 300 米。由于雷达脉冲必须从雷达行至目标物，再由目标物回到雷达，但目标物距雷达的距离，为雷达脉冲总行程的一半。约为每微秒 150 米。此时间可利用电子束在阴极射线管的屏幕上，以直线扫描指示出。借电子束，以已知变动率（如以每微秒 0.01 米）作水平偏向，因此电子束打在萤光屏上所留的痕迹，就形成一个时间标度，或直接用尺，来表示。如雷达天线送出一个 1 微秒长的脉冲，同时指示器的阴极射线管电子束在屏幕上，以每 100 微秒 0.0254 米的变动率开始扫描。再假设雷达脉冲在 30000 米的距离从一飞机反射回天线。当 1 微秒长的脉冲离开天线的同时，在雷达指示器的左侧也显示出一个 0.025 厘米长的主脉冲（发射脉冲）。由天线发射的脉冲，到飞机进行了 30000 米的距离，需时 100 微秒，然后反回天线也需 100 微秒。结果微弱的脉冲回波也显示于指示器上，其与主脉冲之间有 5 厘米的距离，或指示为 200 微秒。由于脉冲本身有 1 微秒的长度，所以量度距离时，必须量度两脉冲的前缘间距离。由于回波信号太弱，所以一个单一回波信号显示于指示器，很难被发现。因此回波信号，必须于每秒内，在指示器上重复显示数次，显示的方法是借电子束随天线扫描的速率（通常天线以每分

钟 15 到 20 转转动) 在指示器上扫描而得。雷达无论在平时及战时, 都已被广泛的应用。在二次世界大战时使用雷达的目的, 只是为了预知敌机的接近。用于预警网的预警雷达, 预警雷达天线都是极大的转动抛物面形反射天线, 或静止双极矩阵天线。战时雷达的应用很快就被扩展到地面拦截控制, 以及高射炮和探照灯的方向控制等。这些所谓的射击控制雷达不仅能察知敌机的所在, 并能自动决定高射炮的发射方向及使其发射。由于雷达可度量其与目标物间的距离, 当然也可以从飞机上测量距地面的垂直高度。常用的各种脉冲式雷达就可度量一架飞机的高度, 供飞行员飞行的参考。然而对很低的高度(低于 1000 米), 因距离太近, 脉冲式雷达的回波有与其发射出的主脉冲合并的趋势。因此大多数雷达测高仪都不用脉冲输出, 而用等幅调频电波。雷达测高仪的发射天线, 送出一垂直无线电波束, 此电波的频率连续不断的变化。当信号离开发射天线的瞬间, 其信号的频率为某一频率。然后当信号由地反射回到测高仪的接收天线后, 因接收机内有一相位鉴别器(或简称为鉴相器), 鉴相器可将接收到的回波, 与正在发射出的信号频率(或相角)作一比较。因为当回波回到接收天线, 已经过了一段时间, 当然此时发射天线所发信号的频率, 也已改变。利用已知每秒周数的频率偏差, 就可决定出电波由发射天线到地, 在回到接收天线的的时间, 因此可计算出飞机距地的高度。关于电波往来所需的时间与相应的高度, 事先已经算出, 并直接标示在指示器上, 所以可以直接从指示器上读出飞机的高度数值。除此之外, 雷达还可以用在飞机和船舶的导航, 作为某一城市、机场, 高山或某一特定点的辨别符号用的雷达指标, 都已事先标示于航行图上。

【通讯卫星】

火箭、飞弹、太空航具，或其他人造物体被置入绕地球公转之轨道上者，均称为人造卫星。而作为通讯用的卫星则称为“通讯卫星”。通讯卫星有两种，被动的和自动的。被动的通讯卫星仅仅是一具反射器。播送站向那卫星发射讯号，这讯号被传送到地面上另一个遥远的接收站。自动的通讯卫星接收讯号后，把它加强，再把它发送出去。它们包含有接收、加强和播送的设备，以特殊的电池或太阳能电池作动力。为了把通讯微波信号，传送得更远，经常采用同步通讯卫星。所谓同步卫星，是指卫星经发射后，它与地球某点的相关位置不变，实际上这些卫星并非在那里静止不动，因为要达到同步的目的，卫星必然要以和地球自转的角速度相同的速度围绕地球转动。根据开普勒第三定律，卫星绕地球的周期因其平均轨道高度增加而增长。故在某一定高度时可期望致使卫星的周期与地球自转周期相同，如此则卫星与地球某点之相关位置可以不变，这个高度大约是 35783 公里。此种高度的卫星称为同步卫星。严格说来，仅是高度这一要求还不够，而必须又是在赤道面中圆形轨道上的卫星才真正能与地球某点相关位置不变。需要正圆形轨道是根据开普勒第二定律而来，此定律说明卫星在椭圆轨道上时其速度永远在改变，在最低点时为最高速，最高点时为最低速，故在椭圆轨道上的同步卫星，因为速率不定的结果，对地球上某点时而偏东时而偏西。卫星在赤道面轨道运行时称之为赤道轨道，如果轨道平面与赤道面成一个角度时，这个同步卫星称之为倾斜同步卫星，这时卫星对地球上某一点来说会时而偏北时而偏南。以这样的同步卫星作为通讯用的卫星就称之为“同步通讯卫星”由于这种卫星和地球上的某一地区处于同步，如果在赤道上空 36000 公里以外的高处，设置三颗同步卫星，就可以把微波信号传到全世界的任何地区。

【电子计算机】

电子计算机包括模拟计算机和数字计算机两大类，都具有度量和计算的简单观念。然而通常所指的计算机，都指数字计算机而言。实际上，每架大型的数字计算机，包括有成千个恒温器，求积计和小型模拟计算机，这些仪器都是以度量他量，来计算某量的。电子计算机的构造极为复杂，通常可分为输入、输出、记忆、计算及控制五大部分。又记忆、计算及控制三大部分称之为“中央处理机”。图 3-89 为其方框图。电子计算机的计算，是有一定的法则。通常它在作计算或逻辑运算时，已有一部分的法则储存于电子计算机中，其余的法则如数目字或指令，则由外界输入。因此，电子计算机在作运算时，必须将许多输入资料事先存储于记忆单位，然后再根据需要，依次自储存单位取出，进行计算。如图 3-89 记忆单位与计算单位是相互沟通的，记忆单位所存储的资料，送入计算单位中，经过运算后的结果，再送回记忆单位储存。此外，指令执行的先后次序，必须根据需要而且有一定的规则，因此电子计算机除了以上两单位外，必须有一控制单位，来执行所需要的指令。经由计算的结果，并不能永远储存于记忆单位，必须取出，而用数目字或字母表达于报表或卡片上。电子计算机的功能，除了可以预测变幻无常的气象、进行医疗诊断，帮助引导人们到月球去，加强各大城市之间的通讯等。电子计算机还有绘制建筑图样和商业图表的能力，并被用来绘制各种美术图案。现在电子计算机已成为现代化办公室不可缺少的手段，在发达的国家电子计算机已进入家庭和生活中。

【电子显微镜】

是一种电子仪器设备，可用来详细研究电子发射体表面电子的放射情形。其放大倍数和分辨率都比光学显微镜高得多。因为普通光学显微镜的放大倍数和分辨率有限，无法观测到微小物体。以电子束来代替可见光束，观察物体时，分辨率就没有波长要在可见光谱之内的限制，不过电子透镜无法作得像光学透镜那样完美。因此理论上，电子显微镜所具有的分辨率并不可靠。目前电子显微镜的分辨率可达 10^{-7} 厘米（约为原子直径的两倍）。通常电子显微镜的放大率是 200 ~ 200 000 倍，再经照相放大可达 1000 000 倍。电子显微镜有两大类：（1）发射型。（2）电磁、静电扫描型。前者用于研究电子放射现象；后者用以增加普通光学显微镜的应用范围。1924 年法国物理学家德布洛意指出电子和其他的粒子也都具有和光类似的波动性质。他还求出了计算它们波长的公式

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

式中 m 是粒子的质量而 v 是它的速度， h 是普朗克常数。此公式发明的年代较早，后来由美国科学家德维生及革末用实验证明其正确性。既然正确，也就告诉人们：虽然电子是一种可称重量，可数数目，可以被电子枪发射的粒子，但它同时又是一种波。从公式中我们可以看到，如果使电子运动的速度十分巨大的话，它就可以明显地显示出波长极短的波动性。如果在光学显微镜中被观察物的大小比光波波长还小的话，人们就不能分辨出来。在实用上通常取波长的三分之一作为限度，光波波长约在 6×10^{-5} 厘米左右，它的三分之一就是 2×10^{-5} 厘米了。然而，有很多科学家急待观察的微小东西如病毒体、胶体粒子及结晶结构的大小都在这限度以下，既然如此，如果我们把一颗运动中的电子加速，使它产生巨大的速度，从而有极短的波长，则利用此原理制成的电子显微镜就能观察到极微小的物体了。把电子加速的办法是在真空中加上若干万伏的高电压，电子就会以极快的速度射出，其波长可能会达到 4×10^{-5} 厘米这样短的长度，也就是说：电子显微镜可以观察到 $\frac{1}{3} \times 4 \times 10^{-10}$ 厘米或 1.4×10^{-10} 厘米这样小的物

体。当然这是理论上的结果，在实际上由于仪器等等原因，不可能达到这样理想的地步。但无论如何，电子显微镜已可以放大五万倍以上；而有些精良到可将物体放大十万倍。电子显微镜中有一个电子枪，电子在枪集束射出，正像光学显微镜中利用光学透镜的成像作用得到显微的放大像一样，在电子显微镜中用磁透镜，使电子束会聚成像。我们把一片待观察的物体，例如一片很薄的晶体，放在电子显微镜中，电子束就会射向这片物体上，在一块荧光幕上就会得到一个放大的影像。如果在电子显微镜中用感光的底片代替荧幕的话就可以得到一张微观世界的珍贵图片。而一些特别好的电子显微镜，甚至可以观察到一些巨分子的结构！这些图片在科学研究上的价值十分重大。当然，在电子显微镜中不会这样简单，它要涉及

电子射线通过物体产生不同的散射而造成明暗不同的影响。最近，有些电子显微镜是利用电子束的反射来观察较厚的物体例如病菌、病毒及其他极微小物体的巨分子组织。而最新的显微镜用的却不是电子显微镜，而是离子显微镜借以达到更短的波长，米勒曾经利用氦的离子显微镜成功地拍摄到金属表面的单独分子运动！这种离子显微镜可以分辨原子之间相隔百万分之二十七厘米的空隙，它是目前显微镜中最好的一种。

【摄像管】

电视广播中，借光感作用的摄像管。摄像管有许多种，但主要工作原理相同。其中一种叫光电摄像管。它包含三个基本部分，即一个镶嵌板、一个集电环和一支电子枪。镶嵌板是用一块涂了一层绝缘物质的金属板制成的。在绝缘物质的表面上，嵌着成千上万个银制的小球（即一些小银圆点），每个小银球上镀着一层特别的物质，例如铯（光电管材料），所以每一个银点的作用就像一个小光电管一样。镶嵌板是由数以千万计的这样的小光电管做成的。当光线照在这样一个光电管上，电子便被打出而离开它。光线越强，失去的电子越多。由于电子带负电荷，光电管失去电子后，就使它自己带正电荷了。所以任何投影在镶嵌板上的图像，将变成一幅正电荷的分布图。我们可以说，这图像已被分裂成大小不同的电荷点子。小光电管所放出的电子，由集电环收集，移出光电摄像管。电子枪由灯丝及带小孔的金属片组成。灯丝用于发射电子，从灯丝发出的电子有一部分穿过小孔。成为一条细如头发的电子束，这束电子又被互相垂直的两套金属板扫描。在第一对金属板上加上适当的交变电压，使电子束沿上下方向扫描。同理，在与第一对金属片垂直的第二套金属片上，加上适当的交变电压使电子左右扫描。电子流就这样从镶嵌板上的左上角开始扫起。像我们看书一样，从左到右，自上而下地把整个镶嵌板全部扫过。这样扫描的目的，是当光线照射时按次序给每个光电管补充电子。假设有一个光电管失去了 1000 个电子，它要向构成镶嵌板支架的金属板吸引 1000 个电子。但因为金属板上的绝缘物质，这 1000 个电子并不能进入光电管。而当由电子枪来的电子流补充了光电管，金属板上那 1000 个电子又被驱散。由金属板上被驱走的电子形成一电脉冲，这电脉冲与照射到光电管的光线数量成正比。光线强，电脉冲也强。当电子流逐个对每个光电管扫描，电脉冲便快速地一个接着一个。这些电脉冲被增强用以调制电视载波，就像由无线电微音器来的电脉冲用以调制无线电载波一样。合成的电波在电视接收机中引起电子运动，即引起电脉冲。显像管中的扫描电子束的强弱变化，因此扫描电子束也携带了电视讯号，当它打到电视显像管机的屏幕上时，就使荧光屏再现出电视图像。

四、光学

【光学】

物理学的一个部门。光学的任务是研究光的本性，光的辐射、传播和接收的规律；光和其他物质的相互作用（如物质对光的吸收、散射、光的机械作用和光的热、电、化学、生理效应等）以及光学在科学技术等方面的应用。17世纪末，牛顿倡立“光的微粒说”。当时，他用微粒说解释观察到的许多光学现象，如光的直线性传播，反射与折射等，后经证明微粒说并不正确。1867年惠更斯创建了“光的波动说”。波动说历时一世纪以上，都不被人们所重视，完全是人们受了牛顿在学术上威望的影响所致。当时的波动说，只知道光线会在遇到棱角之处发生弯曲，衍射作用的发现尚在其后。1801年杨格就光的另一现象（干涉）作实验（详见词条：杨氏干涉实验）。他让光源S的光照亮一个狭长的缝隙 S_1 ，这个狭缝就可以看成是一条细长的光源，从这个光源射出的光线再通过一双狭缝以后，就在双缝后面的屏幕上形成一连串明暗交替的光带，他解释说光线通过双缝以后，在每个缝上形成一新的光源。由这两个新光源发出的光波在抵达屏幕时，若二光波波动的位相相同时，则互相叠加而出现增强的明线光带，若位相相反，则相互抵消表现为暗带。杨格的实验说明了惠更斯的波动说，也确定了惠更斯的波动说。同样地，10世纪有关光线绕射现象之发现，又支持了波动说的真实性。绕射现象只能借波动说来作满意的说明，而不可能用微粒说解释。20世纪初，又发现光线在投到某些金属表面时，会使金属表面释放电子，这种现象称为“光电效应”。并发现光电子的发射率，与照射到金属表面的光线强度成正比。但是如果用不同波长的光照射金属表面时，照射光的波长增加到一定程度时，即使照射光的强度再强也无法从金属表面释放出电子。这是无法用波动说解释的，因为根据波动说，在光波的照射下，金属中的电子随着光波而振荡，电子振荡的振幅也随着光波振幅的增强而加大，或者说振荡电子的能量与光波的振幅成正比。光越强振幅也越大，只要有足够强的光，就可以使电子的振幅加大到足以摆脱金属原子的束缚而释放出来，因此光电子的释放不应与光的波长有关。但实验结果却违反这种波动说的解释。爱因斯坦通过光电效应建立了他的光子学说，他认为光波的能量应该是“量子化”的。辐射能量是由许许多多分立能量元组成，这种能量元称之为“光子”。光子的能量决定于方程

$$E=hf$$

式中 E =光子的能量，单位焦耳

h =普朗克常数，等于 6.624×10^{-34} 焦耳/秒

f =频率。即每秒振动数。 $v=c/\lambda$ ， c 为光线的速度， λ 为光的波长。

现代的观念，则认为光具有微粒与波动的双重性格，这就是“量子力学”的基础。在研究和应用光的知识时，常把它分为“几何光学”和“物理光学”两部分。适应不同的研究对象和实际需要，还建立了不同的分支。如光谱学，发光学、光度学，分子光学、晶体光学，大气光学、生理光学和

主要研究光学仪器设计和光学技术的应用光学等等。

【光】

严格地说，光是人类眼睛所能观察到的一种辐射。由实验证明光就是电磁辐射，这部分电磁波的波长范围约在红光的 0.77 微米到紫光的 0.39 微米之间。波长在 0.77 微米以上到 1000 微米左右的电磁波称为“红外线”。在 0.39 微米以下到 0.04 微米左右的称“紫外线”。红外线和紫外线不能引起视觉，但可以用光学仪器或摄影方法去量度和探测这种发光物体的存在。所以在光学中光的概念也可以延伸到红外线和紫外线领域，甚至 X 射线均被认为是光，而可见光的光谱只是电磁光谱中的一部分。

【光源】

物理学上指能发出一定波长范围的电磁波（包括可见光与紫外线、红外线和 X 光线等不可见光）的物体。通常指能发出可见光的发光体。凡物体自身能发光者，称做光源，又称发光体，如太阳、恒星、灯以及燃烧着的物质等都是。但像月亮表面、桌面等依靠它们反射外来光才能使人们看到它们，这样的反射物体不能称为光源。在我们的日常生活中离不开可见光的光源，可见光以及不可见光的光源还被广泛地应用到工农业，医学和国防现代化等方面。光源主要可分为：热辐射光源，例如太阳、白炽灯、炭精灯等；气体放电光源，例如，水银灯、荧光灯等。激光器是一种新型光源，具有发射方向集中、亮度高，相干性优越和单色性好的特点。

【几何光学】

光学中以光的直线传播性质及光的反射和折射规律为基础的学科。它研究一般光学仪器（如透镜、棱镜，显微镜、望远镜、照相机）的成像与消除像差的问题，以及专用光学仪器（如摄谱仪、测距仪等）的设计原理。严格说来，光的传播是一种波动现象，因而只有在仪器的尺度远大于所用的光的波长时，光的直线传播的概念才足够精确。由于几何光学在处理成像问题上比较简单而在大多数情况下足够精确，所以它是设计光学仪器的基础。

【物理光学】

光学中研究光的本性以及光在媒质中传播时各种性质的学科。物理光学过去也称“波动光学”，从光是一种波动出发，能说明光的干涉、衍射和偏振等现象。而在赫兹用实验证实了麦克斯韦关于光是电磁波的假说以后，物理光学也能在这个基础上解释光在传播过程中与物质发生相互作用时的部分现象，如吸收，散射和色散等，而且获得一定成功。但光的电磁理论不能解释光和物质相互作用的另一些现象，如光电效应、康普顿效应及各种原子和分子发射的特征光谱的规律等；在这些现象中，光表现出它的粒子性。本世纪以来，这方面的研究形成了物理光学的另一部门“量子光学”。

【光线】

光源发出之光，通过均匀的介质时，恒依直线进行，叫做光的直进。此依直线前进之光，代表其前进方向的直线，称之为“光线”。光线在几何光学作图中起着重要作用。在光的直线传播，反射与折射以及研究透镜成像中，都是必不可少且要反复用到的基本手段。应注意的是，光线不是实际存在的实物，而是在研究光的行进过程中细窄光束的抽象。正像我们在研究物体运动时，用质点作为物体的抽象类似。

【日蚀】

指地球进入月球的本影中，太阳被遮蔽的情形。当太阳、月球和地球在同一条直线上时便会发生。月球每月都会处于太阳与地球之间，不过日食并不能每月看到，这是因为白道（月球的轨道）平面对地球轨道有 5° 的倾角。月球可能时而在黄道之上或时而在黄道之下，故其阴影不能落在地球上。只有当太阳、月球和地球在一直线内，才能产生日蚀。如果地球的某一部分在月影之内，即发生日蚀；日蚀有全蚀、偏蚀、环蚀三种。地球上的某些地方正位于月球的影锥之内（即在基本影之内）这些地方就能观看到日全蚀。锥外虚影所射到的地方（即半影内的地方）则看到偏蚀。月球离地球较远的时候，影锥尖端达不到地面，这时从圆锥的延长线中央部分看太阳的边缘，还有狭窄的光环，这就是发生的环蚀现象。环蚀在亚洲，一百年中只能遇见十几次，在一个小地区欲见环蚀者，数百年也难得有一次机会。月影投到地面上，急速向西走，所以某一地点能够看见的全蚀时间非常的短，最长不过七分半钟，平均约3分。日全蚀带的宽度，平均约160公里。在某一地点能够看见日全蚀的机会，非常的少；平均360年只有一次。日全蚀的机会虽少，而需要观测和研究的问题甚多。例如日月相切时刻的测定。爱因斯坦引力说的证明等等。

【木星】

在我国古代称之为岁星，是九大行星中最大也最重的行星，它的直径比地球的直径大 11 倍，它的质量也比地球重 317 倍。它的自转周期为 9.842 小时，是所有行星中最快的一个。木星上的大气分布很广阔，其组成含氢（ H_2 ）氮（ N_2 ）、沼气（甲烷 CH_4 ）及氨气（ NH_3 ），因此，其表面完全为昏暗所笼罩着。木星离地球的距离为 628 220 000 公里，它的赤道直径为 142 804 公里，比地球要大 11 倍。虽然它是太阳系最大的一颗行星，但它却有最短的自转周期，比起地球的一天短了 14 小时 6 分钟；故知它是以极其惊人的速度不停地自转着，就是在其赤道上的某一质点最少也以时速 45 000 公里的速度卷旋前进着。离心力在赤道地带也大得惊人，结果便造成赤道的凸出，使此行星变成如一个压扁的橙子一样。木星有四颗大卫星，被命名为水卫一、木卫二，都能用小望远镜看到，甚至有人能用肉眼观察到。显然它们的体积必定相当可观，它们的直径木卫一约是 3719 公里，木卫二约是 3139 公里，木卫三约是 5007 公里，木卫四约是 5184 公里。在这四颗卫星中，最靠近木星表面的一颗就是木卫一。由于巨大的卫星引力。木卫一只能以 42 小时半的时间环绕木星一周。在这些木卫环绕木星的过程中，它们有时在木星之后所谓被掩，有时在木星的阴暗面，称为蚀，有时在木星前叫作凌犯。

【月蚀】

当地球位于太阳和月球之间而且是满月时，进入地影的月球，就会发生月蚀。月球全部走到地影中的时候，叫做全蚀；只有一部分进入本影的时候，叫做偏蚀。月全蚀的时候可分做五象，当月球和本影第一次外切的时候，叫做初亏；第一次内切的时候叫做蚀既；月心和本影中心距离最近的时候，叫做蚀甚；当月球和本影第二次内切的时候，叫做生光；第二次外切的时候叫做复圆。偏蚀时，只有初亏、蚀甚、复圆三种现象。月蚀现象一定发生于望（阴历十五）的时候；但是望的时候，未必发生月蚀。这是因为白道（月球运行轨道）和黄道（地球运行的轨道）不相一致的缘故。但望时的月球如果距离交点太远，将不能发生月蚀；必须在某一定距离之内，才可以发生月食，这一定的界限，叫做月蚀限；这限界是随日、月、地球的距离和白道交角的变化而略有变动，最大值为 12.2° ，最小值为 9.5° 。月蚀最长时共维持 3 小时 40 分，其中 1 小时 40 分为全蚀，其余两小时为偏蚀。月蚀如在地平以上发生，则因地球自转，故可见地区超过半个地球。月全蚀时因地球大气反射红光进入地影，故可见古铜色微光之月面。月蚀次数虽较少，但见蚀带极广，而日蚀带狭窄，故同一地区之居民，看见月蚀之次数较日蚀多。

【光速】

一般指光在真空中的传播速度。真空中的光速是物理学的基本常数之一，它的特征是：（1）一切电磁辐射在真空中传播的速率相同，且与辐射的频率无关；（2）无论在真空中还是在其他物质媒质中，无论用什么方法也不能使一个信号以大于光速 c 的速率传播；（3）真空中光速与用以进行观测的参照系无关。如果在一伽利略参照系中观察到某一光信号的速率为 $c=2.99793 \times 10^{10}$ 厘米/秒，那么，在相对此参照系以速度 v 平行于光信号运动的另一个伽利略参照系中，所观测到的光信号一定也是 c ，而不是 $c+v$ （或 $c-v$ ），这就是相对论的基础；（4）电磁学理论中的麦克斯韦方程和罗伦兹力方程中都含有光速。当用高斯单位来写出这两个方程时，这一点特别明显。光在真空中的速度为 c ，在其他媒质中，光的速度均小于 c ，且随媒质的性质和光波的波长而不同。

【光速之测定】

伽利略曾经建议，使光行一段 7.5 千米的路程以测定其速度，但因所用的设备不完善而未成功。此后，直到 1675 年，丹麦学者罗默在巴黎求得光速之可用数值。罗默把他的观察扩展到宇宙之间，而其所用的研究对象则为木星卫星的成蚀。这些卫星之中最内层的一个卫星

M如图4-1所示。其绕转一周所需之时间约为 $42\frac{1}{2}$ 小时。因此，每经过

此一周期之间隔，M便再次进入木星J之阴影中，而使地球上的观察者暂时无法看到它。罗默发现，当地球E环绕太阳S作公转并远离木星而去时，其由 E_1 抵达 E_2 所需的时间约为 $42\frac{1}{2}$ 小时，此际木星卫星的成蚀要退14

秒钟才会发生；又当地球在同一时间（即 $42\frac{1}{2}$ 小时）内由 E_6 迎向木星抵达 E_7 时，成蚀却可提早14秒钟发生。至于木星卫星的实际绕转周期，则可根据地球公转到 E_5 或 E_8 时所作之观测求得。罗默认为此一现象，确实是由于地球从 E_1 运行到 E_2 之时，光之进行必须跟在地球后面追赶上去，而当地球由 E_6 运行到 E_7 时，则光之进行可对着地球迎头赶上所致。由此可知， E_1 与 E_2 或 E_6 与 E_7 之间的距离，与地球在木星的卫星绕木星一周所需要的时间内运行的路程相符合。因为地球公转速度为30千米/秒，所以此二距离都是等于 $42.5 \times 60 \times 60 \times 30$ （千米），约为4 600 000千米。这说明光需要多走14秒钟始能赶上地球由 E_1 至 E_2 的这一段距离；另一方面它在地球由 E_6 至 E_7 向光迎头赶上的这段距离中，光之行进却能省下14秒钟。由此得到光速约稍大于300 000千米/秒（ $4600000/14 = 328000$ 千米/秒）。当地球由 E_2 远离木星而继续运转至 E_3 、 E_4 等处时，那么当靠近 B^5 时，则每次成蚀延迟之时间相继地累积起来，直到地球渐近于E时成蚀延迟时间逐渐减少为零了（此乃由于木星与地球间的距离之增加，由于接近 E_5 而渐渐减少，终于抵达 E_5 而趋于零所致）。故成蚀延迟之时间，当地球在半年之中由 E^8 运转至 E_5 时，每次成蚀延迟时间相加起约等于1000秒。这也就是光从木星到达 E_5 和光从木星到达 E_8 这两段行程所需的时间差（亦即光行经地球公转轨道直径 E_5E_8 所需之时间）。由天文学上可知地球公转的轨道之直径为 $d = 300000000$ 千米；利用此数值计算出的光速为

$$\frac{300\ 000\ 000}{1\ 000} = 300000\text{千米/秒}。$$

这一数值要比根据每连续两次木星卫星成蚀之时差所求得的光速更可靠一些。罗默测出的光速 $c = 315000$ 千米/秒，和现在科学家采用更较精细的量度方法在真空中求得之光速的数值 $c = 299796 \pm 4$ 千米/秒，实极接近。 $c = 299796$ 这个数值是美国物理学家迈克耳孙测出的。在激光得以广泛应用以后，开始利用激光测量光速。其方法是测出激光的频率和波长，应用

$$c = v$$

计算出光速 c ，目前这种方法测出的光速是最精确的。根据 1975 年第 15 届国际计量大会决议，把真空中光速值定为

$$c = 299\,792\,458 \text{ 米/秒。}$$

在通常应用多取 $c = 3 \times 10^8$ 米/秒。

【迈克耳孙】

Michelson (1852 ~ 1931 年) 美国物理学家。他创造的迈克耳孙干涉仪对光学和近代物理学是一巨大的贡献。它不但可用来测定微小长度、折射率和光波波长等，也是现代光学仪器如付立叶光谱议等仪器的重要组成部分。他与英国化学家莫雷 (1838 ~ 1923 年) 在 1887 年利用这种干涉仪，作了著名的“迈克耳孙—莫雷实验，这一实验结果否定了以太的存在，从而奠定了相对论的实验基础。1926 年用多面旋镜法比较精密地测定了光的速度。

【光的直线传播定律】

光在均匀媒质中是沿着直线传播的。因此，在点光源（即其线度和它到物体的距离相比很小的光源）的照明下，物体的轮廓和它的影子之间的关系，相当于用直线所做的几何投影。光的直线传播定律是人们从实践中总结出来的。而直线这一概念本身，显然也是由光学的观察而产生的。作为两点间的最短距离是直线这一几何概念，也就是光在均匀媒质中沿着它传播的那条线的概念。所以自古以来，在实验上检查产品的平直程度，均以视线为准。但是，光的直线传播定律并不是在任何情况下都是适用的。如果我们使光通过很小的孔，则光的传播将不

再遵守直线传播的定律。如果孔的直径在 $\frac{1}{100}$ 毫米左右，我们只能得到一个

轮廓有些模糊的小孔的像。孔越小，像越模糊。当孔的限度小到约为 $\frac{1}{2000}$ 毫

米时，人们就看不出小孔的像了。这是光的波动而引起的。

【光的反射】

光遇到物体或遇到不同介质的交界面（如从空气射入水面）时，光的一部分或全部被表面反射回去，这种现象叫做光的反射，由于反射面的平坦程度，有单向反射及漫反射之分。人能够看到物体正是由于物体能把光“反射”到人的眼睛里，没有光照明物体，人也就无法看到它。

【光的反射定律】

在光的反射过程中所遵守的规律：(1)入射光线、反射光线与法线(即通过入射点且垂直于入射面的线)同在一平面内，且入射光线和反射光线在法线的两侧；(2)反射角等于入射角(其中反射角是法线与反射线的夹角。入射角是入射线与法线的夹角)。在同一条件下，如果光沿原来的反射线的逆方向射到界面上，这时的反射线一定沿原来的入射线的反方向射出。这一点谓之“光的可逆性”。

【漫反射】

当一束平行的入射光线射到粗糙的表面时，因面上凹凸不平，所以入射线虽然互相平行，由于各点的法线方向不一致，造成反射光线向不同的方向无规则地反射，这种反射称之为“漫反射”或“漫射”。这种反射的光称为漫射光。很多物体，如植物、墙壁、衣服等，其表面粗看起来似乎是平滑，但用放大镜仔细观察，就会看到其表面是凹凸不平的，所以本来是平行的太阳光被这些表面反射后，弥漫地射向不同方向。

【平面镜】

镜的反射面是光滑平坦的面，叫做平面镜。普通使用的镜是在磨平后的玻璃背面涂有银，或涂锡和水银的合金。物体放在镜前时，物体即映于镜中而可以看见。这是由于物体反射出的光，于镜面反射后进入眼睛所致。平面镜成像，并非光线实际的集合点，所以叫做虚像。平面镜所成之像的大小和原物体相同，其位置和原物体成对称，因为像和镜面的距离，恒与物体和镜面的距离相等。实物在两平面镜间可引起多次反射而形成复像，其在每镜中除由原物各成一像外，余皆互以他镜之像为物而形成。

【潜望镜】

从海面下伸出海面或从低洼坑道伸出地面，用以窥探海面或地面上活动的装置，其构造与普通地上望远镜相同，唯另加两个反射镜使物光经两次反射而折向眼中。潜望镜常用于潜水艇，坑道和坦克内用以观察敌情。

【球面镜】

反射面为球面的镜，可用以成像。球面镜有凹、凸两种，反射面为凹面的称“凹面镜”，反射面为凸面的称“凸面镜”。连接镜面顶点与其球心的直线称为“主轴”。与主轴相近而与它平行的一束光线，被镜面反射后，反射光线（或其延长线）与主轴相交，其交点称为“焦点”。镜而顶点和焦点之间的距离称为“焦距”，等于球半径的一半。凹镜的球心和焦点（实焦点）都在镜前，凸镜的球心和焦点（虚焦点）都在镜后。凹镜有使入射光线会聚的作用，所以也称“会聚镜”，凸镜有使入射光线发散的作用，所以也称“发散镜”。在反射望远镜中用到凹镜；在汽车前面供驾驶员看后面车辆情况的镜子，则是凸镜。

【反射率】

又称“反射本领”。是反射光强度与入射光强度的比值。不同材料的表面具有不同的反射率，其数值多以百分数表示。同一材料对不同波长的光可有不同的反射率，这个现象称为“选择反射”。所以，凡列举一材料的反射率均应注明其波长。例如玻璃在可见光的反射率约为 4%，锗对波长为 4 微米红外光的反射率为 36%，铝从紫外光到红外光的反射率均可达 90% 左右，金的选择性很强，在绿光附近的反射率为 50%，而在红外光的反射率可达 96% 以上。此外，反射率还与反射材料周围的介质及光的入射角有关。上面谈及的均是指光在各材料与空气分界面上的反射率，并限于正入射的情况。

【球面镜成像】对于凸面镜只能使物成正立、缩小的虚像。如图 4 - 2a 所示。由物 A 点出发的平行于光轴的光线，达到镜面后将反射，其反射光的延长线必交球面镜的焦点 F 上。而从 A 射向 F 的光线被球面反射后将平行于光轴。这两条反射线，没有实交点，只有虚交点 A'，也就是说视觉认为这两条光线是从 A' 发出的。物体上的 B 点发出的沿光轴的光线，即平行于光轴，又过焦点，故 B' 为 B 点的像。在物体 AB 上的各点，按照前述办法作图，其各点的像点都在 A' B' 上，故 A' B' 即为 AB 的像。无论物 AB 在何处，它所发出的光射到球面镜后而反射的光，没有实交点，因此所成之像必为虚像。由图中可以看出，物体在轴的上方，所成的虚像也在轴的上方，故所成之像为正立。无论 AB 在什么位置，从 A 点出发的平行于轴的光线一定在 AF 方向的光线的上方。此两线的交点 A' 必比 A 点更靠近轴，所以像是缩小的。根据上述方法作图可知凹透镜成像可有三种情况：
(1) 物在凹镜前二倍焦距以外时，是倒立缩小的实像，见图 4—2b。
(2) 物在两倍焦距以内，焦点以外时，则成倒立放大的实像，见图 4—2c。
(3) 当物位于焦点以内时，则成正立的放大的虚像，见图 4—2d。

