

启明数学考试（合集）

学数华科 转专业交流群

Last Modified: 2024 年 9 月 7 日

目录

前言	v
1 2024 年启明考试数学部分	1
2 2023 年启明考试数学部分	7
3 2022 年启明考试数学部分	11
4 2021 年启明考试数学部分	17
5 2019 年启明考试数学部分	21
6 2015 年启明考试数学部分	27
7 2014 年启明考试数学部分	33

数学化学科

前言

抽了空重新整理了一下往年题，因为之前的版本有些不太美观 (taichoule)，留了更多空出来方便大家写字。这个版本只是重制，肯定有些许错误没有纠正，如果发现错误请加我好友 (QQ: 1363033313) 勘误。选择这条路的 xdx 请考虑清楚各种利弊，再作出最后的选择，希望能做出无悔于自己的决定！最后附上我之前写下的关于启明考试转专业的一些观点，希望能帮助到大家：

1 关于选择启明考试转专业

1 关于启明考试

启明选拔考试分为初始和复试，初试一般在军训前，复试一般在军训后。初试主要为考试的形式，考察的科目包括：数学、英语和综合。

- **数学：**难度略高于高考，远低于联赛一试。详情可参考群文件《转专业-数学(时间匆忙先写一点)》，看看往年真题足够。
- **英语：**英语听力难度六级以上，阅读难度略大于高考。备考策略：无，听力自求多福，阅读有高中基础足够（英语听力一般的同学可以选择不听听力直接做阅读）。
- **综合：**变化较大，2023 年试题可以参考转专业群的群文件。备考策略：无，随机应变是最好的准备。

复试主要为面试，各学院根据初试成绩确定复试名单并公布，复试的问题包括但不限于：2 分钟自我介绍（部分学院要求纯英自我介绍），高考成绩，未来规划，报考原因等。关于面试可能问的问题，转专业群收集了一些创新班的面试问卷，可以加群自行查询

2 关于创新班的优点

1. 创新班的保研率在 40% 至 50% 左右（除启明班以及未来技术学院），相较于普通班更高。
2. 大一下学期可以选择一对一指导导师，详情可参考《华中科技大学实验班管理办法》

3 关于启明班的缺点

1. 创新班、启明班并非重点班，不一定比普通班好，不一定适合所有人，并且实验班（除某些特殊班型）所获得的毕业证和面上班的毕业证没有任何区别。
2. 创新班共通的特点是课业压力大，与面上班相比课程的难度要大得多（如启明学院的一元分析学），由此的结果就是启明班的加权成绩会更低，可能会让你保研外校更困难，甚至对申请出国也有一定影响。
3. 创新班虽较面上班有更高的保研率，但这并不意味着你比面上班更容易保研，30 人选出 12 人和 300 人选出 75 人并不是一个概念。
4. 创新班有更好的师资配置，但这仅仅意味导师有更强的科研水平（其实也不一定，笔者见识过不靠谱的老师），并不意味着有更好的教学水平。

4 结论

报考启明班请慎重考虑，强烈建议先找往届对应启明班的学长了解清楚情况，再选择是否报考。

PS: 打上水印只是想保护一下知识产权，因为这个文件肯定会流向外界啦。有转专业需求的同学欢迎加入华科转专业交流群 (369787431)，另外讨论数学问题可以加入 24 级学数华科 (961040381)，笔者曾经也是 23 级的群主哦^_^

Chapter 1

2024 年启明考试数学部分

1 填空题 (每题 11 分)

1. 若 $\alpha, \beta, \delta, \gamma (\alpha > \beta > \delta > \gamma)$ 为整数, 且 $2^\alpha + 2^\beta + 2^\delta + 2^\gamma = 20\frac{5}{8}$, 则 $(\alpha + \beta + \delta + \gamma - 1)^{2024}$ 的值为。
2. $\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^{12}$ 的整数部分为
3. 设 $f(x) = (2x^5 + 2x^4 - 53x^3 - 57x + 54)^{2023}$, 则 $f\left(\frac{\sqrt{111}-1}{2}\right)$ 的值为
4. 集合 $\Delta = \{1, 2, 3, 5, 6\}$ 的全部非空子集的元素和为
5. 在 $(-1, 1)$ 上任意取两个数, 则这两个数之和小于 0.4 的概率为
6. 直三棱柱 $ABC-A'B'C'$, 侧棱长 4, 底面边长都为 2, 过 A 点截面交 $BB' CC'$ 于 $M N$, 若 $\triangle AMN$ 为直角三角形, 求三角形面积最大值
7. 若 $\theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \pi\right)$, 则 $\frac{2\sin\theta + 4\cos\theta + 5}{\sin\theta + \cos\theta + 1}$ 的最小值为

2 证明题 (本题 10 分)

证明: 若对于 $\forall x, y \in (-\infty, +\infty)$, 有 $|f(x) - f(y)| \leq |x - y|^2$, 则对于每个正整数 n , 设 $\forall a, b \in (-\infty, +\infty)$, 有 $|f(b) - f(a)| \leq \frac{|b - a|^2}{n}$ 。

3 证明题 (本题 13 分)

在数学中, 广义距离是泛函分析中最基本的概念之一。对平面直角坐标系中两个点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$, 记

$$|P_1P_2|_t = \max \left\{ \frac{|x_1 - x_2|}{1 + |x_1 - x_2|}, \frac{|y_1 - y_2|}{1 + |y_1 - y_2|} \right\}$$

称 $|P_1P_2|_t$ 为点 P_1 与点 P_2 之间的 “t-距离”, 其中 $\max\{p, q\}$ 表示 p, q 中较大者。

证明: 对任意点 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$,

$$|P_1P_3|_t \leq |P_1P_2|_t + |P_2P_3|_t$$

4 参考答案

1 填空题 (每 11 分)

1. Solution. 1

注意到 $2^\alpha + 2^\beta + 2^\delta + 2^\gamma = \frac{165}{8} \Rightarrow 2^{\alpha+3} + 2^{\beta+3} + 2^{\delta+3} + 2^{\gamma+3} = 165$ 现在需要找到一组整数 $\alpha, \beta, \delta, \gamma$ 使得方程成立, 注意到: $165 = 2^7 + 2^5 + 2^2 + 2^0$ 解得: $\alpha = 4, \beta = 2, \delta = -1, \gamma = -3$ 故 $(\alpha + \beta + \delta + \gamma - 1)^{2024} = 1$ 。

2. Solution. 321

注: 本题是 2022 年启明考试原题, 解析可参考 2022 年启明考试数学部分参考答案

3. Solution. -1

令 $t = \frac{\sqrt{111} - 1}{2}$, 则 $2t^2 + 2t - 55 = 0$ 。

故 $f(t) = ((2t^2 + 2t - 55)(t^3 + t - 1) - 1)^{2023} = (-1)^{2023} = -1$ 。

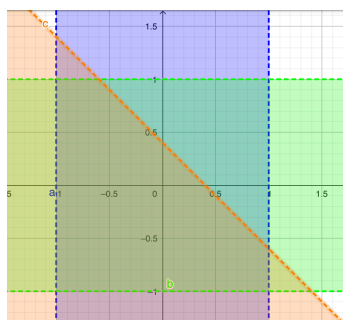
4. Solution. 272

对于集合中的每个元素, 它在所有子集中出现的频率是相同的。由于集合的大小是 5, 每个元素在一半的非空子集中都会出现。集合的非空子集总共有 $2^5 - 1 = 31$ 个, 而每个元素将出现在 $2^{(5-1)} = 16$ 个子集中。

每个元素在一半的子集中出现, 因此总和可以通过将每个元素乘以其出现次数 16 并相加来计算最终结果: $16 \times (1 + 2 + 3 + 5 + 6) = 272$

5. **Solution.** 0.68

在 $(-1,1)$ 上任取 2 个数, 设两数为 x, y , 作图:



$$\text{两数之和小于 } 0.4, \therefore \begin{cases} -1 < x < 1 \\ -1 < y < 1 \\ x + y < 0.4 \end{cases}$$

$$\therefore \text{两数之和小于 } 0.4 \text{ 的概率为 } p = \frac{S_{\text{阴}}}{4} = \frac{4 - S_{\triangle ABC}}{4} = \frac{4 - \left(\frac{1.6 \times 1.6}{2}\right)}{4} = 1 - 0.32 = 0.68$$

6. **Solution.** $\sqrt{17}$

设 $CM = x$, $BN = y$, $x, y \in [0, 4]$. 不妨设 $\angle AMN = 90^\circ$, 则 $AN^2 = MN^2 + AQ^2$, 即 $4 + y^2 = 4 + x^2 + 4 + (y - x)^2$, 整理得: $x^2 - xy + 2 = 0$, $y = \frac{x^2 + 2}{x} = x + \frac{2}{x}$. 又 $y \leq 4$, 所以 $x + \frac{2}{x} \leq 4$. 解得 $2 - \sqrt{2} \leq x \leq 2 + \sqrt{2}$.

设 $\triangle ANN$ 的面积为 S , 则

$$\begin{aligned} 4S^2 &= (4 + x^2) \cdot [4 + (y - x)^2] \\ &= (4 + x^2) \cdot \left(4 + \frac{4}{x^2}\right) \\ &= 20 + 4x^2 + \frac{16}{x^2} \\ &= 20 + 4 \left(x^2 + \frac{4}{x^2}\right) \end{aligned}$$

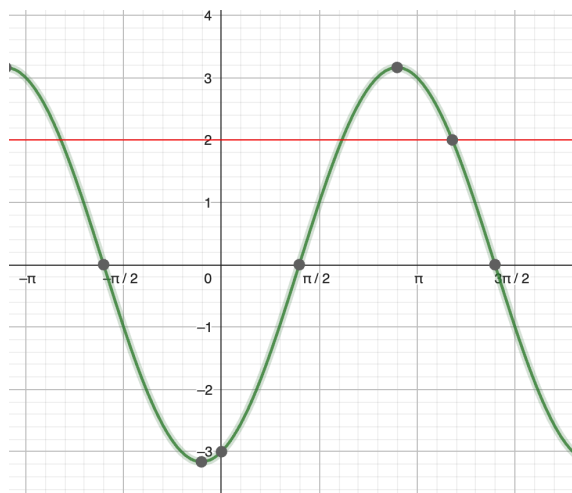
这个函数在 $[2 - \sqrt{2}, \sqrt{2}]$ 上单调递减, 在 $[\sqrt{2}, 2 + \sqrt{2}]$ 上单调递增, 最大值是 $20 + 4 \times 12 = 68$

所以 $S_{\max} = \sqrt{17}$.

