

概率方法在数学竞赛中的运用

武炳杰

(复旦大学数学科学学院 2013 级直博, 200433)

中图分类号: O211 文献标识码: A 文章编号: 1005-6416(2015)04-0002-07

(本讲适合高中)

在中学课本中, 同学们接触了一些简单的有关古典概率的概念. 本文通过概率模型及一些竞赛题阐述概率方法在代数、数论及组合问题中的运用与解题技巧.^[1]

设 $P(A)$ 表示事件 A 发生的概率.

对于一个取值范围是有限集 S 的随机变量 X , 定义 X 的数学期望为

$$E(X) = \sum_{i \in S} iP(X=i).$$

有以下主要结论:

(1) 若基本事件全体所构成的样本空间 Ω 可划分为 $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 则 A_1, A_2, \dots, A_n 互不相交且 $P(\bigcup_{i=1}^n A_i) = 1$.

(2) 在概率空间中的随机变量 X , 总存在一些事件, 使得 $X \geq E(X)$, 也存在一些事件, 使得 $X \leq E(X)$.

利用数学期望解题, 应注意其可加性, 这也给了同学们分解为示性函数、求和提供了可行性.

可加性 对于任意两个随机变量 X, Y (注意未必独立), 总有

$$E(X+Y) = E(X) + E(Y).$$

证明 $E(X+Y)$

$$\begin{aligned} &= \sum_{x,y} (x+y)P(X=x, Y=y) \\ &= \sum_{x,y} xP(X=x, Y=y) + \sum_{x,y} yP(X=x, Y=y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_x \left(x \sum_y P(X=x, Y=y) \right) + \\ &\quad \sum_y \left(y \sum_x P(X=x, Y=y) \right) \\ &= \sum_x xP(X=x) + \sum_y yP(Y=y) \\ &= E(x) + E(y). \end{aligned}$$

1 运用概率模型

在遍历所有项的和式中, 有时能套用概率模型.

例 1 设 S 为平面上的有限点集, 任三点不共线, 对于顶点属于集合 S 的每一个凸多边形 P , 设 P 的顶点数为 $a(P)$, 属于集合 S 且在多边形 P 外部的点的个数为 $b(P)$. 证明: 对于任意实数 $x (0 < x < 1)$, 均有

$$\sum_P x^{a(P)} (1-x)^{b(P)} = 1,$$

其中, P 遍历了集合 S 中的所有凸多边形 (包括三角形, 且一条线段、一个点和空集也分别认为是凸二边形, 凸一边形和凸零边形).^[2]

(第 47 届 IMO 预选题)

证明 将集合 S 中的点随机染色, 每个点染黑的概率为 x , 染白的概率为 $1-x$.

对于任意凸多边形 P , 令事件 E_P 表示随机染色后多边形 P 边界上的点均染黑、外部的点均染白的事件. 显然, 对任何凸多边形 P, P' , 事件 $E_P, E_{P'}$ 互不包含, 故 $\sum_P x^{a(P)} (1-x)^{b(P)}$ 表示 $P(\bigcup_P E_P)$. 而对于任何一种染法, 可取凸多边形 P 为所有黑点的凸包, 故无论怎样染色, 总有一

个事件 E_p 会发生. 于是, $P(\bigcup_p E_p) = 1$.

从而, 原命题得证.

例 2 设 $n \in \mathbf{Z}_+$, 实数 $a_1, a_2, \dots, a_n \in (0, 1)$, 对于任意子集 $S \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$, 定义集函数

$$f(S) = \left(\prod_{i \in S} a_i \right) \left[\prod_{j \notin S} (1 - a_j) \right].$$

若 $\sum_{|S| \text{ 为奇数}} f(S) = \frac{1}{2}$, 证明: 存在某些 k , 使得 $a_k = \frac{1}{2}$ ($\sum_{|S| \text{ 为奇数}} f(S)$ 表示子集 S 遍历了 $\{1, 2, \dots, n\}$ 的所有有奇数个元素的子集).

(2014, 美国国家集训队训练题)

证明 令 $X = \sum_{|S| \text{ 为奇数}} f(S)$.

考虑 n 枚硬币, 每枚正面朝上的概率分别为 a_1, a_2, \dots, a_n . 则 X 表示有奇数枚硬币正面朝上的概率.

