

集萃_1

题1

定义：三维欧氏空间中的点称为整点，当且仅当 x, y, z 坐标都是整数，例如 $(1, 1, 2)$ ， $(-2, 6, -2)$ 。从空间中任取 n 个整点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ ，再从它们之中任取两个不同的点 $P_i, P_j (i \neq j)$ ， P_i, P_j 的中点**不会**是整点。问： n 的最大值为_____

答案：8

解析：

如果两个整点的中点还是整点，说明 x, y, z 坐标的奇偶性相同（因为奇加奇得偶，偶加偶得偶，而偶数除以二一定是整数）。 x, y, z 的奇偶性一共能组合出8种情况：（奇，奇，奇），（奇，偶，奇），（偶，奇，奇），（奇，奇，偶），（奇，偶，偶），（偶，偶，奇），（偶，奇，偶），（偶，偶，偶）。那么 $n > 8$ 时，也就是任取空间中至少9个整点时，其中必然存在两个整点的奇偶性相同，从而它们两个的中点也是整点。现在题目要求所有的中点都不能是整点，所以 n 最大为8（也就是取遍了所有奇偶性的组合）。

题2

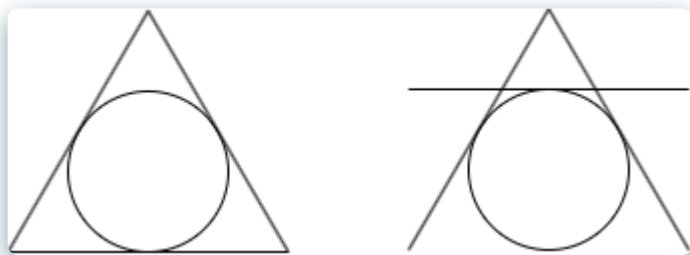
平面直角坐标系中有三条直线

$l_1: \cos \theta_1 \cdot x + \sin \theta_1 \cdot y = 1, l_2: \cos \theta_2 \cdot x + \sin \theta_2 \cdot y = 1, l_3: \cos \theta_3 \cdot x + \sin \theta_3 \cdot y = 1$ ，其中 $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \theta_3$ 。若 l_1, l_2, l_3 围成一个等边三角形，其面积为 S ，则 S 的取值集合为_____

答案： $\{\frac{\sqrt{3}}{3}, 3\sqrt{3}\}$

解析：

观察三条直线的结构，容易注意到它们到原点的距离都为1。所以，它们都是单位圆的切线。又因为围成了等边三角形，所以有两种情形：要么单位圆作为等边三角形的内切圆，要么单位圆作为等边三角形的外切圆（注意不是外接圆）。如下图所示：



题3

任取一户有两个孩子的家庭，已知其中一个是女孩，则另一个是女孩的概率为_____

H2

答案： $\frac{1}{2}$ ……还是 $\frac{1}{3}$ ？

本题是一道争议很大的题目，被称为两孩悖论。在著名的概率论科普读物《醉汉的脚步》中，作者认为本题的答案是 $\frac{1}{3}$ ，同时他还得到了一个更加违反常识的结论：如果把条件“已知其中一个是女孩”改为“已知其中一个是女孩，名字叫佛罗里达”，则结果变成 $\frac{1}{2}$ 。

我知道，第一次看到上面的答案时，你会感到惊讶。实际上，上面的答案虽然有一定的道理，但也并不完全正确。迄今为止，包括《醉汉的脚步》作者蒙洛迪诺在内的很多人都对上面的答案提出了质疑。

我们先来看看蒙洛迪诺在书中写提出的解法：

- ▶ 这是一个古典概型问题，考虑出生顺序，样本空间为{男，男}，{男，女}，{女，男}，{女，女}，现在已知有一个是女孩，那么{男，男}这种情况就不可能了，样本空间缩小为{女，女}，{男，女}，{女，男}，因此概率为 $\frac{1}{3}$ 。
- ▶ 如果把条件改成“已知其中一个是女孩，名字叫佛罗里达”，我们可以用女F表示叫佛罗里达的女孩，女NF表示不叫佛罗里达的女孩，这样样本空间就变成{男，男}，{女F，男}，{男，女F}，{女NF，男}，{男，女NF}，{女F，女NF}，{女NF，女F}，现在已知有一个叫佛罗里达的女孩，那么样本空间缩小为{女F，男}，{男，女F}，{女F，女NF}，{女NF，女F}，因此概率为 $\frac{1}{2}$ 。