7. **Solution.** $1 + \sqrt{6}$

$$\frac{2 \sin \theta + 4 \cos \theta + 5}{\sin \theta + \cos \theta + 1} = 2 + \frac{2 \cos \theta + 3}{\sin \theta + \cos \theta + 1}$$

令 $f(\theta) = \frac{2 \cos \theta + 3}{\sin \theta + \cos \theta + 1}$, $f'(\theta) = \frac{\sin \theta - 3 \cos \theta - 2}{(\sin \theta + \cos \theta + 1)^2}$, 可以画出导函数分子的图像:



易知当 $\sin \theta - 3 \cos \theta - 2 = 0$, $\theta \in (\frac{\pi}{2}, \pi)$ 取最小值, 容易解得此时 $\cos \theta = \frac{-6 + \sqrt{6}}{10}$, $\sin \theta = \frac{2 + 3\sqrt{6}}{10}$, 故 $\left(\frac{2 \sin \theta + 4 \cos \theta + 5}{\sin \theta + \cos \theta + 1} \right)_{\min} = 1 + \sqrt{6}$

2 证明题 (本题 10 分)

Proof. 注意到:

$$\begin{aligned} |f(a) - f(b)| &= \left| \sum_{i=0}^{n-1} f\left(a + i \frac{b-a}{n}\right) - f\left(a + (i+1) \frac{b-a}{n}\right) \right| \\ &\leq \sum_{i=0}^{n-1} \left| f\left(a + i \frac{b-a}{n}\right) - f\left(a + (i+1) \frac{b-a}{n}\right) \right| \\ &\leq \sum_{i=0}^{n-1} \left| a + i \frac{b-a}{n} - \left(a + (i+1) \frac{b-a}{n}\right) \right|^2 \\ &\leq \frac{|a-b|^2}{n} \end{aligned}$$

证毕

3 证明题 (本题 13 分)

Proof. 我们知道函数 $f(x) = \frac{x}{1+x}$ 在 $[0, +\infty)$ 上递增. 则

$$\frac{|x+y|}{1+|x+y|} \leq \frac{|x|+|y|}{1+|x|+|y|} = \frac{|x|}{1+|x|+|y|} + \frac{|y|}{1+|x|+|y|} \leq \frac{|x|}{1+|x|} + \frac{|y|}{1+|y|},$$

于是

$$\frac{|x_1 - x_3|}{1 + |x_1 - x_3|} = \frac{|x_1 - x_2 + x_2 - x_3|}{1 + |x_1 - x_2 + x_2 - x_3|} \leq \frac{|x_1 - x_2|}{1 + |x_1 - x_2|} + \frac{|x_2 - x_3|}{1 + |x_2 - x_3|}$$

$$\frac{|y_1 - y_3|}{1 + |y_1 - y_3|} = \frac{|y_1 - y_2 + y_2 - y_3|}{1 + |y_1 - y_2 + y_2 - y_3|} \leq \frac{|y_1 - y_2|}{1 + |y_1 - y_2|} + \frac{|y_2 - y_3|}{1 + |y_2 - y_3|}$$

于是

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \frac{|x_1 - x_3|}{1 + |x_1 - x_3|}, \frac{|y_1 - y_3|}{1 + |y_1 - y_3|} \right\} \\ & \leq \max \left\{ \frac{|x_1 - x_2|}{1 + |x_1 - x_2|} + \frac{|x_2 - x_3|}{1 + |x_2 - x_3|}, \frac{|y_1 - y_2|}{1 + |y_1 - y_2|} + \frac{|y_2 - y_3|}{1 + |y_2 - y_3|} \right\} \\ & \leq \max \left\{ \frac{|x_1 - x_2|}{1 + |x_1 - x_2|}, \frac{|y_1 - y_2|}{1 + |y_1 - y_2|} \right\} + \max \left\{ \frac{|x_2 - x_3|}{1 + |x_2 - x_3|}, \frac{|y_2 - y_3|}{1 + |y_2 - y_3|} \right\} \end{aligned}$$

即

$$|P_1 P_3|_t \leq |P_1 P_2|_t + |P_2 P_3|_t.$$

注：本题出自合肥二模 2024

数学全科

Chapter 2

2023 年启明考试数学部分

1 填空题 (每题 9 分)

1. 若 α, β 为正整数且 $\alpha^2 + \beta^2 = 3025$ 则 $\alpha + \beta =$
2. $f(x) + f\left(\frac{1}{\sqrt[3]{1-x^3}}\right) = x^3$. 则 $f(-1) =$
3. $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sin^2 \sqrt{n^2 + n\pi}$ 的值为
4. β 为锐角. 则 $\left(1 + \frac{1}{\sin \beta}\right) \left(1 + \frac{1}{\cos \beta}\right)$ 最小值为
5. $\frac{x^2}{m} + \frac{y^2}{p} = 1$ 与 $\frac{x^2}{n} - \frac{y^2}{p} = 1$ ($m, n, p > 0$) 有公共焦点 F_1, F_2 , 并且公共交点为 Q . 则 $S_{\triangle QF_1F_2} =$
6. 设 ε 为 1 的 7 次方根 $\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon^2} + \frac{\varepsilon^2}{1+\varepsilon^4} + \frac{\varepsilon^3}{1+\varepsilon^6} =$
7. 三棱柱侧棱垂直底面且所有棱长为 β , 则外接球表面积为
8. 甲组 5 名男同学、3 名女同学, 乙组 6 名男同学、2 名女同学, 从甲、乙两组各选 2 名, 则 4 人中恰好有一女的选法有

2 解答题 (本题 12 分)

设数列 $\{\beta_n\}$ 满足 $\beta_1 = 2$, $\beta_{n+1} - \beta_n = 3 \times 2^{n-1}$ 记 $\alpha_n = n\beta_n$ 求 $\{\alpha_n\}$ 前 n 项和

3 解答题 (本题 16 分)

已知 $f(x) = \ln(x+1) + \frac{\beta}{x+2}$

(a) 若 $x > 0, f(x) > 1$ 恒成立, 求 β 取值范围.(6 分)

(b) 求证 $\ln(2024) > \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \cdots + \frac{1}{4045} + \frac{1}{4047}$.(10 分)

4 参考答案

1 填空题 (每题 9 分)

1. **Solution.** 77

注意到 $3025 = 55^2 = (5 \times 11)^2$, 由勾股定理显然可知一种情况 $\alpha = 3 \times 11, \beta = 4 \times 11$, 故 $\alpha + \beta = 77$.

2. **Solution.** $\frac{1}{4}$

$$\text{注意到 } \begin{cases} f(-1) + f\left(\frac{1}{\sqrt[3]{2}}\right) = -1 & (1) \\ f\left(\frac{1}{\sqrt[3]{2}}\right) + f(\sqrt[3]{2}) = \frac{1}{2} & (2) \\ f(\sqrt[3]{2}) + f(-1) = 2 & (3) \end{cases}$$

$$(1) + (3) - (2) \Rightarrow f(-1) = \frac{1}{4}$$

3. **Solution.** 1

$$\begin{aligned} \sin^2 \sqrt{n^2 + n} \pi &= \sin^2 \left(\sqrt{n^2 + n} - n \right) \pi = \sin^2 \frac{n}{\sqrt{n^2 + n} + n} \pi \\ &= \sin^2 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{n}} + 1} \pi \rightarrow \sin \frac{\pi}{2} = 1 \quad (n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

4. **Solution.** $3 + 2\sqrt{2}$

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{\sin \beta}\right) \left(1 + \frac{1}{\cos \beta}\right) &= \frac{\sin \beta \cos \beta + \sin \beta + \cos \beta + 1}{\sin \beta \cos \beta} \\ &= \frac{\sin \beta + \cos \beta + 1}{\sin \beta \cos \beta} + 1 \end{aligned}$$

令 $t = \sin \beta + \cos \beta = \sqrt{2} \sin \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right) \in (1, \sqrt{2}]$, 则 $\sin \beta \cos \beta = \frac{t^2 - 1}{2}$

$$\text{原式} = 1 + \frac{1+t}{\frac{t^2-1}{2}} = 1 + \frac{2}{t-1} \geq 1 + \frac{2}{\sqrt{2}-1} = 3 + 2\sqrt{2}, \beta = \frac{\pi}{4} \text{ 取等号.}$$

5. Solution. p

由题意得 $m - n = 2p$, $m + n = 2(m - p)$.

$$\begin{cases} \frac{x^2}{m} + \frac{y^2}{p} = 1, \\ \frac{x^2}{n} - \frac{y^2}{p} = 1, \end{cases} \Rightarrow x^2 = \frac{2mn}{m+n}, y = \pm \frac{\sqrt{2p}}{\sqrt{m+n}}$$

$$\therefore |F_1 F_2| = 2\sqrt{m-p} = 2\sqrt{n+p},$$

$$\therefore S_{\triangle QF_1F_2} = \frac{1}{2} \times 2\sqrt{m-p} \times \frac{\sqrt{2p}}{\sqrt{m+n}} = p.$$