显然, 若存在一个 $a_k = \frac{1}{2}$, 则 $X = \frac{1}{2}$. 从

而, $X - \frac{1}{2}$ 可被 $\prod_{i=1}^n \left(a_i - \frac{1}{2} \right)$ 整除.

比较两者的次数, 均为 n , 故两者只相差一个首项系数.

于是, 结论成立.

2 运用数学期望的分解

运用数学期望解组合问题的步骤是先将问题看作随机事件, 把所求量视为一个随机变量, 并将其分解为若干个示性随机变量, 再分别进行概率计算, 最终累和即可.

例 3 在 $n \times n$ 的方格表中, $1, 2, \dots, n$ 各出现 n 次. 证明: 一定存在一行或一列, 至少有 $[\sqrt{n}]$ 个不同的数, 其中, $[x]$ 表示不超过实数 x 的最大整数.

(2004, 美国数学夏令营)

证明 随机地选出一行或一列, 这样一共有 $2n$ 种选法. 令随机变量 X 表示该行或列中含有不同数的个数.

记 I_i 为示性随机变量, 即若 i 出现在该行, 则 $I_i = 1$, 否则, $I_i = 0$.

$$\text{故 } X = \sum_{i=1}^n I_i.$$

$$\text{从而, } E(X) = \sum_{i=1}^n E(I_i).$$

注意到,

$$\begin{aligned} E(I_i) &= 0 \times P(I_i = 0) + 1 \times P(I_i = 1) \\ &= P(I_i = 1). \end{aligned}$$

为了计算其下界, 考虑最坏状态, 即 n 个 i 恰分布在 $[\sqrt{n}] \times [\sqrt{n}]$ 的方格表中. 则 n 个 i 至少要占据 $2[\sqrt{n}]$ 个不同的行或列.

而任意一行或一列的选法有 $2n$ 种, 故

$$P(I_i = 1) \geq \frac{2[\sqrt{n}]}{2n}.$$

进一步, $E(X) = nP(I_i) \geq [\sqrt{n}]$.

因此, 总有一行或一列, 其包含至少 $[\sqrt{n}]$ 个不同的数.

例 4 设 $S = \{0, 1, \dots, N^2 - 1\}$, A 为集合 S 的一个 N 元子集. 证明: 存在集合 S 的一个 N 元子集 B , 使得集合

$$A + B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\}$$

中的元素模 N^2 的余数的数目不少于集合 S 元素个数的一半.

(第 40 届 IMO 预选题)

证明 将等概率地、独立地从 N^2 个剩余系的元素中取 N 个数的集合记为 B (由于是独立地选, 则每次每个数被取出的概率为 $\frac{1}{N^2}$, 虽可能有元素会重复地选出, 但若证明存在一个不超过 N 个元素的子集符合题意, 则题目中要求的 N 元子集 B 亦自然存在). 用随机变量 X 表示集合 $A + B$ 中的不同元素个数.

对任意一元素 i , 恰有 N 个不同的元素 b , 使得 $i \in A + b$, 故 i 不出现在集合 $A + B$ 中的概率为 $\left(1 - \frac{N}{N^2}\right)^N$. 从而, i 出现在集合 $A + B$

中的概率为 $1 - \left(1 - \frac{N}{N^2}\right)^N$.

类似于例3,用 I_i 表示示性随机变量,即若 i 出现在集合 $A+B$ 中,则 $I_i=1$,否则, $I_i=0$.

$$\text{故 } E(X) = \sum_{i=1}^{N^2} E(I_i) = N^2 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{N}\right)^N\right].$$

由 $\left(1 - \frac{1}{N}\right)^{-N} = \left(\frac{N}{N-1}\right)^N = \left(1 + \frac{1}{N-1}\right)^N > e$, 则

$$\left(1 - \frac{1}{N}\right)^N < \frac{1}{e} < \frac{1}{2.7}.$$

代入后得

$$E(X) > N^2 \left(1 - \frac{1}{2.7}\right) > \frac{N^2}{2}.$$

因此,存在一个符合题意的集合 B ,使得 X 的值大于 $\frac{N^2}{2}$.

3 结合 C_x^k 的凸性

下面的例子需要用到 C_x^k 的凸性.