上面的解答看起来天衣无缝，但得到的结果非常违反直觉。到底错在哪？

严格来说，本题的题干是模糊不清的，因而对题干的的不同理解，会导出不同的答案。

如果你认为本题的答案是 $\frac{1}{2}$ ，你应该是这么想的：这是一个古典概型问题，不考虑出生顺序，样本空间为{男，男}，{男，女}，{女，女}，现在已知有一个是女孩，那么{男，男}这种情况就不可能了，样本空间变成{女，女}，{男，女}，因此概率为 $\frac{1}{2}$ 。

问题在于样本空间上面，究竟要不要考虑出生的先后顺序？

在本题中，这个争议是解决不了的，因为本题的条件：“已知其中一个是女孩”叙述模糊，不管是从中文来理解，还是从英文原文来理解，都无从确定是否“特指”。

题4

设 n 个随机事件 A_1, A_2, \dots, A_n ，发生的概率分别为 p_1, p_2, \dots, p_n ，满足 $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ ，其中 $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_n$ ，并且 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 都是 $\frac{1}{2}$ 的幂。

H2

证明： $p_1 = p_2$ 。

解析：

我们设

$$p_i = \left(\frac{1}{2}\right)^{k_i}, (i = 1, 2, \dots, n)$$

应有 $k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_n$ ，我们要证明 $k_1 = k_2$ 。根据 $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ ，有

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{k_1} + \left(\frac{1}{2}\right)^{k_2} + \dots + \left(\frac{1}{2}\right)^{k_n} = 1$$

我们把它写成

$$1 + 2^{k_1-k_2} + 2^{k_1-k_3} + \dots + 2^{k_1-k_n} = 2^{k_1}$$

注意到右边是偶数，所以左边也是偶数。那么 $2^{k_1-k_2} + 2^{k_1-k_3} + \dots + 2^{k_1-k_n}$ 就应该是奇数，说明其中有指数为0的项（有奇数个，总之至少有一个）。因此至少我们知道 $k_1 - k_2$ 为0（因为它是最小的指数），从而 $k_1 = k_2$ 。即 $p_1 = p_2$ 。

注：这个问题看似单薄，实则背景深厚。所有概率均为 $\frac{1}{2}$ 的幂，这样的情况非常特别，在很多地方都有应用。就我所知道的而言，计算机科学中的Huffman编码就是在这样的情况下，取到平均编码长度的下界。

题5

设 $a, b \in \mathbb{R}$, 若对于任意 $x \in [-1, 1]$, 都有 $|x^2 + ax + b| \leq 1$, 则 a 的取值范围是

H2

答案: $[2 - 2\sqrt{2}, -2 + 2\sqrt{2}]$

解析:

这道题目可谓是把数学“**题干越短，题目越难**”的特点展现得淋漓尽致。没有接触过数学竞赛的正常高中生，如果能独立地做出这道题，可以说是非常非常不错的了。

曾经，浙江卷自主命题的时候，其一大特点就是层出不穷的绝对值。绝对值，这个数学概念看似简单，实则深奥无比，在绝对值上大做文章的难题比比皆是。

本题就是这样一道绝对值难题，它其实有一个背景，称为“**切比雪夫最佳逼近**”，只不过这个背景实在是过于深邃，没有一定竞赛基础的话很难真正弄懂，所以，我就以最通俗易懂的高中数学方法来解决这道题目。

设 $f(x) = x^2 + ax + b, x \in [-1, 1]$, 根据题目条件, $|f(x)|$ 的最大值为1。那么很自然的想到, 要把 $|f(x)|$ 的图像给画出来。

这是个什么样的函数? 二次函数套绝对值, 它在 $[-1, 1]$ 内的图像应该有5种情况:



我们先来考虑最复杂的**Case 1**:

要想出现这样的图像, 说明 $f(x)$ 的对称轴在 $[-1, 1]$ 内, 并且 $f(x)$ 的最小值要小于0, 把这两个条件转换成数学语言, 就是:

$$-1 < -\frac{a}{2} < 1 \quad (1)$$

$$\frac{4b - a^2}{4} < 0 \quad (2)$$

也就是

$$-2 < a < 2$$

$$b < \frac{a^2}{4}$$

此时 $|f(x)|$ 的最大值等于 $\max\{f(-1), -f(-\frac{a}{2}), f(1)\}$, 即

$$\begin{aligned} \max_{[-1,1]}|f(x)| &= \max\{f(-1), -f(-\frac{a}{2}), f(1)\} \\ &= \max\{-a + b + 1, \frac{a^2 - 4b}{4}, a + b + 1\} \end{aligned}$$

根据题意, 上面这个最大值小于等于 1 , 说明

$$-a + b + 1 \leq 1$$

$$\frac{a^2 - 4b}{4} \leq 1$$

$$a + b + 1 \leq 1$$

化简上面的式子, 并结合 (1),(2) , 我们有

$$b \leq a \quad (3)$$

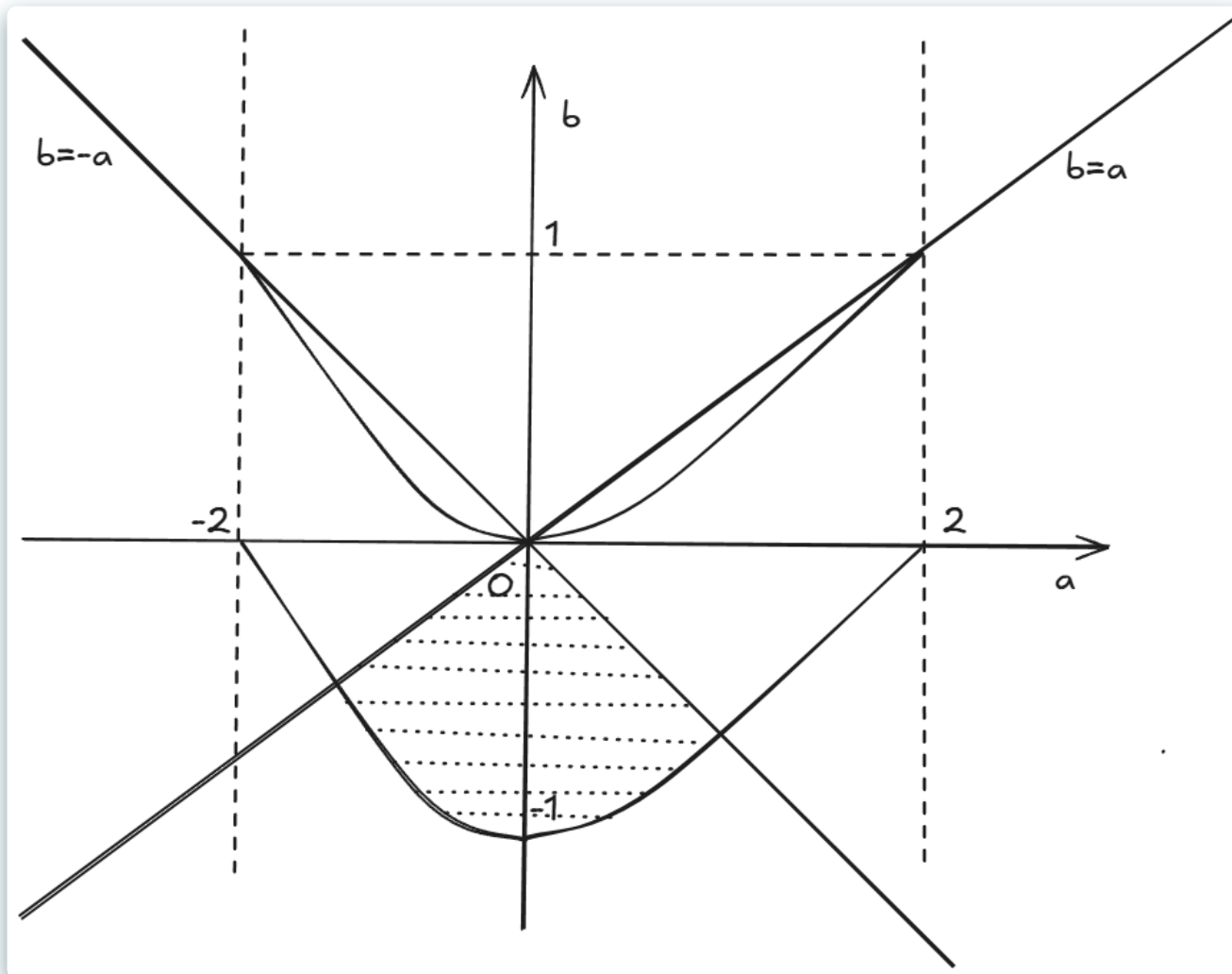
$$b \geq \frac{a^2}{4} - 1 \quad (4)$$

$$b \leq -a \quad (5)$$

$$-2 < a < 2 \quad (6)$$

$$b \leq \frac{a^2}{4} \quad (7)$$

上面这个不等式组, 已经指明了 a, b 的范围。我们在平面直角坐标系中画出该不等式组表示的区域:



如图，点 (a, b) 的范围用点线描绘了出来。它是由 $b = \frac{a^2}{2}, b = \frac{a^2}{4} - 1, b = a, b = -a$ 四条曲线/直线包围出来的区域，包括边界。因此 $2 - 2\sqrt{2} \leq a \leq 2\sqrt{2} - 2$ 。

对于其它 4 种情况，做法是一样的，留给读者自行解决。

题6

(1) 证明：不存在 7 条棱的多面体。

H2 (2) 已知对于任意多面体，其面数 ϕ ，顶点数 v ，边数 ε 满足： $v + \phi - \varepsilon = 2$ 。证明：正多面体的面数只能是 4, 6, 8, 12, 20。