6. Solution. $\frac{3}{2}$ or -2

对于方程 $x^7 = 1 \Rightarrow (x-1)(x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1) = 0$, ε 为其一个根

$$\varepsilon = 1, \text{ 易得原式} = \frac{3}{2}$$

$$\varepsilon \neq 1 \Rightarrow \varepsilon^6 + \varepsilon^5 + \varepsilon^4 + \varepsilon^3 + \varepsilon^2 + \varepsilon + 1 = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon^2} + \frac{\varepsilon^2}{1+\varepsilon^4} + \frac{\varepsilon^3}{1+\varepsilon^6} &= \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon^2} + \frac{\varepsilon^5}{1+\varepsilon^3} + \frac{\varepsilon^4}{1+\varepsilon} = 2 \frac{\varepsilon^6 + \varepsilon^4 + \varepsilon}{(1+\varepsilon^2)(1+\varepsilon^3)} \\ &= -2 \frac{\varepsilon^5 + \varepsilon^3 + \varepsilon^2 + 1}{(1+\varepsilon^2)(1+\varepsilon^3)} = -2 \frac{(1+\varepsilon^2)(1+\varepsilon^3)}{(1+\varepsilon^2)(1+\varepsilon^3)} = -2 \end{aligned}$$

7. Solution. $\frac{7}{3}\pi\beta^2$

这道题很简单, 画个图很容易得到: $R^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{3}\beta\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\beta\right)^2 \Rightarrow R = \frac{\sqrt{21}}{6}\beta$.

$$\text{故 } S = 4\pi R^2 = \frac{7}{3}\pi\beta^2$$

8. Solution. 345

分两种情况:

- case 1: 这名女生来自甲组, 共 $C_3^1 C_5^1 C_6^2 = 225$ 种
- case 2: 这名女生来自乙组, 共 $C_2^1 C_6^1 C_5^2 = 120$ 种

故总的选法有 345 种

2 解答题 (本题 12 分)

Solution. 由错位相减法易求得 $T_n = \sum_{k=1}^n \alpha_k = 3(n-1)2^n - \frac{n(n+1)}{2} + 3$

3 解答题 (本题 16 分)**Solution.**

$$(a) \ln(x+1) + \frac{\beta}{x+2} > 1 \Rightarrow \beta > (x+2)[1 - \ln(x+1)]$$

$$\text{令 } h(x) = (x+2)[1 - \ln(x+1)], x \in (0, +\infty)$$

$$h'(x) = -\left[\ln(x+1) + \frac{1}{x+1}\right] < 0 \Rightarrow h(x) \text{ 在 } (0, +\infty) \text{ 上单调减}$$

$$\text{故 } \beta \geq h(0) = 2$$

$$(b) \text{ 由 (i) 知: } \ln(x+1) > 1 - \frac{2}{x+2} = \frac{x}{x+2}, x > 0$$

$$\text{取 } x = \frac{1}{k} \text{ 得到 } \ln\left(\frac{k+1}{k}\right) > \frac{\frac{1}{k}}{\frac{1}{k}+2} = \frac{1}{2k+1}, x > 0$$

$$\text{故 } \ln(2024) = \sum_{k=1}^{2023} \ln\left(\frac{k+1}{k}\right) > \sum_{k=1}^{2023} \frac{1}{2k+1}$$

Chapter 3

2022 年启明考试数学部分

1 填空题 (每题 9 分)

1. 已知 $\beta = \frac{\sqrt{5}+1}{2}$, 计算 $[\beta^{12}]$ ($[x]$ 为 x 的整数部分).
2. 已知: $\beta_1 = 3, \beta_{n+1} = \beta_n^2 - 3\beta_n + 4$, 计算: $\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_i - 1}$
3. 已知: $a^2 + b^2 = 5$, 求 $2a + 3b$ 的最大值
4. 已知: $\begin{cases} x + \sin x \cos x - 1 = 0 \\ 2 \cos y - 2y + \pi + 4 = 0 \end{cases}$, 求 $\sin(2x - y)$.
5. 已知: $f(1) = 2022, \forall n > 1, n \in \mathbb{N}$, 有: $\sum_{k=1}^n f(k) = n^2 f(n)$, 求: $f(2022)$.
6. 定义 \mathbb{C} 为复数集, 集合 $A = \{z \mid z^{18} = 1, z \in \mathbb{C}\}, B = \{w \mid w^{48} = 1, z \in \mathbb{C}\}$, 求: $\text{card}[\{zw \mid z \in A, w \in B\}]$.
7. 在一个凸四边形 $ABCD$ 中存在点 P , 满足 $S_{\triangle PAB} = S_{\triangle PBC} = S_{\triangle PCD} = S_{\triangle PDA}$, $S_{\triangle ABC} = \alpha S_{\triangle ADC}$, 求: α .
8. 三位数中任意两个数字之和都能被第三个数整除, 求这样的三位数的个数

2 解答题 (12 分)

请用 3 种方法证明: $\left(\frac{\alpha + \beta + \gamma}{3}\right)^3 \geq \alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ ($\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}^+$).

3 解答题 (16 分)

已知: $f(x) = \beta x - \ln x - 1$,

- (a) 若 $f(x) \geq 0$ 恒成立, 求 β 的最小值;
 (b) 求证: $\frac{1}{xe^x} + x + \ln x \geq 1$;
 (c) 若 $\alpha(e^{-x} + x^2) \geq x - x \ln x$ 恒成立, 求 α 的取值范围

4 参考答案

1 填空题 (每题 9 分)

1. **Solution.** 321

$\beta = \frac{\sqrt{5}+1}{2}$ 是方程 $x^2 - x - 1 = 0$ 的根, 故: $x^2 = x + 1, x^4 = (x + 1)^2 = x^2 + 2x + 1 = 3x + 2, x^{12} = (3x + 2)^3 = 27x^3 + 54x^2 + 36x + 8 = 27x(x + 1) + 54(x + 1) + 36x + 8 = 27x^2 + 117x + 62 = 27(x + 1) + 117x + 62 = 144x + 89 \Rightarrow \beta^{12} = 72\sqrt{5} + 161 \in (321, 322)$, 故: $[\beta^{12}] = 321$.

注释: 考察对偶结构 $\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n$ 也是一个重要思想,

分析: 熟知 Fibonacci i 数列通项: $a_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n \right]$,

$\left(\begin{array}{l} a_{n+2} = a_{n+1} + a_n, a_1 = a_2 = 1, \text{ 则特征方程: } x^2 = x + 1, x_1 = \frac{\sqrt{5}+1}{2}, x_2 = \frac{1-\sqrt{5}}{2}, \\ \text{则: } a_n = C_1 \left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^n + C_2 \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n, \\ \text{代入初值条件得: } a_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n \end{array} \right)$

令 $a_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n \right]$, 则:

$a_{12} = 144 = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^{12} - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^{12} \right], \left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)^{12} = 144\sqrt{5} + \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^{12}$, 注意到: $144\sqrt{5} = \sqrt{103680} \in (321.5, 322)$, $\left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^{12} \approx (0.618)^{12} \approx \frac{1}{2^{12}}$, 故: $[\beta^{12}] = 321$.

2. Solution. 1

$$\beta_{n+1} = \beta_n^2 - 3\beta_n + 4 \Rightarrow \beta_{n+1} - 2 = \beta_n^2 - 3\beta_n + 2 = (\beta_n - 2)(\beta_n - 1),$$

$$\text{则: } \frac{1}{\beta_{n+1} - 2} = \frac{1}{(\beta_n - 2)(\beta_n - 1)} = \frac{1}{\beta_n - 2} - \frac{1}{\beta_n - 1}, \text{ 即: } \frac{1}{\beta_n - 1} = \frac{1}{\beta_n - 2} - \frac{1}{\beta_{n+1} - 2},$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_i - 1} = 1 - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\beta_{n+1} - 2},$$

下证: β_n 单调递增趋于 $+\infty$, 注意到: $\beta_{n+1} - \beta_n = \beta_n^2 - 4\beta_n + 4 = (\beta_n - 2)^2 > 0$,
 $\Rightarrow \beta_{n+1} - \beta_1 = \sum_{i=1}^n (\beta_i - 2)^2 > \sum_{i=1}^n (\beta_1 - 2)^2 = n$, 故: $\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = +\infty$, 即:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_i - 1} = 1.$$

3. Solution. $\sqrt{65}$

$$(\text{法一}) \quad 2a + 3b \leq \sqrt{2^2 + 3^2} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} (\text{cauchy}) = \sqrt{65}$$

$$(\text{法一}) \quad 2a + 3b = 2\sqrt{5} \cos \theta + 3\sqrt{5} \sin \theta \leq \sqrt{65}.$$

4. Solution. 1

$$\begin{cases} x + \sin x \cos x - 1 = 0 \\ 2 \cos y - 2y + \pi + 4 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2x + \sin 2x - 2 = 0 \\ y - \cos y - \frac{\pi}{2} - 2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2x + \sin 2x - 2 = 0 \\ y - \frac{\pi}{2} + \sin(y - \frac{\pi}{2}) - 2 = 0 \end{cases}$$

, 观察上式易得同构: $2x = y - \frac{\pi}{2}$, 下证仅有此唯一同构

注意到: $h'(x) = (2x + \sin 2x - 2)' = 2 + 2 \cos 2x \geq 0$, $h(x)$ 单调增

即根是唯一的, 因此 $2x = y - \frac{\pi}{2}$ 是唯一解

故: $\sin(2x - y) = -1$.

5. Solution. $\frac{2}{2023}$

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n f(k) = n^2 f(n) \\ \sum_{k=1}^{n+1} f(k) = (n+1)^2 f(n+1) \end{cases} \Rightarrow f(n+1) = (n+1)^2 f(n+1) - n^2 f(n),$$

$$\text{即: } (n^2 + 2n) f(n+1) = n^2 f(n) \Rightarrow \frac{f(n+1)}{f(n)} = \frac{n}{n+2},$$

$$\text{故: } f(2022) = f(1) \prod_{k=1}^{2021} \frac{k}{k+2} = 2022 \cdot \frac{2}{2022 \cdot 2023} = \frac{2}{2023}.$$

2 解答题 (12 分)

Solution.