如当 $k=2$ 时,若 $\sum_{i=1}^n x_i = S (x_i \in \mathbf{Z}_+)$, 则

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n C_{x_i}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i}{2} \\ &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n} - \sum_{i=1}^n x_i \\ &\geq \frac{S^2 - Sn}{2} = nC_{\frac{S}{n}}^2. \end{aligned}$$

例5 杜马中有1600位议员,他们组成了16000个委员会,每个委员会有80名成员.证明:可以找出两个委员会,两者中至少有4位公共成员.

(1995—1996,全俄数学奥林匹克)

证明 随机地选出一对委员会,这样一共有 C_{16000}^2 种可能,用随机变量 X 表示这对委员会中相同委员的人数.记 I_i 为示性随机变量,即若 i 为这对委员会的公共委员时, $I_i=1$,否则, $I_i=0$.

$$\text{故 } X = \sum_{i=1}^{1600} I_i.$$

从而,由随机变量的可加性知

$$E(X) = \sum_{i=1}^{1600} E(I_i).$$

经计算得

$$E(I_i) = P(I_i=1) = \frac{C_{n_i}^2}{C_{16000}^2},$$

其中, n_i 表示委员 i 参加的委员会个数.

注意到, $\sum_{i=1}^{1600} n_i = 16000 \times 80$.

由 $C_{n_i}^2$ 的凸性知

$$E(X) = \sum_{i=1}^{1600} C_{n_i}^2 \geq 1600 \cdot \frac{C_{16000 \times 80}^2}{C_{16000}^2} = 3.995.$$

由于 X 为整数,故一定有一对委员会,其相同人数大于或等于4.

4 运用到一些代数不等式与组合结合的问题

例6是一道关于平衡向量的题.

例6 n 个 n 维向量 $v_1, v_2, \dots, v_n \in \mathbf{R}^n$, 每一个的长度为1,即

$$|v_i| = \sqrt{v_{1i}^2 + v_{2i}^2 + \dots + v_{ni}^2} = 1.$$

证明:存在 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \in \{1, -1\}$, 使得

$$|\varepsilon_1 v_1 + \varepsilon_2 v_2 + \dots + \varepsilon_n v_n| \leq \sqrt{n}.$$

证明 独立地、等概率地从 $\{1, -1\}$ 中取出 n 个数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, 记随机变量

$$X = |\varepsilon_1 v_1 + \varepsilon_2 v_2 + \dots + \varepsilon_n v_n|^2.$$

展开后得

$$\begin{aligned} X &= (\varepsilon_1 v_1 + \varepsilon_2 v_2 + \dots + \varepsilon_n v_n) \cdot \\ &\quad (\varepsilon_1 v_1 + \varepsilon_2 v_2 + \dots + \varepsilon_n v_n)^T \\ &= (\varepsilon_1 v_1 + \varepsilon_2 v_2 + \dots + \varepsilon_n v_n) \cdot \\ &\quad (\varepsilon_1 (v_1)^T + \varepsilon_2 (v_2)^T + \dots + \varepsilon_n (v_n)^T) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon_i \varepsilon_j v_i \cdot (v_j)^T, \end{aligned}$$

其中, $(v)^T$ 代表 v 的转置.

两边取数学期望,由线性可加性知

$$E(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E(\varepsilon_i \varepsilon_j) v_i \cdot (v_j)^T.$$

当 $i \neq j$ 时, $E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = E(\varepsilon_i) E(\varepsilon_j) = 0$;

当 $i=j$ 时, $E(\varepsilon_i^2) = 1$.

于是, $E(X) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot (v_i)^T = n$.

故一定存在至少一组 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \in \{1, -1\}$, 使得

$$|\varepsilon_1 v_1 + \varepsilon_2 v_2 + \dots + \varepsilon_n v_n| \leq \sqrt{n}.$$

例7 对于整数 $n (n \geq 2)$, 设实数 x_1, x_2, \dots, x_n 满足

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = 0,$$

$$x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 = 1.$$

对于任意的集合 $A \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$, 定义

$$S_A = \sum_{i \in A} x_i \text{ (若 } A \text{ 为空集, 则 } S_A = 0 \text{)}.$$

证明: 对于任意的正实数 λ , 满足 $S_A \geq \lambda$ 的集合 A 的个数最多为 $\frac{2^{n-3}}{\lambda^2}$, 并确定使等号成立的一切 x_1, x_2, \dots, x_n .^[3]

(2012, 美国数学奥林匹克)

证明 设集合 \mathcal{F} 为 $\{1, 2, \dots, n\}$ 的所有子集构成的子集族.