解析：

首先我们明确两个关系，在之后的解题中很有用：

设多面体的面数为 ϕ ，顶点数为 v ，边数为 ε ，每个面上分别有 $m_1, m_2 \cdots m_\phi$ 条边，每个顶点分别连出了 $n_1, n_2 \cdots n_v$ 条边，则有：

$$m_1 + m_2 + \cdots m_\phi = 2\varepsilon$$

$$n_1 + n_2 + \cdots n_v = 2\varepsilon$$

这两个等式其实很显然，因为每条边都属于两个面，同时也属于两个顶点，因此每条边都被计算了两次。

(1) 反证法。假设存在一个 7 条棱的多面体，它的面数为 ϕ ，顶点数为 v ，边数为 $\varepsilon = 7$ 。

因为每个面上至少有 3 条边，所以 $3\phi \leq 2v = 14$ ，所以 $\phi \leq 4$ ，又因为 $\phi \geq 4$ （三个面不能构成多面体），故 $\phi = 4$ 。但是四面体的边数为 6，故假设不成立，也就是不存在 7 条棱的多面体。

(2) 设正多面体的面数为 ϕ ，顶点数为 v ，边数为 ε ，从每个顶点连出的边数为 δ ，每个面都是正 n 边形，则：

$$v + \phi - \varepsilon = 2$$

$$n \cdot \phi = 2\varepsilon$$

$$\delta \cdot v = 2\varepsilon$$

解得

$$(2n + 2\delta - \delta n)\phi = 4\delta$$

分下面几种情况讨论：

► $\delta = 3$ ，则 $(6 - n)\phi = 12$

- $n = 3$ ， $\phi = 4$ ，即正四面体，每个面都是正三角形
- $n = 4$ ， $\phi = 6$ ，即正六面体，每个面都是正四边形
- $n = 5$ ， $\phi = 12$ ，即正十二面体，每个面都是正五边形

► $\delta = 4$ ，则 $(8 - 2n)\phi = 16$

- $n = 3$ ， $\phi = 8$ ，即正八面体，每个面都是正三角形

▶ $\delta = 5$, 则 $(10 - 3n)\phi = 20$

▪ $n = 3, \phi = 20$, 即正二十面体, 每个面都是正三角形

▶ $\delta > 5$, 这种情况是不成立的, 留给读者作为练习。

证毕!