(法一) 根据基本不等式 $\frac{\alpha+\beta}{2} \geq \sqrt{\alpha\beta}$, 故:

$$\frac{\alpha+\beta+\gamma+\eta}{4} = \frac{\frac{\alpha+\beta}{2} + \frac{\gamma+\eta}{2}}{2} \geq \sqrt{\sqrt{\alpha\beta}\sqrt{\gamma\eta}} = \sqrt[4]{\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \eta}$$

令 $\eta = \frac{\alpha+\beta+\gamma}{3}$, 有: $\frac{\alpha+\beta+\gamma}{3} \geq \sqrt[3]{\alpha \cdot \beta \cdot \gamma}$, 证毕

(法二) 令 $\alpha = x^3, \beta = y^3, \gamma = z^3$, 则:

$$\begin{aligned} \frac{x^3+y^3+z^3}{3} - xyz &= \frac{1}{3}(x^3+y^3+z^3-3xyz) \\ &= \frac{1}{3}\{[(x+y)^3-3x^2y-3xy^2]+z^3-3xyz\} \\ &= \frac{1}{3}\{[(x+y)^3+z^3]-3x^2y-3xy^2-3xyz\} \\ &= \frac{1}{6}(x+y+z)[(x-y)^2+(y-z)^2+(z-x)^2] \geq 0 \end{aligned}$$

证毕

(法三) 令 $f(x) = \ln x$, 则: $f'(x) = \frac{1}{x}, f''(x) = -\frac{1}{x^2} < 0$,

故: $f(x)$ 是上凸函数, 根据琴生不等式, $\ln \frac{\alpha+\beta+\gamma}{3} \geq \frac{1}{3}(\ln \alpha + \ln \beta + \ln \gamma)$,
证毕

3 解答题 (16 分)

Solution.

(a) $f(x)$ 的定义域是 $(0, +\infty)$, $f(x) \geq 0 \Rightarrow \beta x - \ln x - 1 \geq 0, \Rightarrow \beta \geq \frac{\ln x + 1}{x}$,

令 $g(x) = \frac{\ln x + 1}{x}, g'(x) = -\frac{\ln x}{x^2}$,

当 $x \in (0, 1)$ 时, $g'(x) > 0, g(x)$ 单调增, 当 $x \in (1, +\infty)$ 时, $g'(x) < 0, g(x)$ 单调减

故 $g_{\max}(x) = g(1) = 1$, 即: $\beta \geq g_{\max}(x) = 1, \beta$ 的最小值为 1.

(b) 证明: 当 $\beta = 1$ 时, 有: $\ln x \leq x - 1$,

令 $\frac{1}{xe^x} = t$, 则: $-x - \ln x = \ln t \leq t - 1 = \frac{1}{xe^x} - 1$, 即: $\frac{1}{xe^x} + x + \ln x \geq 1$.

$$(c) : \alpha (e^{-x} + x^2) \geq x - x \ln x \Rightarrow \alpha \left(\frac{1}{xe^x} + x \right) \geq 1 - \ln x,$$

$$\text{注意到: } \frac{1}{xe^x} + x > 0, \text{ 即: } \alpha \geq \frac{1 - \ln x}{\frac{1}{xe^x} + x},$$

$$\text{由 (b) 知: } \frac{1 - \ln x}{\frac{1}{xe^x} + x} \leq 1, \text{ 且 } xe^x = 1 \text{ 时, } \frac{1 - \ln x}{\frac{1}{xe^x} + x} = 1,$$

故 : $\alpha \geq 1$, α 的取值范围是 $[1, +\infty)$.

Chapter 4

2021 年启明考试数学部分

1 填空题

1. $x, y, z \in \mathbb{Q}, \sqrt{3 + \sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}} = \sqrt{x} + \sqrt{y} + \sqrt{z}, xyz = .$
2. $f(x) \geq 0, f^2(x+1) + f^2(x) = 73 (x \in \mathbb{R}).$ 当 $x \in [0, 1)$ 时,
 $f(x) = 10 - |13x - 4|, f(\frac{2021}{13}) =$
3. $y = \frac{4 \sin \theta \cos \theta + 3}{\sin \theta + \cos \theta} (-\frac{\pi}{4} < \theta < \frac{3\pi}{4}),$ 则 y 的最小值为
4. $\{a_n\}$ 是等差数列, 且 $a_3 = -13, a_7 = 3. S_n = \sum_{i=1}^n a_i,$ 则 $(S_n)_{\min} =$
5. $w = \cos \frac{\pi}{5} + i \sin \frac{\pi}{5},$ 则以 w, w^3, w^7, w^9 为解的方程为
6. A, B 是椭圆 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 (a > b > 0)$ 上两点, O 是原点, $OA \perp OB,$ 则 $|AB|_{\min} =$
7. 双曲线: $\Gamma \frac{x^2}{4} - \frac{y^2}{5} = 1,$ 过右焦点作一条长度为 $4\sqrt{3}$ 的弦 AB, A, B 位于右支上. 将双曲线 Γ 绕其右准线旋转 $90^\circ,$ 则弦 AB 形成的曲面面积为

2 解答题

三种方法求 $x(x+1)(x+2)(x+3)$ 最小值.

3 证明题

已知 $0 < a < b$, 证 $\frac{\ln b - \ln a}{b - a} > \frac{2a}{a^2 + b^2}$.

4 参考答案

1 填空题

1. **Solution.** $\sqrt{3 + \sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}} = \sqrt{x} + \sqrt{y} + \sqrt{z}$

$$\Rightarrow x + y + z + 2(\sqrt{xy} + \sqrt{yz} + \sqrt{xz}) = 3 + \sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}$$

由于 $x, y, z \in \mathbb{Q}$, 因此不妨设:
$$\begin{cases} x + y + z = 3 \\ 2\sqrt{xy} = \sqrt{2} \\ 2\sqrt{yz} = \sqrt{3} \\ 2\sqrt{xz} = \sqrt{6} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = 1 \\ y = \frac{1}{2} \\ z = \frac{3}{2} \end{cases}$$

故: $xyz = \frac{3}{4}$

2. **Solution.** $f^2(x+1) + f^2(x) = 73$

$$\Rightarrow f^2(x+2) + f^2(x+1) = 73 \Rightarrow f^2(x+2) = f^2(x)$$

$$\because f(x) \geq 0 \therefore f(x+2) = f(x)$$

$$f\left(\frac{2021}{13}\right) = f\left(\frac{19}{13}\right), \text{ 又 } \because f^2\left(\frac{19}{13}\right) + f^2\left(\frac{6}{13}\right) = 73$$

$$\text{解得: } f\left(\frac{2021}{13}\right) = 3$$

3. **Solution.**

$$y = \frac{2(1 + 2\sin\theta \cos\theta) + 1}{\sin\theta + \cos\theta} = \frac{2(\sin\theta + \cos\theta)^2 + 1}{\sin\theta + \cos\theta}$$

$$= 2(\sin\theta + \cos\theta) + \frac{1}{\sin\theta + \cos\theta} \geq 2\sqrt{2}$$

$$\text{当且仅当 } 2(\sin\theta + \cos\theta) = \frac{1}{\sin\theta + \cos\theta}, \text{ 即 } \theta = \frac{7\pi}{12} \text{ or } -\frac{\pi}{12} \text{ 取 " = "}$$

4. **Solution.**
$$\begin{cases} a_1 + 2d = -13 \\ a_1 + 6d = 3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = -21 \\ d = 4 \end{cases}$$

易知 $n = 6, (S_n)_{\min} = -66$

5. **Solution.** 由棣莫弗定理易知: $w^5 = -1$, 因此以 w, w^3, w^7, w^9 为解的方程等价于以 $w, -w^2, w^3, -w^4$ 为解的方程.

易知: $-1, w, -w^2, w^3, -w^4$ 是 $(x+1)(x^4 - x^3 + x^2 - x + 1) = 0$ 的根.

故以 w, w^2, w^3, w^4 为解的方程是 $x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 = 0$

6. **Solution.** 根据题意不妨设 $A(r_1 \cos \theta, r_1 \sin \theta), B\left[r_2 \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right), r_2 \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)\right]$,

则 $B(-r_2 \sin \theta, r_2 \cos \theta), AB^2 = r_1^2 + r_2^2, \frac{r_1^2 \cos^2 \theta}{a^2} + \frac{r_1^2 \sin^2 \theta}{b^2} = 1,$

$$r_1^2 = \frac{a^2 b^2}{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta}, \frac{r_2^2 \sin^2 \theta}{a^2} + \frac{r_2^2 \cos^2 \theta}{b^2} = 1, r_2^2 = \frac{a^2 b^2}{b^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta}.$$

$$\begin{aligned} \text{故 } r_1^2 + r_2^2 &= \frac{a^2 b^2 (a^2 + b^2)}{(b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta)(b^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta)} \\ &= \frac{a^2 b^2 (a^2 + b^2)}{(a^4 + b^4) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + a^2 b^2 (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)} \\ &= \frac{a^2 b^2 (a^2 + b^2)}{(a^4 + b^4) \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + a^2 b^2 (1 - 2 \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta)} \\ &= \frac{a^2 b^2 (a^2 + b^2)}{(a^2 - b^2)^2 \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + a^2 b^2} = \frac{4a^2 b^2 (a^2 + b^2)}{(a^2 - b^2)^2 \sin^2 2\theta + 4a^2 b^2} \\ &\geq \frac{4a^2 b^2 (a^2 + b^2)}{(a^2 + b^2)^2}. \end{aligned}$$

当且仅当 $\theta = k\pi \pm \frac{\pi}{4} (k \in \mathbf{Z})$ 时等号成立. 因此, 线段 AB 长的最小值为 $\frac{2ab\sqrt{a^2+b^2}}{a^2+b^2}$.

7. **Solution.** 分析易知弦 AB 扫过的面积为一圆台侧面积的 $\frac{1}{4}$. 设 A, B 两点

到右准线 $l: x = \frac{4}{3}$ 的距离分别为 r_1, r_2 ,

由于双曲线离心率 $e = \frac{3}{2}$, 故 $S = \frac{1}{4}\pi(r_1 + r_2)|AB| = \frac{1}{4e}\pi|AB|^2 = 8\pi$

2 解答题

Solution.