显然, $|\mathcal{F}| = 2^n$.

取集合 A 的示性函数 I_A , 即若 $i \in A$, 则 $I_A(i) = 1$, 否则, $I_A(i) = 0$.

$$\text{由题意知 } S_A = \sum_{i=1}^n I_A(i) x_i.$$

计算知

$$\sum_{A \in \mathcal{F}} (S_A)^2 = \sum_{A \in \mathcal{F}} \left(\sum_{i=1}^n I_A(i) x_i \right) \left(\sum_{j=1}^n I_A(j) x_j \right)$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{A \in \mathcal{F}} (I_A(i) I_A(j)) x_i x_j.$$

当 $i \neq j$ 时, 有 2^{n-2} 个集合 A 同时包含 i, j ;

当 $i = j$ 时, 有 2^{n-1} 个集合 A 同时包含 i, j .

$$\text{故 } \sum_{A \in \mathcal{F}} (S_A)^2$$

$$= 2^{n-2} \left(2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i, j \in \{1, 2, \dots, n\}} x_i x_j \right)$$

$$= 2^{n-2} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \right)$$

$$\therefore = 2^{n-2} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]$$

$$= 2^{n-2} (1 - 0) = 2^{n-2}.$$

事实上, 接下来的证明完全就是概率论中的切比雪夫不等式.

$$\text{记 } B_\lambda = \{A \in \mathcal{F} \mid S_A \geq \lambda\},$$

$$B'_\lambda = \{A \in \mathcal{F} \mid S_A \leq -\lambda\}.$$

因为 $x_1 + x_2 + \dots + x_n = 0$, 所以, 集合 B_λ, B'_λ 可通过取补集的运算构成双射, 即

$$|B_\lambda| = |B'_\lambda|.$$

构造集合函数

$$g(A) = \begin{cases} \lambda^2, & A \in B_\lambda \cup B'_\lambda; \\ 0, & A \notin B_\lambda \cup B'_\lambda. \end{cases}$$

于是, $S_A^2 \geq g(A)$.

$$\text{故 } \lambda^2 |B_\lambda \cup B'_\lambda| = \sum_{A \in \mathcal{F}} g(A)$$

$$\leq \sum_{A \in \mathcal{F}} S_A^2 = 2^{n-2}.$$

$$\text{从而, } |B_\lambda| \leq \frac{2^{n-3}}{\lambda^2}.$$

这便完成了结论中不等式的证明.

对于等号成立, 由最后一步不等式, 知应该对任意的集合 A 均有 $S_A^2 = g(A)$, 这只可能在 $(x_1, x_2, \dots, x_n) = (\lambda, -\lambda, 0, \dots, 0)$ 或其一个任意排列时才会发生. 由平方和为 1 的式子, 知正实数 $\lambda = \frac{\sqrt{2}}{2}$.

5 在图论问题中的运用

将图论中的一些概念和性质转化为概率表述, 结合数学期望的线性可加性, 便可得到计算式.

例8 某社团中, 每两人不是友好的就是敌对的. 设该社团有 n 个人及 q 个友好对, 且任三人中至少有一对人是敌对的. 证明: 该社团中至少有一名成员, 其敌人所组成的集合中, 友好对的数且不多于 $q \left(1 - \frac{4q}{n^2}\right)$.

(1995, 美国数学奥林匹克)

证明 随机取一人 v , 并用随机变量 X 表示与此人敌对的人中的友好对数目.

利用算两次得

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{\text{友好对 } e} E(I_e) \\ &= \sum_{\text{友好对 } e} \frac{1}{n} |\{v \mid \text{边 } e \text{ 的两端均与 } v \text{ 敌对}\}|. \end{aligned}$$

因为没有三人两两友好,所以,由上式可继续推得

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{\text{友好对 } e} \frac{1}{n} [(n-2) - |\{v \mid \text{边 } e \text{ 恰有一端与 } v \text{ 友好}\}|] \\ &= q \cdot \frac{n-2}{n} - \frac{1}{n} \sum_{\text{友好对 } e} |\{v \mid \text{边 } e \text{ 恰有一端与 } v \text{ 友好}\}|. \end{aligned}$$

用 d_v 表示与 v 友好的人数, K 表示社团中恰有两个友好对的三人组总数.