【光的折射】

凡光线在通过疏密不同介质界面时改变方向的现象，称为光之折射。如图 4—3 所示，光线 AB 由空气

内斜向射至水面，自入射点 B 起，就向这点的法线 EE' 偏折而取 BM 的方向，若在水底置一平面镜 M，使反射线 MC 再由水中透入空气，则自入射点 C 起，离开法线 FF' 偏折，而取 CD 的方向。偏折后的光线 BM 和 CD，称为折射线，折射线和法线所成的角，如 $\angle E'BM$ 和 $\angle FCD$ ，称为折射角。由此可知光线由稀的介质入射到密的介质时，折射线常向法线偏向，故折射角常比入射角小；若由密的介质透入稀的介质时，折射线常离法线而偏向，折射角常比入射角大。当光线通过介质的密度在不断变化时，光线前进的方向也随之而改变，因此我们隔着火盆上的热空气看对面的东西时，会觉得那东西不停地在闪动着。这是由于火盆上面的空气因受热很快地上升，这部分空气的密度便和周围空气的密度不同，而且热度还不断在变化，当由物体射来的光线通过这样的空气，其折射线的光路不断发生变化，就会使物体变成了闪动的形状。在炎夏中午时分，假使躺在地上来看树木、房屋和人物，它们的轮廓好像是透过一层流动的水一样，而且动摇不定。这是因为那时十分炎热，地面的辐射热很多，温度高，接近地面的空气受热，密度变小，因而上升，成为向上流动的气流，由物体射来的光线通过这种变动着的气流折射线的光路就不断改变，因此所看到的物便都动摇不定。我们在夜里看到天空中恒星的闪动，也是这个道理。大气里经常存在着密度不同的气流和旋涡，当恒星的光线通过这种气流时，就会使它原来折射的路径发生变化，一会儿到左，一会儿到右，恒星是不会闪动的，都是这折射线造成的。又如太阳位于地平线附近时，光之折射作用尤大。在地平线下的太阳，阳光从太空（真空）平射至逐渐变化的光密媒质空气中而发生的折射，光线传到地面是一曲线，因为光之折射的关系，太阳看上去就如同刚刚接触到地平线的下缘一样，其实它业已落至地平线以下了。同理，当太阳刚刚还在地平线下的时候，看上去它已升起来了。所以我们可以说：太阳实际上比我们肉眼所见的要落得早些而起的迟些；这等于说，光之折射将我们的白天稍稍加长了一点。

【折射定律】

在光的折射现象中，确定折射光线方向的定律。当光由第一媒质（折射率 n_1 ）射入第二媒质（折射率 n_2 ）时，在平滑界面上，部分光由第一媒质进入第二媒质后即发生折射。实验指出：（1）折射光线位于入射光线和界面法线所决定的平面内；（2）折射线和入射线分别在法线的两侧；（3）入射角 i 的正弦和折射角 i' 的正弦的比值，对折射率一定的两种媒质来说是一个常数，即

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = n$$

此定律是几何光学的基本实验定律。它适用于均匀的各向同性的媒质。用来控制光路和用来成像的各种光学仪器，其光路结构原理主要是根据光的折射和反射定律。此定律也可根据光的波动概念导出，所以它也可应用于无线电波和声波等的折射现象。

【折射率】

表示在两种（各向同性）媒质中光速比值的物理量。光从第一媒质进入第二媒质时（除垂直入射外），任一入射角的正弦和折射角的正弦之比对于折射率一定的两种媒质是一个常数。这常数称为“第二媒质对第一媒质的相对折射率”（ n_{12} ），并等于第一媒质中的光速 v_1 对

第二媒质中的光速 v_2 之比值 $\frac{v_1}{v_2} = n_{12}$ 。任一媒质对真空（作为第一媒质）的

折射率称为这媒质的“绝对折射率”，简称“折射率”。由于光在真空中传播的速度最大，故其他媒质的折射率都大于 1。同一媒质对不同波长的光，具有不同的折射率；在对可见光为透明的媒质内，折射率常随波长的减小而增大，即红光的折射率最小，紫光的折射率最大。通常所说某物体的折射率数值多少（例如水为 1.33，玻璃按成分不同而为 1.5 ~ 1.9），是指对钠黄光（波长 5893×10^{-10} 米）而言的。

【光密与光疏媒质】

折射率较大的媒质（光在其中速度较小）与折射率较小的媒质（光在其中速度较大）相比较，前者称“光密媒质”，后者称“光疏媒质”。如水对空气为光密，空气对水为光疏。光从光疏媒质进入光密媒质时，要向接近法线方向折射，即折射角小于入射角；光从光密媒质进入光疏媒质时，要离开法线折射，即折射角大于入射角。

【折射定律的解释】

折射定律的解释，是利用原始形态的惠更斯原理。这种形式的惠更斯原理，实质上是几何光学的原理，并且严格地说，只有在几何光学适用的条件下，也即在光波的波长和波阵面的线度相比为无穷小时，才能够加以应用。在这些条件下，它使我们能够导出几何光学的折射定律。假设以 v_1 表示第一种媒质中的光波速度，以 v_2 表示第二种媒质中的波速。设 i 是波阵面的法线 OC 与折射媒质表面的法线 OD 之间的夹角，见图 4—4。设在时刻 $t=0$ ，波阵面的 C 点到达媒质表面 C 点，和点 O 重合，则在波阵面从 A' 点到达第二种媒质（点 B ）所需的时间为 $\frac{A'B}{v_1}$ ，次波便从作为中心的点 O 出发，传播到某一个距离 Of 。以点 O_1, O_2 等为中心的各个次波，到指定时刻都传播到相应的距离，

图 4—4

在第二种媒质中给出许多元球面波 f_1, f_2, \dots 。按照惠更斯原理，诸元波的包络面，即平面 Bf_2f_1f ，指出波阵面的实在位置。显然

$$OB = \frac{Of}{\sin r} = \frac{A'B}{\sin i}$$

将数值 $A'B = v_1 t$ 和 $Of = v_2 t$ 代入式中，得到：

$$v_1 \sin r = v_2 \sin i$$

或

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n$$

由此看到，惠更斯的理论解释了折射定律，并且很容易使折射率的数值和傅科在 150 多年以后所做的实验结果相符。应当注意，在折射现象中，光经过两种媒质，所以折射率与两种媒质有关，当光由媒质 射入媒质 ，这个折射率是指媒质 对媒质 的相对折射率，通常记作 n_{21} ， $n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$ 。

光从真空射入某种媒质的折射率，叫做该种媒质的绝对折射率，通常用 n 来表示，显然

$$n = \frac{c}{v}$$

【全反射】

光由光密（即光在其中传播速度较小的）媒质射到光疏（即光在其中传播速度较大的）媒质的界面时，全部被反射回原媒质内的现象。光由光密媒质进入光疏媒质时，要离开法线折射，如图 4—5 所示。当入射角增加到某种情形（图中的 e 射线）时，折射线沿表面进行，即折射角为 90° ，该入射角 i_c 称为临界角。若入射角大于临界角，则无折射，全部光线均反射回光密媒质（如图 f、g 射线），此现象称为全反射。当光线由光疏媒质射到光密媒质时，因为光线靠近法线而折射，故这时不会发生全反射。

图 4—5

【临界角】

光从光密媒质射到光疏媒质的界面时，折射角大于入射角。当折射角为 90° 时，折射光线沿媒质界面进行，这时的入射角称为“临界角”。当入射角大于临界角时，折射定律就无法适用了，而只会发生全反射现象。光由水进入空气的临界角约为 48.5° ，从玻璃进入空气的临界角，随玻璃的成分不同而异，约在 $30^\circ \sim 42^\circ$ 之间。利用光的折射定律可以求出其临界角。应注意，这时光是由光密媒质射向光疏媒质，所以

$$\frac{\sin \theta_c}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$$

如果光是由某种媒质射向空气界面，则 n 是该媒质对空气的折射率，而 $\frac{1}{n}$ 则是空气对该媒质的折射率，所以

$$\sin \theta_c = \frac{1}{n}$$

$$\theta_c = \arcsin \frac{1}{n}$$

【光导纤维】

光导纤维是利用全反射规律而使光沿着弯曲途径传播的光学元件。它是由非常细的玻璃纤维组成束，每束约有几万根，其中每根通常都是一种带套层的圆柱形透明细丝，直径约为 5~10 微米，可用玻璃、石英、塑料等材料在高温下控制而成。它已被广泛地应用于光学窥视（传光、传像）和光通讯。光导纤维的结构如图 4—6 所示，内层材料选取的折射率大，外层材料的折射率低，就是要在内外层之间的界面上产生全反射，以保证光的传输效率。如图 4—7 所示，单箭头线表示临界光线，它在内外层分界面上的入射角等于或小于临界角 A。若在折射率为 n_0 的媒质中入射角大于 i_0 的那些光线（以双箭头表示），在 n_1 、 n_2 分界面上的入射角就小于 A，这些光线无法通过纤维而在其中传播。只有在媒质 n_0 中其顶角为 $2i_0$ 的锥体内的全部光线才能在光学纤维中传播，根据临界角的定义

$$\sin A = \frac{n_2}{n_1}$$

和折射定律

$$n_0 \sin i_0 = n_1 \sin i_1$$

可得

$$n_0 \sin i_0 = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - A\right) = n_1 \cos A = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 A} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

所以对于一定的 n_1 和 n_2 ， i_0 的值是固定的，纤维所容许传播的光线所占的范围是一定的。要使更大范围内的光束能在光学纤维中传播，应该选择 n_1 和 n_2 的差值较大的材料。通常把 $n_0 \sin i_0$ 的值叫做光导纤维的数值孔径。

光导纤维可用于潜望

图 4—6

图 4—7

镜和内窥视系统，它可以窥视人眼所观察不到的或有损于人体健康的地方。国防上可以制成各种坦克、飞机或舰艇上的潜望镜。医学上可以用来制作胃、食道、膀胱等内腔部位进行检查和诊断的各种医用窥镜。如果配有大功率激光传输的光学纤维，还可进行内腔激光治疗。由于光纤通讯与电通讯相比具有许多优点，诸如抗电磁干扰性强、频带宽和保密性好、通讯容量大，设备轻巧，制取纤维的二氧化硅的资源又十分丰富。近年来已有数百条光纤通讯线路在世界各地进行试验或正式运行。光导纤维的问世，为光能的应用开辟了更广阔的天地。

【棱镜】

透明材料(如玻璃、水晶等)做成的多面体。在光学仪器中应用很广。棱镜按其性质和用途可分为若干种。例如,在光谱仪器中把复合光分解为光谱的“色散棱镜”,较常用的是等边三棱镜;在潜望镜、双目望远镜等仪器中改变光的进行方向,从而调整其成像位置的称“全反射棱镜”,一般都采用直角棱镜。

图 4—8

【棱镜的偏向角】

光通过一三棱镜的偏向角等于入射角与出射角之和减去棱镜的折射棱角。如图 4—8 所示。为棱镜的折射棱角，当光束 SB 入射到棱镜时，经连续发生两次折射，出射光线 CS' 和入射光线 SB 之间的夹角，叫做偏向角“ δ ”。由图不难看出：

$$\begin{aligned} \delta &= (i_1 - i_2) + (i_1' - i_2') = (i_1 + i_1') - (i_2 + i_2') \\ &= i_1 + i_1' - \end{aligned}$$

如果保持入射线的方向不变，而将棱镜绕垂直于图面的轴线旋转，则偏向角必然随之而改变。可以证明，如果入射角等于出射角时，即在 $i_1 = i_1'$ 时，则偏向角最小，称为最小偏向角。用 δ_{\min} 表示。

$$\delta_{\min} = 2t_1 -$$

由此可得

$$i_1 = \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2}$$

又当 $i_1 = i_2'$ 时，折射角

$$i_2 = i_2' = \frac{\alpha}{2}。$$

利用这两个特殊的入射角和折射角，可以计算棱镜材料的折射率

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin \frac{\alpha + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

利用最小偏向角测折射率，非常方便也很精确。折射棱角很小的棱镜，光线通过它时产生的偏向角可按下述方法推出。即由折射定律可知

$$\sin i_1 = n \sin i_2, \sin i_1' = n \sin i_2'。$$

在折射棱角很小和近轴光线的条件下，BEC 的底角 i_2, i_2' 很小，所以

$$i_1 \approx n i_2, i_1' \approx n i_2'$$

则有

$$\delta = n i_2 + n i_2' - \alpha = n (i_2 + i_2') - \alpha = (n-1)\alpha$$

运用这个近似关系，可以推导出薄透镜的物像关系式。

【色散】

复色光被分解为单色光，而形成光谱的现象，称之为“色散”。色散可通过棱镜或光栅等作为“色散系统”的仪器来实现。例如，白色光线射于三棱镜，则通过棱镜之后，光线被分散为由不同颜色光组成的色彩光谱。如一细束阳光可被棱镜分为红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七色光。这是由于复色光中的各种色光的折射率不相同。当它们通过棱镜时，传播方向有不同程度的偏折，因而在离开棱镜时便各自分散。折射率较大的紫色光偏向大，而折射率较小的红光则偏向小。由于各色光的折射率有大小之分（这是由于各色光的频率不同造成的，频率高的折射率大），所以非单色光才会发生色散。当一白光由空气射入水或玻璃时，折射后分成各色的光，若玻璃为两面平行的平板，则光从玻璃射出的线平行，不同色光再行重叠，并未发现色散现象。若光通过棱镜，不同色光之出射线不平行，色散现象较易观察。

【光谱】

复色光经过色散系统（如棱镜、光栅）分光后，被色散开的单色光按波长（或频率）大小而依次排列的图案。例如，太阳光经过三棱镜后形成按红、橙、黄、绿、青、蓝、紫次序连续分布的彩色光谱。红色到紫色，相应于波长由 $7,700 \sim 3800 \times 10^{-10}$ 米的区域，是为肉眼能感觉的可见部分。红端之外为波长更长的红外光，紫端之外则为波长更短的紫外光，都不能为肉眼所觉察，但能用仪器记录。因此，按波长区域不同，光谱可分为红外光谱、可见光谱和紫外光谱；按产生的本质不同，可分为原子光谱、分子光谱；按产生的方式不同，可分为发射光谱、吸收光谱和散射光谱；按光谱表观形态不同，可分为线光谱、带光谱和连续光谱。光谱的研究已成为一门专门的学科，即光谱学。光谱学是研究原子和分子结构的重要学科。

【透镜】

光学仪器的一种重要元件，由透明物质（如玻璃、水晶等）制成。光线通过透镜折射后可以成像。按照其形状或成像要求的不同，透镜可分为许多种类，如两面都磨成球面，或一面是球面另一面是平面的称“球面透镜”；两面都磨成圆柱面，或一面是圆柱面一面是平面的称“柱面透镜”。透镜一般可分为凸透镜和凹透镜两大类。

【凸透镜】

凸透镜是中央部分较厚的透镜。凸透镜分为双凸、平凸和凹凸（或正弯月形）等形式，如图 4 - 9 所示。薄凸透镜有会聚作用故又称聚光透镜，较厚的凸透镜则有望远、发散或会聚等作用，这与透镜的厚度有关。将平行光线（如阳光）平行于轴（凸透镜两个球面的球心的连线称为此透镜的

图 4—9

主光轴）射入凸透镜，光在透镜的两面经过两次折射后，集中在轴上的一点，此点叫做凸透镜的焦点（记号为 F），凸透镜在镜的两侧各有一焦点，如为薄透镜时，此两焦点至透镜中心的距离大致相等。凸透镜之焦距如图 4—10 所示，是指焦点到透镜中心的距离，通常以 f 表示。凸透镜球面半径越小，焦距越短。凸透镜可用于放大镜、老花眼及远视的人戴的眼镜、显微镜、望远镜的透镜等。

图 4—10

【凹透镜】

两侧面均为球面或一侧是球面另一侧是平面的透明体，中间部分较薄，称为凹透镜。分为双凹、平凹及凸凹透镜三种，如图 4—11 所示之 A、B、C。其两面曲率中心之连线图 4—11b 所示之 C_1H ，称为主轴，其中央之点 O 称为光心。通过光心的光线，无论来自何方均不折射。图 4—11c

表示，平行主轴之光束，照于凹透镜上折射后向四方发散，逆其发散方向的延长线，则均会于与光源同侧之一点 F，其折射光线恰如从 F 点发出，此点称为虚焦点。在透镜两侧各有一个。凹透镜又称为发散透镜。凹透镜的焦距，如图 4—12 所示。是指由焦点到透镜中心的距离。透镜的球面曲率半径越大其焦距越长，如为薄透镜，则其两侧之焦距相等。

图 4—11

图—12

【物和像】

人们能感觉到物，是由于物体各点所反射的光，经过人眼这个光学系统（相当一个焦距可调的凸透镜）成像于视网膜上，再由视神经传到大脑而造成视觉，从光学的角度讲，物点是发散光束的顶点，所以物就是由这些发散光束顶点的组合而成。如果光束经不同媒质的界面反射或折射以后，光线的方向虽然改变了，但反射光线或折射光线所构成的光束仍然有一个顶点“P'”，这个顶点P'就叫做像点，在这种情况下，每个像点和物点间建立了一一对应的关系。这些像点的组合就是像。如果光束中各光线确实在某点会聚，那么该会聚光束的顶点叫做实像；如果光束经界面反射或折射后是发散的，但这些光线反向延长后，能够找到光束的顶点，则该发散光束的顶点叫做虚像。物和像则是这些光束顶点的集合。在空间中的物，它向所有方向反光，眼睛无论在何处，只要找对方向都可以看到物。像则不然，因为平面镜或透镜的反射或折射的光束不是向所有方向，光束总是局限在一定的范围内。如果人眼恰处于光束所在的范围内，便可看到像，但是当眼睛位于反射或折射光束的范围之外时，眼睛是看不到像的。因为这些光束不能进入人的眼睛。

【实像和虚像】

物体发出的光线经过光具组（如反射镜、透镜组等）反射或折射后，重新会聚而造成的与原物相似的图景。实像可以显映在屏幕上，能使照像底片感光。摄影或放映电影都必须利用实像。若物体发出的光线经光具组反射或折射后，如为发散光线，则它们反向的延长线（虚光线）相交时形成的像称为“虚像”。虚像不能显映在屏幕上，也不能使照像底片感光，只能用人眼观察到。在放大镜、显微镜、望远镜等光学仪器中观察到的像都是虚像。

【虚物】

在光具组中，常按不同的要求使几个透镜来达到成像的目的，以两个透镜为例，如果第一个透镜所形成的实像位于第二个透镜的后面，则对第二个透镜来说，这像就称为“虚物”。

【光学的特定名称】

在研究透镜成象光学中有几个重要的特定名称。它们是：(1) 主光轴——它是连接透镜两球面曲率中心的直线。(2) 副光轴——通过光心的任意直线。所以副光轴有无数条。(3) 光心——透镜主轴上的一个特殊点。通过光心的光线，其出射方向和入射方向互相平行，但可有旁向的平行位移，对薄透镜一般认为其方向不变。薄透镜的中心可以近似地当作光心，射向薄透镜中心的光线可以认为无折射地通过。(4) 焦点——平行光束经透镜折射或曲面镜反射后的交点。有实焦点和虚焦点两类。薄透镜两边的焦点对称。而一般透镜的第一焦点（物方焦点）和第二焦点（像方焦点）不对称。(5) 主焦点——平行于透镜的主光轴的平行光束，经反射或折射后和主光轴相交的点。(6) 副焦点——平行于跟主光轴夹角不大的副光轴的光线，经透镜折射后会聚（或发散光线的反方向的延长线）于该副光轴上的一点。副焦点都处在焦平面上。(7) 焦平面——通过透镜（球面镜）主焦点并和主光轴垂直的平面。和主光轴成任意角度的平行光线经折射后相交的交点，均处于焦平面上。(8) 焦距——薄透镜的中心到焦点之间的距离。(9) 焦度——透镜或透镜组焦距的倒数。会聚透镜的焦度规定为正，发散透镜的焦度规定为负。如果焦距用来作单位时，焦度的单位叫做屈光度；而眼镜的焦度通常用度作为单位，1度为1屈光度的百分之一。

【物像公式】

描述物像位置以及它们和透镜或透镜组的特征量之一（焦距）之间的关系式。对一个薄凸透镜可以认为是由底面朝向透镜中央的许多棱镜的集合，而这些棱镜的顶角是很小的，对于顶角很小的棱镜来说，如果构成棱镜的材料的折射率为 n ，顶角为 A ，那么在近轴光线的条件下，其偏向角为常数 $(n-1)A$ 。当棱镜给定后，近轴光线的偏向角是不变的。我们可以利用此关系来推导薄透镜的物像公式。如图 4—13a 所示，设 PM 为平行光束中的任一条光线在 M 点入

射，而 $OM=h$ ，则出射光线 MF' 必通过透镜的焦点 F' ， $OF'=f$ ， f 为透镜的焦距。根据近轴光线的条件，即 $f \gg h$ ，偏向角近似为

$$\frac{h}{f}。$$

当主轴的物点 P 发出的任一近轴光线 PM 入射到透镜的 M 点图 4—13 时，图 4—13b 所示，在理想成像的条件下，出射光线 MP' 和主轴的交点 P' 为像点，此时偏向角也应相同。令物距 $OP=u$ ，像距 $OP'=v$ ，由图 b 中的几何关系可知

$$+ =$$

在近轴光线的条件下，可得

$$= \frac{h}{u}, \quad = \frac{h}{v}。$$

将 $\frac{h}{f}$ 和上式代入前式得

$$\frac{h}{u} + \frac{h}{v} = \frac{h}{f}$$

即

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}。$$

该式叫做高斯公式。平面镜、球面镜和薄透镜所形成的像的位置，可以根据物像关系式求得，最基本的公式有两个，即高斯公式

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

和横向放大率公式

$$K = \frac{v}{u}$$

其中 u 是物距——代表物到透镜（或面镜）的距离； v 是像距——代表像到透镜（或面镜）的距离； f 为透镜的焦距。 K 是像的横向放大率。此二关系式对三种光具组都适用。下表表明在三种透镜中应用情况。

光具 公式	透 镜	球面镜	平面镜
焦 距	$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$	$f = \frac{R}{2}$	f
物像公式	$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$	$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{R}$	$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = 0$
横向放大率	$K = \frac{v}{u}$	$K = \frac{v}{u}$	$K = \frac{v}{u} = 1$

【符号法则】

用物像公式进行计算时，应注意关系式中的各项都是代数值。因为只有取代数值，公式才具有普遍意义，否则会造成、凹球面、凸球面、凹透镜、凸透镜的物像公式各不相同，把问题变得复杂。各特定光学量的符号的采用法则是很重要的，若符号选错，则所有的计算全都错了。下面就其应用法则归纳为：（1）所有距离从光心（或顶点）量起；（2）对于实像 v 取正值，对于虚像 v 取负值；对于实物 u 取正值，对于虚物 u 取负值；（3）凡已知量，其数值前必须冠以符号；凡未知量，必须根据求出的符号来确定物像的性质和位置；（4）会聚透镜（或凹面镜）的焦距为正（实焦点）；发散透镜（或凸面镜）的焦距为负（虚焦点）。物像公式，正确运用符号法则，只要知道物体离开透镜（或球面镜）光心的距离 u 和焦距 f ，就可以求出成像的位置、像的性质和像的大小。应该注意的是，在球面反射和薄透镜折射时，物像公式只有在近轴光线，近轴物的情况下才适用。因此成像关系式是近似的。

【牛顿公式】

设 X_1 表示物体与第一焦点的距离，而 X_2 表示光像与第二焦点的距离，由图 4—14 可以看出。 $CC'F_2 \sim$

图 4—14

MOF 和 $M'O'F_2 \sim AA'O$ 放大率

$$K = \frac{CC'}{MO} = \frac{M'O}{AA'} = \frac{X_2}{F_2} = \frac{F_1}{f_1}$$

即

$$X_1 X_2 = f_1 f_2$$

对于薄透镜来讲， $f_1 = f_2 = f$ ，所以有

$$X_1 X_2 = f^2$$

这一关系式叫做牛顿公式，其形式较 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 简单，且对称性更显著，用时也较方便。

【透镜成像作图】

各种透镜成像作图中，应注意，实际光线用实线画出，在每一条光线上还必须标明箭头，以示光的传播方向。其辅助线，引伸线通常不用实线而采用虚线，以免和实际光线混淆。最后，光线作图法的目的是确定像的位置、性质和大小，因此作图可在方格纸上完成，图中标明比例和所有已知量及待定量数值。即称为按比例成像作图法。（1）凸透镜成像作图——这一作图主要是三条光线。如图 4—15 所示。其中 PF 为通过主焦点的入射线经透镜折射后平行于主轴。而 POP' 为通过光心的入射线不改变方向。由 P 点出发平行于主光轴的入射线折射后通过主焦点。此三条

图 4—15

线必交于同一点 P'，P' 便是 P 点的像。为了简便只要用其中的两条线便可确定像点的位置；（2）凹透镜成像作图的三条光线，如图 4—16 所示。平行于主轴的入射线，经透镜折射后的出射线的反向延长线通过和物同侧的虚主焦点。由 P 点射向透镜另一侧虚主焦点的入射线，折射后平行于主光轴。由 P 点射出通过光心的线不改变方向。其前两条线的反向延长线与第三条线均交于 P' 点。P' 点便是 P 点的虚像；（3）凸透镜的任意光线作图法。如果物点 P 在主轴上，则上述的三条光线便合为一条而无法作图，此时像的位置可利用副光轴和焦平面的性质来确定。利用第一焦平面的作图方法，如图 4—17 所示。经 P 点作一条入射光线 PO，它沿着主轴方向穿过透镜方向不变；经 P 点作一条任意光线 PA，交透镜于 A 点并与第一焦平面交于 B 点；作副光轴 BO，过 A 点作和 BO 平行的线 AP'，交主光轴的 P' 点，P' 便是 P 的像点。同理，也可用第二焦平面作图，其作法如图 4—18 所示。作任意光线 PA 交透镜于 A 点；过透镜中心 O 作平行于 PA 的辅助线 OB'，与

图 4—16

图 4—17

图 4—18

第二焦平面交于 B' 点；连接 A、B' 两点且延长，与沿主轴的光线交于 P' 点，则 P' 点即为所求也像；（4）凹透镜的任意光线作图法。利用凹透镜的副光轴和焦平面作图，如图 4—19 所示。经 P 点作任意光线 PA，交透镜于 A 点，经透镜的中心 O 作平行于 PA 的副光轴 OB'，和第二焦平面交于 B' 点；连接 A、B' 两点，它和延主轴的光线交于 P'，则 P' 点为所求之像点。

图 4—19

【凸透镜成像规律】

从图 4—20 可以看出，随着物和焦点之间的相对位置的不同，成像的情况也不同。大致可分为 6 种情况说明，如图 4—20 所示。（1）物位于无穷远时，则像距 $v = f$ ，成实像，放大率 $K = 0$ 。可用于测定焦距；（2）当 $u > 2f$ 时，像的位置 $f < v < 2f$ ，这时是倒立实像，放大率 $K < 1$ 。眼睛、照像机均相当于这种成像关系；（3）当 $u = 2f$ 时， $v = 2f$ ，这时是倒立实像、放大率 $K = 1$ ，即物像的大小相等；（4） $2f > u > f$ 时， $2f < v < \infty$ ，倒立实像， $K > 1$ ，放大像。

图 4—20

幻灯机，显微镜，均是这种成像关系；（5） $u = f$ 时，则 $v = \infty$ 这时无像，这时 $K = \infty$ 放大，探照灯是这种光学关系；（6） $f > u > 0$ 时， $v < 0$ ，正立虚像， $K > 1$ 放大，放大镜是这种光学成像关系。图中的 2、3、4、5、6 各种情况，分别代表（1）、（2）、（3）、（4）、（5）、（6）所说之情况。

【凹透镜成像规律】

凹透镜所成的像，无论物体的位置在焦点以外还是焦点以内，它经凹透镜折射后，所成的像，都是缩小的，正立的虚像。像和物在透镜的同侧。因此它的成像规律，不同于凸透镜那样复杂。如 图 4—21 所示。

图 4—21

【眼睛】

人的眼睛是一个光学系统。它的构造可以简化为一个单凸透镜和一个屏幕。从物体的两端反射出的两条光线对眼睛的光心点所张的角，叫做视角。物体越小或距离越远，视角越小。观察很小或很远的物体，常使用放大镜、显微镜和望远镜等以增大射角。不是在任何距离处的物体人眼都能看清楚。眼睛能看清物体必要的条件是：（1）物体的像不但要落在视网膜上，并且要落在黄斑中央的中央凹处；（2）像应该有一定的照度。进入眼中的光通量是由瞳孔自行调节，达到一定照度。这一照度是在视网膜适应机能范围之内；（3）视角一般不能小于 $1'$ （长1厘米的线段在距眼睛34米处的视角约为 $1'$ ）。由眼睛的调节作用（或称调焦）所能看得清楚的最远和最近两点，分别叫做远点和近点。正常眼睛远点在无穷远处，近点在10厘米到15厘米处。在适当的照度下，物体离开眼睛25厘米时，在视网膜上造成的像最清晰，并且看起来不易感到疲劳，这个距离叫做明视距离。人的眼睛就是一个透镜系统。外界的景物通过成像在视网膜上而被视觉神经所感受。

【近视眼】

远处物体无法成像于视网膜上，而在网膜前，这时要带近视镜。这是由于近视眼的晶状体比正常眼睛凸一些，或视网膜距晶状体的距离过远，所以造成远处的平行光不能会聚在视网膜上，而会聚在视网膜之前，这说明近视眼的远点不在无穷远处。故不能看清远处物体，只能看清一定距离内的物体。为了矫正近视眼，应采用凹透镜制成的眼镜，使光通过眼镜先发散，再通过晶状体会聚，使会聚点后移到视网膜上。

【远视眼】

无穷远处的物体所成的像只能在视网膜后面。这是由于视网膜到晶状体的距离过近，或晶状体比正常人眼扁平所致。远视眼的近点比正常人眼远，所以视力范围比正常人眼小。矫正远视眼的方法是用凸透镜做眼镜，使光线在进入眼睛之前，先由凸透镜会聚，以达到使会聚点移前而达到视网膜上。

【眼镜】

用以矫正视力或保护眼睛的简单光学器件。由镜片（一般为透镜）和镜架组成。矫正视力的眼镜可分为三种：（1）近视眼镜：由凹透镜制成，能把原先落在视网膜前的像移后到视网膜上；（2）远视眼镜和老光眼镜：由凸透镜制成，能把原先落在视网膜后的像移前到视网膜上；（3）散光眼镜：由球柱面透镜或复曲面透镜制成，以矫正由于角膜各方向曲率不同所引起的像散。保护眼睛用的眼镜有防护镜、防风镜和太阳镜等，用以保护眼睛免受灼伤、暴风袭击、强烈紫达线辐射和红外线的刺激，以及防止强光刺激等。

【显微镜】

显微镜为一使微小物构成放大虚像的透镜系统。最简单之显微镜为单显微镜，系一收敛透镜，俗称放大镜。通常我们所说的显微镜是指复显微镜的简称，用以观察极微小的物体。显微镜是 1610 年伽利略发明的。其最简单的型式只包括两个凸透镜，用一个直立金属圆筒，上下两端各装一个焦距极短的物镜和一个焦距较长的目镜。为了消除像差，实际上二透镜均已各由数个透镜组合所取代。图 4—22 是以基本的单片透镜构造说明显微镜的工作原理。物体置于物镜焦点稍外，得到倒立放大实像于目镜的焦点稍内处；再经

图 4—22

目镜折射产生放大虚像于明视距离处。显微镜的放大率为 m ，在明视距离 D 处的虚像对眼睛所张的视角为 θ' ，并设物体置于 a 距离处，直接看物的视角为 θ ，则 θ' 与 θ 之比等于显微镜的放大率即 $m = \frac{\theta'}{\theta}$ 。求得虚像与物体大小之比，则可求得显微镜的放大率。又设物镜、目镜的焦距各为 f, f' ，则 $m = \frac{b}{a} = \frac{a'}{a} \cdot \frac{b}{a'} = \frac{FF'}{f} \cdot \frac{D}{f'}$ ，式中 FF' 称为光学的筒长， D 为人的明视距离，约 25 厘米。显微镜的放大率是目镜与物镜放大率的乘积

$$m = \frac{\text{光学的筒长}}{\text{物镜焦距}} \times \frac{25\text{厘米}}{\text{目镜焦距}}$$

因物镜的放大率，通常为 5~40 倍，目镜约为 3~20 倍，所以一般显微镜的放大率最大约为 800 倍。如果选用放大倍数更大的物镜时，必须在物体与物镜之间，充以折射率与透镜接近的油，这种镜头叫做油浸镜头，利用油浸镜头可使放大倍数达 2000 倍。最近又发明一种激光断层共轭扫描显微镜，使放大倍数又大大地提高。

【望远镜】

用以观测远处物体或天体的光学仪器。通常的望远镜是由两组胶合透镜构成。每一组胶合透镜都相当一个凸透镜。简单的一种结构：可于一圆筒一端装一个物镜——焦距较长的凸透镜，另一端插入一较小的圆筒，可以自由在大筒中前后移动，小圆筒外端装一目镜——焦距较短的凸透镜，也可作成双筒（即由两个装有物镜和目镜的圆筒构成）。两目镜间的距离可以调节，两筒可使两眼同时观察，从而获得立体感。从远处物体来的光，经物镜折射后造成物体的倒像，将小圆筒伸缩调节，而由目镜将物镜所成的像加以放大，以便观察。用以观察地上远处物体的望远镜有伽利略望远镜、观剧镜、棱镜望远镜等类型，均成正像。用以观测天体的望远镜称天文望远镜，一般均成倒像。按光在望远镜中的路线分，又有折射望远镜（亦称开普勒望远镜）、反射望远镜、双筒望远镜等几种。具有正像透镜装置的折射望远镜亦称“地上望远镜”。本世纪 30 年代发现天体也发出无线电辐射。用以接收和测量天体无线电辐射的仪器称为射电望远镜，也是天文望远镜的一种。由于开普勒望远镜的镜筒较长，携带不便；故往往在物镜和目镜之间加装一对全反射棱镜，使入射光线在镜筒中经过多次全反射，以减短筒的长度，同时可以将物镜所成的倒像再倒转过来而成正像。这种装置便称为棱镜望远镜。它的视野较大。棱镜望远镜常用于航海、军事窥测和野外观察等。开普勒望远镜的原理如图 4—23 所示。从远处物体射来的光线，经过物镜 L_1 后，在其焦点以外距焦点很近的地方成一倒立缩小的实像。调节目镜 L_2 与物镜 L_1 的

图 4—23

距离使 L_2 的前焦点和物镜的焦点重合，所以实像的 $A'B'$ 位于 L_2 和它的焦点之间，但距焦点很近的地方， L_2 以 $A'B'$ 为物，形成放大的虚像 $A''B''$ 。这时观测者所看到的的就是 $A''B''$ 。 $A''B''$ 的视角远大于直接用眼睛看远处物体的视角，因此从望远镜中看到的物体使人觉得离自己既近而又清楚。对于观测天体的天文望远镜，它的聚光本领很大，能看到很远的天体。天文望远镜分为折射式、反射式和折反射式三种。由物镜造成的天体实像可用目镜观测，天文望远镜的口径应尽量大一些，这样进入镜中的光就多一些，所成的像就越明亮清晰，我国最大的天文望远镜口径为 2.16 米。望远镜种类很多，但基本原理还是光的折射和反射。用其观察远物时，使视角变大。