(法一): 不妨设 $y = x + \frac{3}{2}$, 则 $x = y - \frac{3}{2}$, 代入 $x(x+1)(x+2)(x+3)$ 中得到:

$$\begin{aligned} &x(x+1)(x+2)(x+3) \\ &= \left(y - \frac{3}{2}\right)\left(y - \frac{1}{2}\right)\left(y + \frac{1}{2}\right)\left(y + \frac{3}{2}\right) \\ &= \left(y^2 - \frac{9}{4}\right)\left(y^2 - \frac{1}{4}\right) \\ &= y^4 - \frac{5}{2}y^2 + \frac{9}{16} \\ &= \left(y^2 - \frac{5}{4}\right)^2 - 1 \end{aligned}$$

由于 $y^2 \geq 0$, 所以 $x(x+1)(x+2)(x+3) \geq -1$, 等号成立当且仅当 $y^2 = \frac{5}{4}$,
即 $x = \frac{\pm\sqrt{5}-3}{2}$

(法二) :

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx}[x(x+1)(x+2)(x+3)] \\ &= (x+1)(x+2)(x+3) + x(x+2)(x+3) + x(x+1)(x+3) + x(x+1)(x+2) \\ &= 4x^3 + 18x^2 + 22x + 6 \\ &= (4x+6)(x^2+3x+1) \end{aligned}$$

令导函数等于 0, 解得 $x = -\frac{3}{2}$ 或 $x = \frac{\pm\sqrt{5}-3}{2}$ 代入原函数中可得最小值在 $x = \frac{\pm\sqrt{5}-3}{2}$ 取得, 结果为 -1。

(法三) :

$$\begin{aligned} & x(x+1)(x+2)(x+3) \\ &= x(x+3)(x+1)(x+2) \\ &= (x^2+3x)(x^2+3x+2) \\ &= (x^2+3x+1-1)(x^2+3x+1+1) \\ &= (x^2+3x+1)^2 - 1 \geq -1 \text{ (当 } x^2+3x+1=0 \text{ 时取等)}, \text{ 即 } x = \frac{\pm\sqrt{5}-3}{2} \text{ 取得} \end{aligned}$$

3 证明题

Proof. 原式等价于要证: $\ln \frac{b}{a} > \frac{2a(b-a)}{a^2+b^2} = \frac{2(\frac{b}{a}-1)}{1+(\frac{b}{a})^2}$, 设 $t = \frac{b}{a} \in (1, +\infty)$,

即证: $(1+t^2) \ln t > 2t-2$

注意到 $\ln t > 1 - \frac{1}{t}, t \in (1, +\infty)$, 即证: $(1+t^2) \ln t > (1+t^2)(1 - \frac{1}{t}) > 2t-2$,

即证: $t^2 - 3t - \frac{1}{t} + 3 > 0$, 而此式求导易证

Chapter 5

2019 年启明考试数学部分

1 填空题

1. 37, 23, 19, 5..... 以此类推, 第五个数为
2. 今天星期六, 则 3^{1998} 天后是星期几
3. 若 x 满足 $x + x^{-1} = -1$, 求 $x^{2019} + x^{-2019}$
4. 求方程 $13 \sin x = x$ 的根
5. 设整数数列 a_1, a_2, \dots, a_{10} 满足 $a_{10} = 3a_1, a_2 + a_8 = 2a_5$. 且 $a_{i+1} \in \{1 + a_i, 2 + a_i\} (i = 1, 2, 3, \dots, 9)$, 求这样的数列有多少个
6. 求 $n^3 + 100$ 能被 $n + 10$ 整除的最大整数
7. x, y, z 为非负整数, 且 $\begin{cases} x + y + z = 10 & \textcircled{1} \\ x + 2y + 3z = 30 & \textcircled{2} \end{cases}$, 求 $x + 5y + 3z$ 的取值范围
8. 若 $f(x) = (1 - x^2)(x^2 + ax + b)$ 关于 $x = -2$ 对称, 求 $f(x)_{\max}$
9. 若 α, β 满足 $\begin{cases} x \sin \beta + y \cos \alpha = \sin \alpha \\ x \sin \alpha + y \cos \beta = \sin \beta \end{cases}$, 求 $x^2 - y^2$.
10. $A(3, 2)$ 是平面上一点, F 是抛物线: $y^2 = 2x$ 上的一点, 抛物线上一点 M , 则 $|MF| + |MA|$ 取最小值的时 M 的坐标

2 证明题

$\forall x, y \in \mathbb{R}$, 函数 $f(z)$ 满足 $2f(x)f(y) = f(x+y) + f(x-y)$ 且 $f(x) \neq 0$, 证明: $f^2(x) + f^2(y) = f(x+y)f(x-y) + 1$

3 解答题

数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_1 = 3, a_{n+1} \leq \frac{1}{2}(a_n + a_{n+2})$, 且 $a_{505} = 2019$. 求 $\max a_5$.

4 解答题

$f(a)$ 是 \mathbb{R} 上的偶函数, 函数图像关于 $x = 1$ 对称. 对任意的 $x, y \in \left[0, \frac{1}{2}\right]$ 有 $f(x+y) = f(x)f(y)$, 且 $f(1) = \beta > 0$.

(1) 求 $f\left(\frac{1}{2}\right), f\left(\frac{1}{4}\right)$ 的值

(2) 证明: $f(x)$ 是周期函数

(3) 记 $\beta(n) = f\left(2n + \frac{1}{2n}\right)$, 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} \ln \beta(n)$.

5 参考答案

1 填空题

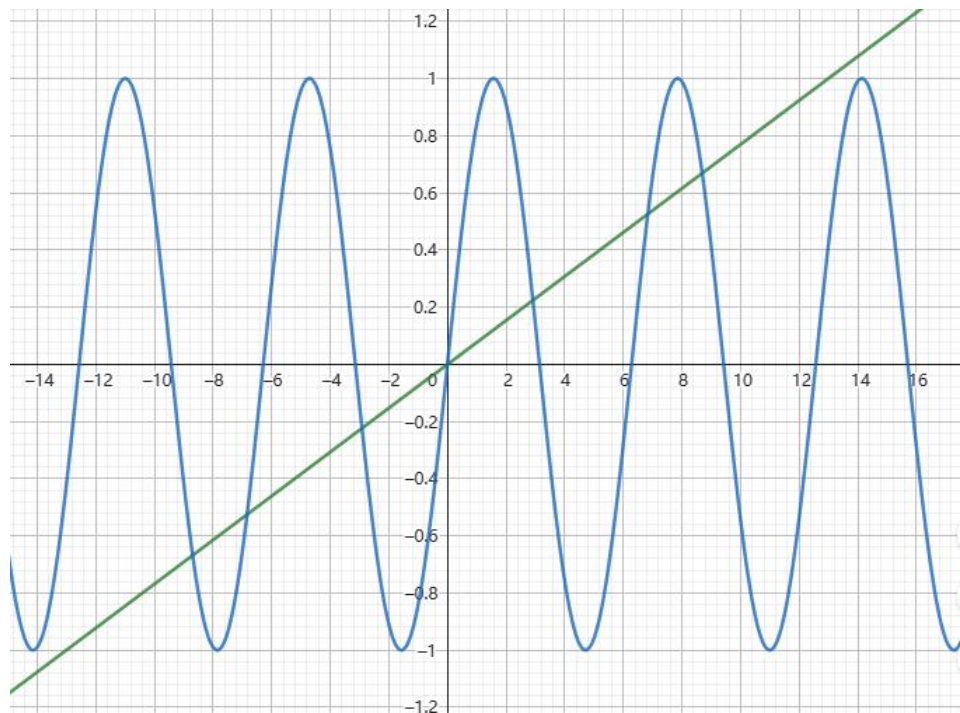
1. **Solution.** 1

2. **Solution.** 注意到 $3^{1998} = (27)^{666} = (28-1)^{666} = 1 + \sum_{k=0}^{665} C_{666}^k (28)^{666-k} (-1)^k = 7N + 1$, 故为星期天.

3. **Solution.** $x + x^{-1} = -1 \Rightarrow x^2 + x + 1 = 0$, 则 $x = -\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{2}i = e^{\pm \frac{2\pi}{3}i}$ (欧拉公式).

由棣莫弗定理易得 $x^{2019} = e^{\pm 1046\pi i} = 1$, 故 $x^{2019} + x^{-2019} = 2$.

4. **Solution.** 作图:



可以求得的零点为 $x = 0$ ，由于此方程为超越方程，其他 6 个零点为隐零点.

5. **Solution.** 不妨设 $b_i = a_{i+1} - a_i \in \{1, 2\}$, 由 $a_{10} = 3a_1, a_2 + a_8 = 2a_5$, 可得:

$$\begin{cases} 2a_1 = \sum_{i=1}^9 b_i \\ b_7 + b_6 + b_5 = b_4 + b_3 + b_2 \end{cases}$$

对于 $b_7 + b_6 + b_5 = b_4 + b_3 + b_2$, 分析易知等式两端 1, 2 的个数相等, 因此 $b_7, b_6, b_5, b_4, b_3, b_2$ 总的取法共有: $(C_3^0)^2 + (C_3^1)^2 + (C_3^2)^2 + (C_3^3)^2 = 20$ 种

注意到 $b_7 + b_6 + b_5 + b_4 + b_3 + b_2$ 必是偶数, 由 $\therefore 2a_1 = \sum_{i=1}^9 b_i$, $2a_1$ 也为偶数

故 $b_1 + b_8 + b_9$ 必为偶数, 取法有 4 种

故满足条件的数列共有 $4 \times 20 = 80$ 种

6. **Solution.**

$$\begin{aligned} & \frac{n^3 + 100}{n + 10} \\ &= \frac{n^3 + 1000}{n + 10} - \frac{900}{n + 10} \\ &= n^2 - 10n + 100 - \frac{900}{n + 10} \\ &\Rightarrow n_{\max} = 890 \end{aligned}$$