由前述的 C_x^2 的凸性知

$$K = \sum_v C_{d_v}^2 \geq n C_{\frac{2}{n}}^2.$$

由于每个这样的三人组有两条边,从而,被算了两次.

$$\begin{aligned} \text{故 } E(X) &= q \cdot \frac{n-2}{n} - \frac{1}{n} \cdot 2K \\ &\leq q \cdot \frac{n-2}{n} - \frac{1}{n} \cdot 2nC_{\frac{2}{n}}^2 = q \left(1 - \frac{4q}{n^2}\right). \end{aligned}$$

例 9 在一个有 n 个顶点的图 G 中,若不包含 p 阶完全图 K_p ,则图 G 的边数

$$|E| \leq \left(1 - \frac{1}{p-1}\right) \frac{n^2}{2},$$

其中, p 阶完全图 K_p 指的是有 p 个顶点且这 p 个顶点两两间均有边的图.^[4]

【注】本题即为托兰(Turan)定理.

证明 记图 G 的顶点为 v_1, v_2, \dots, v_n , 对应的度数分别为 d_1, d_2, \dots, d_n . 用 $\omega(G)$ 表示图 G 中最大完全图的顶点数,用排列 τ 表示图 G 中 n 个顶点的一个随机排列,显然有 $\frac{1}{n!}$ 种.

对于排列 τ ,用集合 C_τ 表示图 G 中的某些顶点,这些顶点在排列 τ 下,均与其前面的顶点相邻. 设随机变量 X 表示 C_τ 的顶点个数. 事实上, C_τ 的顶点构成了图 G 的一个完全图.

再用 X_i 为示性随机变量,即若 $v_i \in C_\tau$ 时, $X_i = 1$, 否则, $X_i = 0$. 于是, $X = \sum_{i=1}^n X_i$.

注意到, $v_i \in C_\tau$ 当且仅当所有 $n-1-d_i$ 个与 v_i 不相邻的顶点在它之后,而该事件的概率恰等于 v_i 在与这 $n-1-d_i$ 个顶点的排列中总排在第 1 个,即 $\frac{1}{n-d_i}$, 所以,

$$E(X_i) = \frac{1}{n-d_i}.$$

故 $E(|C_\tau|) = E(X)$

$$= \sum_{i=1}^n E(X_i) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n-d_i}.$$

又最大完全图一定比取出是完全图的随机变量的数学期望要大,结合柯西不等式知

$$\begin{aligned} |\omega(G)| &\geq E(|C_\tau|) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n-d_i} \\ &\geq \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n (n-d_i)} = \frac{n^2}{n^2 - 2|E|}. \end{aligned}$$

由题意得 $|\omega(G)| \leq p-1$.

代入后化简得

$$|E| \leq \left(1 - \frac{1}{p-1}\right) \frac{n^2}{2}.$$

6 对第 55 届 IMO 第 6 题的探索

以下的概率证法是基于美国队领队 Po-Shen Loh 在 2014 年 IMO 上提出的.

例 10 若平面上的一簇直线中没有两条直线平行,没有三条直线共点,则称其为“处于一般位置”. 一簇处于一般位置的直线将平面分割成若干区域,其中面积有限的区域称为这簇直线的“有限区域”. 证明:对于充分大的 n 及任意处于一般位置的 n 条直线,均可将其中至少 $\frac{2\sqrt{n}}{3}$ 条直线染成蓝色,使得每一个有限区域的边界均不全为蓝色的.

(改编自第 55 届 IMO 第 6 题)

证明 首先,计数 n 条一般位置的直线至多能分割出多少三角形和多边形(三条边以上的图形). 由于一共有 C_n^2 个交点,每个交点至多为两个三角形的顶点,而每个三角形共有三个顶点,于是,三角形的个数至多为 $\frac{2}{3}C_n^2$,即不超过 $\frac{1}{3}n^2$ (这样的放缩是因为题目要求估计充分大的 n ,这表明,阶数较小的量是可以忽略的,下同).

