

2025 年循人中学高三期末考兼统考预试

高中组

高级数学 (III)

(SC007)

训练集

采题: 李冬恒

January 28, 2026

版权所有 © 2026 李冬恒

前言

此训练集的雏形要追溯到 2019 年,依稀记得为当时的备赛爬了大量的 AMC 历届考题,创了“AMC 10 精选”的文档,其中我认为是属于统考范围的难题,便收录于另一个文档。

尘封已久,直到今年 5 月,我在整理电脑资料时偶然翻出,看着当年的内容,心想:读了一个数学系,难免觉得发展空间实属不少。在这几个月内,我随性地在网络上寻找、采集、整理更有趣(恶心)、更值得深思(烧脑)的题目,于是诞生了——高级数学 (III) 训练集。

起初,我并没想过要为每一题整理出解析,但发现到不少当年的题目只附答案没附解法。可惜的是,我的脑袋算是停止运作了一年,发现有一些题目对于现在的我实在是难以下咽。好吧,此乃下下策,但我决定用 LaTeX 开始动手为每一题补上解法、重写排版、增加新的内容。也好,既是备忘录,也是为了防止未来的我看到这些题目时会再次怀疑人生:「咦?是不是百尺竿头,更蠢一步?」

依据统考范围,我把训练集大致分为代数、组合数学、几何及微积分。若你想自行动手尝试,可以在 preamble 中将 `\printanswers` 这行注释掉。

绝大部分解法都由官方或我提供,只有某些是 ChatGpt 生成后由我再校对,之中一定会有纰漏,欢迎批评指正,也希望这份训练集能助你一路披荆斩棘、越战越勇!

——冬恒

目录



代数

一元二次方程、多项式	4
因式定理、余式定理	32
根式、绝对值	45
指数与对数	55
方程组	71
取整	103
函数	122
不等式	149
数列与级数	208
二项展开式	268
泰勒展开式	291
矩阵	306
行列式	324
复数	348
数学归纳法	386

组合数学

排列与组合	422
概率、期望值	448
统计	475

几何

解三角形	480
三角函数	591
反三角函数	652
平面向量	663
直角坐标	674
圆锥曲线	701
坐标变换	777
轨迹方程式、参数方程式	783
极坐标	814
立体几何、空间向量	830

微积分

极限	884
微分	908
积分	934
微分方程	1097

总题数: 1510



代数

一元二次方程、多项式

1. 已知方程

$$x^2 - mx - m + 3 = 0$$

的两根满足下列条件, 求 m 的取值范围:

(a) 一根大于 1, 另一根小于 1

设 $f(x) = x^2 - mx - m + 3$, 所求即

$$f(1) = 1 - m - m + 3 < 0 \Rightarrow m > 2$$

(b) 一根小于 0, 另一根大于 2

即

$$\begin{cases} f(0) = -m + 3 < 0 \\ f(2) = 4 - 2m - m + 3 < 0 \end{cases} \Rightarrow m > 3$$

(c) 一根在 0 与 1 之间, 另一根在 1 与 2 之间

即

$$\begin{cases} f(0) = -m + 3 > 0 \\ f(1) = 1 - m - m + 3 < 0 \\ f(2) = 4 - 2m - m + 3 > 0 \end{cases} \Rightarrow 2 < m < \frac{7}{3}$$

(d) 两根都在 -4 与 0 之间

即

$$\begin{cases} f(-4) = 16 + 4m - m + 3 > 0 \\ f(0) = -m + 3 > 0 \\ -4 < \frac{m}{2} < 0 \\ f\left(\frac{m}{2}\right) = \frac{m^2}{4} - \frac{m^2}{2} - m + 3 \leq 0 \end{cases} \Rightarrow -\frac{19}{3} < m < -6$$

(e) 两根都大于 -5

即

$$\begin{cases} f(-5) = 25 + 5m - m + 3 > 0 \\ \frac{m}{2} > -5 \\ f\left(\frac{m}{2}\right) = \frac{m^2}{4} - \frac{m^2}{2} - m + 3 \leq 0 \end{cases} \Rightarrow -7 < m \leq -6 \quad \text{或} \quad m \geq 2$$