7. **Solution.** $3 \times \textcircled{1} - \textcircled{2} \Rightarrow 2x + y = 0$

$$\because x, y \in \mathbb{N}^* \therefore x = y = 0 \Rightarrow z = 10$$

$$\text{故 } x + 5y + 3z = 30$$

8. **Solution.** 注意到 $x = -1, 1$ 为 $f(x)$ 的零点, 又 $\because x = -2$ 为其对称轴, 因此可得另两个零点为: $x = -3, x = -5$

$$\text{故 } f(x) = (1 - x^2)(x + 3)(x + 5)$$

$$\begin{aligned} \text{注意到: } f(x) &= (1 - x)(x + 5)(1 + x)(x + 3) \\ &= (-x^2 - 4x + 5)(x^2 + 4x + 3) \\ &\leq \left(\frac{-x^2 - 4x + 5 + x^2 + 4x + 3}{2} \right)^2 \\ &= 16 (\text{当且仅当 } -x^2 - 4x + 5 = x^2 + 4x + 3 \text{ 取得}) \end{aligned}$$

9. **Solution.** 分析: 不要被题设吓到, 实际上就是解二元一次方程组

$$\begin{cases} x \sin \beta + y \cos \alpha = \sin \alpha \\ x \sin \alpha + y \cos \beta = \sin \beta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{\sin \beta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \beta}{\sin \alpha \cos \alpha - \sin \beta \cos \beta} \\ y = \frac{\sin^2 \alpha - \sin^2 \beta}{\sin \alpha \cos \alpha - \sin \beta \cos \beta} \end{cases}$$

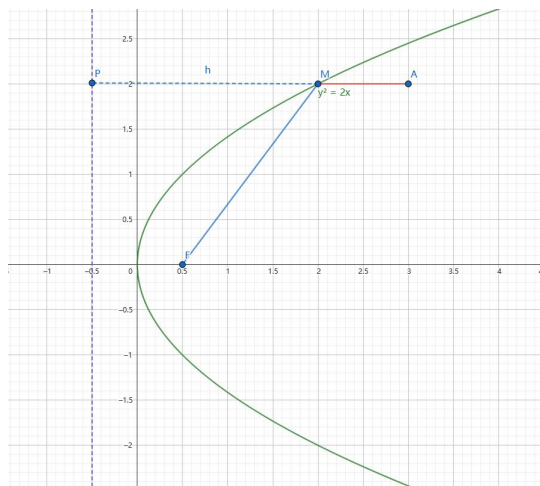
$$\begin{aligned} x &= \frac{\sin \beta \cos \alpha - \sin \alpha \cos \beta}{\sin \alpha \cos \alpha - \sin \beta \cos \beta} = \frac{2 \sin(\alpha - \beta)}{\sin 2\alpha - \sin 2\beta} \\ &= \frac{2 \sin(\alpha - \beta)}{2 \cos(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \beta)} = -\sec(\alpha + \beta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{\sin^2 \alpha - \sin^2 \beta}{\sin \alpha \cos \alpha - \sin \beta \cos \beta} = \frac{\cos 2\beta - \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha - \sin 2\beta} \\ &= \frac{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha - \beta) \cos(\alpha + \beta)} = \tan(\alpha + \beta) \end{aligned}$$

$$\text{故 } x^2 - y^2 = 1$$

10. **Solution.** 很简单的高中题. 由题意得 $F(\frac{1}{2}, 0)$, 准线方程为 $x = -\frac{1}{2}$, 设点 M 到准线的距离为 $d = |PM|$. 则由抛物线的定义得 $|MA| + |MF| = |MA| + |PM|$ 故当 P, A, M 三点共线时, $|MF| + |MA|$ 取得最小值为 $|AP| = 3 - (-\frac{1}{2}) = \frac{7}{2}$. 把 $y = 2$ 代入抛物线 $y^2 = 2x$ 得 $x = 2$, 故点 M 的坐标是 $(2, 2)$

附个图:



2 证明题

Proof. 令 $x = y = 0 \Rightarrow f(0) = 1$

$$2f(x)f(y) = f(x+y) + f(x-y) \Rightarrow 2f(x+y)f(x-y) = f(2x) + f(2y) (*)$$

令 $x = y \Rightarrow 2f^2(x) = f(2x) + f(0) = f(2x) + 1$, 同理 $2f^2(y) = f(2y) + 1$

带入 (*) 中得: $f^2(x) + f^2(y) = f(x+y)f(x-y) + 1$

3 解答题

Solution.

分析: 一个自然的想法是所有的等号均能取得时 a_5 取得最大值, 此时 $\{a_n\}$ 为 $d = 4$ 的等差数列, 解得 $a_5 = 19$

$$\text{令 } b_n = a_{n+1} - a_n, a_{n+1} \leq \frac{1}{2}(a_n + a_{n+2}) \Rightarrow b_n \leq b_{n+1}$$

$$\therefore a_5 = a_1 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4$$

$$a_{505} - a_1 = \sum_{i=1}^{504} b_i \geq 126(b_1 + b_2 + b_3 + b_4) \Rightarrow b_1 + b_2 + b_3 + b_4 \leq 16$$

$$\therefore a_5 = a_1 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 \leq 19, \text{ 当 } \{a_n\} \text{ 为等差数列取 " = "}$$

4 解答题

Solution.

$$(1) \text{ 易得: } f\left(\frac{1}{2}\right) = \beta^{\frac{1}{2}}, f\left(\frac{1}{4}\right) = \beta^{\frac{1}{4}}$$

(2) **Proof.** 事实上, 由双镜原理周期为 2 是显然的

$$f(2+x) = f(-x) = f(x) \Rightarrow f(x) \text{ 是 } T = 2 \text{ 的周期函数}$$

$$(3) \beta(n) = f\left(2n + \frac{1}{2n}\right) = f\left(\frac{1}{2n}\right)$$

$$\text{注意到: } f\left(\frac{1}{2}\right) = f\left(n \times \frac{1}{2n}\right) = f^n\left(\frac{1}{2n}\right) \Rightarrow f\left(\frac{1}{2n}\right) = \beta^{\frac{1}{2n}}$$

$$\therefore \beta(n) = \ln f\left(\frac{1}{2n}\right) = \frac{\beta}{2n} \rightarrow 0 (n \rightarrow \infty)$$

Chapter 6

2015 年启明考试数学部分

1 填空题

1. 对抛物线 $y^2 = 2\sqrt{2}x$, 若设其焦点为 F , y 轴正半轴上一点为 N . 若准线上存在唯一的点 P 使得 $\angle NPF = 90^\circ$, 则 N 点的纵坐标为
2. $\frac{1}{\sqrt{1} + \sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2} + \sqrt{3}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{255} + \sqrt{256}} =$
3. 若已知 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} - \ln n \right)$ 存在, 则 $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i+1} =$
4. 在边长为 1 的正方形中 (含边界) 取 9 个点, 其中必有 3 个点, 它们构成的三角形面积不超过
5. 某人打靶打中 8 环、9 环、10 环的概率分别为 0.15, 0.25, 0.2, 现他开三枪, 不少于 28 环的概率为

2 解答题

若对任意实数 x, y , 有 $f((x-y)^2) = (f(x))^2 - 2xf(y) + y^2$, 求 $f(x)$.

3 解答题

求所有 a, b , 使 $\left| \sqrt{1-x^2} - ax - b \right| \leq \frac{\sqrt{2}-1}{2}$ 成立, 其中 $x \in [0, 1]$.

4 解答题

若复数 z 满足 $|z| = 1$, 求 $|z^3 - z + 2|^2$ 的最小值.

5 解答题

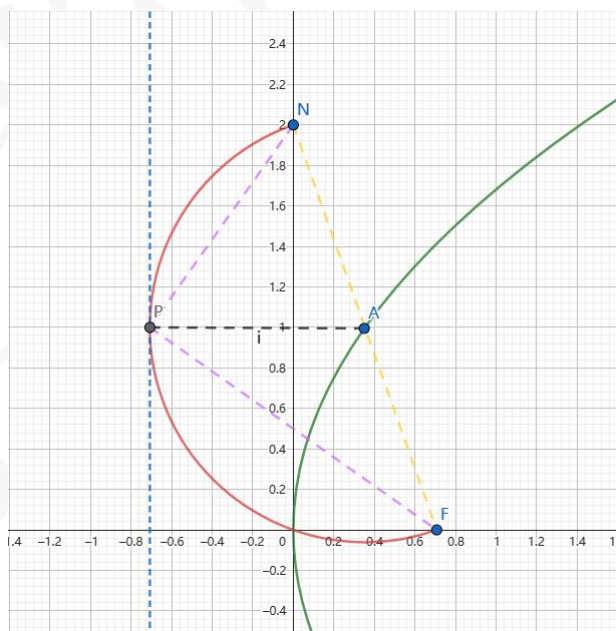
已知三次方程 $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$ 有三个实根.

- (a) 若三个实根为 x_1, x_2, x_3 , 且 $x_1 \leq x_2 \leq x_3$, a, b 为常数, 求 c 变化时 $x_3 - x_1$ 的取值范围;
- (b) 若三个实根为 a, b, c , 求 a, b, c .