对于多边形,由欧拉定理

$$V - E + F = 2$$

(V, E, F 分别代表顶点个数、边数、面数,平面上为划分出来的小区域加一块涉及无穷远点的面,至于如何从立体图形转化到平面图形,可由欧拉球极投影来想像),而

$$E = (n - 2)n, V = C_n^2,$$

$$\text{则 } F = \frac{n^2 - 3n}{2} + 2, \text{ 即划分出的有限图形}$$

不超过 $\frac{n^2}{2}$ 块(其中还包括了三角形).

假设有概率为 p 的可能将每条直线染为蓝色. 则

$$E(\text{蓝色直线}) = np,$$

$$E(\text{蓝色三角形}) < \frac{1}{3}n^2p^3,$$

$$E(\text{蓝色有限区域}) < \frac{1}{2}n^2p^4.$$

更进一步地放缩知

$$E(\text{蓝色有限区域(三边以上图形)})$$

$$< \frac{1}{2}n^2p^4.$$

接下来考虑问题:对于每一块蓝色有限区域(无论是三角形还是多边形),只需对其任一条蓝边染回原色即可使其不是全蓝,从而,使得没有全蓝区域的蓝色直线数的数学期望至少为

$$np - \left(\frac{1}{3}n^2p^3\right) - \left(\frac{1}{2}n^2p^4\right) = np\left(1 - \frac{np^2}{3} - \frac{np^3}{2}\right).$$

因为题目要求估计的对象是充分大的 n ,所以,可忽略上式中较小项 $\frac{np^3}{2}$.

$$\text{设 } p = \frac{k}{\sqrt{n}}.$$

$$\text{代入后得 } \sqrt{n} \text{ 的系数为 } k\left(1 - \frac{k^2}{3}\right).$$

由均值不等式知

$$\left[k\left(1 - \frac{k^2}{3}\right)\right]^2 \leq \frac{3}{2} \left[\frac{\frac{2}{3}k^2 + \left(1 - \frac{k^2}{3}\right) + \left(1 - \frac{k^2}{3}\right)}{3} \right]^3 = \frac{4}{9}.$$

当 \sqrt{n} 的系数取最大值 $\frac{2}{3}$ 时, $k = 1$.

代入 $np\left(1 - \frac{np^2}{3} - \frac{np^3}{2}\right)$ 后知至少能保留

任 $\frac{2\sqrt{n}}{3} - \frac{1}{2}$ 条蓝色直线.

因此,当 n 充分大时,有方案染 $\frac{2\sqrt{n}}{3}$ 条直线为蓝色,使得每一个有限区域的边界均不全为蓝色的.

文[5]第六题的评注中,提到美国队领队 Po-Shen Loh 基于非初等的概率方法对充分大的 n 证明了 $\sqrt{n \lg n}$ 的情形,并鼓励参赛者继续研究探索.事实上,当时他运用的方法框架便是以上解法,其中,将计数部分放缩到了更佳的情形,用到了以下定理:

对于一个超图 G ,含有 N 个顶点,平均度数为 d ,所有的边的大小为 3. 假设任何两个顶点间至多有一条边联结,则可找到至少 $c \frac{N}{\sqrt{d}} \sqrt{\lg d}$ 个顶点,两两之间无连线,其中, c 为常数.[6]

需要解释的是,超图不同于以往的图,其每条边不是联结两个顶点,而是若干个顶点.在以上定理中,每条边便联结了三个顶点,并

且要求任意两个顶点间至多只有一条边.

回到 IMO 题目中, 可以将 n 条直线视为超图的顶点, 每块有限区域视为超图的边. 类似地, 假设有概率为 p 的可能将每条边染为蓝色, 将所有超过四条边的有限区域视为三角形或四边形. 从所有的蓝边中, 去除联结四个顶点的边及同时联结两个顶点的重复 3—边(这样的重复边至多两条, 因为原题中两条直线至多同时属于两个不同的三角形), 然后, 剩余的图便符合定理的要求且能估计出度数的平均值.

套用定理, 将定理中独立的顶点视为原题中需要染为蓝色的边, 便得到 $\sqrt{n \lg n}$ 的情形了.