【射电望远镜】

又名“无线电望远镜”。专门用来接收由天体发来的无线电波的仪器。主要由天线和接收机两部分构成。天线用来接收天体发射的无线电波，相当于光学望远镜的物镜。天线类型很多。由许多作为半波振子的金属棒构成的，称为“振子天线”，专用于米波波段无线电波的接收。有的天线则成抛物面形状，称为“抛物面天线”，无线电波的探测器就装在抛物面的焦点上。它主要用于分米、厘米和毫米波波段无线电波的接收。天线和接收机用传输线联接起来。接收机先把由天线传来的高频信号放大，然后加以检波，再把高频电信号变成可用仪表测量和记录的低频电信号，或变成直接进行照相的图形。因为无线电波可以穿过云雾和尘埃，因此用射电望远镜能不分晴雨昼夜连续进行观测；对于那些难以用光学望远镜观测的天体和宇宙空间，利用射电望远镜便可进行探测研究。

【光的波动说】

关于光的本性的一种学说。第一位提出光的波动说的是与牛顿同时代的荷兰人惠更斯。他在 17 世纪创立了光的波动学说，与光的微粒学说相对立。他认为光是一种波动，由发光体引起，和声一样依靠媒质来传播。这种学说直到 19 世纪初当光的干涉和衍射现象被发现后才得到广泛承认。19 世纪后期，在电磁学的发展中又确定了光实际上是一种电磁波，并不是同声波一样的机械波。19 世纪 60 年代英国物理学家麦克斯韦在理论研究中发现，振动着的电荷或迅速交变的电流都会激起其周围的电磁场，并以波的形式向外传播，其传播速度与光速相同，从而提出光是电磁波的假说。1888 年德国物理学家赫兹用实验证明了电磁波的存在，从此奠定了光的电磁理论。这一理论能够说明光的传播、干涉、衍射、散射、偏振等许多现象。但不能解释光与物质相互作用中的能量量子化转换的性质，所以还需要近代的量子理论来补充。

【光的微粒说】

关于光的本性的一种学说。17 世纪曾为牛顿等所提倡。这种学说认为光由光源发出的微粒、它从光源沿直线行进至被照物，因此可以想像为一束由发光体射向被照物的高速微粒。这学说很直观地解释了光的直进及反射折射等现象，曾被普遍接受；直到 19 世纪初光的干涉等现象发现后，才被波动说所推翻。但在 19 世纪末和 20 世纪初，许多有关光和物质相互作用的现象，如光电效应，不能用波动说来解释，这促使爱因斯坦于 1905 年提出光是一种具有粒子性的实物（光子）。但这观念并不摒弃光具有波动性质。这种关于光的波粒二象性的认识，是量子理论的基础。

【光子】

光量子之简称。基本粒子的一种，光子不显电性。光子的能量是量子化的。1905年爱因斯坦在解释光电效应时首次指出了光子的存在，从而揭示了光的波粒二象性。真空中的光子在不同参照系中都以光速 c 运动。如果光的频率为 ν ，则光子的能量为 $h\nu$ （ h 为普朗克常数，动量为 $h\nu/c$ ，质量为 $h\nu/c^2$ 。但其静止质量为零。

【干涉】

发出具有相同频率、相同振动方向和恒定相位差的两列(或两列以上)波在空间迭加时,在迭加区的不同地点加强或减弱的现象。这是波的一个重要特性。波在迭加的区域中,有些地方振动被加强,有些地方振动被减弱,形成明暗相间的“干涉图样”。水波的干涉是常见的现象。单色光波的干涉图样是明暗相间的条纹,复色光产生彩色条纹。利用光的干涉,可以精确地进行长度测量,以及检查表面的平滑程度等。利用电磁波的干涉,可作成定向发射天线。显然声波也可产生干涉。

【光的干涉】

两列或多列光波在空间相遇时相互迭加，在某些区域始终加强，在另一些区域则始终削弱，形成稳定的强弱分布的现象。在一般的情况下两个独立光源向空间的一个区域发出光波时不能发生干涉。不发生干涉的两个光源，只说明它们没有发出相干波。通常的独立光源不相干的原因是：光的辐射一般是由原子的外层电子激发后自动回到正常状态以光的形式把能量放出所形成的。由于辐射原子的能量损失，加上和周围原子的相互作用，个别原子的辐射过程是杂乱无章而且常常中断，持续时间甚短，即使在极度稀薄的气体发光情况下，和周围原子的相互作用已减至最弱，而单个原子辐射的持续时间也不超过 10^{-8} 秒。当某个原子辐射中断后，它自身或者其他的原子又受到激发重新辐射，但却具有新的初位相。这就是说，原子辐射的光波并不是一列连续不断、振幅和频率都不随时间变化的简谐波，即不是理想的单色光。此外，不同原子辐射的光波波列的初相位之间也是没有一定关系和规律。这些断续、或长或短、初位相不规则的波列的总体，构成了非相干的光波。由于原子辐射的这种复杂性，在不同瞬时迭加所得的干涉图样变化得如此之快和如此地不规则，以致这种短暂的干涉现象无法观测。从微观上看，光子只能自己和自己干涉，不同的光子是不相干的；但是从宏观上看，干涉现象却是大量光子各自干涉结果的统计平均效应。故实际的光的干涉对光源的要求也不是那么苛刻。由于 60 年代激光的问世，使光源的相干性大大提高，同时快速光电探测仪器的出现，探测仪器的时间响应常数缩短，以至可以观察到两个独立光源的干涉现象。1963 年玛格亚和曼德用时间常数 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 秒的变象管拍摄了两个独立的红宝石激光器发出的激光的干涉条纹。可目视分辨的干涉条纹有 23 条。对于普通的光源，保证相位差恒定是实现相干的关键。为了解决发光机制中初相位的无规则迅速变化和干涉条纹的形成要求相位差恒定的矛盾，可采用把同一原子所发出的光波分解成两列或几列，使各分光束经过不同的光程，然后相遇，这样，尽管原始光源的初相位频繁变化，分光束之间仍然可能有恒定的相位差，因此可以产生干涉现象。通常有两种方法实现这种分解：

(1) 分波阵面法——将光源的波阵面分为两部分，使之分别通过两个光具组，经反射、折射或衍射后交迭起来，在一定区域形成干涉。由于波阵面上任何一部分都可以看成为新光源，而且同一波阵面的各个部分有相同的位相，所以这些被分离出来的部分波阵面可作为初相位相同的光源，不论点光源的位相改变得如何快，这些光源的初相位差却是恒定的，杨氏双缝、菲涅耳双面镜和洛埃镜等都是产生这类分波阵面的干涉装置。(2) 分振幅法——当一光束投射到两种透明媒质的分界面上，光能一部分反射，另一部分折射。这方法叫做分振幅法。最简单的分振幅干涉装置是薄膜，它是利用薄膜的上下表面对入射光反复地反射，由这些反射光波在空间相遇而形成的干涉现象。由于薄膜的上下表面的反射光来自同一入射光的两部

分，只是经历不同的路径而有恒定的相位差，因此它们是相干光。另一种重要的分振幅干涉装置，是万克耳孙干涉仪。光的干涉现象是光的波动性的最直接、最有力的实验证据。光的干涉现象是牛顿微粒模型根本无法解释的，只有用波动说才能圆满地解释这一现象。

【杨氏干涉实验】

杨格于 1801 年设法稳定两光源之相位差，首次做出可见光之干涉实验，并由此求出可见光波之波长。其方法是，使太阳光通过一挡板上之小孔使成单一光源，再使此单一光源射到另一挡板上，此板上有两相隔很近的小孔，且各与单光源等距离，则此两同相位之两光源在屏幕上形成干涉条纹。因为通过第二挡板上两小孔之光因来自同一光源，故其波长相等，并且维持一定的相位关系（一般均维持同相），因而能在屏幕上形成固定不变的干涉条纹。若 X 为屏幕上某一明（或暗）条纹与中心点 O 的距离， D 为双孔所在面与屏幕之间的距离， $2a$ 为两针孔 S_1, S_2 间之距离（通常小于 1 毫米）， λ 为 S 光源及副光源 S_1, S_2 所发出的光之波长。两光源发出的两列光波必然在空间相迭加，在传播中两波各有各的波峰和波谷。当两列波的波峰和波峰或波谷和波谷相重叠之点必为亮点。这些亮点至 S_1 与 S_2 的光程差必为波长的整数倍。在两列波的波峰与

波谷相重叠之点必为暗点，这些暗点至 S_1 与 S_2 的光程差必为半波长 $\frac{\lambda}{2}$ 的奇数倍。如图 4—24 所示。实验结果的干涉条纹如图 4—24 所示，它是以 P_0 点为对称点而明暗相间的条纹。 P_0 点处的中央条纹是明条纹。当用不同的单色光源作实验时，各明暗条纹的间距并不相同。

图 4—24

波长较短的单色光如紫光，条纹较密；波长较长的单色光如红光，条纹较稀。另外，如果用白光作实验，在屏幕上只有中央条纹是白色的。在中央白色条纹的两侧，由于各单色光的明暗条纹的位置不同，形成由紫而红的彩色条纹。干涉明暗条纹的条件由图 4 - 25 所示，设相干光源 S_1 与 S_2 之间的距

图 4—25

离为 $2a$ ，到屏幕 E 的距离为 D ，已知 $D \gg 2a$ 。在屏幕上任取一点 P ， P 距 S_1 与 S_2 的距离分别为 r_1 与 r_2 。从 S_1 与 S_2 所发出的光，到 P 点处的光程差是：

$$r_2 - r_1$$

设 N_1 和 N_2 分别为 S_1 和 S_2 在屏幕上的投影点， O 为 N_1 和 N_2 的中点，并设 $OP=x$ 。从图中直角三角形 S_1PN_1 和 S_2PN_2 ，可知

$$r_1^2 = D^2 + (x-a)^2$$

$$r_2^2 = D^2 + (x+a)^2$$

两式相减后，得

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = (r_2 + r_1) = 4ax$$

因 $D \gg 2a$ ，所以 $r_2 + r_1 \approx 2D$ ，因此

$$r_2 - r_1 = \frac{4ax}{2D} = \frac{2ax}{D}$$

如果 P 为一亮点，按干涉条件，光程差应等于波长的整数倍，

即

$$= \frac{2ax}{D} = \pm K\lambda ,$$

或

$$x = \pm K \frac{D \lambda}{a}$$

这里 $K=0$ 相应于在 O 点处的中央明条纹。 $K=1, K=2, \dots$ 等等相应的明条纹分别称为第一级、第二级、 \dots 级明条纹。如果 P 点为暗点，按干涉条件，有

$$= \frac{2ax}{D} = \pm (2K+1) \frac{\lambda}{2} ,$$

或

$$x = \pm (2K+1) \frac{D}{2a} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad K = 0, 1, 2, \dots$$

由此可知某明（暗）条纹与中点 O 的距离与光之波长及光源到屏幕的距离成正比，与二针孔间的距离成反比。依此公式可计算某光波波长的近似值。

【薄膜干涉】

水面上的薄层油膜，机动车在潮湿柏油道上所遗留下来的油迹，或是肥皂泡等，都会在白光中出现灿烂的彩色。所有上述的各例中，均是由薄膜干涉现象引起的。若将一用金属细丝制成的矩形框架，浸以肥皂水形成一层薄膜，然后用弧光灯的白光或阳光照射于其上，就呈现出典型的薄膜干涉。其中一部分是由反射光产生的干涉条纹，而其余的则从皂液膜中透过去。此时从反射光中可以看到许多与水平框架上缘平行的彩色横条纹。不但如此，这些横条纹还会慢慢地向下移动，愈靠近框架上缘则愈宽。此外，透射光在白幕上也显示出许多彩色横条纹，但比起反射光中的条纹要暗淡得多。如果用单色光代替白光，则彩色现象会立即消失，而出现的便是一些彩色条纹的花样类似于明暗相间的条纹。在 1800 年英国科学家杨格指出薄膜彩色条纹之形成，是因为干涉现象所致。如图 4 - 26，SA 是一束单色光，斜射到

图 4—26

厚度为 d 之皂液薄膜 P_1P_2 上。照射于 A 处之光线 S（实际上它代表的是一个光束），一部分立即被反射，而另一部分则折射到 B 处。反射部分以 S_1 来表示，折射至 B 处者又会照样地有一部分立即被反射，及另一部分被折射。后者仍用 S_3 来表示。被反射的光线抵达 C 处，又在该处分为两部分，一部分折射为平行于 S_1 之 S_2 ，另一部分被反射后则沿 CD 路线而抵达 D 处。然后再在该处被分为两部分，一部分折射为平行于 S_3 之 S_4 ，另一部分则被反射到 E 处。关于薄膜上所发生之干涉现象（单色光），如果有两条平行入射到薄膜上，如图 4—27 中的 a 和 b，b 在薄膜上表面的反射光线为 b_1 ，a 由膜的上表面折射到下表面的 C 点再反射到 B 点，又折回 a_1 与 b_1 重合。我们可以计算出 aa_1 和 bb_1 之间的光程差。对薄膜来说，AB 的长度比光源 S 到薄膜的距离小得很多，因此 $\angle BSA$ 非常小，可以认为 SA 和 SB 是相

图 4—27

互平行的。作 $AD \perp SB$ ，可以认为 $SA = SD$ ，也就是说从 S 发出的这两条光线分别到达 A 点和 D 点时，光程是相等的。从图中可以看出，光线 a 在薄膜（折射率为 n_2 ）中经历路程 ACB 到达 B 点，而光线 b 在原媒质（折射率 $n_1 < n_2$ ）中经历路程 DB 而在 B 点反射。所以这两光线之间的光程差

$$= n_2(AC + CB) - n_1DB + \frac{\lambda}{2}$$

式中 $\frac{\lambda}{2}$ 这一项，是由于光线 b 在 B 点处是在光密媒质面上反射的，而光线 a 在 c 处是在光疏媒质面上反射的，两者之间有了附加的半波长光程差的缘故，从图上可以看出

$$AC = CB = \frac{e}{\cos r}, \quad DB = AB \sin i = 2etgr \sin i,$$

式中 e 为薄膜厚度， r 为折射角。根据折射定律 $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ ，因此

$$\begin{aligned}
&= 2n_1 AC - n_1 DB + \frac{\lambda}{2} = 2n_2 \frac{e}{\cos r} 2n_1 \sin r \sin i + \frac{\lambda}{2} \\
&= \frac{2n_2 e}{\cos r} (1 - \sin^2 r) + \frac{\lambda}{2} = 2n_2 e \cos r + \frac{\lambda}{2} \\
&= 2e \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}
\end{aligned}$$

于是，干涉条件是

$$\sigma = 2e \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} K\lambda & K = 1, 2, \dots \text{加强} \\ (2K+1) \frac{\lambda}{2} & K = 0, 1, 2, \dots \text{减弱} \end{cases}$$

由公式 $\sigma = 2e \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$ 可见，对于厚度均匀的平面薄膜（e

到处一样）来说，光程差是随光线的倾角（指入射角 i）而改变的。如果用发散的单色光线束照射在厚度均匀的平面薄膜上，相当于每一入射角 i 都有一束平行光入射，那么，具有同一倾角的一切光线将有同一光程差。这样，不同的干涉明条纹和暗条纹，相应地具有不同的倾角，而同一干涉条纹上的各点都具有同一的倾角，因此这种干涉条纹叫做等倾干涉条纹。对于透射光来说，也有干涉现象。这时，光线 b₂ 是由光线 b 直接透射而来的，而光线 a₂ 是由光线 a 折入薄膜后在 C 点和 B 点处经两次连续反射后再透射出来的，这两次反射均在光疏媒质面上发生，所以不存在反射时的半波损失，因此，这两束透射的相干光的光程差是

$$= 2e \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$$

由此可见当反射光相互加强时，透射光将相互减弱；当反射光相互减弱时，透射光将相互加强。

【光程】

光在媒质中通过的路程和该媒质折射率的乘积。例如，在折射率为 n 的介质中，光行进一距离 d ，光程即为乘积 nd ，由 n 的物理意义可知，光在该介质中行经距离 d 所需的时间，与光在真空中行经 nd 距离所需的时间相等。这是因为，媒质的折射率等于真空中的光速和媒质中的光速之比，所以光程也就是在相同的时间内光在真空中通过的路程。显然，当光在折射率为 n_1 、 n_2 、... 的各介质中行程各为 d_1 、 d_2 、...，则光程为

$$d = n_1 d_1 + n_2 d_2 + \dots = n_1 d_1$$

【牛顿环】

又称“牛顿圈”。光的一种干涉图样，是一些明暗相间的同心圆环。例如用一个曲率半径很大的凸透镜的凸面和一平面玻璃接触，在日光下或用白光照射时，可以看到接处点为一暗点，其周围为一些明暗相间的彩色圆环；而用单色光照射时，则表现为一些明暗相间的单色圆圈。这些圆圈的半径不等，随离中心点的距离的增加而逐渐变窄。它们是由球面上和平面上的反射光线相互干涉而形成的干涉条纹。在加工光学元件时，广泛采用牛顿环的原理来检查平面或曲面的面型准确度。图 4 - 28 为牛顿环的示意图，B 为底下的平面玻璃，A 为平凸透镜，其与平面玻璃的接触点为 O，在 O 点的四周则是平面玻璃与凸透镜所夹的空气气隙。当平行单色光垂直入射于凸透镜

图 4—28

的平表面时。在空气气隙的上下两表面所引起的反射光线形成相干光。如图中所示。光线在气隙上下表面反射（一是在光疏媒质面上反射，一是在光密媒质面上反射）。形成两相于光线，这两光线之间的光程差是

$$= 2e + \frac{\lambda}{2}$$

所以

$$2e + \frac{\lambda}{2} = K\lambda \quad K = 1, 2, 3, \dots \text{明环}$$

$$2e + \frac{\lambda}{2} = (2K + 1)\frac{\lambda}{2} \quad K = 0, 1, 2, \dots \text{暗环}$$

现在我们求与 O 相距 r 处的空气层厚度 e，由图中的直角三角形得

$$r^2 = R^2 - (R - e)^2 = 2Re - e^2$$

因 $R \gg e$ ，所以 $e^2 \ll 2Re$ ，可将 e^2 从式中略去，于是

$$e = \frac{r^2}{2R}$$

上式说明 e 与 r^2 成正比，所以离开中心愈远，光程差增加愈快，所看到的牛顿环也变得愈来愈密。将上式代入 $2e + \frac{\lambda}{2} = K\lambda$ 和 $2e + \frac{\lambda}{2} = (2K + 1)\frac{\lambda}{2}$ ，求得在反射光中的明环和暗环的半径分别为

$$r = \sqrt{\frac{(2K - 1)R\lambda}{2}}, \quad K = 1, 2, 3, \dots \text{明环}$$

$$r = \sqrt{KR\lambda} \quad K = 0, 1, 2, \dots \text{暗环。}$$

【半波损失】

光在被反射过程中，如果反射光在离开反射点时的振动方向对入射光到达入射点时的振动方向恰好相反，这种现象叫做半波损失。从波动理论知道，波的振动方向相反相当于波多走（或少走）了半个波长的光程。入射光在光疏媒质中前进，遇到光密媒质界面时，在掠射（入射角为 $\frac{\pi}{2}$ ）或垂直入射（入射角为零）两种情况下，在反射过程中产生半波损失，这只是对光的电场强度矢量的振动而言。如果入射光在光密媒质中前进，遇到光疏媒质的界面时，不产生半波损失。不论是掠射或垂直入射，折射光的振动方向相对于入射光的振动方向，永远不发生半波损失。

【全息照相】

一种记录被摄物体反射（或透射）光波中全部信息（振幅、相位）的新型照相技术。普通的照相利用透镜成像原理，在感光胶片上记录反映被摄物体表面光强变化的平面像。全息照相不单是记录了被摄物体的反射光波强度（振幅），而且还记录了反射光波的位相。通过一束参考光束和一束被摄物体上的反射光束在感光胶片上迭加而产生干涉现象，可以实现上述的目的。参考光束与反射光束都是从一束相干性极好的激光束分离出来的。感光胶片上记录的干涉图样极为错综复杂，这样的图样称为全息图。由全息图看不出原来被摄物体的表观图像，但是当再用一束激光（或单色光）照射这全息图时，可以透过全息图而看到原物体的具有立体感的形像。这是因为光束经过全息图后又模拟出与原来物体相同的反射光波，这种重构光波状态的效应称为波前重建。全息照相在讯息记录、形变计量等方面有较多的应用。

【光的衍射】

光绕过障碍物偏离直线传播而进入几何阴影，并在屏幕上出现光强不均匀分布的现象。这种现象也体现了光的波动特征。光的衍射现象是光的波动性的最直接，最有力的实验证据。牛顿的微粒模型难以说明光绕过障碍物时发生的弯曲现象，衍射现象只能用波动说解释。根据惠更斯—菲涅耳原理，不仅可以对光绕过障碍物边缘偏离直线传播的现象作一般性的解释，而且能定量分析衍射图样的发光强度分布。光屏上任意一点的发光强度可根据次波迭加推算出来。因此光的衍射现象是光的波动性的最直接、最有力的证据。如图 4 - 29 所示，K 是一可以调节的狭缝。从光源 S 发出的光线，穿过 K 后，在屏幕 E 上呈现光斑 ab。在 S、K、E 三

图 4—29

者的位置已经固定的情形下，ab 的宽度是由缝的宽度决定的。当狭缝从一定的宽度逐渐缩小时，穿过缝的光束也逐渐变窄，在屏幕 E 上的光斑 ab 随之变窄，但是当缝 K 缩小到一定程度时，屏幕上的光斑不仅不变窄，反而增宽，如图中 a' b' 所示。而且光斑的全部亮度也将发生变化，由原来的均匀分布变成一系列明暗条纹。光斑的边缘也将失去明显的界限，变得模糊不清。应当指出，在图 4 - 29 中所示的衍射实验装置中，狭缝距光源和屏幕都很近，所以入射光和衍射光均是非平行光束。在光学中，通常把入射光或衍射光不是平行光束的衍射，称为菲涅耳衍射。图 4 - 29 所示的单缝衍射情况就是一种菲涅耳衍射。在另一些装置中，如果入射光和衍射光都是平行光束，那末，这种衍射称为夫琅和费衍射。显然，观察这种绕射现象需要利用透镜。

【单缝衍射】

单缝衍射的实验装置（夫琅和费单缝衍射）如图 4-30 所示。光源 S 放在透镜 L_1 的主焦面上，因此通过透镜 L_1 后的光线是一平行光束。这束平行光照射在很窄的单缝 K 上，一部分穿过单缝，再经过透镜 L_2 在屏幕 E 上将出现衍射条纹的像。实验指出，平行光（波阵面和透镜的光轴相垂直）经过透镜后，会聚在焦面中间的光线相互加强而产生亮条纹，这就证明，周相相同的平行光线，经过透镜而被聚焦时，它们的周相仍然是相同的。故可认为透镜的存在不引起附加的周相差。图 4-31 所示为单缝衍射的说明图。设有宽度为 a 的单缝，在平行单色光的垂直照射下，位于单缝所在处的波阵面 AB 上的子波沿各方向传播。衍射角（衍射后的平行光束与入射平行光束所成的角）为 φ 的一束平行光经过透镜后，聚焦在屏幕上 P 点。这束光线的两条边缘光线之间的光程差为

$$BC = a \sin \varphi$$

P 点条纹的明暗完全决定于光程差 BC 的量值。菲涅耳在惠更斯—菲涅耳原理的基础上，提出了将波阵面分割成许多等面积的波带的方法。在单缝的例子中，可以作一些平行于 AC 的平面，使两相邻平面之间的距离等于入射光的半波长，即 $\frac{\lambda}{2}$ 。假定这些平面将单缝处的波阵面 AB 分成 AA_1 、 A_1A_2 、 A_2B 等整数个波带。由于各个波带的面积相等，所以各个波带在 P 点所引起的光振幅接近相等。两相邻的波带上，任何两个对应点（如 A_1A_2 带上的 G 点与 A_2B 带上的 G' 点）所发出的光线的光程差总是 $\frac{\lambda}{2}$ ，亦即周相差总是

。经过透镜聚焦，由于透镜不产生附加周相差，所以到达 P 点时周相差仍然是 $\frac{\lambda}{2}$ ，结果任何两个相邻波带所发出的光线在 P 点将相互抵消。由此可见，BC 是半波长的偶数倍时，即对应于某给定角度 φ ，单缝恰好能分成偶数个波带时，所有波带的作用成对地相互抵消，在 P 点处将出现暗条纹；如果 BC 是半波长的奇数，亦即单缝可分成奇数个波带时，在 P 点处将出现明条纹。上述结果可用数学式表示为，当 φ 适合

$$-\lambda < a \sin \varphi < \lambda$$

时为零级明条纹，当 φ 适合

$$a \sin \varphi = \pm 2K \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

时为暗条纹，当 φ 适合

$$a \sin \varphi = \pm (2K + 1) \frac{\lambda}{2} \quad K = 1, 2, 3, \dots$$

时为明条纹。从 $K=1, 2, 3, \dots$ 分别得到第一级、第二级、... 等明条纹或暗条纹。应当指出，对任意衍射角 φ 来说，AB 一般不能恰巧分成整数个波带，亦即 BC 不等于 $\frac{\lambda}{2}$ 的整数倍。此时，衍射光束经透镜聚焦后，形成屏幕

上亮度介于最明和最暗之间的中间区域。

【衍射光栅】

衍射光栅简称光栅。利用光的多缝衍射原理使光发生色散的光学元件。它是在一块平面（或凹面）玻璃或镀有金属的反射面上刻上大量相互平行、等宽、等距的刻痕。平面的称为平面的光栅，凹面的称为凹面光栅。平面光栅又可根据所用的是透射光还是反射光而分为透射光栅和反射光栅两种。通常用塑料在做为母模的光栅上复制出与原刻线完全一样的薄膜，把它贴在玻璃片上，制成所谓“复制光栅”或“摹拟光栅”。最新的光栅是利用全息照相方法制做的，叫做“全息光栅”。全息光栅比用机械刻划的光栅的条纹更密，条纹间隔误差更小，因此在很大的应用范围里，刻划光栅逐渐为全息光栅所取代。光栅每单位长度内的刻痕多少，主要决定于所要分光的波长范围（两刻痕间的距离应与该波长同一数量级），单位长度内刻痕越多，它的色散率越大。而光栅的分辨本领则决定于刻痕的总数。天然晶体内按一定规则排列的微粒，形成所谓“空间光栅”（两微粒间距离比人工刻出来的痕距要小得多），它适用于对 X 射线的衍射。当一束平行单色光垂直照射在光栅上，光线经过透镜上后，将在屏幕 E 上呈现各级衍射条纹。图 4-32 是光栅实验的原理。精制的光栅，在 1 厘米内刻痕可以多达数万条。图中 S 是和纸面垂直的线光源，它位于透镜 L₁ 的焦平面上，屏幕 DD 放在透镜 L₂ 的焦平面上。在两透镜之间是一块由一系列等宽等间隔的平行狭缝构成的光栅。设各缝的宽度都等于 a，相邻两缝间不透明的部分的宽度都等于 b。则 a+b=d 称为“光栅常数”。由光源 S 发出的光通过 L₁ 而出射的平行光照射在光栅上。对光栅中每一狭缝来说，均有单缝衍射的结果，由于光栅中有大量的等面积的平行狭缝，所以最后结果并不是每个单独的狭缝所起的作用，这时最重要的作用来自各个狭缝所发出的光波之间的干涉。即使在某一给定方向上，按单缝衍射将得到明条纹，但由于缝与缝之间光波的相互干涉，最后可能得到暗条纹。因此，光栅的衍射条纹应看作是衍射与干涉的总结果。查衍射角 φ 适合条件

$$(a + b) \sin \varphi = 2K \frac{\lambda}{2} \quad K = 0, 1, 2, \dots$$

时，由所有相邻狭缝的相应位置射出的光线的光程差是波长的整数倍，因而相互加强形成明条纹。显然，光栅上狭缝的条数愈多，条纹就愈为明亮。上式中 k 是整数，表示明条纹的级数。而当 φ 角适合条件

$$(a + b) \sin \varphi = \pm (2K + 1) \frac{\lambda}{2} \quad K = 0, 1, \dots$$

时，将出现暗条纹。当 φ 角适合条件

$$a \sin \alpha = \pm 2K \frac{\lambda}{2} \quad K = 1, 2, \dots$$

时，由各个狭缝所射出的光波都将各自地由于干涉而抵消，形成暗条纹。当然也就谈不上缝与缝之间的干涉作用，在这里即使符合明干涉条纹条件

的也没有明条纹出现。由此可见在光栅衍射中，仅当 φ 角满足 $(a+b)\sin\varphi = \pm 2K\frac{\lambda}{2}$ 时，才能形成极窄的明条纹，其他位置则是一片黑暗的背景，对给定的入射单色光波来说，光栅上每单位长度的狭缝条数愈多，亦即光栅常数 $a+b$ 愈小，各级明条纹的间隔也愈大，因为这时的 φ 角要大。光栅上狭缝总数愈多，透射光束愈强，因此所得明条纹也愈亮。由于这些优点，通常用衍射光栅可以准确地测量光的波长。

【分辨本领】

仪器或肉眼对两个非常靠近的物点或量值刚能加以识别的能力。随着仪器和所要分开的量值性质不同，分辨本领有不同的衡量方法。（1）在光学仪器如显微镜中，以它所能分辨的物体上两个最靠近的细点间距离作为分辨本领；但在望远镜和肉眼中，则以它们对两物点的视角来量度。目前一般的光学显微镜的分辨本领可达 2×10^{-5} ，电子显微镜可达 $2 \sim 3 \times 10^{-8}$ ；望远镜的理论分辨本领可达 0.03 秒（实际分辨本领受观察地点的大气条件影响，一般要比理论分辨本领小），人的眼睛分辨本领约为 1 分。（2）光谱仪的分辨本领为两条刚能分辨的光谱线的波长平均值对它们波长差的比值。比值越大分辨本领越高。各种“能谱仪”的分辨本领可用类似的定义来表示。也有以这种定义的倒数来表示的（如 谱仪），称为“分辨率”。（3）成像系统（如照相、电视等）的分辨本领通常以某一规定长度内能够分辨的平行直线数表示，线数越多，分辨本领越大，成像就越清晰。在电视系统中分辨本领常称为分解力。

【偏振光】

光是一种电磁波，电磁波是横波。而振动方向和光波前进方向构成的平面叫做振动面，光的振动面只限于某一固定方向的，叫做平面偏振光或线偏振光。通常光源发出的光，它的振动面不只限于一个固定方向而是在各个方向上均匀分布的。这种光叫做自然光。光的偏振性是光的横波性的最直接，最有力的证据，光的偏振现象可以借助于图 4-33a 所示的实验装置进行观察， P_1 、 P_2 是两块同样的偏振片。通过一片偏振片 P_1 直接观察自然光（如灯光或阳光），透过偏振片的光虽然变成了偏振光，但由于人的眼睛没有辨别

偏振光的能力，故无法察觉。如果我们把偏振片 P_1 的方位固定，而把偏振片 P_2 缓慢地转动如图 4-33b 所示，就可发现透射光的强度随着 P_2 转动而出现周期性的变化，而且每转过 90° 就会重复出现发光强度从最大逐渐减弱到最暗；继续转动 P_2 则光强又从接近于零逐渐增强到最大。由此可知，通过 P_1 的透射光与原来的入射光性质是有所不同的，这说明经 P_1 的透射光的振动对传播方向不具有对称性。自然光经过偏振片后，改变成为具有一定振动方向的光。这是由于偏振片中存在着某种特征性的方向，叫做偏振化方向（在图 4-33 中的偏振片中用平行长线条表示），偏振片只允许平行于偏振化方向的振动通过，同时吸收垂直于该方向振动的光。通过偏振片的透射光，它的振动限制在某一振动方向上。图 4-33a 中双箭头符号表示平面偏振光的振动方向。我们把第一个偏振片 P_1 叫做“起偏器”，它的作用是把自然光变成偏振光，但是人的眼睛不能辨别偏振光。必须依靠第二片偏振片 P_2 去检查。旋转 P_2 ，当它的偏振化方向与偏振光的偏振面平行时，偏振光可顺利通过，这时在 P_2 的后面有较亮的光。当 P_2 的偏振方向与偏振光的偏振面垂直时，偏振光不能通过，在 P_2 后面也变暗。第二个偏振片帮助我们辨别出偏振光，因此它也称为“检偏器”。

【偏振光的获得】

自然光在两种媒质的分界面上反射和折射时，反射光和折射光就能成为部分偏振光也可能得到完全偏振光。当自然光在两种媒质的分界面上反射时，如果以某特定的入射角 i_p (起偏振角) 入射，即 $i=i_p$ ，则在反射光中只有垂直于入射面的振动，而其他振动方向的光不能反射，表明这时的反射光为平面偏振光。 i_p 的数值应满足

$$\operatorname{tgi}_p=n_{21}$$

上式称为布儒斯特定律。式中的 n_{21} 是折射媒质对入射媒质的相对折射率。 i_p 又称为起偏振角。例如，光线射向玻璃而反射时， $n_{21}=1.5$ ，因

此起偏振角为 $i_p = 56^\circ$ 。按折射定律 $\sin i_p = \frac{n_2}{n_1} \sin r = n_{21} \sin r$ ，又按布儒斯特定律，完全偏振的条件为 $\operatorname{tgi}_p=n_{21}$ ，于是得

$$\begin{aligned} \sin i_p &= \operatorname{tgi}_p \sin r \\ \sin r &= \frac{\sin i_p}{\operatorname{tgi}_p} = \cos i_p \end{aligned}$$

即

$$i_p + r = \frac{\pi}{2}$$

这说明当入射角为起偏振角时，反射光和折射光是相互垂直的。利用双折射晶体也可以得到偏振光。一束自然光线在两种各向同性媒质的分界面上折射时，遵守通常的折射定律，这时只有一束折射光线和入射光线传播。但是，当一束光线射入各向异性的媒质（晶体）时，将产生特殊的折射现象。1669年巴托里奴斯发现：通过方解石观察物体时，物体的像是双重的。这一现象是由于光线进入方解石晶体后，分裂成为两束光线，沿不同方向折射而引起的，因此称为双折射现象。除立方系晶体（如岩盐）外，光线进入一般晶体时，都将产生双折射现象。显然，晶体越厚，射出的光线分得越开。实验证明，当改变入射角 i 时，两束折射线之一恒遵守通常的折射定律，这束光线称为寻常光线，通常用 o 表示。另一束光线不遵守折射定律，也不一定在入射面内，而且对不同的入射角 i ， $\frac{\sin i}{\sin r}$ 的量值也不是恒量。这束光线称为非常光线，用 e 来表示。见图 4-34a 所示。甚至在入射角 $i=0$ 时，寻常光线沿原方向进行，而非常光线一般不沿原方向前进，如图 4-34b

所示。产生双折射现象的原因是由于晶体对寻常光线与非常光线具有不同的折射率：对寻常光线来说，在晶体内部各个方向上的折射率是相等的，而对非寻常光线，在晶体内部各个方向上的折射率是不相等的。因为折射率决定于光线的速度，可见寻常光线在晶体中各方向上的传播速度都相同，而非寻常光线的传播速度却随着方向而改变。在晶体的光轴方向上，寻常光线和非寻常光线的折射率相等，亦即沿这一方向，寻常光线和非寻常

光线的传播速度相等。所以在晶体光轴方向上不产生双折射现象。寻常光线和非常光线都是偏振光，可以用检偏振器验证。寻常光线的振动面垂直于晶体的主截面，而非常光线的振动面在主截面内。两种光的振动面是互相垂直的。偏振光在工业生产和科学实验中有着广泛应用，例如光测弹性试验、立体电影、以及很多科学仪器中都需要偏振光装置。