(f) 有且仅有一根在 0 与 2 之间

即

$$\begin{cases} 0 < \frac{m}{2} < 2, \\ f\left(\frac{m}{2}\right) = \frac{m^2}{4} - \frac{m^2}{2} - m + 3 = 0 \end{cases}$$

或

$$f(0) \cdot f(2) = (-m + 3)(4 - 2m - m + 3) < 0$$

解得

$$m = 2 \quad \text{或} \quad \frac{7}{3} < m < 3$$

2. 已知 $y = x^3 - x^2 + 3x - 4$ 与 $y = ax^2 - x - 4$ 恰好相交于两点, 求 a 的可能值。

联立方程得

$$x[x^2 - (a+1)x + 4] = 0$$

已知两线交于恰好两点, 其中一点为 $(0, 4)$, 则意味

$$x^2 - (a+1)x + 4 = 0$$

有重根, 其判别式为零:

$$[-(a+1)]^2 - 4 \cdot 1 \cdot 4 = 0$$

解得 $a = 3, -5$

3. 已知由 $f(x) = -x^2 + 4x + 1$ 和 $g(x) = -x + 5$ 所围成的封闭区域 A , 若作一直线 L 垂直于 x 轴, 分别与封闭区域 A 的边界交于 P, Q 两点, 求在封闭区域内的 \overline{PQ} 长的最大值为多少?

令 $f(x) = g(x)$, 则

$$-x^2 + 4x + 1 = -x + 5 \Rightarrow (x-1)(x-4) = 0 \Rightarrow x = 1, 4$$

所以封闭区域的 x 范围为 $[1, 4]$, 而 \overline{PQ} 即

$$f(x) - g(x) = (-x^2 + 4x + 1) - (-x + 5) = -x^2 + 5x - 4 = -\left(x - \frac{5}{2}\right)^2 + \frac{9}{4}$$

在 $x = \frac{5}{2}$ 时有最大值 $\frac{9}{4}$

4. 已知 k 为有理数, 且使得方程式 $kx^2 + (k-1)x + (k+1) = 0$ 只有整数解, 求 k 的所有可能值。

情况一: $k = 0$, 则原方程式为

$$-x + 1 = 0 \Rightarrow x = 1 \in \mathbb{Z}$$

情况二: $k \neq 0$, 原方程式变为

$$k(x^2 + x + 1) = x - 1 \Rightarrow k = \frac{x-1}{x^2+x+1} \quad (1)$$

设 α, β 为 $kx^2 + (k-1)x + (k+1) = 0$ 的两根, 则

$$\alpha + \beta = \frac{1-k}{k} = \frac{1}{k} - 1$$

将 (1) 代入上式,

$$\alpha + \beta = \frac{x^2+x+1}{x-1} - 1 = x + 1 + \frac{3}{x-1} \in \mathbb{Z}$$

解得

$$x-1 = \pm 1, \pm 3 \Rightarrow \begin{cases} x=2, 4 \Rightarrow k = \frac{1}{7} \\ x=0, -2 \Rightarrow k = -1 \end{cases}$$

故 k 的所有可能值为 $-1, 0, \frac{1}{7}$

5. 若抛物线 $y = mx^2 - 1$ 上必存在相异两点对称于直线 $x + y = 0$, 求 m 的范围。

设 A, B 在抛物线 $\Gamma: y = mx^2 - 1$ 上且对称于直线 $L_1: x + y = 0$, 则 A, B 同在直线

$$L_2: y = x + k$$

上, 其中 $L_1 \perp L_2$, 抛物线与 L_2 联立得

$$mx^2 - x - 1 - k = 0 \quad (1)$$

设 (1) 的解为 a, b , 则 $A(a, a + k), B(b, b + k)$ 的中点 $C\left(\frac{a+b}{2}, \frac{a+b}{2} + k\right)$ 在 L_1 上, 得

$$\frac{a+b}{2} + \frac{a+b}{2} + k = 0 \Rightarrow k = -(a+b)$$

由韦达定理,

$$k = -(a+b) = -\frac{1}{m}$$

且两实根相异, 则判别式大于 0:

$$\Delta = (-1)^2 - 4m\left(-\frac{1}{m} + 1\right) > 0 \Rightarrow m > \frac{3}{4}$$