注: 本题中的公式 $v + \phi - \varepsilon = 2$ 称为**欧拉公式**。

题7

设

H2

$$P = \frac{a}{a+b} + \frac{b}{b+c} + \frac{c}{c+a} \quad a, b, c > 0$$

关于 P , 下列说法中正确的是()

A. P 有最大值, 无最小值

B. P 有最小值, 无最大值

C. P 既有最大值又有最小值

D. P 既没有最大值又没有最小值

答案: D

解析:

这道题比较考验代数功底。

首先, P 可以放缩为

$$P > \frac{a}{a+b+c} + \frac{b}{a+b+c} + \frac{c}{a+b+c} = 1$$

那么 P 有没有最小值呢? 我们取 $a \rightarrow 0, b \rightarrow 0$, 则 $P \rightarrow 1$, 所以 P 可以无限趋近于 1 , 没有最小值。

另一方面, P 还可以放缩为

$$P < \frac{a+c}{a+b+c} + \frac{b+a}{a+b+c} + \frac{c+b}{a+b+c} = 2$$

我们取 $a \rightarrow 0, b \rightarrow +\infty$, 则 $P \rightarrow 2$, 所以 P 可以无限趋近于 2, 没有最大值。

题8

H2 (2022-武汉四调) 某同学在课外阅读时了解到概率统计中的切比雪夫不等式, 该不等式可以使人们在随机变量 X 的期望 $E(X)$ 和方差 $D(X)$ 存在但其分布未知的情况下, 对事件 “ $|X - E(X)| \geq \varepsilon$ ” 的概率作出上限估计, 其中 ε 为任意正实数。切比雪夫不等式的形式为: $P(|X - E(X)| \geq \varepsilon) \leq f(D(X), \varepsilon)$, 其中 $f(D(X), \varepsilon)$ 是关于 $D(X)$ 和 ε 的表达式。由于记忆模糊, 该同学只能确定 $f(D(X), \varepsilon)$ 的具体形式是下列四个选项中的一种。请你根据所学相关知识, 确定该形式是 ()

- A. $D(X) \cdot \varepsilon$ B. $\frac{1}{D(X) \cdot \varepsilon}$ C. $\frac{\varepsilon^2}{D(X)}$ D. $\frac{D(X)}{\varepsilon^2}$

答案: D

解析:

这道题目比较创新, 解法也多种多样。一种比较简单的方法是使用量纲的思想。

所谓量纲, 通俗来说就是单位: 米、千克、秒、伏特……

物理公式 (经验公式除外) 都严格遵循量纲守恒, 公式两边的量纲必须一致。其实, 数学公式也是如此。

例如海伦公式:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$$

左边的面积 S 的量纲是 2 次的 (你可以想象成平方米), 右边的量纲是 $4 \times \frac{1}{2} = 2$ 次的, 满足量纲守恒。不知道你发现没有, 这个所谓的量纲守恒其实就是齐次。一般地, 数学中的公式都是齐次的。

回到本题，切比雪夫不等式 $P(|X - E(X)| \geq \varepsilon) \leq f(D(X), \varepsilon)$ 的左边是概率，概率值是个常数，所以应该是 0 次的，从而右边也应该是 0 次的。观察四个选项，是 0 次的只有 C 和 D。（注意 $D(X)$ 是 2 次， ε 是 0 次）

然后我们要在 C 和 D 中选。 $|X - E(X)| \geq \varepsilon$ 这个不等式刻画了 X 的**中心偏离程度**，而方差 $D(X)$ 越小，中心偏离程度应该越小，所以方差应该在分子上，故选 D

□

题9

空间直角坐标系中，有一个棱长为 4 的正四面体 $ABCD$ ，顶点 A, B 分别在 x 轴和 y 轴上运动。设坐标原点为 O ，正四面体 $ABCD$ 的中心为 P ，则 $|PO|$ 的取值范围是

H2

答案： $[2 - \sqrt{2}, 2 + \sqrt{2}]$

解析：

令人叹为观止的一道题。

AB 在 x 轴和 y 轴上滑动的时候，相当于把坐标系看成参考系，正四面体围绕着坐标系运动。现在我们反过来想，把正四面体看成参考系，于是坐标系绕着正四面体运动，也就是 O 在运动。注意到 $\angle AOB$ 始终为 90° ，因此点 O 的轨迹是以 AB 为直径的球！后面就很简单了，留给读者作为练习。