【光的电磁说】

说明光在本质上是电磁波的理论。电磁辐射不仅与光相同，并且其反射、折射以及偏振之性质也相同)由麦克斯韦的理论研究表明，空间电磁场是以光速传播。这一结论已被赫兹的实验证实。麦克斯韦，在 1865 年得出了结论：光是一种电磁现象。按照麦克斯韦的理论

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}$$

式中 c 为真空中的光速。为在介电常数为 ϵ 和导磁系数为 μ 的媒质中的光速，因为 $\frac{c}{v} = n$ (折射率)，所以

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

这个关系式给出了物质的光学常数，电学常数和磁学常数之间的关系。当时从上述的公式中看不出 n 应随着光的波长而改变，因而无法解释光的色散现象。后来罗仑兹在 1896 年创立了电子论，从这一理论看，介电常数是依赖于电磁场的频率，即依赖于波长而变的，从而搞清了光的色散现象。光的电磁理论能够说明光的传播、干涉、衍射、散射、偏振等许多现象，但不能解释光与物质相互作用中的能量量子化转换的性质，所以还需要近代的量子理论来补充。

【红外线】

亦称“红外光”。在电磁波谱中，波长介于红光和微波间的电磁辐射。在可见光的范围以外，波长比红光要长，有显著的热效应，可以用温差电偶、光敏电阻等仪器来测量，波长在 0.77 ~ 3 微米为近红外区；3 ~ 30 微米为中红外区；30 ~ 1000 微米为远红外区。红外线容易被物体吸收，转化为物体的内能；在通过云雾等充满悬浮粒子的物质时，不易发生散射，具有较强的穿透能力，红外线应用很广，可用以焙制食品、烘干油漆以及进行医疗等。物质对红外线的吸收光谱对研究物质的分子结构、化学分析及化学工业上的控制有重要意义。军事上常用红外探测器来探测目标，以及红外通信等。

【紫外线】

亦称“紫外光”。在电磁波谱中位于紫光和伦琴射线（X射线）之间的电磁辐射。波长约为 $(4 \sim 39) \times 10^{-6}$ 厘米，不能引起视觉（即在可见光范围之外）。可见光能透过的物质，对于紫外线的某些波段却会强烈的吸收。例如：玻璃对波长小于 35×10^{-4} 厘米的紫外线有强烈的吸收；地球大气中的氧和臭氧几乎全部吸收了太阳辐射中，波长小于 29×10^{-6} 厘米的紫外线；水晶（即石英）吸收波长小于 2×10^{-5} 厘米的紫外线；波长小于 2×10^{-5} 厘米的紫外线被空气强烈吸收。因此观察这一紫外线波段的光谱仪的内部必须抽成真空，这个波段称为真空紫外，适用于这一波段的光谱仪称为真空紫外光谱仪。水银灯和电弧的光中有 $(25 \sim 39) \times 10^{-6}$ 厘米之间的强紫外辐射，是常用的紫外线光源，紫外线通常用光电元件和感光乳胶来检测。紫外光谱是研究原子结构的重要手段，紫外线在工农业方面也有重要应用价值。在生物学和医学上常用紫外线进行杀菌消毒，诱发突变、治疗皮肤病和软骨病等。

【伦琴射线】

又称“X射线”，它是一种波长很短的电磁辐射，其波长约为 $(20 \sim 0.06) \times 10^{-8}$ 厘米之间。伦琴射线具有很高的穿透本领，能透过许多对可见光不透明的物质，如墨纸、木料等。这种肉眼看不见的射线可以使很多固体材料发生可见的荧光，使照相底片感光以及空气电离等效应，波长越短的X射线能量越大，叫做硬X射线，波长长的X射线能量较低，称为软X射线。当在真空中，高速运动的电子轰击金属靶时，靶就放出X射线，这就是X射线管的结构原理。放出的X射线分为两类：（1）如果被靶阻挡的电子的能量，不越过一定限度时，只发射连续光谱的辐射。这种辐射叫做轫致辐射；（2）一种不连续的，它只有几条特殊的线状光谱，这种发射线状光谱的辐射叫做特征辐射。连续光谱的性质和靶材料无关，而特征光谱和靶材料有关，不同的材料有不同的特征光谱这就是为什么称之为“特征”的原因。X射线的特征是波长非常短，频率很高。因此X射线必定是由于原子在能量相差悬殊的两个能级之间的跃迁而产生的。所以X射线光谱是原子中最靠内层的电子跃迁时发出来的，而光学光谱则是外层的电子跃迁时发射出来的。X射线在电场磁场中不偏转。这说明X射线是不带电的粒子流。1906年，实验证明X射线是波长很短的一种电磁波，因此能产生干涉、衍射现象。X射线用来帮助人们进行医学诊断和治疗；用于工业上的非破坏性材料的检查；在基础科学和应用科学领域内，被广泛用于晶体结构分析，及通过X射线光谱和X射线吸收进行化学分析和原子结构的研究。

【电磁波谱】

在空间传播着的交变电磁场，（即电磁波）。它在真空中的传播速度约为每秒 30 万公里。无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线都是电磁波，不过它们的产生方式不尽相同，波长也不同，把它们按波长（或频率）顺序排列就构成了电磁波谱。依照波长的长短以及波源的不同，电磁波谱可大致分为：（1）无线电波——波长从几千米到 0.3 米左右，一般的电视和无线电广播的波段就是用这种波；（2）微波——波长从 0.3 米到 10^{-3} 米，这些波多用在雷达或其它通讯系统；（3）红外线——波长从 10^{-3} 米到 7.8×10^{-7} 米；（4）可见光——这是人们所能感光的极狭窄的一个波段。波长从 $(78 \sim 3.8) \times 10^{-6}$ 厘米。光是原子或分子内的电子运动状态改变时所发出的电磁波。由于它是我们能够直接感受而察觉的电磁波极少的那一部分；（5）紫外线——波长从 3×10^{-7} 米到 6×10^{-10} 米。这些波产生的原因和光波类似，常常在放电时发出。由于它的能量和一般化学反应所牵涉的能量大小相当，因此紫外光的化学效应最强；（6）伦琴射线——这部分电磁波谱，波长从 2×10^{-9} 米到 6×10^{-12} 米。伦琴射线（X 射线）是原子的内层电子由一个能态跳至另一个能态时或电子在原子核电场内减速时所发出的；（7） γ 射线——是波长从 $10^{-10} \sim 10^{-14}$ 米的电磁波。这种不可见的电磁波是从原子核内发出来的，放射性物质或原子核反应中常有这种辐射伴随着发出。 γ 射线的穿透力很强，对生物体的破坏力很大。

【分光镜】

可产生并观察光谱的仪器，故又称分光仪。也可以用来作简单的波长测量仪器。分光镜的型式很多，各型式间除操作原理的差异外，还有被探测的辐射线不同，辐射频率的区间由红外光到伦琴射线（X光）。一种简单的分光镜就是：从光源 S 射出的光，经过一狭缝，变成一窄束光后，由凸透镜而变成平行光（窄缝应处在凸透镜的焦平面内），使平行光经过一棱镜而色散，因同色光（同波长）的射线平行，这些光线再通过一凸透镜时则可把各色光分别聚焦在屏幕的不同位置上，于是在屏幕上就呈现出一排按照波长长短排列的彩色的光谱，这就是光源发出的光谱，不同元素的光源它的光谱也各不相同。现在的分光镜中多数都用衍射光栅代替棱镜。如果光栅的表面是凹面的（凹面光栅），这种光栅本身就有聚焦作用，因此可以取消透镜系统。

【发射光谱】

由物体发 所产生的光谱叫做发射光谱。如物质在高温状态或因受到带电粒子的撞击而激发后而直接发出的光谱均属发射光谱。由于物质被激发时所处的状态不同，发射光谱有不同的组合形式；如原子被激发后发出明线光谱；分子则有带光谱，实际上是一组非常密集的线光谱组成；在炽热的固态、液态或高压气体中为连续光谱。例如，稀薄气体发光是由不连续的亮线组成的，这种发射光谱就是明线光谱，也就是原子光谱。因为原子有一系列分立的能级，电子从能量较高的激发状态跃迁到能量较低的激发态或基态时，以一定频率的光的形式放出能量。其发光频率由

$$h\nu=E_2-E_1$$

确定。对于不同的 E_1 和 E_2 ，有不同的能量差。或者说，电子在不同能级之间的跃迁将产生不同频率的光谱线。不同的原子具有一系列不同的能级，正如每个人有他独特的指纹一样。因此不同的原子有不同的发射光谱线系。通过测定光谱线系的波长能鉴定发光的原子是何种元素。波长连续分布的光谱叫做连续光谱。炽热的固体、液体、高压气体往往发出连续光谱。电子和离子复合时，以及高速运动的带电粒子在加速场中运动时，也能发射这种光谱。参见“轫致辐射”。

【吸收光谱】

当物体发出的波长连续分布的光通过物质时，某些波长的光被物质有选择性地吸收，它所产生的光谱是在连续光谱的背景下，分布着一系列暗线或暗带。这种光谱叫做吸收光谱。由于物质所在的状态不同，吸收光谱有不同的形状；如原子状态的吸收光谱中有比较分开的暗线光谱；气体或蒸气的分子状态的吸收光谱是由密集的暗线组成的暗带光谱；处于固体或液体状态中的物质，则往往将一定波长区域的光线吸收，而表现出逐渐变暗的一些暗带。在一般情况下，物质吸收光谱的波长与该物质的某些发射光谱波长相对应。因为发射光谱一般必须在高温下获得，而高温下的分子或晶体往往易于分解，因此吸收光谱最适宜于研究分子的结构。又由于分子的振动和转动光谱均位于红外区域，所以红外吸收光谱是研究分子结构变化的重要手段。

【光谱分析】

应用光谱学的原理和实验方法以确定物质的结构和化学成分的分析法。炽热的气体或蒸气能产生特定的光谱线，人们可以根据分析所产生的这些谱线来确定此种气体中的物质成分。从各种星球的光谱中，可以推断其上所存在之元素与物质。由于极微量的元素存在足以在光谱中产生特征谱线，所以此种分析在化学中价值很大。许多元素，如铯与铷等，就是由光谱分析发现的。光谱分析包括：（1）发射光谱分析——利用各种物质的特征发射光谱以确定其化学成分。按目的和方法不同又可分为：光谱定性分析。因每种元素都有各自的特征谱线，可从待测物质所发射的光谱，鉴定其中所含的元素。光谱定量分析。因每种元素所发射的特征谱线的强度，与它在物质中的含量有关，所以可通过谱线强度的对比，测定物质中各元素含量的多少。（2）吸收光谱分析——利用各种物质的特征吸收光谱以确定其结构的化学成分。例如分光光度分析。根据特征光谱的波长不同，分为“可见和紫外分光光度分析法”及“红外分光光度分析法”。适用于可溶性物质的分析。光谱分析具有极高的灵敏度和准确度、且分析速度快，故在生产技术（如冶金、地质、化工，石油等部门）中广泛采用。

【光谱仪】

将复色光分解为光谱，并进行记录的精密光学仪器。在可见光和紫外光区域，过去常用照相法记录光谱，故也称摄谱仪。在红外区域，一般用光敏或热敏元件逐点记录，故有红外分光计的名称。现在在各个波段均采用光电接收和记录的方法，比较直接、灵敏，称为“光电记录光谱仪”。为了得到更多的光谱线，可以把被分析物质放在等离子体火焰中激发，在光谱仪中除采用光电接收方法外，还配有专用计算机，计算物质中各元素含量。可以在数秒种内从显示器的荧光屏读出结果。这种仪器称为“等离子体光电直读光谱仪”简称 ICP 光谱仪，是当前光谱分析中最迅速最灵敏的一种仪器。光谱仪是上述各种仪器的总称。虽然各种光谱仪的形式各异，但均有三大主要部分：一是激光光谱的光源；二是光谱仪系统，使不同波长的光聚焦在仪器上的特定位置。三是用置于焦点上的探测器来量光的强度。近代的光谱仪大都采用微型计算机处理实验结果。

【激光】

用电学、光学及其它方法对工作物质进行激励，使其中一部分粒子激发到能量较高的而又能维持时间较长的所谓亚稳态上去，当这种状态的粒子数量大于能量较低状态的粒子数时，叫做粒子数的反转。由于场效应的作用，处于高能态的粒子受到感应而跃迁到低能态，同时发生光的辐射，这种辐射称为受激辐射。这种辐射又感应其他高能态的粒子发生同样的辐射。受激辐射的特点是辐射光和感应它的光子同方向、同位相、同频率并且同偏振面。若把激光的工作物质置于谐振腔内，则光辐射在谐振腔内沿轴线方向往复反射传播，多次通过工作物质，使工作物质中处于反转态的粒子不断受到感应而发光，一个粒子的辐射感应一大片造成雪崩似的放大效果，而形成一束强度很大、方向集中的光束，这种光束称之为激光。激光的特点是：具有很好的单色性、方向性和相干性，并且亮度极高。（1）单色性——如氦氖激光器发射出频率为 4.74×10^{14} 赫兹的红色激光，它的频带宽仅是 9×10^{12} 赫兹。（2）方向性——激光光源的光束延伸几公里后扩展范围的线度不到几厘米，而探照灯延伸几公里后的扩展范围的线度有几十米。（3）相干性——受激辐射满足干涉条件，因而激光具有很好的相干性。（4）高亮度——由于激光能把巨大的能量高度集中地辐射出来。如果把强大的激光束会聚起来照射到物体上，可以使物体的被照部分在不到千分之一秒时间内产生几千万度的高温。自从激光问世以来，不但使古老的光学又变得生气勃勃，并促使许多科学技术领域发生了巨大的变化，诸如激光手术刀，激光切割，直至激光武器等等。

【光电效应】

物质（主要指金属）在光的照射下释放出电子的现象，称之为光电效应。其所释放出的电子叫做“光电子”。1887年德国物理学家，赫兹首先发现，这种效应不能简单地用光的波动理论来解释，1905年爱因斯坦引入光子概念才满意地说明了这一现象。根据爱因斯坦的理论，当光照射到物体上时，光子的能量可被物体中某个原子的外层电子全部吸收。如果电子吸收的能量 $h\nu$ 足够大，使它不但具有足以摆脱原子束缚它的能量（即电离能量） I ，而且还有能量用于脱离物体表面所需的逸出功（或叫做功函数） W ，则电子就可以从物体表面脱逸出来，成为光电子，这就是光电效应的过程爱因斯坦方程是

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + I + W$$

式中的 $\frac{1}{2}mv^2$ 是脱出物体的光电子的初始动能。对于金属来说，其内部有大量的自由电子，这些自由电子不需要克服脱离原子的电离能量，因而对金属来说， I 可以略去，爱因斯坦方程成为

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$$

如果 $h\nu < W$ ，电子就不能脱出金属的表面。对于一定的金属，产生光电效应的最小光频率（极限频率） ν_0 由

$$h\nu_0 = W$$

确定。相应的红限波长为

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{hc}{W}$$

由此可见，光电效应只有在照射物体的光频率大于某个确定值时，物体才能发出光电子，这个频率就是 ν_0 ，相应的波长 λ_0 通常称为红限波长。不同的物质具有不同的极限频率 ν_0 和相应的红限波长 λ_0 。被照物体发射的光电子数和照射光的强度成正比。光电子脱出物体时的初始动能只和照射光的频率有关而与发光强度无关。从实验中还得知，产生光电流的过程非常快，一般不超过 10^{-9} 秒；光照射停止，光电流也就立即停止。这表明光电效应是瞬时的。利用光电效应可以制造光电倍增管。光电倍增管能将一次次闪光转换成一个个放大的电脉冲，然后送到电子线路中，被记录下来。大多数纯金属材料的逸出功约在 2~6 电子伏特之间或大一些。这表明其红限波长要小于 4×10^{-5} 厘米，可见，可见光对这些物质不能产生光电效应。高效率的光电效应材料，除逸出功应较低外，还需具有能将大部分照射光吸收，并能更多地将它转变为电子动能的特性，所以反射性高及透明的物质不是理想的光电效应材料。碱金属钠、钾等物质是极好的光电效应材料。其中钾的逸出功为 2eV（电子伏特），钠的逸出功为 2.3eV。

【光的波粒二象性】

光电效应和康普顿效应，使人们无法不承认光的量子性质，而干涉和衍射现象又使人们不能放弃光的波动性。把光的两重性质——波动性和微粒性联系起来，即动量和能量是光的粒子性的描述，而频率和波长则是波的特性。虽然普朗克和爱因斯坦的理论揭示出光的微粒性，但这并不否定光的波动性，因为光的波动理论早已被干涉、衍射等现象所完全证实。这样光就具有微粒和波动的双重性质，这种性质便被称为光的波粒二象性。1925年玻恩提出的波粒二象性的统计解释，把波动性和粒子性联系起来。这种统计的观点，统一了粒子概念和波动概念。一方面它具有集中的能量、质量和动量，也就是光的粒子性；同时在另一方面，它们在各处出现，具有一定的几率，由这个几率可以算出它们在空间的分布，这种空间分布又和波动的概念一致。必须注意的是，光子既不是经典的波，也不是经典的粒子，更不是两者的混合。其实当光子和物质相互作用时，它是粒子；当它在运动时，观察到衍射现象来说，它是波动。但它究竟是什么，很难用经典物理学的概念来完全描述。真正把光的波粒二象性统一地反映出来的理论是量子电动力学，它是在量子力学的基础上建立起来的。不仅光具有波粒二象性，而且电子、原子等一切实物粒子也都具有两重性。且一个动量为 P 、能量为 E 的自由运动粒子，相当于一个

波长为 $\lambda = \frac{h}{P}$ 、频率为 $\nu = \frac{E}{h}$ ，并沿粒子运动方向传播的平面波（ h 为普朗

克常数）。这种对微观粒子所具有波动性的描述，叫做物质波，即德布罗意波。但是不能因此而忽视光子和电子、原子等实物粒子之间的差别。例如，就速度方面，光在真空中的传播速度只有一个不变的速度，即光速 c ，而电子可以有小于光速的任何速度；在质量方面电子有静止质量，而光子的静止质量等于零。尽管如此，电子和光子之间仍然有着内在联系。当能量超过 1.02MeV （兆电子伏特）的光子，在经过另一粒子（通常是原子核）附近时，就可转化为电子对。反之当电子和正电子相遇时，电子对将湮没而转化为两个光子，这一现象揭示了光子和电子有着深刻的联系，它也说明了物质存在形式之间的相互转化。德布罗意的假说，通过能量和动量，把微观粒子的粒子性和波动性联系起来，即

$$E = mc^2 = h\nu$$

$$P = m v = \frac{h}{\lambda}$$

所以对具有静止质量 m_0 的实物粒子来说，按照德布罗意假说，粒子以速度 v 运动时，相应于这些粒子的平面单色波的波长是

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{m v} = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

上述公式称为德布罗意公式，如果 $v \ll c$ ，则

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v}$$

以电子为例，电子经电场加速后，电子的速度将由关系式

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = eU \quad \text{或} \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m_0}}$$

式中 U 为加速电位差，所以

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0U}}$$

将 $h=6.62 \times 10^{-34}$ [焦耳] [秒]， $e=1.60 \times 10^{-19}$ [库仑]， $m_0=9.11 \times 10^{-31}$ [公斤] 代入上式，得

$$\lambda = \frac{12.2}{\sqrt{v}} \times 10^{-10} \text{ [米]}$$

如果 $v=150$ 伏特的电位差，则德布罗意波的波长 $=10^{-8}$ 厘米。如果电位差再大则 也相应变短。

【普朗克】

德国物理学家。1900年为了克服经典物理学对黑体辐射现象解释上的困难，创立了物质辐射（或吸收）的能量只能是某一最小能量单位（能量量子）的整数倍的假说，即量子假说，对量子论的发展有重大影响。在热力学和统计物理学方面，如关于热力学定律的表述、非平衡态理论等，都有一定贡献。

【普朗克常数】

物理学中普适常数之一，以符号 h 表示，其数值为 6.62×10^{-34} 焦耳·秒。这一常数是 1900 年普朗克在研究黑体辐射时首次引进的。当时他为了推导出一个与实验结果相符合的黑体辐射公式，普朗克把黑体辐射看作是带电谐振子振动时释放的能量，并假设这些谐振子的能量不能连续变化，而只能取一些分立值，如果振子的固有频率为 ν 则它们只能是最小能量 $\epsilon_0 (=h\nu)$ 的整数倍： $\epsilon_0, 2\epsilon_0, 3\epsilon_0, \dots, n\epsilon_0$ ，这些分立的能量值称为谐振子的能级。后由黑体辐射公式与维恩电热力学得出的普遍公式相比较，即

$$\rho_\nu d\nu = \frac{3}{c^3} \nu^2 \cdot \frac{\epsilon_0}{e\epsilon_0 / KT - 1} d\nu$$

与

$$\nu d\nu = \nu^3 (\nu/T) d\nu$$

相比较，得出 ϵ_0 必须与振子的固有频率 ν 成比例。

$$\epsilon_0 = h\nu$$

比例常数 h 称为“普朗克常数”。它的数值是由实验得出的。它是微观现象量子特性的表征。在量子力学中也常用 $\frac{h}{2\pi}$ 作为普朗克常数，以 \hbar 表示。

【德布罗意】

法国理论物理学家。在量子论的研究中提出了物质波的大胆设想，为此获巴黎大学博士学位，著有“波动力学研究导论”。

【有声电影】

当一部电影拍摄时，可见的景物、人物以及动作被拍摄下来的同时，演员们所说的话及各种声音，通过把声音变成光也被记录在同一胶片上。声音变成光，是用一系列的特殊电子管。首先，声音由微音器收集，把声音变成电脉冲，这与电话中的情况相同。电脉冲在电子管内被放大，然后被送到一个特制的灯泡中去。这种灯泡实际上是一条灯管，它的光的亮度在极短的时间内能作很大的改变，它可以由亮变暗又变亮。这样，声音变成电脉冲，再变成光脉冲。一个响亮的声音产生强光，而一个弱的声音产生微弱的光。当不同亮度的光照到胶片的声道上，引起不同数目的银原子出现。这和拍照片时发生的现象相同。由于光线的作用，溴化银分子分裂，银原子出现。在胶片被冲洗后，根据原来的声音或强或弱，声道上或明或暗。暗黑的部分，表示响亮的声音。光亮的部分表示微弱的声音，这叫做密度变化式的声道。因为声道从透明变到非常阴暗，即变成非常浓黑。另一种声道是由波纹线组成，这叫做面积变化式声道，因为由波纹线覆盖的面积是变更着的，这两种声道用在电影放映机内，它们的效果相同。光电管是一种特别的电子管。它是有声电影放映机中使声音与影像密切吻合的关键，它的职责是把胶片声道上的声音的照相，或者说声道上光的强弱讯号变成强弱变化的电流讯号，然后再变回声音，虽然光电管并非完成其全部工作，但它负责第一个重要的变换步骤。光电管，包括两个部分——一块弯曲的金属片和一条金属棒，金属片上涂有一层特别的物质，例如铯（电子逸出功很小），以金属片为阴极称为光电阴极，金属棒为阳极，在二电极之间加上一定的电压，当光照在铯上，由于光电效应而放出电子，在电极之间的电场作用下电子从阴极到阳极而形成光电流，当强光照射时，就有较强的电子流流至金属棒；光弱时，电子流较弱，所以光电流的强度是随着光线的亮度而改变的。在电影放映机里，光电管放在胶片声道之前，而光源放在声道之后，于是光线透过声道射入光电管中，在影片不断移动的过程中，通过声道的光的强度也就不断变化，变化的光射向光电管时，在电路中产生变化的电流，把电流放大后，使之通过喇叭可把声音放出来，由于像和声同时制做在同一胶片上，因而，声音和像是同步的。故声和影像的配合完全一致。

【光的散射】

当光通过不均匀媒质悬浮的颗粒或分子时，部分光束将偏离原来方向而分散到各个不同方向去，称之为光的散射。如太阳光束射到地球表面时必须穿过大气层，因此阳光要受到空气分子和悬浮在空中的细小的尘埃粒子的散射。散射光的强度和光波长的四次方成反比，也就是说，波长越短的光，越多地被散射。阳光经过大气层时，其短波部分，如蓝光和紫光较多地被散射掉，透过大气层而射到地面上的阳光中波长较长的黄光和红光的成分更多一些。所以没有射到地面而从空中穿过的阳光，它的

图 4—35

蓝紫色部分被散射到地面。如图 4 - 35 所示而使天空呈现蓝色。旭日和夕阳呈红色。这是因为早晚阳光以很大的倾角穿过大气层，经历的大气层要远比中午时厚得多，所以波长较短的蓝光、紫光等几乎全部被散射掉，而剩下波长较长的黄光和红光到达观察者。

【颜色】

眼睛对不同波长的光产生的不同的感觉。从而显示出不同的颜色，光的颜色决定于它的频率。一个具有一定波长或频率的光显示出单一的颜色，称为单色光。物体所呈现的颜色由下列诸因素而定：(1)物体本身的性质——光线照射在物体上，物体依照自己的特性有选择地反射或折射某些颜色的光，而其它颜色的光则被物体吸收，此称为选择吸收。对于不透明物体的颜色是：选择吸收之后剩余反射光的颜色。我们都知道阳光或白炽灯的灯光中包含有红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫等颜色。我们称它为“复色光”。如果我们在复色光照明下看物体，譬如红色的布是因为红布反射红色光而吸收其它色光；白色体是将入射的复色白光全部反射。而基本上没有吸收，故显示白色；黑色物体则将入射的复光完全吸收，而无任何色光反射或折出，故呈黑色。而透明体的颜色乃是：选择吸收之后所余的透射光之颜色。如红色玻璃只透过红光而吸收其它的色光，故呈红色。(2)照射光的性质——例如以不含红光之光照射红色物体，即呈现黑色；隔红色玻璃观察不含红光之光源亦呈现黑色。这两种情况都是因为光源中不包含该物体能反射或能透射的光，而其余的色光全被吸收的缘故。(3)入射光透进物体内的深浅——可分双向色性及表面色两个方面。表面色：反射光有一部分自表面立即漫射，另一部分而深入少许而后反射。某种物体对某单色光有较强的反射本领，故在透射之光线中几乎不再有此种色光，但这种物体可能对另一种单色光很少吸收而使它大部分透射过去，于是这种单色光就透过了物体因此就有表面色与透过色互异的现象这就是“双色向性”。如金箔反射黄色光，而透过之光呈蓝绿色；铜箔的透过之光亦为蓝色。追究颜色产生的主要根由，应归结为物质电子能态的改变，不同能态之间的电子跃迁决定了其发光的频率，因而它是产生颜色的根本原因。

【光度学】

在光学中研究光的发射、传播、吸收和散射等过程中光的计量问题的学科，也即对可见光的能量计量的学科，研究各种光量，如发光强度、光通量、照度、亮度等的定义及其单位的选定，以及同其他物理量之间的关系，并研究光量测量仪器的设计、制造和测量方法。测量方法可分为目视测量（主观光度学）与仪器测量（客观光度学）两类。光度学的研究对照明的准确计量及设计有重要意义。

【视见率】

又称“视见函数”。不同波长的光对人眼的视觉灵敏度。实验表明：正常视力的观察者，对波长 5.5×10^{-7} 米的黄绿色光最敏感；而对紫外光和红外光，则无视力感觉。取人眼对波长为 5.55×10^{-7} 米的黄绿光的视见率为最大，取为 1；其他波长的可见光的视见率均小于 1；红外光和紫外光的视见率为零。某波长的光的视见率与波长为 5.55×10^{-7} 米的黄绿光视见率的比称为该波长的相对视见率。

【光通量】

人眼所能感觉到的辐射能量，它等于单位时间内某一波段的辐射能量和该波段的相对视见率的乘积。由于人眼对不同波长光的相对视见率不同，所以不同波长光的辐射功率相等时，其光通量并不相等。例如，当波长为 555×10^{-7} 米的绿光与波长为 65×10^{-6} 米的红光辐射功率相等时，前者的光通量为后者的 10 倍。光通量的单位为“流明”。光通量通常用来表示，在理论上其功率可用瓦特来度量，但因视觉对此尚与光色有关。所以度量单位采用，依标准光源及正常视力另定之“流明”来度量光通量。

【烛光】

发光强度的单位。1967年第十三届国际计量大会统一规定为：在标准大气压下，处在铂凝固温度（2045K）的绝对黑体的 $1/600000$ 平方米表面上的发光强度为“1烛光”。在此之前，烛光依一标准蜡烛所发的光而定，标准蜡烛是英国所定的烛光，依直径2.2厘米用鲸油制成的蜡烛，每小时燃烧鲸油7.78克。这样标准蜡烛所发的光的强度为烛光。

【发光强度】

指光源的明亮程度。也即表示光源在一定方向和范围内发出的可见光辐射强弱的物理量。以光源发射的光通量除以空间的总立体角 4π ，就是该光源平均发光强度。例如，一点光源沿某一方向的发光强度就是：沿此方向的单位立体角发出的光通量。如果光沿着 v 方向，取 v 为轴的一个立体角 $d\Omega$ ，设 $d\Omega$ 内的光通量为 $d\phi$ ，则沿 v 方向的发光强度为

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$$

发光强度的单位为烛光。

【亮度】

表示发光表面的发光强度。发光面在某一方向的发光强度 I ，除以发光面在该方向的视面积 $S \cos \alpha$ ，就是发光面 S 在这一方向上的亮度 B_a ，如图 4 - 36 所示，即

$$B_a = I / S \cos \alpha$$

或者说，在某方向上从单位表现面积在单位立体角内发出的光通量。亮度一般随观察方向而变，但有某些光源如太阳、黑体、粗糙的发光面，其亮度和方向无关，这类光源叫做朗伯光源。一个理想的漫射面也是沿各方向漫射光的发光强度与 $\cos \alpha$ 成正比，从而光亮度相同，积雪、粉刷的白墙以及十分粗糙白纸的表面，都可近似看成朗伯光源。

【照度】

落在受照射物体单位面积上的光通量叫做照度。假设在面积 dS 元上的光通量为 $d\Phi$ ，则此面积元上的照度 $E = \frac{d\Phi}{dS}$ 。对点光源来说，照度反比于光源到受照射面的距离 r 的平方，而正比于光束的轴线方向 r 与受照面的法线 n 间夹角的余弦，即

$$E = \frac{I \cos \theta}{r^2}$$

照度的单位为“勒克司”。

【流明】

光通量的单位。发光强度为 1 烛光的点光源，在单位立体角（1 球面度）内发出的光通量为“1 流明”。

【勒克司】

照度的单位。等于 1 流明的光通量均匀照在 1 平方米表面上所产生的照度。适宜于阅读和缝纫等的照度约为 60 勒克司。

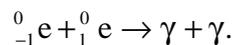
【光度计】

光度计是对可见光进行计量的仪器，例如，油滴光度计、球光度计等；也有一些光度计可以直接读出光通量、照度或亮度的数值，例如，流明计、勒克司计等。光度计一般都采用与已知发光强度的标准光源作比较来进行测量，例如，油滴光度计、本生光度计；但也有可以直接读出光源的光量，例如，某些流明计。在作比较测量时，可用目视（主观测量）或用仪器（客观测量）两种方法。近年来由于仪器制造技术的提高，仪器测量基本上已替代目视测量。

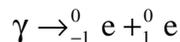
五、原子和原子核

【电子】

是一种最小的带电粒子。它也是最早被人们发现的基本粒子。带负电，电量为 1.602189×10^{-19} 库仑。是电量的最小单元。质量为 9.10953×10^{-28} 克。常用符号 e 表示。电子在原子中，围绕于原子核外，其数目与核内的质子数相等，亦等于原子序数。导线中电流的产生即是电子流动的结果。一安培的电流相当于每秒通过 6.24×10^{18} 个电子。利用电场和磁场，能按照人们的要求控制电子的运动（特别是在真空中），从而制造出各种电子仪器和元件，如各种电子管，电子显像管、电子显微镜等。电子的反粒子叫做正电子，可用符号 e^+ 或 0_1e 来表示。正电子的质量和电子相等，它的电量的数值和电子相等而符号相反，即带正电。一个电子和一个正电子相遇会发生湮没而转化为一对光子，即



一对正负电子，常称为正负电子对（电子偶）。能量超过 1.02MeV（兆电子伏特）的光子穿过铅板时，会产生电子—正电子对，这个反应表示为



电子的运动质量 m 与静止质量 m_0 的关系为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

这里 v 是电子运动速度， c 是光速，这就是相对论的公式。

【原子】

组成单质和化合物分子的最小粒子。不同元素的原子具有不同的平均质量和原子结构。原子是由带正电的原子核和围绕核运动的、与核电荷核数相等的电子所组成。原子的质量几乎全部集中在原子核上。在物理化学反应中，原子核不发生变化。只有在核反应中原子核才发生变化。

【汤姆逊的原子核模型】

汤姆逊的原子核模型是最早提出的原子核模型，他认为：构成原子的正电荷是均匀分布于球状原子内，原子大小乃是此正电荷球之大小，电子则埋藏于此正电荷中，当电子受到外界激励时，它即以平衡位置为中心作振动而发射光。当 α 粒子穿过此原子时， α 粒子将受到散射，因电子质量很小，这项散射之主要原因是正电荷之斥力作用。由电磁理论预示加速的带电物体如振动的电子等会发射电磁辐射，故根据汤姆生模型，便可了解受激原子会发射电磁辐射的性质。在实际计算其可能发射的辐射能谱，即发现此模型所导致的结果，与实验观察到的能谱在数值上并不相符。1911年卢瑟福对原子核散射 α 粒子的实验加以分析之后，便得出汤姆生模型不正确的结论。卢瑟福分析的结果表明，正电荷并非布满在整个原子内，而是集中在原子中心的极小区域，或原子核内，就此，汤姆生的原子模型便被废弃了。

【 α 粒子的散射】

1911 年卢瑟福等人用 α 粒子 (He 的原子核) 射击重的金属箔, 结果大部分 α 粒子穿过了金属箔而很少改变其运动方向, 一小部分 α 粒子被分别散射到不同的方向上。他们测定了不同散射角中 α 粒子的数目, 加以分析后, 得出如下结论: 原子是由一个很小的核心 (原子核) 和围绕着它运动的电子构成 (原子行星模型), 原子核所带电荷量为 Ze (Z 为该金属的原子序数, e 为电子的电荷), 其线度约为原子的十万分之一, 一般为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 厘米。 α 粒子散射, 又称为卢瑟福散射, 它是原子物理发展中最早期的重要实验之一。图 5-1 所示描述了 α 粒子通过重金属箔的散射情况。假设距原子核很远的地方, α 粒子沿直线 ab 以速度 V 运动,

以 P 表示直线 ab 与原子中心 O (即原子的正电荷 E 所在的地方) 的最短距离。 P 被称为“瞄准”距离, 可由理论力学应用电学知识计算证明, 在 α 粒子与电荷 E 之间存在着库仑相互作用力的情况下, α 粒子沿双曲线运动。而 α 粒子轨道的偏转角 (双曲线的渐近线之间的角) 为下式决定:

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{MV^2}{2eE} \cdot P$$

式中 M 是 α 粒子的质量, 重金属原子核的质量和 α 粒子的质量相比较, 可以看作是无穷大。由上式可知, “瞄准”距离 P 愈小, 偏转角 愈大。对于不同的“瞄准”距离, α 粒子的轨道形状可有如图 5—2 所示的三种情况。在 P 小到一定程度时, $P < \frac{2eE}{MV^2}$, 即 α 粒子与原子碰撞后可能被弹回。这

种情况往往称为 α 粒子背向散射。假定一束平行的 α 粒子穿过金属箔, 并设单位时间内通过单位横截面的粒子数为 n_0 。我们可以计算单位时间内有多少个粒子的偏转角是在给定的 θ 与 $\theta + d\theta$ 之间。设偏转角 θ 与“瞄准”距离 P 对应, 而偏转角 $\theta + d\theta$ 与“瞄准”距离 $P - dP$ 对应。在此情况下, 偏转角在 $\theta \sim \theta + d\theta$ 之间的粒子, 是那些穿过以 A 为中心, 以 P 为半径所作的宽为 dP 的环的面积中的粒子如图 5-3 所示。这样的粒子数目等于 $n_0 dS$, 式中 dS 为环的面积。如果金属箔每单位面积有 N 个原子, 则单位时间内其偏转角在 θ 与 $\theta + d\theta$ 之间的粒子的总数为

$$dn = n_0 N dS$$

此关系式是在每一个 α 粒子只偏转一次的条件才正确, 而这个条件在金属箔足够薄时是能够实现的。环的面积 dS 近似地等于 $2 P dP$ 。所以有

$$dn = 2 n_0 N P dP$$

由 $\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{MV^2}{2eE} \cdot P$ 得

$$P^2 = \left(\frac{2eE}{MV^2} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2}$$

将上式微分, 得出

$$Pd\theta = -\frac{1}{2} \left(\frac{2eE}{MV^2} \right)^2 \frac{\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta$$

显然

$$\begin{aligned} dn &= n_0 N \left(\frac{2eE}{MV^2} \right)^2 \frac{\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta \\ &= n_0 N \left(\frac{Ze^2}{MV^2} \right)^2 \frac{2 \sin \theta d\theta}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \end{aligned}$$

式中 Z 是原子核的电荷数 (原子序数)。 dn 表示单位时间内散射角在已知值 θ 与 $\theta + d\theta$ 之间的粒子数目。换句话说 dn 是单位时间内在开放角为 2θ 和 $2(\theta + d\theta)$ 的二锥体之间的空间内飞行的 α 粒子数目。如果我们以这两个锥体的顶点 c 为球心, 作一半径为 r 的球, 则这两个锥体在球面上截出的面积为 $2 r \sin \theta \cdot r d\theta = 2 r^2 \sin \theta \cdot d\theta$ 的区域, 如图 5-4 所示的阴影部分。所有 dn 个粒子都射在这区域的面积上。因而落在单位面积上的粒子数目

$$\begin{aligned} dn' &= \frac{dn}{2 r^2 \sin \theta \cdot d\theta} \\ &= \frac{n_0 N}{r^2} \left(\frac{Ze^2}{MV^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \end{aligned}$$

在一定的实验条件下, 当 r 变化时乘积 $dn' \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}$ 应保持不变。实验的结果完全证实了理论的这一结论。

【原子核的电荷】 由 α 粒子的散射公式中的 $dn' = \frac{n_0 N}{r^2} \cdot \left(\frac{Ze^2}{MV^2}\right) \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$

(见词目 α 粒子的散射)和不同元素对 α 粒子的实验数据(即公式中的 r , V , n_0 , N 和测出的 dn' 诸值)。可以计算出各种元素原子核的电荷 $Q=Ze$ 。其中 Z 是某种元素的原子序数。

【原子核的大小】

根据卢瑟夫的核式结构模型，可以估计出原子核的线度不超过 10^{-13} [厘米]，它的这一线度也是由散射实验确定的。如果我们知道了原子的电荷 $Q = Ze$ ，就可以由 $\text{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{MV^2}{2Ze^2}$ （见词目 α 粒子的散射）求出与不同偏转角 θ 对应的“瞄准”距离 P 。我们发现，对于重的元素， θ 的值达到 150° ， P 的数量级为 10^{-13} [厘米]。这表示，当 α 粒子中心与原子中心距离的数量级为 10^{-13} [厘米] 的时候，相互作用力仍遵守库仑定律，由此可得出结论：原子核的线度不超过 10^{-13} [厘米]。因为整个原子的线度是一数量级为 10^{-8} [厘米] 的量，这很显然说明原子核在较原子小得多的体积内。原子核虽小但集中了原子的几乎全部质量，因此原子核的密度非常之大，如果在一立方厘米的体积中全部充满原子核，则它的质量约为一千万吨。

【卢瑟福】

Rutherford, Ernest (1871 ~ 1937 年) 物理学家。生于新西兰，长期在英国工作。在原子结构和放射性研究方面做出了重要的贡献。1899 年发现放射性辐射中的两种成分，并由他命名为 α 射线和 β 射线，接着又发现新的放射性元素“钷”。1902 年与英国化学家索第一起提出原子自然蜕变理论。1911 年根据 α 粒子的散射实验（卢瑟福实验）最先发现原子核的存在，并提出了关于原子结构的行星模型。1919 年用 α 粒子轰击氮原子而获得氧的同位素，第一次实现了元素的人工嬗变。

【玻尔】

Bohr , Niels Henrik David (1885 ~ 1962 年) 丹麦物理学家。他在普朗克量子假说和卢瑟福原子行星模型的基础上 , 于 1913 年提出了氢原子结构和氢光谱的初步理论。后来 , 又提出了 “ 对应原理 ” 。这些工作 , 对量子论和量子力学的建立起了重要作用。此外 , 玻尔在原子核反应理论和解释重核裂变现象等方面 , 也有重要的贡献。1916 年任哥本哈根大学理论物理教授。由于他在原子结构方面的研究成就而获 1922 年诺贝尔物理学奖。

【玻尔的原子理论】

由丹麦物理学家玻尔根据原子行星模型用经典运动规律和普朗克的量子概念来阐明原子结构的初步理论。这一理论的基础是两个基本假设：(1) 电子在原子中不可能沿着经典理论所允许的能量连续变化的所有的轨道运动，而只能沿着一组特殊的轨道运动。只有当电子运动的动量矩等于 $h/2$ (h 为普朗克常数) 的整数倍时，其轨道才是稳定的。在每一稳定轨道中，原子具有一定的能量。处于稳定状态的电子不吸收也不发出辐射。(2) 当电子从一个定态跃迁到另一个定态时，才产生辐射的吸收或发射现象。当原子从能量为 E_n 的能级跃迁到另一个能量为 E_m 的能级时，将发射或吸收一定频率的光，频率的数值为

$$\nu = \frac{|E_n - E_m|}{h}$$

玻尔的理论只考虑到电子的圆周轨道，即电子只具有一个自由度，因此它对只有一个电子的氢原子和类氢原子的谱线频率作出了解释，对于具有两个或更多电子的原子所发的光谱，这理论遇到了根本的困难。后来索末菲将玻尔的量子化条件加以推广，使得它不仅能解释氢原子的光谱，而且对于只有一个价电子的复杂原子光谱也能较好地解释。玻尔理论的部分成就，促进了量子论的发展，在历史上曾起大的作用。

【玻尔轨道】

在玻尔的理论中，认为电子绕原子核运行是许多分立的圆形轨道。轨道半径在 10^{-8} 厘米左右。在不同轨道上运行的电子各有确定的能量。当电子从外层轨道跳向内层轨道时，便发射光子。电子沿轨道运动这一概念并不正确，后已被量子力学的几率分布概念所取代，但由于它的直观性，现在仍然经常用轨道这个术语来近似地描述原子内部电子运动的规律性。根据玻尔的量子化条件，可以算出轨道的半径，对于圆形的轨道，电子的动量矩 P 为

$$P = mvr$$

又根据电子与核之间的作用力为库仑力，所以有

$$f_{\text{库}} = \frac{Ze^2}{r^2}$$

圆形轨道的向心力为

$$f_{\text{向}} = \frac{mv^2}{r}$$

所以

$$\frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

即

$$\frac{Ze^2}{r} = mv^2$$

$$r^2 m^2 v^2 = Ze^2 m r$$

$$P^2 = Ze^2 m r$$

$$r = \frac{P^2}{Ze^2 m}$$

又由于 $P = nh = \frac{nh}{2}$ （ h 为普朗克常数， n 取值 1, 2, 3, ...，称为量子

数（见词目玻尔的原子理论）。得到

$$r = \frac{n^2 h^2}{4 \pi^2 m e^2} \cdot \frac{1}{Z}$$

量值 $\frac{h^2}{4 \pi^2 m e^2} = 0.529 \times 10^{-10}$ 米，是氢原子中电子的最低能量的轨道，

即靠核最近的圆形轨道半径，约为 0.529×10^{-8} [厘米]。在原子物理中常用它作为一种长度单位以 a_0 表示：

$$a_0 = \frac{h^2}{4 \pi^2 m e^2} = 0.529 \times 10^{-8} \text{ [厘米]}$$

【量子数】

表征微观粒子运动状态的一些特定数字。按照量子力学，表征微观粒子运动状态的某些物理量只能不连续变化，称为量子化。量子数就是用来确定它们所可能具有的数值。按照物理量的性质，量子数可以是整数或半整数，有的只能取正值，有的能取正值，也能取负值，但当微观粒子运动状态发生变化时，量子数的增减只能为 1 的整数倍。例如，电子在原子中的运动可用四个量子数表示：主量子数 n 只能取 1, 2, 3, ... 等正整数，它是确定电子能量的主要量子数；角量子数 L 只能采取 0, 1, 2, ... 等正整数，它表示电子轨道动量矩；磁量子数 m 可以采用 0 和正或负整数，它表示电子轨道动量矩在空间某一方向上的分量；自旋量子数 m_s 只能采取 $\pm \frac{1}{2}$ ，它表示电子自旋动量矩在这一空间方向上的分量。

【基态】

由量子的观点来看，微观粒子系统（如原子、原子核或其他多粒子体系等）所能具有的各种状态中能量最低的状态（也就是处于最低能级）叫做基态。当原子处于基态时，电子处于离核最近的轨道上，此时原子处于稳定状态。

【激发态】

对于微观粒子体系（如原子、原子核）当其内部能量高于基态能量时所处的能量状态称为激发态。当原子中的电子通过某种方式从外界吸收光子或与其他粒子相互作用而获得能量时，原子便由基态跃迁到激发态。处于激发态的原子是不稳定的，一般是由发射光子或与其他粒子发生作用而回复到基态。例如，当激发态的原子在回到基态时，它将以光子的形式放出它所减少的这部分能量。光子的频率为

$$\nu = \frac{w_2 - w_1}{h}$$

其中 w_2 表示发光之前原子的能量，而 w_1 表示发光之后的能量。

【能级】

微观粒子系统在束缚态中只能处于一系列不连续的、分立的状态，这些状态对应着一定的能量，它们的数值各不相同。为了形象化起见，人们往往按比例以一系列不同高度的水平线代表不同的能量状态，并把这些状态的能量按大小排列，犹如一级一级的阶梯。故称为能级。例如，原子中的电子处于一系列不连续而分立的定态。每一个定态所具有的能量可用一定高度的能级表示。对于氢原子，电子在各个定态上的能量（包括动能和电势能）为

$$E_n = -\frac{2.18 \times 10^{-18} \text{J}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

式中 K 为静电力恒量，等于 $9.0 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ， e 和 m 分别为电子的电量和质量， h 为普朗克常数。由于取电子电离时（即电子脱离原子时）的电势能为零，所以氢原子能量 E_n 取负值。图 5 - 5 是按能量数值的大小排列成的能级图。从图中可以看出，能级之间的间隔不等， n 愈大，即能量愈高时能级愈密。

$n=1$ 的能级代表基态。 $n=2, 3, 4, \dots$ 都叫做原子的激发态。 n 对应于使原子电离所需要的最小能量。使原子中的电子从能量较低的状态跃迁到能量较高的状态叫做原子受激发。将电子从基态激发到脱离原子，叫做电离，这时所需的能量叫电离电势能。例如氢原子中基态的能量为 -13.6eV （电子伏特），使电子电离的电离势能就是 13.6eV （即 2.18×10^{-18} 焦耳）。

【跃迁】

微观粒子系统从某一状态（初态）到另一个状态（末态）的过程。如一个处于能量较高的激发态原子，将发射光子而变到能量较低的激发态或基态，称为原子从高能态到低能态的跃迁。这时原子以光子的方式放出能量。如果原子由基态过渡到激发态或由较低的激发态过渡到较高的激发态，称为原子从低能态到高能态的跃迁。这时原子需要吸收相应的能量。

【量子】

在微观世界中的某些物理量不能连续变化，而只能以某一最小单位的整数倍发生变化。这一物理量的最小单位称为该物理量的量子，普朗克在研究黑体辐射时，首先发现自然现象中的这一不连续的量子性质。他发现物质吸收或发射的辐射能量量子，其大小为 $h\nu$ （其中 h 为普朗克常数， ν 为辐射的频率）。能量分化为量子的现象，只是普遍自然规律中的一个例子，其他物理量如动量矩等也是量子化的。有时也将同某种场联系在一起的基本粒子称为这个场的量子。例如电磁场的量子就是光子。每种物理量的量子数值都很小，所以在较大物体的运动中，量子化不发生显著地影响，各量犹如能连续变化一样。但对微观粒子（如电子、原子）来说，这种量子化效应就不能忽视，对于它们，牛顿力学已不适用，必须用量子力学来研究。

【量子论】

探索微观粒子运动所遵从的量子规律的初步理论，是量子力学的先驱。是从普朗克在物理学中引入量子概念（1900年）开始，特别是在玻尔提出他的氢原子理论（1913年）以后发展起来的。量子论仍然以经典物理规律为基础，但加上了一些反映微观运动具有量子特性的附加条件（量子条件）。它指出，在物体大、运动范围广（相当于量子数很大）的极限情形下，微观运动规律应该趋近于宏观运动规律，并且两种运动规律应该具有相互对应的关系（对应原理）。量子论能够解释一些简单的原子、分子所发射的光谱和黑体辐射等现象，但由于它的半经典性质，其结果在数量方面往往不能与实验符合。量子论本身还包含着很大矛盾，在解释许多实验事实时都遇到严重困难。它的进一步发展导致量子力学的建立（1924~1926年），现在这一理论已被量子力学所代替，故有时称之为旧量子论，但由于它的直观性强，在解释某些现象（如复杂的光谱）时，还常被采用。人们有时也把研究微观运动的整个学科统称为量子论或量子物理学。

【原子光谱的规律】

在 19 世纪下半期，已了解到稀薄气体发光产生的光谱是不连续的。从 1885 年，瑞士中学教师巴耳末发现描述氢原子光谱规律性的巴耳末公式开始，由大量实验数据分析出原子发射的线光谱是由按照一定规律组成的若干线系构成的。例如，氢原子光谱谱线的波数可用下述的经验公式来描述

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

式中 $R=1.096776 \times 10^7 [\text{米}]^{-1}$ ，称为里德伯常数。m 与 n 都是正整数，n

比 m 大的整数、波数 $\tilde{\nu}$ 是波长的倒数，波数与频率 ν 的关系为 $\tilde{\nu} = \nu / c$ (c 是光速)。当 m 取定一个值时，不同的 n 得出的不同的谱线属于同一个线系，当

- m=1, n=2, 3, 4, 组成的线系叫赖曼线系。
- m=2, n=3, 4, 5, 组成的线系叫巴耳末线系。
- m=3, n=4, 5, 6 组成的线系叫帕邢线系。
- m=4, n=5, 6, 7, 组成的线系叫布喇开线系。
- m=5, n=6, 7, 8, 组成的线系叫做逢德线系。

由此可见，氢原子光谱具有确定的规律性，每一条光谱线的波长都是由两个与整数有关的项决定的， $\tilde{\nu}$ 可以表示为

$$\tilde{\nu} = T(m) - T(n)$$

其中
$$T(m) = \frac{R}{m^2} \quad T(n) = \frac{R}{n^2}$$

$T(m)$ 和 $T(n)$ 叫做光谱项。由于氢原子光谱具有上述的规律性，人们又企图在其他元素的原子光谱中寻找类似的规律。不过其他原子的光谱比氢原子的光谱复杂，这表明其他原子内部的结构比氢原子复杂。但它们也组成若干线系，每一条谱线也可以写成两个光谱项的差。例如类氢离子的光谱可表述为

$$\tilde{\nu} = T(m) - T(n) = RZ^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

或中 R 为里德伯常数，Z 为类氢离子的原子序数，m、n 是整数，且 $n > m$ 。碱金属的光谱项和氢的光谱项不同，碱金属光谱项中多一个改正数 α 、 β ，即

$$T(m) = \frac{R}{(m + \alpha)^2} \quad T(n) = \frac{R}{(n + \beta)^2}$$

总之，关于原子光谱规律可归结为：(1) 谱线的波数由两个谱项的差值来决定。(2) 如果前项保持定值，后项按整数参变量而变，则所给出的各谱线便是同一谱系中各谱线的波数。(3) 改变定项的数值，便给出不同的谱系。

【氢原子光谱解析】

玻尔的原子理论是建立在三个基本假设的基础上：(1)原子系统只能具有一系列的不连续的能量状态，在这些状态中，电子虽然作加速运动但不辐射电磁能量。这些状态叫做原子的定态，相应的能量分别为 E_1, E_2, E_3, \dots ($E_1 < E_2 < E_3 < \dots$) 这就是所谓的定态假设。(2)当原子从一个具有较大能量 E_2 的定态跃迁到另一个能量较低的定态 E_1 时，它辐射出具有一定频率的光子，光子的能量为

$$h\nu = E_2 - E_1$$

这一假设确定了原子发光的频率——它就是频率假设。(3)原子的不同能量状态和电子沿不同的圆形轨道绕核运动相对应，电子的可能轨道的分布也是不连续的，只有当轨道的半径 r 与电子的动量 P 的乘积（即为动量矩）等于 $h/2\pi$ 的整数倍，轨道才是可能的。即

$$Pr = n \frac{h}{2\pi}$$

根据玻尔的第二个假设，原子系统中电子从较高能级 W_n ，跃迁到较低能级 W_k 时，发出单色光，其频率为

$$\nu = \frac{W_n - W_k}{h}$$

其波数为

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{W_n - W_k}{ch}$$

电子在量子数为 n 的轨道上运动时，其原子系统的总能量 W_n 等于电子的动能 $\frac{1}{2}mv_n^2$ 和电子与原子核之间的位能 $-\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$ 代数和，即

$$W_n = \frac{1}{2}mv_n^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}$$

又因

$$\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = m \frac{v^2}{r}$$

可知

$$\frac{1}{2}mv_n^2 = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

所以

$$W_n = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}$$

又由 $\frac{Ze^2}{4\epsilon_0 r^2} = m\frac{v^2}{r}$ 和 $P = mvr = n\frac{h}{2}$ 得出

$$v_n = \frac{Ze^2}{2\epsilon_0 nh} \quad r_n = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{mZe^2}$$

$$W_n = -\frac{me^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

因为与能级 W_k 和 W_n 相应的量子数分别为 k 和 n

所以有

$$v_{kn} = \frac{me^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\tilde{\nu}_{kn} = \frac{v_{kn}}{c} = \frac{me^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

即

$$\tilde{\nu}_{kn} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

由玻尔假设而推出的上式，当 k 为 2 时，与氢原子光谱巴耳末系的里德伯公式完全相同，且 R 的理论值可由式

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$$

算出，结果 $R = 1.097373 \times 10^7$ [米] $^{-1}$ ，此值与经验公式中的 R 的实验值十分符合。故上式也为里德伯恒量提供了理论解释。根据玻尔理论，氢原子光谱的产生可解释如下：由式

$$W_n = -\frac{Ze^2}{8\epsilon_0 r_n} = -\frac{me^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2}$$

可知， n 越大，原子系统 W_n 的绝对值越小，但代数值越大，亦即电子离核越远，原子能量越大。电子在第一轨道亦即最内层轨道 ($n=1$) 时，能量最小，原子最为稳定，这种状态便是基态。量子数 n 大于 1 的各个状态，其能量均大于基态能量，这些状态都是激发态。当原子由基态跃迁到受激态时，原子必须吸收一定的能量。例如原子受到辐射的照射或高能粒子的撞击等，这时电子可由第一轨道跃迁到量子数较高的轨道上运动。处于受激状态的原子一般在 10^{-8} 秒内自发地跃迁到能量较低的受激态或基态，在跃迁过程中，将发射一个一定频率的光子，其波数由

$$\tilde{\nu} = \frac{mn^4 Z^2}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

决定。由此可看出，巴耳末谱系是当氢原子中的电子从不同的较外层的轨道，跃迁到第二轨道时所发射的谱线。当电子跃迁到第一轨道时，应发出谱系：

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

跃迁到第三轨道时应发出的谱系：

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

而跃迁到第四第五轨道时应发出的谱系：

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 5, 6, 7, \dots$$

和

$$\tilde{\nu} = R\left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 6, 7, 8, \dots$$

两谱系。这些谱系，的确都在氢原子光谱中观察到，而且有些还是在玻尔理论发表以后先从理论上计算出来，然后才通过实验找到的。在 $k=1$ 时所表示的谱系在光谱的远紫外部分，称为赖曼系。 $k=3$ 所表示的谱系在红外部分，称为帕邢系。 $k=4$ 和 $k=5$ 所表示的谱系也都在红外范围，分别称为布喇开系和普芳德系。在某一瞬时，一个氢原子只能发射一个一定频率的光子，这一频率相应于一条谱线，不同的受激氢原子才能发射不同的谱线。实验中观察到的是大量不同受激状态的原子所发射光的组合，所以能观察到大量的谱线。

【巴耳末公式】

由于氢原子是诸原子中最简单的原子，物理学家曾对氢原子就理论上及实验上作了比较细致的研究，并以它为研究复杂原子的基础。应用光谱方法是研究原子结构的一种重要手段。任何元素的原子，如令其在气态下发光，均随元素的不同而发射或吸收某一特定波长的光波。利用光谱仪，可以观察到各种波长不同的明线，称为光谱线。在 1885 年瑞典物理学家巴耳末发现，氢原子光谱可见光区的光谱线。排列是很有规律的，故其波长存在着一定的关系，设光波之频率为 $\tilde{\nu}$ ，波长为 λ ，则波长的倒数 $1/\lambda$ 为单位长度中的波数；巴耳末发现氢原子光谱中可见光区之明线与其波数之关系为：

$$\frac{1}{\lambda} n = \tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) n = 3, 4, 5, \dots$$

此式称为巴耳末公式，R 称为里德伯常数。

【布喇开系】 氢原子的一组红外线谱线，可表示为 $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}\right)$ ，

其中 $\tilde{\nu}$ 为波数，R为氢的里德伯常数（109677 581厘米⁻¹），n为5，6，7...。

【 粒子散射装置 】

早期的 粒子散射的实验装置如图 5—6 所示。R 为放在铅室中的放射源， D_1 和 D_2 为限束光栏（目的是为了形成细束），F 为金属箔上通过来的位置，S 为一荧光屏，M 为放大镜。每当 粒子打到荧光屏上时，就有荧光闪烁，通过放大镜观察和计数荧光闪烁的次数，从而测定 粒子束在该处的强弱。S 和 M 可以同步地在以 F 为圆心的圆弧上移动。在不同的散射角度上测 散射的粒子数是不相同的，利用这些散射粒子的能量和不同角度上的分布，可以研究不同的物质的性质。这种装置是很简单的。近期的粒

子散射实验装置中，多用加速器把 粒子（氦原子核）加速到一定能量并准直为细束，打到要研究的金属箔上，其探测装置，也多用半导体探测器代替荧光屏和放大镜。探测器可以记录 粒子的数量，通过多道分析器还能定出各种 粒子的能量，测出按能量分布的能谱。 粒子的散射有的散射角大于 90° ，对于大于 90° 角的散射，常称之为“背散射”。对于要研究的样品不是薄片而是比较厚的样片， 粒子不能穿过，要研究其表面的性质。多用背散射进行研究。在背散射的分析中，可以用加速器来精确地控制 粒子的能量，使 粒子和靶核的作用在弹性碰撞范围之内，这就可以用经典理论来分析。利用加速器作 粒子源其主要优点是：(1) 粒子的能量单色性好。(2) 粒子的能量可调整到所需要的能量。(3) 可以做高能量的 粒子实验。大大改善了早期 粒子散射实验的精度。近年来， 粒子背散射技术有了更大的发展，特别是在半导体领域中，由于工业生产的发展迫切要求了解半导体表面 $1\mu\text{m}$ （微米）内杂质的纵剖面分布、晶体损伤和杂质原子的晶格定位等。背散射技术及沟道效应的应用，正好满足这些要求。此外这种分析方法是定量的，可靠的，对样品非破坏性的分析，尤其是对轻衬底中的重元素杂质的分析，因此这种分析技术得到了很快的发展，成为表面分析的有利工具。

【量子力学】

它是研究微观粒子（如电子、原子、分子等）运动规律的理论。原子核和固体的性质以及其他微观现象，目前已基本上能从以量子力学为基础的现代理论中得到说明。现在量子力学不仅是物理学中的基础理论之一，而且在化学和许多近代技术中也得到了广泛的应用。上世纪末和本世纪初，物理学的研究领域从宏观世界逐渐深入到微观世界；许多新的实验结果用经典理论已不能得到解释。大量的实验事实和量子论的发展，表明微观粒子不仅具有粒子性，同时还具有波动性（参见波粒二象性），微观粒子的运动不能用通常的宏观物体运动规律来描写。德布罗意、薛定谔、海森堡，玻尔和狄拉克等人逐步建立和发展了量子力学的基本理论。应用这理论去解决原子和分子范围内的问题时，得到与实验符合的结果。因此量子力学的建立大大促进了原子物理。固体物理和原子核物理等学科的发展，它还标志着人们对客观规律的认识从宏观世界深入到了微观世界。量子力学是用波函数描写微观粒子的运动状态，以薛定谔方程确定波函数的变化规律，并用算符或矩阵方法对各物理量进行计算。因此量子力学在早期也称为波动力学或矩阵力学。量子力学的规律用于宏观物体或质量和能量相当大的粒子时，也能得出经典力学的结论。在解决原子核和基本粒子的某些问题时，量子力学必须与狭义相对论结合起来（相对论量子力学），并由此逐步建立了现代量子场论。

【海森堡】

(1901~1976年)德国物理学家,因创立矩阵力学等成就而获1932年诺贝尔物理学奖。26岁任莱比锡大学教授。1928年提出把量子力学应用于金属内部电磁的强磁体理论。1929年与泡利一起提出量子场论作为电磁与电子相互作用的理论。在查德威克发现中子后,他又建立了把中子看作原子核结构要素的结构理论,继续从事量子物理学的研究。1941年任柏林大学教授和凯泽·威廉研究所所长。1943年提出S矩阵理论。第二次世界大战期间领导德国原子能利用事业。战后被俘往美国。1946年返回德国后,任普朗克物理研究所所长兼哥廷根大学教授,从事基本粒子研究。1958年与泡利一起研究基本粒子的统一场论,提出“元物质”理论,1967年发表《基本粒子统一场论》。著有《量子论的物理学基础》(1930年)、《自然科学基础的变化》(1935年)、《原子核物理》(1943年)、《物理学与哲学》。

【薛定谔】

(1887 ~ 1961年) 生于维也纳。理论物理学家。1910年取得维也纳大学博士学位。先后在维也纳，苏黎世等地任教。1926年将法国人德布罗意的物质波观念用数学表示，得到量子力学中最基本的薛定谔方程式，因而获1933年诺贝尔物理学奖。1928年继普朗克退休出任柏林大学物理学系主任。由于纳粹党得势，1933年离德赴美国牛津之一学院任客座教授。1936年回奥国任大学教授，至奥国被纳粹德国合并后，先短期访问美国，后长期定居爱尔兰，1940年任爱尔兰皇家学院教授及柏林高等研究院教授。曾试图推广爱因斯坦的重力场论到电磁场，并尝试对生命现象用纯物理观念解释。1944年著《什么是生命》一书。1938年曾经意大利到美国，任达布林研究所所长，在此期间曾从事波动力学应用问题的研究。还从事物理学基础和物理学哲学问题的研究，由他建立的薛定谔方程是量子力学中描述微观粒子运动状态的基本定律，在粒子运动速度远小于光速的条件下适用。它在量子力学中的地位大致类似于牛顿运动定律在经典力学中的地位。

【狄拉克】

1902年生，英国理论物理学家，原在布里斯托大学学习工程，后兴趣转到物理而在剑桥大学获物理学博士学位。1933年31岁时以对量子力学的贡献荣获诺贝尔物理学奖（与薛定谔共享）。1925年海森堡和薛定谔创立量子力学，狄拉克将相对论引进量子力学，写下有名的狄拉克方程式，以解释电子的性质，如电子的自旋为 $\frac{1}{2}$ ，磁矩为1等。并预测反粒子的存在，此预测1931年被美人安德生在宇宙射线中发现。狄拉克是量子辐射理论的开创者，又与费米分别发现费米，狄拉克统计律，并预测磁子的存在，提出了宇宙尺度中重力常数随时间变化的论述。1930年初版的《量子力学原理》是量子力学的标准教科书之一。

【薛定谔方程】

薛定谔方程式为量子力学中粒子运动的基本方程式，但是这一理论假定粒子运动速度比光速小得多，因此它是非相对论性的。理论的基本点是一物理系统中的特定能量，可用一波动方程求出。此方程式的形式为

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \psi + u(\mathbf{r}, t)\psi$$

此方程也常称为薛定谔波动方程，它描写粒子状态随时间的变化。它反映了微观粒子的运动规律。上式也常写为

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + u(\mathbf{r}, t) \right] \psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t)$$

式中 $\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + u(\mathbf{r}, t) \right]$ 称为哈密顿算符， $\psi(\mathbf{r}, t)$ 是波函数。在经典力学中，动量和能量的关系为

$$E = \frac{p^2}{2\mu} + u(\mathbf{r}, t)$$

式中E为总能量，P为动量， $u(\mathbf{r}, t)$ 为势能。自由粒子的波函数是平面波：

$$\psi(\mathbf{r}, t) = A e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - \mathbf{p} \cdot \mathbf{r})}$$

它是薛定谔方程的解，我们可以由解来反推方程，即

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} EA e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - \mathbf{p} \cdot \mathbf{r})} = -\frac{i}{\hbar} E\psi$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} &= A \frac{\partial^2}{\partial x^2} e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - P_x x - p_y y - p_z z)} \\ &= -\frac{AP_x^2}{\hbar^2} e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - P_x x - p_y y - p_z z)} \\ &= -\frac{P_x^2}{\hbar^2} \psi \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\frac{P_y^2}{\hbar^2} \psi$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\frac{P_z^2}{\hbar^2} \psi$$

三式相加，得

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} &= \nabla^2 \psi \\ &= -\frac{(P_x^2 + P_y^2 + P_z^2)}{\hbar^2} \psi = -\frac{P^2}{\hbar^2} \psi \end{aligned}$$

利用自由粒子的能量和动量的关系式：

$$E = \frac{p^2}{2\mu} \quad (\mu \text{ 为粒子的质量})$$

由
$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} E \psi$$

和
$$\nabla^2 \psi = -\frac{P^2}{\hbar^2} \psi$$

则有
$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \psi$$

$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} E \psi$ 改写为

$$E \psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi$$

$\nabla^2 \psi = -\frac{P^2}{\hbar^2}$ 改写为

$$(\vec{P} \cdot \vec{P}) \psi = (-i\hbar \nabla) \cdot (-i\hbar \nabla) \psi$$

式中 ∇ 是算符：

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

由上两式的形式可以看出，粒子的能量 E 和动量 p 分别与下列作用在波函数上的算符相当：

$$E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}, \quad P \rightarrow -i\hbar \nabla$$

设粒子在力场中的势能为 $u(\vec{r}, t)$ ，在这种情况下，粒子的能量和动量的关系是

$$E = \frac{P^2}{2\mu} + u(\vec{r}, t)$$

用上述与能量和动量相对应的算符代替 E 和 P ，并在等式两边乘上粒子的波函数 $\psi(\vec{r}, t)$ 便得到

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \psi + u(\vec{r}, t) \psi$$

这就是著名的薛定谔方程式，在这个方程式问世以后不久，就被成功地用于解决许多原子和分子物理学的问题，并促使有关学科向前迈进了一大步。

【物质波】

也称为“德布罗意波”或“实物波”对微观粒子所具有的波动性的描述。由法国物理学家德布罗意在 1924 年首先提出的。他把当时已发现的关于光的波粒二象性这一事实加以推广，提出一切微观粒子也都具有波粒二象性的论点。他认为 19 世纪在对光的研究上，只重视光的波性，忽视了光的微粒性；而在对实体的研究上，则过分重视了实体的微粒性，而忽略了实体的波性。因此他提出了微观粒子也具有波性的假设。德布罗意把粒子和波通过下面的关系联系起来：粒子的能量 E 和动量 P 与平面波的频率和波长 之间的关系正象光子与光波的关系一样，即

$$=E/h$$

$$= h/P$$

且平面波沿着粒子运动方向传播（h 为普朗克常数）。如电子衍射实验完全证实了物质波的存在，它成为建立量子力学的重要基础之一。按照德布罗意假设，粒子以速度 运动时，相应于这些粒子的平面单色波的波长是

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0 v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

如果 $v \ll c$ ，那末

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v}$$

再如，电子经电场加速（加速电位差为 V ）后，电子的速度将由关系式

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = eV, \quad v = \sqrt{\frac{2eV}{m_0}}$$

得

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em_0} \sqrt{V}}$$

将 $h = 6.62 \times 10^{-34}$ [焦耳] [秒]， $e = 1.60 \times 10^{-19}$ [库仑]， $m_0 = 9.11 \times 10^{-31}$ [公斤] 等数据代入后，得

$$\lambda = \frac{12.2}{\sqrt{V}} \times 10^{-10} \text{ [米]} =$$

由此可知，假如用 150 [伏特] 的电位差所加速的电子，物质波的波长为 10^{-10} 米，与伦琴射线（x 射线）的波长的数量级相同；而当 $V = 10000$ [伏特] 时， $\lambda = 0.122 \times 10^{-10}$ 米。所以这种物质波的波长是很短的。我们知道，光学仪器的分辨率与光的波长成反比，电子显微镜的放大率，远大于光学仪器的放大率，就是因为电子的物质波（德布罗意波）的波长，远较可见光波长为短的缘故。这也充分证明物质波是确实存在的。