6 参考答案

1 填空题

1. **Solution.** 分析: 实际上就是以 NF 为直径的圆与准线相切, 求此时 N 点坐标, 图如下:



$$|AP| = |AN| = |AF|, AP \perp l: x = \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow A \text{ 在抛物线上}$$

设 $N(0, a) \Rightarrow A(\frac{\sqrt{2}}{4}, \frac{a}{2})$ 代入抛物线方程, 解得 $a = 2$

2. **Solution.** 设 $b_n = \frac{1}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n}} = \sqrt{n+1} - \sqrt{n}$

$$\frac{1}{\sqrt{1} + \sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2} + \sqrt{3}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{255} + \sqrt{256}} = \sum_{i=1}^{255} b_i = \sqrt{256} - 1 = 15$$

3. **Solution.** 这道题超纲太多了, 涉及到级数知识, 仅展示做法

(法一) 设 $H(n) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \Rightarrow H(n) = \gamma + \ln n + o(1)$

$$\text{考虑部分和: } S_{2n} = \sum_{i=1}^{2n} \frac{(-1)^{i-1}}{i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2i-1} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{2i} = \sum_{i=1}^{2n} \frac{1}{i} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} =$$

$$H(2n) - H(n) = \ln 2 + o(1) \rightarrow \ln 2 (n \rightarrow \infty)$$

$$S_{2n+1} = S_{2n} + \frac{1}{2n+1} \rightarrow \ln 2 (n \rightarrow \infty)$$

$$\text{综上: } \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i+1} = \ln 2$$

(法二) 注意到: $\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} x^n \Rightarrow \ln 2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n}$

4. **Solution.** 在边长为 1 的正方形内任取 3 个点, 则这 3 点组成的三角形的面积不超过 $\frac{1}{2}$ 。若我们在一个边长为 $\frac{1}{2}$ 的正方形内任取 3 点, 那么这 3 点所组成的三角形的最大面积就是这个正方形的面积的一半, 即不超过 $\frac{1}{8}$ 。那么我们将一个边长为 1 的正方形分为 4 个相同的边长为 $\frac{1}{2}$ 的小正方形, 任取 9 个点放到正方形中, 必有 3 个点落在同一个小正方形内。

由上面的分析得知, 这 3 个点所组成的三角形面积不超过 $\frac{1}{8}$

5. **Solution.**

- case 1: 成绩为 28 环, 有以下情况: $\{9, 9, 10\}, \{8, 10, 10\}$
- case 2: 成绩为 29 环, 有以下情况: $\{9, 10, 10\}$
- case 3: 成绩为 30 环, 有以下情况: $\{10, 10, 10\}$

$$p = C_3^2 0.25^2 \cdot 0.2 + C_3^2 0.2^2 \cdot 0.15 + C_3^2 0.2^2 \cdot 0.25 + 0.2^3 = 0.0935$$

2 解答题

Solution. 令 $x = y \Rightarrow f(0) = f^2(x) - 2xf(x) + x^2 = (f(x) - x)^2$

再令 $x = 0 \Rightarrow f(0) = 0$ or $1 \Rightarrow f(x) = x$ or $f(x) = x + 1$

3 解答题

Solution. 不妨设 $x = \sin \theta, \theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$

$$\begin{aligned} & \left| \sqrt{1-x^2} - ax - b \right| \\ &= |\cos \theta - a \sin \theta - b| \\ &= |\sqrt{a^2+1} \sin(\theta + \phi) - b| \leq \frac{\sqrt{2}-1}{2} (\tan \phi = -\frac{1}{a}) \\ &\Rightarrow \frac{1-\sqrt{2}}{2} + b \leq \sqrt{a^2+1} \sin(\theta + \phi) \leq \frac{\sqrt{2}-1}{2} + b \quad (*) \\ & f(\theta) := \sqrt{a^2+1} \sin(\theta + \phi) \end{aligned}$$

case 1 : $a \geq 0$

$$[f(\theta)]_{\max} = f(\frac{\pi}{2}) = \sqrt{a^2+1}, [f(\theta)]_{\min} = f(0) = -1$$

注意到此时值域区间长度 $l = a + 1 > \sqrt{2} - 1$, (*) 必不能恒成立, 此种情况舍去

case 2 : $a < 0$

$$[f(\theta)]_{\max} = f(\frac{\pi}{2} - \phi) = \sqrt{a^2+1}, [f(\theta)]_{\min} = \min\{f(\frac{\pi}{2}), f(0)\} = \min\{-a, 1\}$$

if $a \leq -1, \Rightarrow [f(\theta)]_{\min} = 1$, 区间长度 $l = \sqrt{a^2+1} - 1 \leq \sqrt{2} - 1 \Rightarrow a \in [-1, 1] \Rightarrow a = -1$

$$[f(\theta)]_{\min} = 1 = \frac{1-\sqrt{2}}{2} + b \Rightarrow b = \frac{\sqrt{2}+1}{2}$$

if $a > -1, \Rightarrow [f(\theta)]_{\min} = -a$, 此时区间长度 $l = \sqrt{a^2+1} + a > \sqrt{2} - 1$, (*) 必不能恒成立, 此种情况舍去

综上所述: $a = -1, b = \frac{\sqrt{2}+1}{2}$

4 解答题

Solution.

(法一) 设 $z = \cos \theta + i \sin \theta$, 得 $z^3 - z + 2 = \cos 3\theta - \cos \theta + 2 + i(\sin 3\theta - \sin \theta)$

$$\begin{aligned} |z^3 - z + 2|^2 &= (\cos 3\theta - \cos \theta + 2)^2 + (\sin 3\theta - \sin \theta)^2 \\ &= 6 - 2(\cos 3\theta \cos \theta + \sin 3\theta \sin \theta) + 4\cos 3\theta - 4\cos \theta \\ &= 6 - 2\cos 2\theta + 4\cos 3\theta - 4\cos \theta \\ &= 4(4\cos^3 \theta - \cos^2 \theta - 4\cos \theta + 2) \end{aligned}$$

求导易得当 $\cos \theta = \frac{2}{3}$ 时, $(|z^3 - z + 2|^2)_{\min} = \frac{8}{27}$.

(法二)

$$\begin{aligned}
|z^3 - z + 2|^2 &= |z^3 - z + 2z\bar{z}|^2 = |z(z^2 - 1 + 2\bar{z})|^2 = |z^2 - 1 + 2\bar{z}|^2 \\
&= (z^2 - 1 + 2\bar{z})(\bar{z}^2 - 1 + 2z) = 4 - 2(z + \bar{z}) - (z^2 + \bar{z}^2) + 2(z^3 + \bar{z}^3) \\
&= 4 - 2(z + \bar{z}) - [(z + \bar{z})^2 - 2] + 2(z + \bar{z})[(z + \bar{z})^2 - 3] \\
&\stackrel{\text{let } z+\bar{z}=x \in [-2,2]}{=} 2x^3 - x^2 - 8x + 6 \text{ (用导数易求最值)}
\end{aligned}$$

5 解答题

Solution. 这题有些麻烦, 如果缺少一元三次方程的相关概念建议下去了解一下再来看这道题

- (a) 设三次方程 $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$ 的三个实根分别为 x_1, x_2, x_3 ($x_1 \leq x_2 \leq x_3$)
由韦达定理, 可得 $x_1 + x_2 + x_3 = -a, x_1x_2 + x_2x_3 + x_3x_1 = b$, 注意到

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2}[2(\frac{x_3 - x_1}{2})^2 + (x_3 - x_1)^2] &\leq a^2 - 3b = \frac{1}{2}[(x_1 - x_2)^2 + (x_2 - x_3)^2 + (x_3 - x_1)^2] \leq [(x_3 - x_1)^2] \\
&\Rightarrow \sqrt{a^2 - 3b} \leq x_3 - x_1 \leq 2\sqrt{\frac{a^2 - 3b}{3}}
\end{aligned}$$

当且仅当 $x_1 = x_2$ 或 $x_2 = x_3$ 时取到左端 "=", 当且仅当 $x_1 + x_3 = 2x_2$ 时取到右端 "=".

综上所述: $x_3 - x_1$ 的取值范围是 $\left[\sqrt{a^2 - 3b} \leq w \leq 2\sqrt{\frac{1}{3}a^2 - b} \right]$.

- (b) 易知 $x^3 + ax^2 + bx + c = (x - a)(x - b)(x - c)$, 由韦达定理得

$$\begin{cases} a + b + c = -a \\ ab + bc + ca = b \\ abc = -c \end{cases}$$

$$\Rightarrow c = 0 \text{ or } ab = -1$$

$$\text{if } c = 0, \begin{cases} b = -2a \\ ab = b \end{cases}, \Rightarrow \begin{cases} a = 0 \\ b = 0 \end{cases} \text{ or } \begin{cases} a = 1 \\ b = -2 \end{cases}.$$

$$\text{if } ab = -1 \text{ 时, } \begin{cases} c = -2a - b \\ -1 + (a + b)c = b \end{cases}, \text{ 代入原方程, 得:}$$

$$b^4 + b^3 - 2b^2 + 2 = 0$$

$$\Rightarrow b + 1 = 0 \text{ or } b^3 - 2b + 2 = 0$$

$$\text{if } b+1=0, \Rightarrow \begin{cases} a=1 \\ c=-1 \end{cases}$$

$$\text{if } b^3-2b+2=0,$$

$$\text{由一元三次方程的求根公式得 } b = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{19}{27}}-1} - \sqrt[3]{\sqrt{\frac{19}{27}}+1} \Rightarrow \begin{cases} a = -\frac{1}{b} \\ c = \frac{2}{2} - b \end{cases}$$

综上 (a, b, c) 的值为 $(0, 0, 0), (1, -2, 0), (1, -1, -1)$, $\left(-\frac{1}{k}, k, \frac{2}{k} - k\right)$ (其中

$$k = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{19}{27}}-1} - \sqrt[3]{\sqrt{\frac{19}{27}}+1}.$$

Chapter 7

2014 年启明考试数学部分

1 填空题 (本题共 5 小题, 每小题 8 分, 共 40 分)

1. 设 $f(x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}$, 则 n 重复合函数 $f_n(x) = f(f(\cdots f(x)\cdots)) =$
2. 设多项式 $p(x)$ 满足 $p(x^2 + 1) = (p(x))^2 + 1$ 和 $p(0) = 0$, 则 $p(x) =$
3. 设 $S_n = \sum_{k=1}^n \frac{6^k}{(3^{k+1} - 2^{k+1})(3^k - 2^k)}$, 则极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n =$
4. 对 $x > 0$, 函数 $f(x) = \frac{\left(x + \frac{1}{x}\right)^6 - \left(x^6 + \frac{1}{x^6}\right) - 2}{\left(x + \frac{1}{x}\right)^3 + \left(x^3 + \frac{1}{x^3}\right)}$ 的最小值为
5. 假设 20 名学生中的每一名学生可从提供的六门课程中选学一门至六门, 也可以一门都不选. 试判断下列命题是否正确: 存在 5 名学生和两门课程, 使得这 5 名学生都选了这两门课, 或者都没选, 选填“正确”或“否”

2 证明题 (本题共 14 分)

1. 若 a 为正整数而 \sqrt{a} 不为整数, 证明: \sqrt{a} 为无理数.
2. 试证: 除 $\{0, 0, 0\}$ 外, 没有其他整数 m, n, p 使得

$$m + n\sqrt{2} + p\sqrt{3} = 0.$$

3 证明题 (本题共 16 分)

设 a, b, c 为三角形三边之长, $p = \frac{a+b+c}{2}$, r 为内切圆半径, 证明:

$$\frac{1}{(p-a)^2} + \frac{1}{(p-b)^2} + \frac{1}{(p-c)^2} \geq \frac{1}{r^2}$$

4 证明题 (本题共 12 分)

证明: 设 m 是任一正整数, 则 $a_m = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} + \cdots + \frac{1}{2^m}$ 不是整数

5 解答题 (本题共 18 分)

下图是 2013 年恒大足球俱乐部策划的主场与首尔 FC 足球队的亚冠决赛海报, 左边是恒大队, 右边是首尔队, 该海报的寓意是什么? 要求简单推导海报中两个数学式子的结果. 一个数学式子是 $\sqrt{1+2\sqrt{1+3\sqrt{1+4\sqrt{1+\cdots}}}}$ (拉马努金式子), 另一个是 $e^{\pi i} + 1$ (已知欧拉公式 $e^{\pi i} = \cos \alpha + i \sin \alpha$).