练习 题

1. 有 n 位同学参加了 2014 年中国数学奥林匹克冬令营, 每位同学有一张准考证. 现收取所有的准考证并打乱顺序后再随机地分发给每一位学生. 假设 S 表示依旧拿到自己的准考证的学生数目. 证明: S 的数学期望为 1.

提示: 将 S 分解为每位学生的示性随机变量即可.

2. A_1, A_2, \dots, A_s 为 $\{1, 2, \dots, M\}$ 的一些子集. 假设 A_1, A_2, \dots, A_s 不相互包含(即没有一个 是另一个的子集), 令 $a_i = |A_i|$. 证明:

$$\sum_{i=1}^s \frac{1}{C_M^{a_i}} \leq 1.$$

(1981, 圣彼得堡数学竞赛(十年级))

提示: 令 $\sigma = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ 为 $\{1, 2, \dots, M\}$ 的一个随机排列, 这样的全体记为空间 Ω . E_i 表示 A_i 中的元素出现在 σ 的前 a_i 个的事件, 即 $\{x_1, x_2, \dots, x_{a_i}\} = A_i$ 的概率.

由于 A_i 之间互相不包含, 故事件 E_i 之间互相不包含.

$$\text{又 } P(E_i) = \frac{a_i! \cdot (M - a_i)!}{M!} = \frac{1}{C_M^{a_i}}, \text{ 故}$$

$$\sum_{i=1}^s \frac{1}{C_M^{a_i}} = P\left(\bigcup_{i=1}^s E_i\right) \leq P(\Omega) = 1.$$

3. 证明: 在一次有 799 支队参加的比赛中, 存在 14 支队, 可以被分成两组, 使得第一组中的所有队伍胜了第二组中的所有队伍.

(2008, 伊朗国家队选拔考试)

提示: 随机地选取七支队, 结合例 5 及 $C_{x_i}^7$ 的凸性即可得到结论.

4. n 个 n 维向量 $v_1, v_2, \dots, v_n \in \mathbf{R}^n$, 每一个的长度小于 1, 即

$$|v_i| = \sqrt{v_{1i}^2 + v_{2i}^2 + \dots + v_{ni}^2} \leq 1.$$

任取 n 个实数 $p_1, p_2, \dots, p_n \in [0, 1]$, 记向量 $w = p_1 v_1 + p_2 v_2 + \dots + p_n v_n$.

证明: 存在 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \in \{1, 0\}$, 记向量 $v = \varepsilon_1 v_1 + \varepsilon_2 v_2 + \dots + \varepsilon_n v_n$.

$$\text{则 } |w - v| \leq \frac{\sqrt{n}}{2}.$$

提示: 独立地从 $\{1, 0\}$ 中取出 n 个数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, 其中,

$$P(\varepsilon_i = 1) = p_i, P(\varepsilon_i = 0) = 1 - p_i.$$

接下来仿例 6 即可.

5. 对 $3 \leq k \leq n$, 令 $X = \{1, 2, \dots, n\}$, F_k 为 X 中一些 k 元子集的集合族, 使得其中任两个 k 元子集至多有 $k-2$ 个共同的元素.

(1997, 中国台湾数学奥林匹克)

提示: 类似例 8 的计算, 放缩时需要运用不等式

$$C_t^k \leq 3 \times 2^{t-3} \quad (3 \leq k \leq t).$$

这可用数学归纳法证明.

参考文献:

- [1] 宋波, 安永宏, 杨志龙. 高三概率复习策略实验研究[J]. 数学教育学报, 2013(4).
- [2] 第 47 届 IMO 预选题(下)[J]. 中等数学, 2007(11).
- [3] 李 翠 译. 2012 美国数学奥林匹克[J]. 中等数学, 2013(增刊二).
- [4] Martin Aigner, Gunter M. Ziegler. Proofs from the Book [M] 4th ed. Springer-Verlag Berlin and Herdelberg GmbH & Co. K. 2010.
- [5] 第 55 届 IMO 试题解答[J]. 中等数学, 2014(9).
- [6] R. Duke, H. Lefmann, V. Rodl. On Uncrowded Hypergraphs [J]. Random Structures and Algorithms, 1995(6).