【相对论】

相对论是关于物质运动与时间空间关系的理论。它是现代物理学的理论基础之一。相对论是本世纪初由爱因斯坦等在总结实验事实（如迈克耳孙—莫雷实验）的基础上所建立和发展。在这以前，人们根据经典时空观（集中表现为伽利略变换）解释光的传播等问题时，导致一系列尖锐的矛盾。相对论针对这些问题，建立了物理学中新的时空观和高速物体的运动规律，对以后物理学的发展有重大作用。相对论分为狭义相对论和广义相对论两大部分。1905年建立的狭义相对论的基本原理：(1)在任何惯性参考系中，自然规律都相同，称为相对性原理。(2)在任何惯性系中，真空光速 c 都相同，即光速不变原理。由此得出时间和空间各量从一个惯性系变换到另一惯性系时，应该满足洛伦兹变换，而不是满足伽利略变换。并由此推出许多重要结论，例如：两事件发生的先后或是否“同时”，在不同参照系看来是不同的（但因果律仍然成立）。量度物体的长度时，将测到运动物体在其运动方向上的长度要比静止时缩短。与此相似，量度时间进程时，将看到运动的时钟要比静止的时钟进行得慢。物体质量 m 随速度 v 的增加而增大，其关系为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m_0 为静止时的质量，称为静止质量。任何物体的速度不能超过光速 c 。物体的质量 m 与能量 E 之间满足质能关系式 $E=mc^2$ 。以上结论与目前的实验事实符合，但只有在高速运动时，效应才显著。在通常的情况下，相对论效应极其微小，因此经典力学可认为是相对论力学在低速情况下的近似。在1916年又建立了广义相对论，其基本原理：(1)广义相对论原理，即自然定律在任何参考系中都可以表示为相同数学形式。(2)等价原理，即在一个小体积范围内的万有引力和某一加速系统中的惯性力相互等效。按照上述的原理，万有引力的产生是由于物质的存在和一定的分布状况使时间空间性质变得不均匀（所谓时空弯曲）；并由此建立了引力场理论；而狭义相对论则是广义相对论在引力场很弱时的特殊情况。从广义相对论可以导出一些重要结论，如水星近日点的进动规律；光线在引力场中发生弯曲；较强的引力场中时钟较慢（或引力场中的光谱线向红端移动）等。这些结论和后来的观测结果基本上相符合。近年来，通过测量雷达波在太阳引力场中往返传播在时间上的延迟，以更高的精密度证实了广义相对论的结论。相对论，具有重要的历史意义，但许多问题仍有待研究。

【原子物理学】

物理学的一个部门。是研究原子和分子结构及其运动规律的学科。近代物理学主要是以原子物理学的研究为基础，从微观的本质阐明聚集态物质的性质，同时深入原子的内部领域中，阐明原子核及其基本粒子的属性。原子物理学主要研究的对象包括：原子和分子的基本结构，如各种原子模型，核外电子的分布规律；各种发射和吸收光谱；谱线的强度、分布规律及其精细结构等；原子的激发和电离；以及 X 射线的产生和特性等。原子物理学在本世纪初开始得到迅速发展，它的早期研究成果成为建立量子力学的重要基础，并进一步推动了原子核物理、固体物理等许多科学的发展；目前它的研究在理论和实验上都已达到相当精确的程度，并得到广泛应用。它是近代物理学的基础之一。

【玻恩】

Born , Max (1882 ~ 1970 年) 德国理论物理学家。从事过相对论和晶格力学的研究。1912 年与卡尔曼一起提出了采用晶格理论解释固体比热的量子理论论文。1915 年写了《晶格的动力学》。和约尔丹、海森堡一起创立了矩阵力学。由于对波函数的概率(几率)解释而获得 1954 诺贝尔物理学奖。

【几率】

也称为“概率”或“或然率”，是概率论中最基本的概念。在社会和自然界中，某一类事件在相同的条件下可能发生也可能不发生，这类事件称为“随机事件”。如掷骰子，设骰子落地后每一面朝上的可能性均相同。即1、2、3、4、5、6朝上的可能性是一样的，而出现六个数字中的每一个数字都是随机事件。再如一只口袋装两个黑球，一个白球和一个红球，这四个球的大小、形状、重量完全一样，从口袋中任取一球，所取得的是红球也是一个随机事件。不同的随机事件发生的可能性的的大小是不相同的，几率就是用来表示随机事件发生的可能性大小的一个量。很自然地把必然发生的事件的几率规定为1，并把根本不可能发生的事件的几率规定为零，而一般随机事件的几率是介于零与1之间的分数，例如，在上面的第一个例子中，出现1, 2, 3, 4, 5, 6的几率均是 $\frac{1}{6}$ ，而第二例中，取出黑球几率为 $\frac{1}{2}$ ，而取出白球和红球的几率均为 $\frac{1}{4}$ 。几率越大便表示该事件发生的可能性也越大。

【电子云】

描写原子或分子中电子在原子核外围各区域出现的几率的状况，为直观起见，把电子的这种几率分布状况用图像表示时，以不同的浓淡程度代表几率的大小，这种图像所显示的结果，有如电子在原子核周围形成云雾，故称“电子云”。在距原子核很远的地方，电子出现的几率几乎等于零，意味着不可能在那里发现电子。有些非常靠近核的区域其几率也是零，也是无法发现电子的区域。

【亚稳态】

某些原子有一些特殊激发态的能级，原子处于这些激发态的能级上时，能停留比较长的时间，比处于一般激发态的时间最多可长 10 多万倍，这种特殊的激发态叫做“亚稳态”。例如有的原子的亚稳态上，电子可停留 10^{-3} 秒，而电子在氢原子的激发态上只停留 10^{-8} 秒。具有亚稳态的原子很多，如氙、钕等。

【粒子数反转】

在通常情况下，处于低能级 E_1 的原子数大于处于高能级 E_2 的原子数，这种情况得不到激光。为了得到激光，就必须使高能级 E_2 上的原子数目大于低能级 E_1 上的原子数目，因为 E_2 上的原子多，发生受激辐射，使光增强（也叫做光放大）。为了达到这个目的，必须设法把处于基态的原子大量激发到亚稳态 E_2 ，处于高能级 E_2 的原子数就可以大大超过处于低能级 E_1 的原子数。这样就在能级 E_2 和 E_1 之间实现了粒子数的反转。在工作物质处于谐振腔内时，只要有能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子能引起腔内谐振，就可以得到激光。实现粒子数反转的工作物质是制造激光器所不能缺少的。例如，氦氖激光器中，通过氦原子的协助，使氖原子中的两个能级实现粒子数反转而获得激光。

【激光器】

也称为“光激励器”或“莱塞”。利用受激辐射原理使光在某些受激的工作物质中放大或发射的器件。用电学、光学及其他方法对工作物质进行激励，使其中一部分粒子激发到能量较高的状态中去，当这种状态的粒子数大于能量较低状态的粒子数时，由于受激辐射作用，该工作物质就能对某一定波长的光辐射产生放大作用，也就是当这种波长的光辐射通过工作物质时，就会射出强度被放大而又与入射光波位相一致、频率一致、方向一致的光辐射，这种情况便称为光放大。激光器一般由三个部分组成：(1)能实现粒子数反转的工作物质。例如氦氖激光器中，通过氦原子的协助，使氖原子的两个能级实现粒子数反转；(2)光泵：通过强光照射工作物质而实现粒子数反转的方法称为光泵法。例如红宝石激光器，是利用大功率的闪光灯照射红宝石（工作物质）而实现粒子数反转。造成了产生激光的条件；(3)光学共振腔：最简单的光学共振腔是由放置在氦氖激光器两端的两个相互平行的反射镜组成。当一些氖原子在实现了粒子数反转的两能级间发生跃迁，辐射出平行于激光器方向的光子时，这些光子将在两反射镜之间来回反射，于是就不断地引起受激辐射，很快地就产生出相当强的激光。这两个互相平行的反射镜，一个反射率接近 100%，即完全反射。另一个反射率约为 98%，激光就是从后一个反射镜射出的。激光器的种类很多，如氦氖激光器、二氧化碳激光器，红宝石激光器、钕铝石榴石激光器，砷化镓激光器，染料激光器，氟化氢激光器和氩离子激光器等等。

【固体激光器】

这类激光器所采用的固体工作物质，是把具有能产生受激发射作用的金属离子掺入晶体而制成的。在固体中能产生受激发射作用的金属离子主要有三类：(1)过渡金属离子(如 Cr^{3+})；(2)大多数镧系金属离子(如 Nd^{3+} 、 S^{2+} 、 Dy^{2+} 等)；(3)锕系金属离子(如 U^{3+})。这些掺杂到固体基质中的金属离子的主要特点是：具有比较宽的有效吸收光谱带，比较高的荧光效率，比较长的荧光寿命和比较窄的荧光谱线，因而易于产生粒子数反转和受激发射。用作晶体类基质的人工晶体主要有：刚玉(Al_2O_3)、钇铝石榴石($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)、钨酸钙(CaWO_4)、氟化钙(CaF_2)等，以及铝酸钇(YAlO_3)、铍酸镧($\text{La}_2\text{Be}_2\text{O}_5$)等。用作玻璃类基质的主要是优质硅酸盐光学玻璃，例如常用的钡冕玻璃和钙冕玻璃。与晶体基质相比，玻璃基质的主要特点是制备方便和易于获得大尺寸优质材料。对于晶体和玻璃基质的主要要求是：易于掺入起激活作用的发光金属离子；具有良好的光谱特性、光学透射率特性和高度的光学(折射率)均匀性；具有适于长期激光运转的物理和化学特性(如热学特性、抗劣化特性、化学稳定性等)。晶体激光器以红宝石($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$)和掺钕钇铝石榴石(简称为 $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$)为典型代表。玻璃激光器则是以钕玻璃激光器为典型代表。

【液体激光器】

液体激光器所采用的激光工作物质主要包括两类：一类是有机染料溶液，另一类是含有稀土金属离子的无机化合物溶液。有机染料液体激光器是应用较普遍的一类液体激光器，目前已在数十种有机荧光染料（如若丹明，荧光素、香豆素、吖定等）溶液中实现激光发射作用。一般采用光泵激励，光泵源可以是脉冲放电灯，也可以是由其他激光器发出的一定波长的激光辐射。这一类激光器的特点是输出波长覆盖的光谱区域较广、可调谐和器件效率较高。

【气体激光器】

这类激光器采用的气体工作物质，是所使用的工作物质中数目最多、激励方式最多样化、激光发射波长分布区域最广的一类激光器。气体激光器所采用的工作物质，可以是原子气体、分子气体和电离化离子气体，为此，把它们相应的称为原子气体激光器、分子气体激光器和离子气体激光器。在原子气体激光器中，产生激光作用的是没有电离的气体原子，所采用的气体主要是几种惰性气体（如氦、氖、氩、氪、氙等），有时也可采用某些金属原子（如铜、锌、镉、铯、汞等）蒸汽，或其他元素原子气体等。原子气体激光器的典型代表是氦—氖气体激光器。在分子气体激光器中，产生激光作用的是没有电离的气体分子，所采用的主要分子气体工作物质有 CO_2 、 CO 、 N_2 、 H_2 、 HF 和水蒸气等。分子气体激光器的典型代表是二氧化碳（ CO_2 ）激光器的氮分子（ N_2 ）激光器。离子气体激光器，是利用电离化的气体离子产生激光作用，主要的有惰性气体离子和金属蒸汽离子，这方面的代表型器件是氩离子（ Ar^+ ）激光器、氪离子（ Kr^+ ）激光器以及氦—镉离子激光器等。

【半导体激光器】

这是以一定的半导体材料做工作物质而产生受激发射作用的器件。其工作原理是，通过一定的激励方式，在半导体物质的能带（导带与价带）之间，或者半导体物质的能带与杂质（受主或施主）能级之间，实现非平衡载流子的粒子数反转，当处于粒子数反转状态的大量电子与空穴复合时，便产生受激发射作用。半导体激光器的激励方式主要有三种，即电注入式、光泵式和高能电子束激励式。电注入式半导体激光器，一般是由 GaAs（砷化镓）、InAs（砷化铟）、InSb（锑化铟）等材料制成的半导体面结型二极管，沿正向偏压注入电流进行激励，在结平面区域产生受激发射。光泵式半导体激光器，一般用 N 型或 P 型半导体单晶（如 GaAs、InAs、InSb 等）做工作物质，以其他激光器发出的激光作光泵激励。高能电子束激励式半导体激光器，一般也是用 N 型或者 P 型半导体单晶（如 PbS、CdS、ZnO 等）做工作物质，通过由外部注入高能电子束进行激励。在半导体激光器器件中，目前性能较好，应用较广的是具有双异质结构的电注入式 GaAs 二极管激光器。

【红宝石激光器】

红宝石激光器的工作物质是红宝石棒。在激光器的设想提出不久，红宝石就被首先用来制成了世界上第一台激光器。激光用红宝石晶体的基质是 Al_2O_3 ，晶体内掺有约 0.05%（重量比）的 Cr_2O_3 。 Cr^{3+} 密度约为 $1.58 \times 10^{19}/\text{厘米}^3$ 。 Cr^{3+} 在晶体中取代 Al^{3+} 位置而均匀分布在其中，光学上属于负单轴晶体。在 Xe（氙）灯照射下，红宝石晶体中原来处于基态 E_1 的粒子，吸收了 Xe 灯发射的光子而被激发到 E_3 能级。粒子在 E_3 能级的平均寿命很短（约 10^{-9} 秒）。大部分粒子通过无辐射跃迁到达激光上能级 E_2 。粒子在 E_2 能级的寿命很长，可达 3×10^{-3} 秒。所以在 E_2 能级上积累起大量粒子，形成 E_2 和 E_1 之间的粒子数反转，此时晶体对频率 ν 满足

$$h\nu = E_2 - E_1$$

（其中 h 为普朗克常数， E_2 、 E_1 分别为激光上、下能级的能量）的光子有放大作用，即对该频率的光有增益。当增益 G 足够大，能满足阈值条件时，就在部分反射镜端有波长为 6943×10^{-10} 米的激光输出。

【二氧化碳激光器】

二氧化碳激光器是以 CO_2 气体作为工作物质的气体激光器。放电管通常是由玻璃或石英材料制成，里面充以 CO_2 气体和其他辅助气体（主要是氦气和氮气，一般还有少量的氢或氙气）；电极一般是镍制空心圆筒；谐振腔的一端是镀金的全反射镜，另一端是用锗或砷化镓磨制的部分反射镜。当在电极上加高电压（一般是直流的或低频交流的），放电管中产生辉光放电，锗镜一端就有激光输出，其波长为 10.6 微米附近的中红外波段；一般较好的管子。一米长左右的放电区可得到连续输出功率 40 ~ 60 瓦。 CO_2 激光器是一种比较重要的气体激光器。这是因为它具有一些比较突出的优点：第一，它有比较大的功率和比较高的能量转换效率。一般的闭管 CO_2 激光器可有几十瓦的连续输出功率，这远远超过了其他的气体激光器，横向流动式的电激励 CO_2 激光器则可有几十万瓦的连续输出。此外横向大气压 CO_2 激光器，从脉冲输出的能量和功率上都达到了较高水平，可与固体激光器媲美。 CO_2 激光器的能量转换效率可达 30 ~ 40%，这也超过了一般的气体激光器。第二，它是利用 CO_2 分子的振动-转动能级间的跃迁的，有比较丰富的谱线，在 10 微米附近有几十条谱线的激光输出。近年来发现的高气压 CO_2 激光器，甚至可做到从 9 ~ 10 微米间连续可调谐的输出。第三，它的输出波段正好是大气窗口（即大气对这个波长的透明度较高）。除此之外，它也具有输出光束的光学质量高，相干性好，线宽窄，工作稳定等优点。因此它在国民经济和国防上都有许多应用，如应用于加工（焊接、切割、打孔等），通讯、雷达、化学分析，激光诱发化学反应，外科手术等方面。

【染料激光器】

是一种以染料为工作物质，用激光器为泵浦源的激光器。这种激光器输出激光的波长连续可调。因而人们可以得到所需要波长的激光。它具有高的输出功率和波长连续可调的特点，故此种激光器应用范围较广，目前使用不同的染料和泵浦源产生的激光波长已可覆盖 $(3200 \sim 12850) \times 10^{-10}$ 米的区间。连续染料激光的线宽已可压缩到 1 千赫以下。而脉冲染料激光的脉冲时间已可压缩到 8×10^{-15} 秒。用于染料激光器的染料是有机大分子，分子量一般在几百。染料激光器按泵浦的方式可分为脉冲和连续运转两类。对于脉冲染料激光的形成过程为：未被泵浦的染料分子处于 $S_0(v=0)$ 能级。在泵浦光作用下，跃迁到 $S_1(v=1, 2, \dots)$ 而后又很快通过振转能级间弛豫而到达 $S_1(v=0)$ 能级。因而被激发的分子都聚集在 $S_1(v=0)$ 能级上。同时 $S_0(v>0)$ 上的分子由于同样的过程而聚集在 $S_0(v=0)$ 能级上，而 $S_0(v>0)$ 的各能级则是空的。这样，就在 $S_1(v=0)$ 和 $S_0(v>0)$ 各能级间形成粒子数反转，提供了高增益。这就使 $S_1(v=0)$ 和 $S_0(v>0)$ 间的光跃迁可能形成激光振荡。由于下能级是 $S_0(v>0)$ 的一系列能级，一般能复盖几百厘米⁻¹；所以在激光腔中加入色散元件就可选择激光波长，实现激光波长连续可调。由于 S_1 有相当的宽度，所以激发谱很宽。当用激光来激发时，一种固定波长的激光也可用以激发多种染料。但是，染料激光器输出的激光波长一定比做为光泵的激光器的波长更长。

【原子核】

简称“核”。原子的核心部分。类似球体，带正电。原子核是由质子和中子组成的。质子和中子统称为核子。核是质子和中子的紧密结合体。原子核占有原子质量的绝大部分，但它的直径不足原子直径的万分之一。由于质子带一个单位的正电荷，中子不带电，质子和中子的质量几乎相等，都等于一个质量单位，所以原子核的电荷数就等于它的质子数，原子核的质量等于它的核子数（即质子数和中子数的和）。例如

${}_{92}^{238}\text{U}$ 代表铀的原子核，上角标“238”表示核的质量数，下角标“92”表示核的电荷数（原子序数）。

${}_{2}^{4}\text{He}$ 代表氦的原子核（即 α 粒子）， ${}_{1}^{1}\text{H}$ 代表氢的原子核（即质子）。在原子核中需要有足够多的中子，才能使质子和中子聚集在一起，组成稳定的原子核。对于质子数不多的核，只要有等量的中子，就能组成稳定的原子核。例如氦的原子核 ${}_{2}^{4}\text{He}$ 内有两个质子和两个中子，氧的原子核 ${}_{8}^{16}\text{O}$ 内有8个质子和8个中子，对于质子数超过20的稳定原子核内，中子数大于质子数。例如铁-54的原子核 ${}_{26}^{54}\text{Fe}$ 内有26个质子和28个中子，铜-63的原子核 ${}_{29}^{63}\text{Cu}$ 内有29个质子和34个中子。质子数目超过82个的原子核都是不稳定的。现在已经知道的核超过1600种，其中约有300种是稳定的，其余的均是不稳定的。

【放射性】

不稳定的原子核自发放出 α 、 β 、 γ 射线的现象。天然存在的放射性同位素能自发放出射线的特性，称为“天然放射性”。而通过核反应，由人工制造出来的放射性，称为“人工放射性”。放射性在工业、农业和医疗各方面的应用，具有极重要的价值和很广阔的前途。但人类或其他生物受到过量的放射性物质辐照时，可能引起各种放射性病或烧伤等，必须注意防护。

【贝克勒耳】

Baekeland, Leo Hendrik (1852 ~ 1908 年) 法国物理学家。从 1895 年起一直研究磷光现象。在研究 X 射线的荧光作用时发现了不可见的辐射。1896 年发现铀的放射性质，是科学实验中认识放射性的开端。贝克勒耳 1903 年获诺贝尔物理学奖。

【玛丽·居里】

Marie Skłodowska Curie 人们常称为“居里夫人”。（1867~1934年）法国物理学家、化学家。原籍波兰，姓斯克罗多夫斯卡。1891年去巴黎大学学习。1894年与皮埃尔·居里结婚。在1896年贝克勒尔发现含铀物质的自发放射现象之后，居里夫妇开始从事放射性物质的研究。1898年发现了新的放射性元素钋和镭。1902年提取出氯化镭结晶，测定了镭的原子量获得1903年诺贝尔物理学奖。居里去世（1906）后，居里夫人提取出纯镭元素，测定了它的各种物理化学性质。还测定了氢等元素的半衰期，并在此基础上整理出放射性元素蜕变的系统关系，又获得了1911年诺贝尔化学奖。并著有《放射性通论》、《放射性物质的研究》等，对原子核科学的发展起了不少推动作用。

【居里】

Pierre Curie 比埃尔·居里 (1859 ~ 1906 年)。法国物理学家。早期的主要贡献为确定磁性物质的转变温度 (居里点), 建立居里定律和发现晶体的压电现象。后与居里夫人共同研究放射性现象, 发现钋和镭两种天然放射性元素。荣获 1903 年诺贝尔物理学奖。

【同位素】

同属一种元素（即核电荷数相同）但具有不同的质量数的原子。它们彼此之间的化学性质几乎相同，在周期表中占同一位置。每一种元素包括几种同位素。同位素的表示是在该元素符号的左上角（有时在右上角）注明质量数。需要时可同时在左下角（或右下角）注明核电荷数。例如， ${}^15_7\text{N}$ 是氮的一种同位素。目前已确知103种元素的同位素，包括稳定同位素（例如 ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ 、 ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{13}_6\text{C}$ 等）。天然放射性同位素及人工放射性同位素在内，已达 2000 种左右。

【放射性同位素】

具有放射性的元素，叫做放射性同位素。根据放射性同位素的性质和特点，人们利用放射性同位素解决了很多技术上的问题，在工农业生产和医药卫生各方面都起着重要的作用：(1)利用射线的穿透性质来检查金属制品内部的缺损，测量物体的密度和厚度。例如，对金属板进行探伤时，就要选用穿透本领强的射线的同位素。如钴 60 或钨 182 都是放出射线的同位素。(2)利用射线的电离本领来消除工业上有害的静电积累。这时应用电离本领较大的或射线。(3)利用射线的生理效应来消毒杀菌和医治肿瘤。(4)示踪原子的应用。在物质中加入少量的放射性同位素而追踪探索，如用放射性同位素检漏、研究机械部件的磨损、分析农业上的肥效，炼钢中的去硫和去磷过程等。对于需要长时间的示踪工作，就要选择半衰期较长的同位素。(5)辐射育种和辐射保鲜等工作。

【 α 射线】

也称“甲种射线”。是放射性物质所放出的 α 粒子流。它可由多种放射性物质（如镭）发射出来。α 粒子的动能可达几兆电子伏特。从 α 粒子在电场和磁场中偏转的方向，可知它们带有正电荷。由于 α 粒子的质量比电子大得多，通过物质时极易使其中的原子电离而损失能量，所以它能穿透物质的本领比 β 射线弱得多，容易被薄层物质所阻挡。从 α 粒子的质量和电荷的测定，确定 α 粒子就是氦的原子核。

【 射线】

也称“乙种射线”。它是由放射性原子核所发出的电子流。电子的动能可达几兆电子伏特以上，由于电子质量小，速度大，通过物质时不易使其中原子电离，所以它的能量损失较慢，穿透物质的本领比 α 粒子强。实质上它是高速运动的电子流。

【 射线】

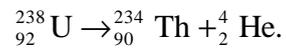
射线与 X 射线、光、无线电波一样，为一种电磁辐射，是原子核内所发出的电磁波。原子核从能量较高的状态过渡到能量较低的状态时所放出的能量常以 射线形式出现。 射线也称为“丙种射线”。带电粒子的轫致辐射，基本粒子转化过程中发生的湮没，以及原子核的衰变过程中都产生 射线。它的穿透本领极强。

【衰变】

原子核由于放出某种粒子而转变成新核的变化叫做原子核的衰变。大量的同种原子核由于衰变过程，原状态的核数目不断减少，新核的数目不断增加。如 α 衰变、 β 衰变等。对个别核来说，这种衰变以一定的几率发生（见半衰期）。此外，不稳定的基本粒子转变为新粒子的过程也称为衰变。

【 衰变】

不稳定的重原子核,自发放出 α 粒子的衰变叫做 α 衰变。例如,铀-238核放出 α 粒子变成钍-234核的衰变,即为 α 衰变,可用方程表示为



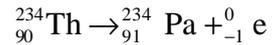
由此可见, α 衰变的规律是:新核的质量数比原核的质量数减少 4,新核的电荷数比原来核的电荷数减少 2,所以新核在元素周期表中的位置要向前移两位。 α 衰变的半衰期与所放射的 α 粒子的能量密切相关,原子核放射出的 α 粒子能量越大,它的半衰期越短。在 α 衰变中往往有 γ 辐射伴随发生。

【 衰变】

放射性原子核放射电子(β^- 粒子) 和中微子而转变为另一种核的过程。放出正电子的称为“正 β 衰变”，放射负电子的称为“负 β 衰变”。在正

β 衰变中，核内的一个质子转变成中子，在负 β 衰变中，核内的一个中子转变为质子。因为 β^- 粒子就是电子，而电子的质量比起核的质量来要小很多，所以一个原子核放出一个 β^- 粒子后，它的质量数不变。

电子的质量数为零，电荷数是 -1。可以用符号 ${}^0_{-1}\text{e}$ 来表示 β^- 粒子。例如，钍-234 放出 β^- 粒子变成镤-234 的衰变可用方程表示为



或
$${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + \beta^-$$

由此可见， β^- 衰变的规律是：新核的质量数不变，电荷数增加 1，新核在元素周期表中的位置要向后移一位。 β^- 衰变中放出的电子能量是连续分布的，但对每一种衰变方式有一个最大的限度，可达几兆电子伏特以上。此外电子俘获也是 β^- 衰变的一种。

【半衰期】

在放射性衰变过程中，放射性元素的核数减少到原有核数的一半时所需的时间。半衰期是放射性元素的一个特性常数，一般不随外界条件的变化，元素所处状态（游离态或化合态）的不同、或元素质量的多少而改变。每一种放射性元素都有一定的半衰期，不同的放射性元素，半衰期不同，甚至差别非常大。例如，氡-222 变为钋-218 的半衰期为 3.8 天，镭-226 变为氡-222 的半衰期为 1620 年，铀 238 变为钍-234 的半衰期是 4.5×10^9 年。因此，放射性元素经过一个半衰期后其核数余存一半，经过两个半衰期后其核数余存四分之一。短的半衰期仅有几千万分之一秒。长者可达数亿年（如钍 Th）的衰变半衰期可达 139 亿年，（即 1.39×10^{10} 年）。原子核的衰变规律是： $N=N_0e^{-\lambda t}$ ，这里的 N_0 是初始时刻（ $t=0$ ）时的原子核数， λ 为衰变常数， N 为衰变后留下的原子核数。由此可以导出半衰期 T 和衰变常数 λ 的关系，即

$$N = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$\therefore \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

$$2 = e^{\lambda T}$$

$$\ln 2 = \lambda T$$

$$\text{故 } T = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

由元素的半衰期可以计算出岩石结构及其年龄。

【云室】

在原子核物理研究中观测微观粒子径迹的仪器，由英国物理学家威尔逊于 1911 年发明。故又称为威尔逊云室。威尔逊云室的作用是以气体中的离子作为气体的凝结核（凝结中心）。如果在云室中充满空气、水和酒精的饱和蒸气。若使云室中的主体突然膨胀而变冷，这时室中的蒸气达到饱和状态。此时如有带电粒子进入云室主体，在它经过的路程上产生离子时，则过饱和蒸气即在离子的周围凝成雾滴，在适当的照明下，就能看到或拍到粒子运动的径迹。根据径迹的长短、浓淡，以及在磁场中的弯曲程度等可以分辨粒子的种类和性质（如质量、电荷和能量）。通过间接的分析也可以测定不带电的粒子。这种云室有时也称为“膨胀云室”。威尔逊云室的示意图如图 5 - 7 所示。C 是一个圆筒状的容器，里面盛有气体和水或任何液体的饱和汽。圆筒上面用一玻璃窗 O 封闭起来。活塞 P 能够在圆筒 C 内移动。当活塞 P 迅速下降时，气体绝热地膨胀，结果气体变冷，而形成汽体的过饱和状态。如果将极少量的放射性制品 R 引入容器中，则放射性物质放射出的粒子在自己的轨道上使气体电离，因而使粒子的路径上形成雾滴的凝聚，致使轨迹为可见的。

图 5—7

【计数器】

是一种常用的原子核辐射探测器。适用于不同的用途，有各种不同的结构和型式。常见的一种是在一玻璃管内，装一个金属圆筒作为阴极，在其轴线上有一细钨丝作为阳极，管内充以惰性气体（如氩）和少量有机气体或卤素气体（如乙醚、溴等），并在两极之间加上适当的电压。如果有带电粒子或光子射入管内使气体分子电离，所产生的电子就向阳极运动，同时在强电场的加速下，与更多的气体分子碰撞，并使它们电离而产生大量电子。这些电子由阳极收集后在外部电路中形成一个脉冲电压，记录这种脉冲发生的次数，便可获知射入管内的粒子数目。此种计数器应用很广。另一种是正比计数器，结构和前者相似，但所加电压较低，产生的脉冲电压大小与入射粒子的能量近似成正比，主要应用在科学研究中。

【电离室】

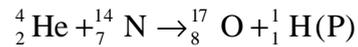
一种测量电磁辐射或粒子流强度或测量短射程带电粒子（如 α 粒子）能量的仪器。在一个充有气体（如氩、空气等）的密封容器内装两个电极，其上加有几百伏特的电压。(1)当带电粒子、X射线或 γ 射线进入容器后，使电极间的气体电离而产生正负离子，这些离子分别向两极运动而形成电流。用测量仪器测出电流的大小，就可以推知粒子流的强度或物质所受X射线或 γ 射线照射的剂量。这种是“电流电离室”或“累积电离室”。(2)当短射程带电粒子进入后，将在两极间消耗其全部能量于使气体电离，所产生的正负离子分别到达两极，使它们间的电势发生改变（“脉冲电压”）。测量出脉冲电压的大小和数目，就可推知带电粒子的能量和数量。这种是“脉冲电离室”。

【核乳胶】

记录带电微观粒子运动径迹的一种特制照相乳胶。这种方法，是根据带电粒子穿过照相乳胶时，使乳胶粒子内的溴化银分解。因此，在厚的照相乳胶层中，显影像后得到的粒子轨道痕迹是一个跟一个的黑点。核乳胶层比一般照相乳胶层厚，溴化银的含量更多，且颗粒细，分布均匀。作为一种核物理实验中的径迹探测器、核乳胶的优点是体积小、轻便、能将高能粒子的径迹永久保存等。故常用于高空宇宙射线和基本粒子的研究方面；其缺点是根据径迹测量粒子能量时精确度较低。核乳胶经适当处理后，也可用来记录不带电粒子，如中子等。

【质子】

质子是带正电的基本粒子，常用符号 P 来表示。质子是氢的原子核，也是其它任何原子核的组成部分。原子核中所含质子的数目就是该核的原子序数 Z。质子的静止质量为 $1.673 \times 10^{-27} \text{kg}$ (千克)，电量为 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ (库仑)，半径约为 0.8×10^{-15} (米)。质子的自旋量子数 (简称自旋) 为 $1/2$ 。1919 年英国物理学家卢瑟福用天然放射性产生的 α 粒子轰击氮的原子核，核反应方程为



这是第一次用人工方法使原子核发生变化，实验中产生的新粒子 ${}^1_1\text{H}$ 就是质子 P。质子的反粒子叫做反质子，质子和反质子的质量相同，但所带电荷符号相反。质子和反质子相遇时发生质子对“湮没”而转变为其他的基本粒子。我们说，质子是氢的原子核，是指普通氢 (即只含一个质子而没有中子的核)。氢还有两种同位素。即氘 (重氢) 和氚 (超重氢)。通常“氘”用符号 D 或 ${}^2_1\text{H}$ 表示，而“氚”用符号 T 或 ${}^3_1\text{H}$ 表示。显然氘核中包含 1 个质子和 1 个中子，而氚核中包含 1 个质子和 2 个中子。

【布拉凯特】

Blaskett , Patrik Maynard Stuart (1897 ~ 1974 年) 英国物理学家。1948 年诺贝尔物理学奖的获得者。他用威尔逊云室观测和研究 粒子轰击氢、氦、氮等元素原子核的情况 , 并成功地从氮原子核中击出质子。还从事宇宙射线中高能粒子的研究。证明了 C · D · 安德森所发现的正电子。第二次世界大战期间从事军事技术研究以对付德国的 U 型导弹。

【闪烁计数器】

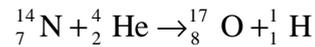
由透明荧光体和光电倍增管以及有关电子仪器组成的记录原子核辐射的仪器。当一个粒子射入荧光体，其能量被吸收后，荧光体便发出一次为时极短（无机荧光体约为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 秒；有机的约 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 秒）的闪光，再经光电倍增管转变为一个电脉冲，最后由电子仪器记录下来。采用的荧光物质多种多样，有某些无机或有机化合物的单晶、塑料、有机溶液等。目前常用的荧光体是单晶体。其光学性能较好。且它们对于自己的特征荧光都是透明的。常用的无机晶体有碘化钠（加铯）、钨酸镭、钨酸钙等，有机晶体有萘、蒽、反式 等。射线产生荧光的过程基于射线对物质中电子的激发。电子吸收射线的能量以后跃迁到较高的激发能级，电子从激发能级恢复到正常状态时可能发射荧光，也可能以别的方式把能量放出。在荧光物质中前者的几率大。闪烁计数器的主要优点是其分辨时间短和效率高。根据脉冲的大小，还可用以测定粒子的能量。

【半导体探测器】

近些年来发展的一种新型核辐射探测器。它的特点是能量分辨本领好，分辨时间快。常用的半导体探测器有两种类型：(1)金硅面垒型，它是在一块 n 型硅单晶片上喷涂一层金膜，在金硅交界面附近形成一个高阻区。也就是形成一个非常薄的 P 型反型层，接线从底面和靠近交接部分的表面引出。形成一个半导体二极管。如果加上一个方向偏压，在二极管交接部分的电场使得只有微弱的电流能通过。在靠近交接部分的两边有一个所谓耗尽层的区域，所有反向偏电压都加在这个区域。耗尽层是半导体射线探测器的灵敏部分，如果射线穿过这部分，产生载流子，它们就会被收集，和气体电离室的情形一样。(2)锗（或硅）—锂漂移型探测器。它是使适量的锂均匀地漂移进一块 P 型锗（或硅）单晶，形成高阻区。使用时探测器接上反向电压，当有射线进入高阻区时，损耗能量产生电子—空穴对，在电场作用下，电子、空穴被收集，就有电信号输出，再用电子仪器记录。其中金硅面垒探测器适用于测量带电粒子。锗（或硅）—锂漂移探测器测量 γ 射线、X 射线等的能量分辨率特别好，但必须要在低温（77K）真空条件下工作。一般必须用液态氮冷却条件下使用。近代也曾把此种探测器放在火箭中升到太空做宇宙射线的探测和研究，在化学方面用来做化学分析后的放射性物质的精密测定。由于半导体探测器的体积小，将来会在医学上得到广泛的应用。