6 参考答案

1 填空题 (本题共 5 小题, 每小题 8 分, 共 40 分)

1. **Solution.** $f(x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}$ 计算得 $f_2(x) = \frac{x}{\sqrt{1+2x^2}}$, $f_3(x) = \frac{x}{\sqrt{1+3x^2}}$
由此猜想: $f(x)$ 经过 n 次复合后结果是 $\frac{x}{\sqrt{1+nx^2}}$, 下面用数学归纳法证明:

当 $n=1$ 时, 显然成立

当 $n=k(k \in \mathbb{N}^+)$ 时, $f_k(x) = \frac{x}{\sqrt{1+kx^2}}$ 成立.

当 $n=k+1$ 时, f_{k+1} 为 $f(x)$ 和 $f_k(x)$ 的复合函数

经计算得 $f_{k+1} = \frac{x}{\sqrt{1+(k+1)x^2}}$ 与假设相符, 故假设成立

故: $f_n(x) = \frac{x}{\sqrt{1+nx^2}}$

2. **Solution.** 答案很明显 $p(x) = x$, 证明如下:

注意到 $p(1) = p(0)^2 + 1 = 1, p(2) = p(1)^2 + 1 = 2, p(5) = p(2)^2 + 1 = 5, \dots \Rightarrow$
 $p(x) = x$ 有无穷多解

又 $\because p(x)$ 为多项式函数 (设为 n 次), 则 $p(x) - x$ 也为多项式函数

但由代数基本定理 $p(x) - x = 0$ 最多有 n 个根 $\Rightarrow p(x) - x \equiv 0 \Rightarrow p(x) = x$

3. **Solution.** 注意到:

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{k=1}^n \frac{6^k}{(3^{k+1} - 2^{k+1})(3^k - 2^k)} \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{2^k}{3^k - 2^k} - \frac{2^{k+1}}{3^{k+1} - 2^{k+1}} \\ &= 2 - \frac{2^{n+1}}{3^{n+1} - 2^{n+1}} \rightarrow 2 (n \rightarrow \infty) \end{aligned}$$

4. **Solution.** 注意到:

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \frac{(x + \frac{1}{x})^6 - (x^3 + \frac{1}{x^3})^2}{(x + \frac{1}{x})((x + \frac{1}{x})^2 + x^2 + \frac{1}{x^2} - 1)} \\
 &= \frac{(x + \frac{1}{x})^2((x + \frac{1}{x})^4 - (x^2 + \frac{1}{x^2} - 1)^2)}{(x + \frac{1}{x})((x + \frac{1}{x})^2 + x^2 + \frac{1}{x^2} - 1)} \\
 &= \frac{(x + \frac{1}{x})^2((x + \frac{1}{x})^2 - (x^2 + \frac{1}{x^2} - 1))((x + \frac{1}{x})^2 + (x^2 + \frac{1}{x^2} - 1))}{(x + \frac{1}{x})((x + \frac{1}{x})^2 + x^2 + \frac{1}{x^2} - 1)} \\
 &= 3(x + \frac{1}{x}) \geq 6 \text{ (当且仅当 } x = 1 \text{ 取得 “=”)}
 \end{aligned}$$

5. **Solution.** 答案是否定的. 不一定会出现这 5 个学生. 假设 20 个学生都选三门课, 而且选法都不完全一样, 因为 $20 = \binom{6}{3}$, 所以这是可能的. 那么对任何两门课程, 恰有 4 个学生选 (他们选的第 3 门课都不同, $4 = 6 - 2$ 门课程中的一门). 所以任何两门课程没有 5 个学生同时选. 同样地, 对任何两门课程, 恰有 4 个学生没有选取这两门课, 而没有 5 名学生同时不选两门课.

2 证明题 (本题共 14 分)

1. **Proof.** 反证法, 设 $\sqrt{a} \in \mathbb{Q}$, 从而可进一步设 $\sqrt{a} = \frac{p}{q}$ ($p, q \in \mathbb{N}^*, (p, q) = 1$)

$$\Rightarrow p^2 = aq^2$$

$$\because a \text{ 不是完全平方数} \therefore \exists m \in \mathcal{P}, s.t. \ a \bmod m = 0, a \bmod m^2 \neq 0$$

$$p^2 = aq^2 \Rightarrow p^2 \bmod m = 0 \Rightarrow p \bmod m = 0 \Rightarrow p^2 \bmod m^2 = 0$$

$$\Rightarrow aq^2 \bmod m^2 = 0 \Rightarrow q^2 \bmod m = 0 \Rightarrow q \bmod m = 0$$

$$\therefore q \bmod m = 0, p \bmod m = 0 \text{ 与 } (p, q) = 1 \text{ 矛盾, 故 } \sqrt{a} \text{ 为无理数}$$

2. **Proof.** 反证法. 假设存在整数 m, n, p , 使得 $m + n\sqrt{2} + p\sqrt{3} = 0$

首先考虑含有 0 的情况, 这种情况显然是存在矛盾的, 不多赘述

下面考虑 m, n, p 全部不为 0 的情况:

注意到 $n\sqrt{2}$ 和 $p\sqrt{3}$ 也是无理数对于 $m + n\sqrt{2} + p\sqrt{3} = 0$, 易得:

$$m = -n\sqrt{2} - p\sqrt{3}$$

$$\Leftrightarrow m^2 = (n\sqrt{2} + p\sqrt{3})^2$$

$$\Leftrightarrow m^2 = 2n^2 + 3p^2 + 2\sqrt{6}np$$

$$\because m \in \mathbb{Z} \therefore m^2 \in \mathbb{Z} \Rightarrow 2n^2 + 3p^2 + 2\sqrt{6}np \in \mathbb{Z}$$

但 $2\sqrt{6}np$ 是一个无理数。因此, $2n^2 + 3p^2 + 2\sqrt{6}np$ 必是一个无理数。矛盾, 假设不成立。综上所述, 除了 $\{0, 0, 0\}$ 外, 不存在其他整数 m, n, p 使得 $m + n\sqrt{2} + p\sqrt{3} = 0$ 。

3 证明题 (本题共 16 分)

Proof. 设三角形的面积为 S , 则 $S = pr$, $S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$,

$$\Rightarrow p^2 r^2 = p(p-a)(p-b)(p-c).$$

设 $x = \frac{1}{p-a}, y = \frac{1}{p-b}, z = \frac{1}{p-c}$, 则有:

$$\frac{1}{r^2} = pxyz = xyz \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} \right) = xy + yz + zx$$

$$\Leftrightarrow x^2 + y^2 + z^2 \geq xy + yz + zx$$

而上式是显然易证的。

4 证明题 (本题共 12 分)

Proof. 当 $m = 1$ 时, $a_1 = \frac{1}{2}$, 显然不是整数, 结论成立. 下面证明, 当 $m \geq 2$ 时, $a_m = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2^m}$ 也不可能是整数. 设 $S = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2^m}$, 令 $M = 2^m$, 在 S 两边同时乘以 M 得:

$$MS = \frac{M}{2} + \frac{M}{3} + \frac{M}{4} + \dots + 1 \quad (*)$$

等式右边的每一项 $\frac{M}{k}$ ($k = 1, 2, 3, \dots, 2^m$) 要么是整数, 要么是一个分母为奇数的不可约分数, 再来考察那些分母为奇数的不可约分数的项. 因为 $m \geq 2$, 故在所有的分母当中 (都是奇数) 必定存在一个最大的奇素数, 设它为 p , 这样在分母中去掉 p , 设余下的奇数的最小公倍数为 N , 在 $(*)$ 再同时乘以 N , 得到

$$MNS = \frac{MN}{2} + \frac{MN}{3} + \frac{MN}{4} + \dots + N$$

等式右边的每一项 $\frac{MN}{k}$ ($k = 1, 2, 3, \dots, 2^m, k \neq p$), 仅当 $k = p$ 时, $\frac{MN}{k}$ 不是整数, 其他的项都是整数.

所以等式右边最后得到的不是整数, 因此, 等式左边的 MNS 也不是整数, 显然, 若 S 是整数, 那么就与 MNS 不是整数相矛盾! 所以 a_m 不可能是整数. 证毕.

5 解答题 (本题共 18 分)

Solution. 注意到拉马努金恒等式: $n = \sqrt{1 + (n-1)(n+1)}$, 因此:

$$\begin{aligned} 3 &= \sqrt{1 + 2 \cdot 4} \\ &= \sqrt{1 + 2\sqrt{1 + 3 \cdot 5}} \\ &= \sqrt{1 + 2\sqrt{1 + 3\sqrt{1 + 4 \cdot 6}}} \\ &= \dots \end{aligned}$$

注意到 $e^{i\pi} + 1 = 0$, 故结果为: $3 : 0$