【核反应】

利用天然放射性的高速粒子或利用人工加速的粒子去轰击原子核时，由于相互作用而产生各种变化的过程叫做核反应。在核反应过程中将有能量放出或吸收。所放出或吸收的能量叫做反应能。放出能量的核反应叫做放能反应，吸收能量的核反应叫做吸能反应。历史上第一个人工核反应是由卢瑟福在1919年实现的，他用 α 粒子 (${}^4_2\text{He}$) 轰击氮，产生了



的核反应。现在利用各种加速器和原子核反应堆，能进行上万种核反应，由此获得了千余种放射性同位素和各种介子、超子、反质子、反中子等基本粒子。任何核反应的过程都遵守能量、动量、质量和电荷等守恒定律。这方面的研究对于了解原子核的结构，基本粒子间的相互作用。以及探索新的能源等方面都有重大意义，通过裂变反应而释放出来的巨大能量在技术上已能加以控制和利用。要发生吸能反应，入射粒子的能量必须大于阈能。阈能的值大于反应能。如果入射粒子的能量小于阈能，吸能反应就不能发生。反应能的量值和符号，可以按爱因斯坦相对论的质能关系式加以确定。如果引起反应的粒子和靶核的静止质量分别为 M_a 和 M_x ，反应后产物的静止质量分别为 M_b 和 M_y ，根据质量守恒定律应满足下式：

$$M_x + M_a = M_y + M_b + \Delta m$$

如果 $m > 0$ ，则在反应中是放出能量的。反之，当 $m < 0$ 时，反应将吸收能量。反应中放出或吸收的能量为

$$E = mc^2$$

【约里奥 - 居里】

Joliot-Curie, Jean Frederic (1900 ~ 1958 年) 法国物理学家。物理学家居里夫妇的女婿。对原子核物理学有重要贡献。1932 年和他的妻子伊丽夫—居里 (1897 ~ 1956 年) 合作, 用放射性元素钋 (Po) 所产生的射线轰击铍、锂、硼等元素, 发现了前所未见的穿透性强的辐射, 后经查德威克的研究, 确定为中子。1934 年在用 α 粒子轰击铅、硼时首次产生了人工放射性物质, 并对裂变现象进行过研究。他们夫妇曾长期领导法国原子能委员会, 并领导建成了法国第一个原子核反应堆 (1948 年)。

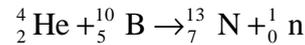
【查德威克】

Chadwick, Sir James (1891 ~ 1974 年) 英国物理学家, 因发现中子(1932 年) 而获 1935 年诺贝尔物理学奖。1930 ~ 1932 年, 约里奥—居里夫妇用粒子轰击铍等轻原子核时发现了穿透力极强的射线。查德威克重复这一实验并证明这是与质子质量相仿但不带电的粒子, 由此而开创了原子核物理学的新时代。曾作为英国代表参加在美国原子弹的研制工作。

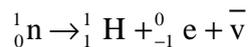
【中子】

中子是不带电的基本粒子，常用符号 ${}^1_0\text{n}$ 表示，是原子核的组成部分。

的组成部分。它的静止质量为 1.675×10^{-27} 千克，其半径为 0.8×10^{-15} 米，与质子的大小类似。中子是 1932 年英国物理学家查德威克在做了用 α 粒子轰击硼的实验中发现的，即



单独存在的中子是不稳定的，平均寿命约 15.3 分，然后就衰变成质子、电子和反中微子 $\bar{\nu}$ ，即



中子不带电，易于进入原子核内部，因此在原子核物理研究中，常利用中子来引起核反应。原子核由中子和质子组成，在原子核内的中子是稳定的。中子的自旋量子数为 $1/2$ 。利用中子作为入射粒子也可产生放射性同位素，例如。



${}^6\text{C}^{14}$ 是放射性的。它是由氮被中子照射而产生的核反应，制造出 ${}^6\text{C}^{14}$ 放射性同位素。中子的用途很多。在核裂变中必须由中子引爆。可以用各种类型的加速器加速带电粒子并使这些加速粒子轰击适当的靶而得到一定产额的中子；也可以用天然放射性物质放出的 α 粒子轰击 Be 而制造天然放射中子的中子源。如 Ra-Be 中子源和 Po-Be 中子源。它们是适当比例的镭和铍或钋和铍混在一起，用适当的容器封装而成。实际上就是用镭或钋放射的 α 粒子轰击铍而产生核反应而放出中子。

【射线的防护】

α粒子、β射线、γ射线以及中子，是核物理实验中经常要遇到的，在研究核反应，原子核的结构等方面，它们也是相当重要的实验手段。但是，它们对人的身体是有害的，因此在使用、接触这些射线时必须加以屏蔽和防护。然而由于各种射线的性质不同，采用的防护手段和材料各有不同。

(1)对α粒子的防护：由于α粒子较大，又带有两个电子电量的电荷，因此，它的穿透本领较弱。甚至一张纸就能把它挡住，但它的电离本领较大。故在使用放射源，或接触β射线时，主要不是考虑外防护，而是不要使α粒子进入体内。因为人的皮肤可使α粒子进入不了体内。但如果实验完不洗手就吃东西，使很多α粒子进入体内，它会使食道内壁电离而受到严重的损伤。因此，使用放射源，要防止通过口或伤口处进入体内，不造成伤害。

(2)对β射线的防护：β射线是高速运动的电子，它的穿透本领较强，但不如γ射线和中子的穿透本领强。对β射线的防护要注意它的次级效应。这是因为，高速运动的电子，与物质相互作用时，产生韧致辐射（光子）。特别是与重粒子相互作用，韧致辐射相当厉害。例如，在接触β射线时，为保护眼睛，应该用普通的玻璃眼镜，不能用铅玻璃或较重物质的眼镜。因为较重的物质与β射线作用，在镜片上产生非常强的韧致辐射，虽然α粒子被防护了，但其次级的射线，将会伤害眼睛。

(3)γ射线的防护：对γ射线主要是防护外照射。一般采用较重的物质，如铅等来防护。一般 ^{60}Co 辐射源，都放置在铅罐中。

(4)对中子的防护：在使用中子放射源时，要特别注意。因为中子通过人体时，和人体中的一些元素发生核反应，有可能产生放射性同位素、造成内部照射，而中子的穿透本领极强。这是因为，中子不带电，不受原子核库仑场的作用。它可在原子之间的空隙中直穿而过。它和较重原子核的作用，能量减少很小。故在防护中子时均采用两层防护。内层采用较轻的物质，使和中子在碰撞中迅速减慢，使较快的中子变成慢速中子，然后再用较重的物质将其屏蔽。达到安全防护的目的。在运送中子源的罐中，内层多用石蜡外部用铅或钢罐。

【辐射剂量】

当辐射通过物质时，物质就要吸收辐射能。剂量就是单位质量被照射的物质所吸收辐射能的数值即

$$D = \frac{E}{M}$$

式中 D 为辐射剂量，E 为被照射物质吸收的辐射能，M 为物质的质量。辐射能在物质中的吸收，是由于辐射与物质原子中的电子相互作用而引起的，因此在估计单位质量被照射的物质所吸收的能量时，可认为只决定于电子在原子中的结合能，以及一克物质中所含有的原子数目。由此可见，同一辐射对不同的物质其辐射剂量不相同。因为剂量是以单位物质吸收能量多少来定义的。剂量不反映放射性强度的大小。辐射剂量的常用单位是拉德 (rad) 和伦琴 (R)。一克物质吸收辐射能量为 10^{-5} 焦耳时，该物质的吸收剂量是 1rad。注意，拉德的数值与被照射物质的性质无关。只要 1 克物质吸收了 10^{-5} 焦耳的能量其吸收剂量即为 1rad。伦琴则不然，它的定义是：使射线通过 0.001293 克空气，如果在其中由电离而产生正负离子各为一个静电单位的电量，那么这些空气吸收的剂量为 1R。0.001293 克的空气是在标准状况下 (0 760mmHg) 的一立方厘米干燥空气的质量。因为一个离子的电量的绝对值为 4.8×10^{-10} 静电单位，因此要积累起一个

静电单位的电量，必须在每立方厘米的空气中产生的离子对数目为 $\frac{1}{4.8 \times 10^{-10}}$

$= 2.083 \times 10^9$ 离子对。在较宽的能谱范围内，空气的电离能可取作 32.5 电子伏特，故一伦琴相当于吸收的能量为

$2.083 \times 10^9 \times 32.5 = 0.68 \times 10^{11}$ 电子伏特/立方厘米空气所以 1 伦琴相当于

$$0.68 \times 10^{11} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦耳/立方厘米}$$

$$\text{空气} = 0.11 \times 10^{-7} \text{ 焦耳/cm}^3$$

一电子伏特为 1.6×10^{-19} 焦耳。显然 1 克空气所吸收的辐射能为

$$\frac{0.11 \times 10^{-7} \text{ 焦耳/立方厘米空气}}$$

$$\frac{0.001293 \text{ 克/立方厘米空气}}$$

$$= 84 \times 10^{-7} \text{ 焦耳/克 (空气)}$$

故 1 伦琴实际上是 1 克空气从射线吸收 84×10^{-7} 焦耳能量。

【示踪原子】

示踪原子是将一种稳定的化学元素和它的具有放射性的同位素混合在一起。当它们参与各种系统的运动和变化时，由于放射性同位素能发出射线，测量这些射线便可确定它的位置与分量，只要测出了放射性同位素的分布和动向，就能确定稳定化学元素的各种作用。例如，将放射性磷混合在磷肥中使用，根据放射性磷在植物中的分布，便可了解植物对磷吸收的实际情况。示踪原子在生物学、医学、工业和农业等方面都有极为广泛的用途。

(1)在医学上的用途：在医学上利用示踪原子主要是为了诊断病情。例如，放射性的碘化钠在人体内的作用与通常的碘化钠完全相同。这些碘元素集中在甲状腺，然后转变为甲状腺荷尔蒙。另外有些含放射性的原子能够附在骨髓、红血球、肺部、肾脏或留滞在血液中，可被适当的仪器探测出来。作为检查各部位病情的依据。

(2)在工业上的应用：有些工业部门，在很多操作过程中，都应用同位素。如，在石油工业中，探测石油时，将放射性的针放入试验井或插进地中，然后再测量放射线，穿过不同的岩石被散射的情况，记录下来各处所测的辐射线，据此画出地层的剖面图。此图可告诉地质学家在何处打井较为适当。

(3)在化学上的应用：在化学中的某些问题必须使用示踪原子方能解决，例如，金属离子在其盐类的溶液中自身扩散的现象，不能由其他方法加以研究。有些问题虽然原则上并不一定非要使用示踪方法，不过为了方便，也常使用示踪方法。示踪原子的应用有特殊的优点：

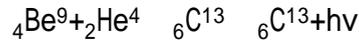
(1)灵敏度极高。通常最灵敏的天平可以称出 10^{-6} 克，最灵敏的光谱分析法可以鉴定 10^{-9} 克的物质，而用示踪原子法能检查出 $10^{-14} \sim 10^{-1}$ 克的放射性物质，这是任何化学分析所不及的。

(2)容易辨别，手续简单。用示踪原子法可以节省很多繁复的分析工作。

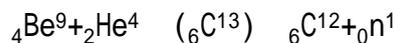
(3)可以揭示其他方法在目前还不能发现的事实，从而得出新的正确的结论。例如用示踪原子测定平衡状态下物质运动的规律、物质的扩散等。

【中子的发现】

1930 年发现 粒子轰击铍 (${}_4\text{Be}^9$) 时, 发现穿透本领非常大的辐射。当时曾认为这种辐射是能量很高的 射线。因此被误认为 粒子轰击铍的反应是



式中 ${}_6\text{C}^{13}$ 为碳同位素 ${}_6\text{C}^{13}$ 的激发核。测定发生的射线在铅中的吸收, 证明 光子的能量应该为 7MeV (兆电子伏特)。1932 年, 伊伦·约里奥-居里和约里奥-居里发现如果使铍射线(粒子轰击铍放出的射线) 通过石蜡板, 则其电离作用大大增加。这种效应的产生是由于铍射线由石蜡中击出质子所致。铍射线从石蜡中击出的质子, 在空气中的射程为 40 厘米, 大约相当于 5 兆电子伏特的能量。若假定质子是 光子作用, 发生弹性碰撞而被加速, 则 光子应该具有大约 55 兆电子伏特的能量, 此值比由铅吸收得到的 7 兆电子伏特大很多。55 兆电子伏特这个值也不与根据反应式中的质量亏损相符合。由 ${}_4\text{Be}^9$, ${}_2\text{He}^4$ 、 ${}_6\text{C}^{13}$ 的原子量和轰击的 粒子的能量, 能够求出按反应式进行过程对应的质量亏损等于 0.01665 原子量单位 (相当于 15.5 兆电子伏特的能量)。由此可见, 光子的能量不可能超过 15.5 (兆电子伏特)。查德威克证明, 如果假设铍在 粒子轰击下发射出的辐射是由中性的、质量接近于质子的粒子组成的, 便圆满地解释了这一放射现象, 其反应式为



因为中子不带电, 所以它从原子和分子的近傍飞过时同它们的相互作用很弱, 这就是它的电离本领极小, 而穿透本领很强的原因。中子与原子核之间的碰撞, 与弹性球之间的碰撞相同, 遵守能量守恒和动量守恒定律。利用此二定律可得出对心碰撞时, 反冲核的速度为

$$v' = \frac{2M_n}{M_n + M} v$$

式中的 v' 为反冲核速度, v 为中子的初速度, M_n 为中子的质量, M 为反冲核的质量。在中子速度相同的情况下, 质量为 M_1 和 M_2 的两个不同的反冲核的速度 v'_1 和 v'_2 之比为

$$\frac{v'_1}{v'_2} = \frac{M_n + M_2}{M_n + M_1}$$

由此式便可求出中子的质量 M_n 。由各对不同的核得到相同的中子质量 M_n 这件事实, 证实了查德威克假设: 铍的辐射不是光子, 而是质量 $M_n = 1.00893$ 的中子。

【正电子】

亦称“阳电子”。是电子的反粒子，基本粒子之一。常用符号 e^+ 表示。所带电量与电子相等，但符号相反；质量也与电子相同。正电子的存在最早是英国物理学家狄拉克在理论上所预言，1932年由美国物理学家安德逊在宇宙射线中发现。当能量超过 1.02 兆电子伏特的光子经过原子核附近时，或在放射性元素的正衰变中都可出现正电子。当它和电子相遇时，就会被湮灭而放出两个光子。

【核子】

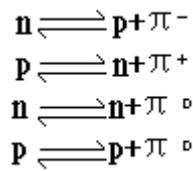
组成原子核的基本粒子。质子和中子的统称。

【氘】

又称“重氢”。符号D或 ${}^2_1\text{H}$ 。氢的同位素。质量数为2。沸点-249.5 $^{\circ}\text{C}$ 。化学活泼性较氢(${}^1_1\text{H}$)稍差，与氧化合而生成重水(D_2O)，在海水中重水在海水中重水大约占海水的七千分之一。它的原子核是由一个质子和一个中子组成的氘核。被加速器加速的氘核能产生很多核反应。在热核反应中释放出巨大的能量，是一极有前途的能源。

【核力】

核力是核子之间的作用力，它是核子组成稳定的原子核的非常巨大的力。核力是一种近程力，在大于 10^{-15} 米的距离时，核力远比库仑力小。在小于 10^{-15} 米的距离时，核力比库仑力增加得更为迅速，核力与核子是否带有电荷并无关系。核力的本质，目前认为是一种交换力。我们知道电磁力是通过电磁场而作用的，电磁场具有粒子（光子）性，因此电磁力是通过光子的交换来实现的一种交换力。对核力，目前假设，核子之间的相互作用是通过一种特殊的粒子（介子）的交换来实现的。认为中子和质子的相互作用是通过带正、负电的或中性的介子（ π^+ 、 π^- 或 π^0 ）的交换来完成的，交换的方式为



目前以介子场论作为核力的基本理论，它能作出很多有价值的定性说明，但是这种理论还不完备，还存在严重的困难。核力的本质，还没有一个比较完美的理论来说明。

【质量亏损】

按照经典的想法，原子核的质量应等于核内所有核子质量的总和。例如，电荷数为 Z 、质量数为 A 的原子核的质量应等于

$$ZM_p + (A-Z)M_n$$

式中 M_p 和 M_n 分别为质子和中子的质量，然而从实验测得的原子核的质量 M_A 恒小于上式给出的量值，其差额

$$\Delta M = ZM_p + (A-Z)M_n - M_A$$

为质量亏损。质量亏损说明当核子集合组成原子核时要放出结合能。它的数值越大，原子核就越稳定。例如氦核 (${}^4_2\text{He}$ ，即 α 粒子) 由两个质子和两个中子组成，质子质量为 1.007276 原子质量单位，中子质量为 1.008665 原子质量单位，故这 4 个核子独立存在时的总质量为

$$\begin{aligned} & 2 \times (1.007276 + 1.008665) \\ & = 4.031882 \end{aligned}$$

但当它们组成氦核后，其氦核质量为 4.001505 原子质量单位，其质量亏损为

$$\begin{aligned} & 4.031882 - 4.001505 \\ & = 0.030377 \end{aligned}$$

由于 $E = \Delta M c^2 = 0.030377 \times 1.660 \times 10^{-27}$ [公斤]

$$\times (3 \times 10^8)^2 = 28.297 \text{ (MeV)}$$

1 个原子质量单位相当于 931.50 MeV (兆电子伏特) 的能量。

【质能关系式】

根据相对论原理，物质的质量与能量之间的关系式： $E=mc^2$ ；其中 c 为真空中的光速。当物质的能量发生改变时，它的质量就按照这一关系相应地发生变化，反过来也是如此。此式是相对论的一个重要结论，且为实验所证实。人们运用这一关系式解释原子核质量亏损现象时，就发现了核内蕴藏着巨大的能量，看到了利用原子能的可能性和重要性。按照这一关系式，1 克质量相当于 9×10^{20} 尔格或 9×10^{13} 焦耳的能量。

【平均结合能】

将原子核的结合能除以核子数（即质量数 A ），即得每个核子的平均结合能。不同元素的原子核的稳定程度是不同的。我们可以用每个核子的平均结合能来表示原子核的稳定程度，核子的平均结合能越大，原子核就越稳定。质量数中等的核，平均结合能近似相等，在 8MeV 左右，而最轻和最重的一些核（元素周期表上两端的原子核）平均结合能较小。由此可见，中等原子量的核最稳定。在重核裂变或轻核聚变时，都相当于平均结合能较小的核转变为平均结合能较大的核，因而能释放能量。

【裂变】

重核分裂为两个中等质量核的过程，同时还可能放出中子（也有分裂成更多裂块的情形，但几率很小）。裂变有自发和感生两种，前者裂变的半衰期很长。如铀-238的半衰期为 10^{16} 年。后者指原子核在受到其他粒子轰击时立即发生的裂变，如铀-235受到热中子（非常慢的中子）轰击时就能分裂。铀核裂变时的产物多种多样，有时裂变成氙和锶，有时裂变为钡和氪，有时裂变成锑和铈等等；同时还放出2~3个中子。原子核裂变时释放出巨大能量（包括裂块和中子的动能及辐射的能量等）。在原子核反应堆中已经能控制和利用这种能量。例如， ${}_{92}\text{U}^{235}$ 裂变时，能放出巨大的能量，根据计算和实验测得：每一个核分裂时约放出200MeV（兆电子伏特）的能量，主要是裂变碎片的动能，辐射能约占总能量的10%。能量分配为：(1)裂变碎片的动能168MeV；(2)中子的动能5MeV；(3)裂变碎片衰变时放出的能量13MeV；(4)裂变时放出的射线的能量5MeV；(5)中微子的能量11MeV。这些能量最后绝大部分转变为热能。以一个铀核裂变产生200MeV的能量来计算。1千克铀全部裂变时放出的能量相当于2500吨优质煤完全燃烧时放出的化学能。此两种燃料的质量比为 2.5×10^6 ，由此可见核内所蕴藏的能量比化学能巨大得多。

【原子能】

指原子核能。原子核结构发生变化时放出的能量。在实用上指重核裂变和轻核聚变时所放出的巨大能量。在利用裂变所放出的能量方面已取得很大进展，现已建成各种类型的原子核反应堆和原子能发电站。轻核聚变时放出的能量要比同质量重核裂变时大几倍。聚变能量是太阳等恒星能量来源的重要部分；而人工控制聚变反应以及利用其能量的研究正在积极进行。急剧的裂变和聚变反应会引起爆炸，原子弹和氢弹就是根据这一原理制造的。此外对放射性同位素各种射线的应用，也是原子能利用的一个重要方面。

【链式反应】

当一个中子引起一个铀核裂变后，裂变中放出的中子继续能引起其他铀核裂变，并且能不断继续下去。例如，铀-235的核吸收一个中子后发生裂变，同时放出二到三个中子；除去损耗以外，这些中子中如能至少剩下一个以引起另一个铀-235核裂变，链式反应就可持续不断。在天然铀中，99.3%是铀-238，只有0.7%是铀-235。铀-235俘获各种能量的中子都会发生裂变，而且俘获慢中子发生裂变的几率较大。铀-238和快中子作用时，大多俘获中子后形成铀-239，并不发生裂变；如果铀-238和慢中子作用，它们只发生弹性碰撞，而不发生裂变反应。因此铀-238的存在是不利于裂变反应的继续进行的。因此作为核燃料的铀均采用浓缩铀（其中铀-235的含量比天然铀中的含量高）。各种浓缩度的铀已广泛应用于原子核反应堆和原子武器中。

【临界体积】

也称“临界大小”。可发生裂变的物质，产生链式反应所必须具有的最小体积。如果铀块的体积小于临界体积，中子从铀块中通过时，可能还没有碰到铀-235而引起裂变前就已飞出铀块外去了。于是中子数目越来越少，不能使链式反应继续下去。在原子核反应堆能正常运转，即堆内链式反应能正常进行，就必须能保证由原子核裂变所产生的中子，能补偿被其它核俘获（不产生裂变）或者逸出反应堆而损耗的中子，这条件只有在反应堆具有一个最低限度的体积，即临界体积时，才能实现。临界体积与堆内可裂变物质，例如，同位素铀-235的含量百分比、铀和减速剂的布置方式以及其他物质存在的情况都有关，因而它不是一个常数。又如要使原子弹发生爆炸，也必须使铀块具有一个最低限度的体积，这体积也称临界体积。在设计原子核反应堆时，临界体积的计算是重要的一环。

【原子弹】

以纯铀-235 或纯钚-239 作核燃料（或称炸药），将它们做成半球形的两块，每一块的体积小于临界体积，因此单块存在不能引起核裂变的链式反应。但当两块合成一块时，将大于临界体积，中子倍增系数 K 比 1 大很多，只要有一个中子进入，链式反应将开始，并非常激烈地进行。将这两块半球形的核燃料，分开安装在炸弹中，其中一块被固定，另一块后面装上普通炸药和引爆装置。当引爆装置引起普通炸弹爆炸时，就把两块炸药迅速压在一起，成为一个整块，这时核裂变开始并发生激烈的链式反应，大量能量在极短的时间内放出，因而形成剧烈爆炸，这就是原子弹爆炸的原理。

【核反应堆】

使原子核裂变的链式反应能够有控制地持续进行而获得核能的装置。是利用原子能的一种最重要的大型设备。如果裂变反应达到一定强度后，控制中子倍增系数 $K=1$ ，这时裂变链式反应就能有控制地按照这一强度进行下去，不发生爆炸而输出巨大能量。按照不同的目的和要求，反应堆有许多型式。原子核反应堆主要有三种类型，它们是非均匀反应堆，均匀反应堆和增殖堆。

(1)非均匀反应堆：此种反应堆的中心部分用重混凝土屏蔽，以防止各种放射性射线对反应堆周围人们的伤害。堆芯部分装着铀棒，这些铀棒是浓缩铀，这些铀棒插在减速剂（通常为石墨或重水）中，减速剂的作用是使裂变产生的高速中子和石墨或重水的原子碰撞后变成慢中子，慢中子不会被铀-238 吸收，但能引起铀-235 的分裂，所以减速剂使中子倍增系数 K 增加。堆芯中还插有控制棒，它们插在各层铀棒之间，通常是用碳化硼或镉制成的，它能吸收中子，控制棒推入深些，吸收的中子就多，逐渐拉出吸收的中子就渐渐减少，通过控制棒插入的深浅可以控制堆芯内的中子数，从而控制了链式反应的速度。堆芯的外面是传热剂，如液态钠吸收了反应堆放出的能量以后，由泵打到热交换器，在那里把热量传给水，然后再回到堆芯去循环。水获得热量后成为蒸气，可以推动汽轮机工作。可用于发电机组的动力，核潜艇的动力等。

(2)均匀反应堆：这种反应堆是将浓缩铀的盐类溶解在重水中（重水又作为减速剂），然后通入堆芯，堆芯有一定的体积，在其中进行链式反应，镉棒插入堆芯以控制中子倍增系数 K 。溶解着铀的盐类的重水本身同时作为传热剂，这就是均匀反应堆。

(3)增殖反应堆：当铀-238 俘获中子以后，经过两次 蜕变形成了钚-239。在天然铀中主要是铀-238，其中有一部分钚-239。如果有一个钚-239 在中子作用下发生了裂变反应，同时放出几个中子。其中有一个中子引起其他的钚-239 发生裂变，而剩下的中子被铀-238 俘获后蜕变成钚-239，这就意味着，这块天然铀中不但有钚-239 的链式反应，而且还有钚-239 的增殖。一个增殖反应堆，中心处是活性区，活性区内是铀-235 和稀释剂，铀-235 裂变而放出快中子。这些快中子射入围成一圈的铀棒使钚-239 增殖，当铀棒中的钚-239 增加到一定的程度，增殖和链式反应就开始。这种反应堆可以用较易得到的天然铀作铀棒，其功率也由控制棒来控制。当需要停止反应堆的工作时，可将所有的控制棒全部插进。将大量的中子全部吸收，链式反应停止，反应堆停止工作。反应堆的核燃料的链式反应，不象其他的化学燃料，在燃烧时需要氧气。所以核潜艇的隐蔽性更强。可以长期沉于水下，不需要到海面上吸气。

【减速剂】

也称“慢化剂”。它可使快速运动的中子减速成为慢中子或热中子，热中子就能有效地使铀-235发生裂变，减速剂是原子核反应堆中必不可少的物质。优良的减速剂必须具备两种性质：(1)对中子的吸收较少；(2)中子与它的核只要碰撞很少次数就能被减慢到所需要的程度。常用的减速剂有重水、石墨、铍等。一般减速剂均采用较轻的元素或化合物。中子与原子核的弹性碰撞会引起中子运动方向的改变和中子的一部分能量损失（将能量传给原子核），从动量和能量守恒定律出发，可证明，碰撞后质量为M的反冲核的能量为

$$E_{\text{反冲核}} = E_{\text{中子}} \frac{4Mm}{(M+m)^2} \cos^2 \theta = \alpha E_{\text{中子}} \cos^2 \theta$$

是与中子运动方向所成的角， $\alpha = \frac{4Mm}{(M+m)^2}$ ，显然， $E_{\text{反冲核}}$ 越大，则中子慢化越快。由系数 $\alpha = \frac{4Mm}{(M+m)^2}$ 可以看出， α 越大，减速效果越好。

当 $M = m$ 时（即反冲核的质量等于中子质量时） α 最大为1，反之M与m的差距越大其 α 值越小。比较轻的物质的原子核的质量更接近中子的质量，因而 α 值大，减速效果好。

【控制棒】

用以控制原子核反应堆的反应速率或输出功率的元件，它是用能够强烈吸收中子的材料（如镉或含硼物质等）制成，一般制做成棒状，故名控制棒。用它可以控制反应堆的启动和停止，以及控制核裂变链式反应的强弱，从而达到反应堆输出功率的控制，控制棒插入堆内越深，吸收的中子越多，使反应速度减慢或停止；而把棒从堆内抽出时，吸收的中子减少，可使反应起动或使反应加快。一般控制棒也不是一根，也可用插入棒的多少来调整。这种调节一般都通过自动装置进行。

【载热剂】

反应堆工作时，核燃料裂变放出巨大的热量。这些热量必须靠载热剂的循环流动不断把能量输送到堆外，作为动力的能源加以利用，同时使堆内的温度不致过分升高，保证反应堆正常工作。优良的载热剂必须具有不易吸收中子、比热大、在高温和辐照下不会分解等性质，并可兼作减速剂用。常用的有水，重水，二氧化碳，液态金属钠、钾和某些有机物（如双酚）等。

【防护层】

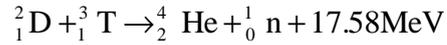
在核辐射强烈的区域（如原子核反应堆、加速器周围）使人体免受过量的射线、中子辐照以及其它放射线的伤害而建造的屏蔽层。一般采用厚实重混凝土墙来屏蔽辐照，用水层、石蜡层和含硼物质来减弱中子辐照。

【反射层】

能够起反射作用的物质层。在原子核反应堆中，反射层包围反应堆的主体部分，用来反射中子，以减少中子逸出反应区的可能。使用反射层可以缩小反应堆的体积。常用的材料是水、石墨、铍等。

【聚变】

由于轻核中的核子的平均结合能更小，当轻核相遇聚合成较重的原子核并放出巨大能量的过程称为“聚变”。例如氘核 (${}^2_1\text{D}$) 同氚核 (${}^3_1\text{T}$) 相遇时，就可能发生聚变而生成氦核 (${}^4_2\text{He}$)，并放出一个中子 (${}^1_0\text{n}$)；生成物的总动能要比反应物的总动能大17.58百万电子伏特；其反应式可写成



因为所有的核都带有正电，相互间存在着库仑排斥力，因此在一般条件下不可能发生核的聚变。自然界中只有在太阳等恒星内部，因温度极高，轻核才有足够的动能克服库仑斥力，而能自发地进行持续的聚变。人工聚变目前只能在氢弹爆炸或由加速器产生的高能粒子碰撞中实现，然而大规模的聚变控制，目前尚未能办到，正在通过控制热核反应进行探索研究。可聚变的元素有氢、重氢、锂等氢原子核。聚变反应因为需要在高达百万度或千万度以上的温度才能进行，故又称“热核反应”。在摄氏百万度以上的高温，所有原子均完全游离，原子中所有电子全部逸出，仅余下原子核。在高温下这些原子核因热运动而获得高速，在它们相互碰撞时因直接接触而能产生聚变反应，同时放出很大能量。

【热核反应】

热核反应是在极高的温度下将轻核聚变为较重的原子核，因而放出大量能量的反应。当温度足够高时，聚变能自动持续进行。象太阳等恒星的主要能量来源就是其内部的热核反应。根据理论上的估算，使氘核和氚核实现自持热核反应，需要五千万度以上的高温，而氘核同氘核则需要几亿度的高温。目前已实现的人工热核反应是氢弹的爆炸，它利用铀（ ^{235}U ）或钚（ ^{239}Pu ）在裂变时发生爆炸而产生的高温，从而使内部的轻原子核发生剧烈而不可控制的聚变反应。由此可见，氢弹的爆炸，必须由原子弹来引爆。至今，人们不能自如地控制热核反应，其关键在于如何使等离子体达到所需的极高温度，并使之稳定足够长的时间。这是目前自然科学研究的重点问题之一。一旦研究成功，人类将从水中的重氢（氘）获得取之不尽的能量。

【氢弹】

它是使轻核发生不可控的热核反应，而产生巨大能量的炸弹。氢弹的结构很复杂，它是靠原子弹爆炸产生的极高温，使氢原子核发生不可控的聚变而释放巨大能量的。它的威力要比原子弹大很多倍。我们知道，原子弹的起爆，是靠普通炸弹把两块均不足临界体积的核燃料堆在一起，发生裂变链式反应而引起原子弹爆炸。由此可见，在一颗氢弹中，包含着普通炸弹、原子弹。它们共同完成氢弹的引爆工作。

【基本粒子】

泛指比原子核还要小的物质单元。包括电子、中子、质子、光子以及在宇宙射线和高能原子核实验中发现的一系列粒子。现今已发现的基本粒子有 30 余种，连同它们的共振态共有 300 余种。每一个基本粒子都有确定的质量、电荷、自旋、平均寿命等；它们中的多数是不稳定的，在经历一定的平均寿命后转化为别种基本粒子。基本粒子有的是中性，有的带正电或负电，电量大小与电子相同。它们的质量大小有很大差别。按照基本粒子之间的相互作用，可以把它们分为三类：(1)强子。质子和中子之间的作用力，是一种比电磁作用大很多的相互作用，叫做强相互作用。凡是参与强相互作用的粒子，都叫做强子。强子包括重子和介子两类。(2)轻子。轻子都不参与强相互作用。 μ 介子、电子、 μ 中微子和中微子都属于轻子。(3)光子。光子只有一种光子。即人们常说的光量子。许多基本粒子都有对应的反粒子。一对正反粒子相遇时，会同时消失而转化为别种粒子，这种现象叫做湮灭（湮没）。

【强子】

参与强相互作用的基本粒子，包括介子和重子两大类。核力是一种强相互作用，通常认为是由于介子在核子（质子和中子）间交换而引起。

介子和核子都是强子。强子结构的夸克模型认为，强子是由夸克组成的。夸克有几种，所带电荷是基本电荷的 $\pm\frac{1}{3}$ 或 $\pm\frac{2}{3}$ 。按照夸克模型，介子是由一个夸克和一个反夸克组成的。重子是由三个夸克组成的，反重子是由三个夸克组成的，夸克又可叫做层子。

【重子】

质量比质子更重（包括质子在内）的基本粒子。它们的自旋角动量是 $h(\frac{h}{2})$ 的半整数($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$)倍，即都是费密子。每种重子有它的反粒子（反重子），例如质子的反粒子叫反质子，记作 \bar{p} ，它们的质量相同，电荷相反但绝对电量相同。重子和反重子分别以重子数 1 和 -1 标记。在一切过程中重子数保持守恒。除质子外的一切重子都是不稳定的，其中寿命有短到 10^{-23} 秒，称为重子共振态，近年来在高能加速器上做粒子碰撞实验时，常有发现。

【轻子】

包括电子、 μ 子和中微子三种。它们的共同特点是：自旋量子数均是 $\frac{1}{2}$ （以此区别于介子和光子）、质量很轻并与原子核没有强相互作用（以此区别于重子）。

【费密子】

自旋动量矩为 $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$ (h是普朗克常数) 的奇数倍的微观粒子, 如电子、

质子、 μ 子及由奇数个核子构成的原子核等, 都是费密子。因意大利物理学家费密而得名。

【玻色子】

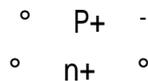
自旋动量矩为 $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$ (h是普朗克常数) 的偶数倍的微观粒子, 如光子、
介子、
粒子及由偶数个核子构成的原子核等。因印度
物理学家玻色而得名。

【介子】

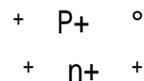
基本粒子的一类，包括 π 介子、K 介子、 η 介子、 ω 介子、 ϕ 介子、 n 介子等以及许多共振态。它们的自旋角动量都是 $E(\frac{h}{2})$ 的整数（0、1、2）倍，即都是玻色子。介子都不能稳定存在，经历一定平均寿命后即转变为别种基本粒子。有的介子是荷电的，也有中性的。例如 π 介子有三种， π^+ 和 π^- 质量为电子的 273.3 倍，电荷相反，互为正、反粒子，而 π^0 是中性的，质量为电子的 264.3 倍，其反粒子就是它自身。荷电 K 介子 K^+ 和 K^- 互为正、反粒子，质量为 $966.7m_c$ ；中性 K 介子 K^0 和 \bar{K}^0 互为正、反粒子，质量为 $976m_c$ 。中性 K 介子在运动时有两种组合态，其平均寿命长短显著不同，分别以 K_L^0 （L 表示长寿命）和 K_S^0 （S 表示短寿命）记之。 π 、K、 n 介子的自旋都是零，有时称为标介子， ρ 、 ω 、 ϕ 介子的自旋为 1，有时称为矢介子。日本物理学家汤川秀树最早（1935 年）通过核力的研究预言介子的存在，并推测它的质量介于电子与质子之间。后来在宇宙线中先后发现了 μ 和 π 介子， μ 介子的质量为电子的 206.6 倍，现在被正式命名为 μ 子，不归入介子而归入轻子一类，而 π 介子才是核力的媒介。近几年在高能加速器中使粒子相互碰撞，新的介子（共振态）续有发现。

【超子】

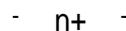
质量超过核子（中子、质子）的各种重子。超子包括三种粒子，所有的超子的自旋均为 $\frac{1}{2} \frac{h}{2}$ （h为普朗克常数）；所以都是费密子。这三种超子为：(1) Λ^0 （lambda）粒子——只有一种，不带电，其质量约相当于 1,115.4MeV。(2) Σ （sigma）粒子——共有三种： Σ^+ ， Σ^0 ， Σ^- 。并且还有与其相当的反粒子。 Σ^+ 带正电，质量约相当于 1,189.4MeV。 Σ^0 不带电，其质量约相当于 1,192.3MeV。 Σ^- 带负电，其质量约相当于 1,197.2MeV。(3) Ξ （ksi）粒子——共有两种： Ξ^0 和 Ξ^- ，还有其相当的反粒子。 Ξ^0 不带电，其质量约相当于 1,314MeV； Ξ^- 带负电，其质量约相当于 1,321MeV。超子都不能稳定存在，经过一定的平均寿命后，即衰变为其他基本粒子。其中： Λ^0 粒子的半衰期约为 2.6×10^{-10} 秒，其主要衰变方式为



(2) Σ^+ 粒子的半衰期约为 0.79×10^{-10} 秒，其主要衰变方式为



(3) Σ^- 粒子的半衰期约为 1.58×10^{-10} 秒，其主要衰变方式为



(4) Σ^0 粒子的半衰期很短，约为 10^{-14} 秒，很显然 Σ^0 的衰变主要是一个电磁交互作用的反应，因此在衰变中有光子被放出来，其反应方式为



(5) Ξ^0 粒子的半衰期约为 3×10^{-10} 秒，其主要衰变方式为



(6) Ξ^- 粒子的半衰期约为 1.75×10^{-10} 秒，其主要衰变方式为



Λ^0 粒子也称为递次粒子，因为其主要的衰变方式是先衰变为 π^0 粒子，然后 π^0 粒子再衰变为质子和介子。

【湮灭】

当一种基本粒子和它的反粒子相遇时，两个粒子一起消失而转化为他种基本粒子的现象。例如电子和正电子相遇而转化为两个光子。

【高能物理】

即“高能粒子物理”。研究具有很高能量（一般在 1GeV 以上， $1\text{GeV}=10^9\text{eV}$ ）的基本粒子的性质，以及它们之间的相互作用和转化规律，这对物质结构的认识具有重要意义。高能加速器是高能物理研究的基本设备之一，目前最大的加速器能把质子加速到具有几百 GeV（千兆电子伏）的能量。另外宇宙射线中也含有高能粒子，这一部分的研究也属于高能物理范畴。

【宇宙射线】

简称“宇宙线”。来自宇宙空间的高能粒子流。宇宙射线分为两类：一是原宇宙线，是来自地球以外的高能带电粒子，其中约有91.5%是质子，7.8%是氦核（ α 粒子），其余是碳（C）、氮（N）、氧（O）及铁（Fe）等重原子核，能量极高，可达 10^{20} 电子伏特以上。二是次级宇宙射线，由于宇宙射线进入大气层后，和空气中原子核发生碰撞，引起核的分裂并产生一系列其他粒子，通过这些粒子与周围物质的相互作用及自身的转变，形成次级宇宙射线，其成分中有一半以上是 μ 子，这部分射线穿透本领很大，能透入深水和地下，称“硬性部分”。另一部分主要是电子和光子，穿透本领较小，称“软性部分”。由于初级宇宙射线能量极高，生物到大气层外时，就可能受到它的伤害或影响，同时它能引起许多目前无法用人工实现的核反应和基本粒子转变过程。又因为它可能与太阳和某些恒星的活动以及各种地球物理现象有密切关系，故对宇宙射线的研究意义重大。

六、单位与其他

【单位】

在对物理量进行测量时，所规定的标准量，以便与被测量量进行比较，此标准量叫做单位。体现物质属性的物理量各不相同，因此，物理单位也各有不同。例如，米是计量长度的单位，秒为计量时间的单位等等。

【物理量】

量度物质的属性和描述其运动状态时所用的各种量值。例如，量度物质惯性的物理量是质量，描述物体运动快慢的物理量是速度等。在物理学中以时间、长度、质量、温度、电流强度、发光强度作为基本物理量（在不同时期和不同学科中，基本量的选择可以不同），其余的物理量则分别按其定义由基本物理量组合而成，称为导出物理量。如速度、加速度由时间、长度两个基本量组合而成；力、能量、功等由时间、长度和质量三个基本量组合而成等等。各种物理量都有它们相应的量度单位，并以选定的物质在规定条件下所显示的数量作为基本量单位的标志。

【基本物理量】

基本物理量是由人们根据需要选定的，在不同学科中和不同时期，选定的基本物理量有所不同。例如，在力学中选定的基本物理量是：长度、质量、时间；在热学领域中则采用长度、质量、时间、温度为基本物理量。1971年前国际制中采用的基本物理量是六个，即：长度、质量、时间、电流、热力学温度、发光强度。1971年起又增加了物质的量为基本物理量，使基本物理量增加到七个。

【导出物理量】

导出物理量是根据物理量的定义由基本物理量组合而成的。例如，速度就是一个导出物理量。它是物体的位移和所经过时间的比来定义的，因此它就是由长度和时间这两个基本物理量组合而成的物理量。导出物理量和基本物理量或导出物理量与导出物理量，还可以组成新的导出物理量。从根本上说，所有的物理量都是由基本物理量构成的，在力学范畴内，所有的力学量都是由长度、质量和时间这三个基本物理量构成的；在电学领域内，除了上述三个基本量外，再加上电流这一基本量就可以导出所有的电学物理量。应用上述七个基本物理量，便可以导出目前物理学中的各个物理量。

【基本单位】

物理量的计量，就是将物理量与作为计量单位的同类量相比较，借以确定被量度的物理量为单位量的若干倍。则此单位量值为单位尺度，或简称单位。一般说来，物理量的计量单位是可以任意选择的，单位选择的准绳是：使用方便，尽可能符合近代物理概念，并且有制成物质范型及复制的可能性。根据这些原则制定出的基本物理量的计量单位，叫做基本单位。对于其他物理量的计量单位则可以通过它们与基本单位的关系来确定，而称为导出单位。目前在理论物理方面最通用的绝对单位制是根据 1832 年高斯所提出的方法建立的，基本量选取了长度、质量和时间，相应的基本单位是厘米、克、秒；米、千克、秒和英尺、磅、秒等数种组合。目前广泛应用在工程技术领域中的重力单位制是选取长度、时间和力作为三个基本量，相应的基本单位有米、秒、千克力和英尺、秒、磅两种组合。各单位制中选用的基本量和基本单位不一定限于三个。例如：在热力学和电磁学领域中通用的单位制，都是由四个基本单位组成，而 1960 年 10 月第十一届国际计量大会通过的国际单位制（国际代号为 SI）采用了六个基本单位：米、千克、秒、开氏度、安培和烛光。在 1971 年第十四届国际计量大会决定采用七个基本单位：米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔和坎德拉。随着科学技术的发展，物理基本单位的数目是在变化的，基本单位的定义也在不断更新。

【单位制】

由基本单位和它们的导出单位的总和叫做单位制。取长度、质量和时间的单位为基本单位的，称“绝对单位制”，它是1832年由高斯所提出的。如科学上常用的“厘米·克·秒制”（CGS制）就是由基本单位厘米、克、秒及其导出单位如达因、尔格等组成；“米·千克·秒制”（mks制）是由基本单位米、公斤、秒及其导出单位如牛顿、焦耳等组成；还有米、吨、秒为基本单位的“米·吨·秒制”等都是绝对单位制。在工程领域中的重力单位制是选取长度、时间和力作为三个基本量，相应的基本单位则为，米、秒、公斤（力）及其导出单位如能量单位“公斤米”等组成。以上都是力学上用的单位制。在上述单位制中，增添温度的单位时，就得到热学上用的单位制；增加电磁量的基本单位，就得到各种电磁单位制；增加光学量的基本单位，就得到光学上用的单位制。

【国际单位制】

由国际计量大会通过决定采用的一种单位制。以米、公斤（千克）、秒、安培，开尔文、坎德拉、摩尔作为基本单位，其他单位均由这七个单位导出。各基本单位规定如下：(1)米。等于氪 86 原子在真空中发射的橙色光波波长的 $1,650,763.73$ 倍。(2)公斤。等于保存在巴黎国际计量局的铂铱公斤国际原器的质量。(3)秒。等于铯 133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间。(4)安培。在圆截面很小的两根平行的无限长直导体中通以强度相同的稳恒电流，如果两导体相距 1 米，且处于真空中时，在每米长度上所受到的作用力为 2×10^{-7} 牛顿，则此稳恒电流的强度为 1 安培。(5)开尔文。以水的三相点温度为 273.16K 。开尔文一度等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。热力学温度 T 和摄氏温度 t 的关系为 $T=t+273.15$ 。(6)坎德拉。坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 540

$\times 10^{12}$ 赫兹的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $\frac{1}{683}$ 瓦特每球面度

(W/sr)。(7)摩尔。是一物质系统的物质的量。它是：构成物质系统的结构粒子数目和 0.012 公斤碳-12 中的原子数目相等，则这个系统的物质的量为 1 摩尔 (mol)。结构粒子可以是原子、分子、离子、电子、光子等，或是这些粒子的指定组合体；在使用该单位时必须指明结构粒子的种类。

【公制】

也称“米突制”，是“国际公制”的简称。它是法国在18世纪末首创的。采用当时认为最稳定而不变的自然物——地理子午线的长度作为标准，以通过巴黎子午线的四千万分之一作为长度单位，定名米突（米）；容量单位为升，等于一立方米的千分之一；质量单位为公斤（千克），等于摄氏四度时一升纯水的质量。1875年，法、德、美、俄等17个国家的代表在巴黎签订米突公约，公认米突制为国际通用的计量制度，并成立国际计量局，制造出铂铱合金原器，作为长度和质量的国际标准。几个主要单位规定如下：(1)长度单位：米，代号m，为保存在巴黎国际计量局内的铂铱米国际原器，在冰熔点时两标点间的距离，约等于通过巴黎子午线长的四千万分之一。(2)质量单位：公斤，代号kg，为保存在巴黎国际计量局内的铂铱公斤国际原器的质量。(3)容量的单位：升，代号L，质是为1公斤的纯水，在标准大气压下，密度最大时的体积。1升=1.000028立方分米。

【市制】

以公制为基础，结合我国民间习惯用的计量名称而定的一种计量制度。市制的主要单位及其与公制的关系为：

$$\text{长度单位：1（市）尺} = \frac{1}{3} \text{米}$$

$$\text{质量单位：1（市）斤} = \frac{1}{2} \text{公斤}$$

$$\text{容量单位：1（市）升} = 1 \text{升}$$

【英制】

用英尺为长度单位、磅为质量单位、秒为时间单位的单位制。在包括美国在内的英语国家中通用。

【英里】

简作“哩”。英制中的一种长度单位。1 英里=5,280 呔=1,760 码=1.609 公里=3.219 市里。

【英尺】

简作“ ”。英制中的长度单位。十二英寸为一英尺，三英尺为一码。
1 英尺=0.3048 米=0.9144 市尺。

【英寸】

简作“ ”。英制中的一种长度单位，十二英寸为一英尺。1 英寸=2.54 厘米=0.762 市寸。

【码】

英制中长度的一种单位。1 码=3 英尺 ;1 英里=1760 码。与公制及市制的关系是：1 码=0.9144 米=2.743 市尺。

【磅】

英制中质量的单位。1 磅=0.4536 公斤，或 1 公斤=2.205 磅。2240 磅为 1 英吨；而 2000 磅为 1 美吨。1 磅=16 盎司。以上均指常衡磅或国际磅。金、药衡磅和常衡磅的关系是：常衡 1 磅=金、药衡磅 1.215 磅；或金、药衡 1 磅=0.8229 常衡磅。

【盎司】

亦称“英两”或“ ”。英制质量单位。常衡：1常衡盎司 = $\frac{1}{16}$ 常衡磅 = 28.35克。金、药衡：1金、药衡盎司 = $\frac{1}{12}$ 金、药衡磅 = 31.10克。盎司也是英制容量单位：1盎司 = $\frac{1}{160}$ 加仑 = 0.0284升（在美国1盎司 = 0.02366升）。

【加仑】

英、美计量液体和干散颗粒容量的单位。同公制的关系是：1 英加仑=4.546 升。在美国，1 液体加仑=3.785 升；1 干量加仑=4.405 升。

【量纲】

把物理量用基本量表示时，在关系式中的各个指数称为该物理量对于所取基本量的量纲。若取长度 L 、质量 M 和时间 T 为基本量，则体积可用 L^3 表示，因此它对长度的量纲为 3。加速度可用 LT^{-2} 表示，故它对长度的量纲为 1，对时间的量纲为 -2。能量可用 ML^2T^{-2} 表示，故其对质量的量纲为 1，对长度和时间的量纲分别为 2 和 -2。

【量纲式】

导出单位随基本单位改变而改变的依从关系，叫做该导出量的量纲式。例如，由速度单位的定义方程可得速度的量纲式 LT^{-1} ，它表示当长度和时间单位分别改变 L 和 T 倍时，速度单位将改变 LT^{-1} 倍。由此可见， L^3 、 LT^{-2} 和 ML^2T^{-2} 依次称为体积、加速度和能量的量纲式。在基本量选定以后，任何物理量都有确定的量纲和量纲式，而且在任何物理方程中，等号两边的量纲和量纲式必须相等。因此，通过量纲分析可检查计算有无错误，甚至可以提供寻找复杂规律的一些线索。同一物理量，在不同的单位制中可能具有不同的量纲和量纲式。

【数量级】

在量度或估计物理量的大小时常用的一种概念。当某物理量的数值写成以 10 为底的指数式时，其指数的数目（不考虑 10 前面的系数）就是该物理量的数量级。例如地球赤道半径为 6.378×10^3 公里，则对量公里来说，它的数量级是 3，或说成 10^3 公里。真空中光速约为 3×10^{10} 厘米/秒，则对厘米/秒来说，它的数量级是 10，或说成 10^{10} 厘米/秒。显然，当采用不同单位时数量级也就不同；如果地球半径以厘米为单位时，数量级就是 8。有些物理量，由于测量技术的限制，只能量得它的大致范围；或者只要知道它的数量级，而前面的数字对问题影响不大，此时只说出它的数量级就可以了，而不必说出其准确值。

【准确度】

在实验测量中，所测得数值（即近似值）对真实数值（即准确值）的接近程度。某测得数值的准确度愈高，表示愈接近真实数值。习惯上用相对误差表示，其数值越小，则准确度越高。这好比一个水平很高的射手，射出的颗颗子弹非常接近靶心。说明相对误差很小，也就是准确度较高。

【精确度】

在同一条件下，用同一方法对某物理量进行多次测量时，所测得各数值间相互接近的程度，精确度指在测量中所测数值重复性的大小。精确度很高，只能说明各次测量值很接近。但这些值可能与准确值（真值）相差很远。这好比，射手射出的颗颗子弹击中靶上某一部位。但这一部位确离靶心很远。

【测量误差】

对某量进行测量时所得的值与该量真值之间的差（通常以多次测量结果的平均值作为“真值”）。由于仪器不完善（如刻度不准等）和人为的误差因素（如观测者反应能力有高低和器官的限制等）以及外界条件的影响（如温度改变等），测量误差总是不可避免的。一般可分为两种：(1)偶然误差。如测量时瞄准目标常有偏差，此种误差有正有负，而其产生出于偶然，可用误差理论，对所测的数据进行处理。(2)系统误差。如尺的长度或其刻度不准确，用它测量时就会得出总是偏大或偏小的误差。系统误差带有规律性，原则上可加以改正或消除。此外还有由于读数错误等原因引起的所谓“粗差”，须通过多次测量来发觉，并予剔除。

【贝尔】

在声学中测定声强级的特定单位。它在数值上等于被测声强 I 和声强的最小值 I_0 之比的常用对数。声音最小值 I_0 是指正常人耳能听

到的最弱的声强，一般 $I_0 = 10^{-12}$ 瓦 / 米²。其声强级贝尔数为 $\lg \frac{I}{I_0}$ 。在电学

中计算功率的比值也常用贝尔作单位，在数值上等于输出功率和输入功率比的常用对数，即

$$\text{功率比 (贝尔数)} = \lg \frac{P_{\text{出}}}{P_{\text{入}}}$$

电学中计算电流或电压的比也借用贝尔作单位。在数值上等于输出电流 (或电压) 与输入电流 (或电压) 的比的常用对数的两倍。即

$$\text{电流比 (贝尔数)} = 2 \lg \frac{I_{\text{出}}}{I_{\text{入}}}$$

$$\text{电压比 (贝尔数)} = 2 \lg \frac{U_{\text{出}}}{U_{\text{入}}}$$

“贝尔”这一单位是为了纪念美国发明家贝尔在电、声学方面的贡献而命名的。

【分贝】

贝尔数的十分之一，即 1 贝尔=10 分贝。声强级、电功率比、电流比、电压比，通常都多用分贝作单位。

【奈贝】

电平单位，它是电流比值（或电压比值）的自然对数；也是相应的电功率比值的自然对数的二分之一，分别表示为

$$\text{电流比（奈贝数）} = \ln \frac{I_{\text{出}}}{I_{\text{入}}}$$

$$\text{电压比（奈贝数）} = \ln \frac{U_{\text{出}}}{U_{\text{入}}}$$

$$\text{功率比（奈贝数）} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{\text{出}}}{P_{\text{入}}}$$

$$1 \text{ 奈贝} = 8.686 \text{ 分贝}$$

$$1 \text{ 贝尔} = 10 \text{ 分贝} = 1.151 \text{ 奈贝}$$

【宇宙】

宇宙是指整个的物质世界，是自然界中运动着的万物的总称。它是处于不断地运动和发展之中。在空间上没有边界没有尽头，在时间上没有开始没有终了。宇宙中的物质的表现形式是多种多样的。随着天文学的日益发展，宇宙可观测的范围日益扩大。这个范围已经远远超出太阳系所属的银河系，而包括数以十亿计的其他星系，称为河外星系。每个星系包含着数以百亿、万亿计的恒星。目前，能观测到的最远的天体离地球约为百亿光年。

【恒星】

由炽热的气体组成，能自己发光的天体。太阳是距我们最近的一颗恒星。其他的恒星距离地球都十分遥远，其中最近的距离也有 4.3 光年。在整个天空中，人眼可看到的恒星约 6 500 颗，利用天文望远镜观测，多得难以数计。恒星实际上也都在不停地运动，但因距我们太远，在短期间内感觉不到它们之间相互位置的改变，故古时就称其为“恒星”，并沿用至今。恒星也和太阳一样各有速度不等的自转运动。各种不同恒星的物理性质也千差万别：直径从太阳的千分之一以下到千倍以上，质量从太阳的二十分之一到百倍以上，密度从水的几千分之一到千万倍以上，光度从太阳的几十万分之一到几十万倍，表面温度从几百到几万度（ ），而中心温度可达千万度甚至上亿度。维持恒星辐射的能源主要是热核反应。

【星座】

为使人们便于认识星空,古代巴比伦人将天球分为许多区域,叫做“星座”。每一星座可由其中亮星的特殊分布而辨认出来,如七颗亮星形成象杓子的叫做“大熊座”(我国通称“北斗”七星)。现今国际通用的星座共有 88 座。如“大熊座”,“小熊座”,“天龙座”,“仙后座”,“仙王座”,“仙女座”,“蝎虎座”等等。

【行星】

环绕太阳运行，近似于球行的天体，是太阳系的主要成员。行星本身不发光，按照距离太阳的次序，有水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星 9 颗。其中，水星的体积和质量最小，而木星的体积和质量最大。

【地球】

人类居住的星球，太阳系九大行星之一。与太阳的平均距离 14960 万公里。体积约 10832 亿 (1.0832×10^{12}) 立方公里，赤道半径 6378 公里，极半径 6357 公里，两者相差 21 公里。质量约为 5.976×10^{21} 公吨，平均密度是水的 5.5 倍，公转周期 365.25 日，自转周期为 23 时 56 分，地球的轨道平面与地球赤道面相交成 $23^\circ 27'$ 的角度，故有四季寒暑和昼夜长短的差别。地球表面包有坚固的地壳（岩石圈），面积 51000 万 (5.1×10^8) 平方公里，其中海洋（水圈）约占总表面积的 70.8%，陆地只占 29.2%。地球周围大气层由氮、氧、水汽等气体混合组成。在大气层外还环绕着由带电粒子组成的辐射带。地球有一颗卫星（月球）。

【卫星】

围绕行星运行的天体，例如，月球是地球的卫星，卫星本身不能发光，在太阳系中除水星、金星、冥王星未发现卫星外，其他 6 颗行星已发现卫星共有 34 颗，其中地球有 1 颗，火星 2 颗，木星 14 颗，土星 10 颗，天王星 5 颗，海王星 2 颗。

【流星】

在行星运行的轨道空间里，布满着无数叫做流星体的小物体，当这些小物体进入地球大气层时，因为相对于地球大气的运动速度非常之大，与大气摩擦燃烧而发光而形成流星。平时看到天到天空中星光如箭掠过的现象，就是流星。一般出现在离地球 50 ~ 140 公里处，速度由每秒 12 公里到 80 公里。流星出现，秋季比春季多。后半夜比前半夜多。

【慧星】

又称“扫帚星”。也是绕太阳运行的一种天体。形状很特殊，在远离太阳时，是一个发光的云雾状小斑点；接近太阳时，由慧核、慧发和慧尾三个部分组成。慧核由比较密集的固体块和质点组成，其周围的云雾状光辉叫做“慧发”。慧核和慧发总称为“慧头”。慧尾是由极稀薄的气体和尘埃组成，形状象扫帚，是慧星接近太阳时形成的，一般背着太阳方向延伸出去。慧星的体积非常庞大，它可长达数千万、甚至数亿公里；但慧星的质量却很小，一般不到地球质量的十亿分之一。慧尾的密度极小，只有地球上海面大气密度的几千亿分之一。慧星的轨道大多是很扁长的椭圆，少数慧星也运行在抛物线或双曲线轨道上。肉眼能见的慧星很少。哈雷慧星是一颗著名的周期慧星。由英国天文学家哈雷首先确定它的轨道是一个很扁长的椭圆，以约 76 年的周期绕太阳运行。我国历史上有哈雷慧星出现的最早和最完整的记载：第一次是在春秋鲁文公 14 年（公元前 613 年，到最近一次 1987 年哈雷慧星出现为止，共有 32 次记载）。

【激光雷达】

向被测目标发射一束激光，然后测量反射或散射信号的到达时间、强弱程度和频率变化等参数，以确定目标的距离、方位和运动速度，还能探测出肉眼看不见的大气中悬浮微粒群的动态以及大气的密度不均匀性等。激光雷达与无线电雷达相比，测量精度高，分辨能力强，在大气吸收较小时，作用距离远；但它受气候影响较大，不易对准目标，且跟踪、监视和大面积搜索较为困难。主要应用于天文观测和气象观测等。它不能完全代替无线电雷达。

【黑洞】

天文学名词。依照广义相对论，当一定质量的天体物质高度集聚到很小体积内，集聚到一定程度，引力场便将强到使该天体周围的空间高度弯曲，弯曲到把自己包起来，天体产生的辐射将出不来，这样的天体称为“黑洞”。20世纪60年代里，有人根据许多观测资料推测宇宙间可能存在着许多黑洞。但至今还未得到证实。

【光年】

计量天体之间距离的一种单位。光在一年中所走过的距离 约为 94 605 亿公里。例如，天狼星距离地球约 8.7 光年，人们现在所看到的天狼星的光是它在 8.7 年以前发出的光。

【回归线】

天球上赤道之北和南各 $23^{\circ} 27'$ 的两个赤纬圈（即太阳所能达到的两个极限位置）。夏至日太阳到达北回归线后即转向南归；冬至日太阳到达南回归线后即开始转向北归。地球上北、南纬各 $23^{\circ} 27'$ 的两个纬度圈，是地球上热带和北南温带的分界线。 $23^{\circ} 27'$ 是黄道与天赤道之间的交角。

【黄道】

地球上的人看太阳于一年内在恒星之间所走的视路径，即地球的公转轨道平面和天球相交的大圆。黄道和天赤道成 $23^{\circ} 27'$ 的角，相交于春分点和秋分点。

【月球】

地球的卫星。和地球的平均距离为 384401 公里。是距离地球最近的天然星体。本身不发光，但反射太阳光而被人们看见。它的直径为 3 476 公里是地球直径的 $\frac{1}{4}$ ，质量为地球的 $\frac{1}{18.3}$ ，密度是水的 3.3 倍，重力只有地球的 $\frac{1}{6}$ 。月球的自转周期和绕地球转动的周期相等，都是 27.3 日，因此，它永远以同一面对着地球。月球上无水，基本上没有大气。月球表面的温度变化剧烈，在自转一周之内，其温度变化可达 300 。月面凹凸不平，有海（实际是平原）、环形山、月面辐射纹和山系等结构。在 1959 年用宇宙火箭拍摄到了月球背面的照片。照片表明月球的背面和正面的结构有很大差别。主要是背面的“海”的面积小，而环形山较多。

【空间和时间】

空间是物质存在的广延性；时间是物质运动过程的持续性和顺序性。同物质一样，它们是不依赖于人的意识而存在的客观实在，是永恒的，是运动着的物质的存在形式。它们与运动物质是不可分割的，没有脱离物质运动的空间和时间，也没有不在空间和时间中运动的物质。就宇宙而言，空间和时间是无限的，空间无边无际，时间无始无终；就每一个具体的个别事物而言则在空间上和时间上都是有限的。量度空间和时间是科学的任务，通过量度单位的选定和参考系的建立而进行。量度单位以某物体在一选定参考系中的尺度或稳定运动为依据。量度空间一般以米（即公尺）或其分数（如厘米、微米）或倍数（千米）为单位。在量度天体间距离时则用天文单位、光年、秒差距。量度时间一般以地球自转和公转为标准，由此定出各种年、月、日、时、分、秒等单位。历法是量度较长时间的系统。近代利用某些物质原子的内部过程作为空间和时间的量度标准。

【原理】

在科学领域中具有普遍意义的基本规律，它是在大量实践的基础上获得，其正确性也由实践来检验，并对进一步的实践具有指导作用。它反应自然科学中带有普遍规律的本质。例如，独立作用原理，功的原理等都具有普遍的指导意义。

【定理】

通过一定的论据而证明为正确的结论。例如，动量定理是由牛顿定律为根据而导出的。

【定律】

对客观规律的一种表达形式。通过大量具体的事实归纳而成的结论。如牛顿定律、折射定律等都是。

【定则】

为了快速而准确的判断，并能帮助理解和记忆，用以表达相互关联的事物之间的内在联系并得到公认的方法。如左，右手定则等。

【标量积】

又称“数量积”。矢量相乘的一种形式。两个矢量按这种形式相乘得到一个标量。对两个矢量 \vec{a} 和 \vec{b} ，从原点O分别引与 \vec{a} ， \vec{b} 相等的矢量OA，OB，则其 \vec{a} 与 \vec{b} 的标量积为 $\vec{a} \cdot \vec{b}$ （其中 θ 是 \vec{a} 和 \vec{b} 的交角）。在物理学中用标量积处很多，例如，机械功就等于力 \vec{F} 和位移 \vec{S} 的标量积 $F \cdot S \cos\theta$ 。

【向量积】也叫“向量积”。对于两个向量 \vec{a} , \vec{b} , 从原点O分别引与之相等的向量 \vec{OA} , \vec{OB} , 再从O作一向量 \vec{OC} , 使之与平面OAB垂直, 其长度等于三角形OAB的面积数值的两倍。它的方向是按右手螺旋由 \vec{OA} 转向 \vec{OB} 时拇指所指的方向。这样的 \vec{OC} 便是 \vec{a} 和 \vec{b} 的向量积, 记作 $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$ 。显然向量积仍然是向量。

【立体角】

一个锥面所围成的空间部分称为“立体角”。立体角是以锥的顶点为心，半径为 1 的球面被锥面所截得的面积来度量的，度量单位称为“立体弧度”。

【原子时】

原子内部能级跃迁所发射或吸收的电磁波频率极为稳定，以此为基准建立的很均匀的计量时间系统称为“原子时”。原子时的秒长定义为铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间。目前，原子时的秒长作为时间的基本单位。

【恒星年】

地球绕太阳公转一周所需要的时间。只在天文学上使用。由于岁差(地球自转轴的进动使春分点沿黄道向西缓慢运行，速度每年 50.24 角秒，约 25,800 年运行一周，这现象而引起的岁差)，恒星年比回归年约长 20 分 23 秒。等于 365.25636 个平太阳日，或 365 日 6 时 9 分 9.5 秒。

【回归年】

太阳视圆面中心相继两次过春分点所经历的时间。又称“太阳年”。回归年比恒星年约短 20 分 23 秒，回归年长 365.2422 平太阳日或 365 日 5 时 48 分 46 秒。

【恒星日】

指太阳在春分点相继两次上中天所经历的时间，等于 23 时 56 分 4.09 秒平太阳时。一恒星日分为 24 个恒星小时，一恒星小时分 60 恒星分，一恒星分又分为 60 恒星秒。

【真太阳日】

太阳中心相继两次上中天所经历的时间。由于太阳周年视运动的不均匀性，故真太阳日的长度不一样，一年中最长和最短的太阳日约差 51 秒。

【平太阳日】

太阳在黄道上运行的速度不均匀，又因黄道和天赤道不在同一平面内，所以一年中真太阳日的长短不一样，用它来计时很不方便。在天文学中为了弥补这一缺陷，假想有一天体在天球赤道上以匀速由西向东运行；此速度等于太阳在黄道上运行的平均速度。这个假想的天体，称为“平太阳”。平太阳相继两次下中天所经历的时间（即一年内真太阳日的平均值）叫平太阳日。平太阳日比恒星日约长 4 分钟。一平太阳日分为 24 平太阳小时，一平太阳小时分为 60 平太阳分，一平太阳分又分为 60 平太阳秒。这些就是平常所使用的时间单位。

【云雾物理】

大气物理学的组成部分之一。主要研究云、雾及其伴存现象（例如，降水、电、光等）的形成、发现和消灭的规律，从而阐明其物理过程的本质，外部大气条件及其本身演变间的关系等。

【海市蜃楼】

也称为“蜃景”。光线经不同密度的空气层，发生显著折射（有时伴有全反射）时，把远处景物显示在空中或地面的奇异幻景。常发生在海边和沙漠地区。一般有上现蜃景、下现蜃景和侧现蜃景三种，也有其他更复杂的蜃景。我国山东省蓬莱县常见渤海庙岛群岛的幻景。

【能见度】

正常人视力能将目标物从背景中区别出来的最大距离（以米或公里为单位）所相应的等级。进行地面气象观测时，白天一般选择离观测点不同距离的目标物，作为估计能见度的依据；夜间则选取测站周围一定亮度的固定灯光来估计。观测能见度对航空、航海等事业具有实际意义。

【诺贝尔】

瑞典人（1833~1896年）发明家，工业家，诺贝尔奖的创设者。生于斯德哥尔摩。1842年全家移居彼得堡。从1850年起在美国留学4年，学习机械工程。返回后协助父亲改进炸药。1859年全家返回瑞典，继续从事炸药制造和排除其危险性的研究。他把易爆但不易处理的液状硝基甘油吸到硅藻土中，增加了安全性，也便于处理，称之为黄炸药（达纳炸药），1866年取得了专利。接着发明了比黄炸药威力更强的无烟炸药，也取得了专利。在世界各地经营15家炸药工厂，还在俄国开发巴库油田，成为大富翁。为了促进世界和平和科学的进步，他留下遗嘱设立诺贝尔奖。

【诺贝尔奖】

根据诺贝尔的遗言设立的科学奖。自 1901 年开始设物理学奖、化学奖、医学或生物学奖、文学奖、和平奖，1969 年又增设经济学奖。前五项是在诺贝尔逝世的前一年(1895 年 11 月 27 日)在巴黎写的遗嘱中提出的。他亲手用瑞典文写下并在斯德哥尔摩银行中保存，1897 年 1 月启封。其中写着要遗嘱执行人将其遗产做安全可靠的投资作为基金，以每年的利息作为奖金，授给前一年对人类社会做出最大贡献的人。诺贝尔一生健康不佳，未婚无子女，其遗产的大部分做了诺贝尔奖的基金。诺贝尔奖由金质奖章、奖状和奖金组成，每年 12 月 10 日（诺贝尔忌日）在斯德哥尔摩（和平奖在奥斯陆）发奖，有瑞典国王出席。根据诺贝尔的遗愿，物理学奖和化学奖由瑞典皇家科学院授与，医学或生物学奖由皇家与罗琳医学研究所授与。这三项奖的历史，是 20 世纪科学史最宝贵的资料。1901~1980 年的 80 年间，三奖获奖总数为 331 名。根据获奖人数看，科学繁荣的中心，是从欧洲转向美国的。

世界主要地区重力加速度数值表

地 名	纬 度	重力加速度数值	高 度
北 极		983.216	
柏 林	北纬 52 度 31 分	981.280	
伦 敦	北纬 51 度 31.1 分	981.199	海拔 30 米
巴 黎	北纬 48 度 50.2 分	980.934	海拔 61 米
罗 马	北纬 41 度 54 分	980.348	海拔 59 米
芝加哥	北纬 41 度 50 分	980.283	海拔 182 米
纽 约	北纬 40 度 48.5 分	980.247	海拔 38 米
旧金山	北纬 37 度 47.5 分	979.996	海拔 114 米
东 京	北纬 35 度 42 分	979.801	海拔 18 米
南 京	北纬 32 度 3.6 分	979.442	海拔 270 米
上 海	北纬 31 度 11.5 分	979.436	海拔 7 米
广 州	北纬 23 度	978.360	海拔 13 米
台 北	北纬 25 度 2 分	978.707	海拔 8 米
高 雄	北纬 22 度 37 分	977.896	海拔 29.1 米
赤 道		978.039	
南 极		983.216	