6. 实系数二次多项方程 $f(x) = 0$ 有一根为 2, 且方程 $f(f(x)) = 0$ 恰只有一实根为 5, 求 $f(0)$ 。

设

$$f(x) = a(x-2)(x-b)$$

则

$$\begin{aligned} g(x) = f(f(x)) &= a[a(x-2)(x-b)-2][a(x-2)(x-b)-b] \\ &= a^3 \left(x^2 - (b+2)x + 2b - \frac{2}{a} \right) \left(x^2 - (b+2)x + 2b - \frac{b}{a} \right) \equiv a^3 f_1(x) f_2(x) \end{aligned}$$

若 $f_1 = (x-5)^2$, f_2 的判别式 < 0 , 可得

$$a = -\frac{2}{9}, b = 8$$

若 $f_2 = (x-5)^2$, f_1 的判别式 < 0 , 可得

$$a = -\frac{8}{9}, b = 8$$

但 f_1 判别式 > 0 , 故舍去; 因此

$$f(0) = 2ab = 2 \cdot \left(-\frac{2}{9}\right) \cdot 8 = -\frac{32}{9}$$

7. 求所有实数 c , 使得 $f(x) = x^2 + 4x + c$ 满足 $f(f(x))$ 恰好有三个相异实根。

若 f 的根为重根, 则 $f \circ f$ 至多只有两个相异根, 因此 f 必须有两个相异根。设 r 为其中一根使得 $f(x) = r$ 有重根, 解

$$x^2 + 4x + c - r = (x + 2)^2$$

得 $r = c - 4$ 是 f 的根, 故

$$(c - 4)^2 + 4(c - 4) + c = 0 \Rightarrow c = 0 \text{ 或 } c = 3.$$

当 $c = 0$, 解 $x^2 + 4x = 0$ 及 $x^2 + 4x = -4$ 得

$$x = 0, -4, -2,$$

当 $c = 3$, 解 $x^2 + 4x + 3 = -3$ 及 $x^2 + 4x + 3 = -1$, 发现其中

$$x^2 + 4x + 6$$

判别式为负, 故唯一满足条件的 c 为 0。

8. 求非零实数三元组 (a, b, c) , 使得

$$(x^2 + 2ax + b)^2 + 2a(x^2 + 2ax + b) - b = (x - c)^4$$

是多项式恒等式。

设

$$P(x) = x^2 + 2ax + b, Q(x) = x^2 + 2ax - b,$$

且 $Q(P(x))$ 的根满足 $P(x) = r_1$ 或 $P(x) = r_2$, 其中 r_1, r_2 是 Q 的根。欲使 $Q(P(x))$ 只有一个四重根, Q 必须有重根, 因此判别式为

$$4a^2 + 4b = 0 \Rightarrow b = -a^2,$$

其中根为 $-a$, 此时 $P(x) = -a$ 也必须有重根, 因此 $P(x) + a = x^2 + 2ax + b + a = 0$ 的判别式为

$$4a^2 - 4(a + b) = 0.$$

代入 $b = -a^2$ 解得

$$a = \frac{1}{2}, \quad b = -\frac{1}{4}.$$

c 是 $P(x) + a = 0$ 的解, 即 $c = -a = -\frac{1}{2}$, 所以三元组为

$$(a, b, c) = \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{4}, -\frac{1}{2}\right)$$

9. 求所有实数 k , 使方程

$$4x^2 + 4(2 - k)x - k^2 = 0$$

有两个实数解 x_1, x_2 满足 $|x_1| = 2 + |x_2|$ 。

由韦达定理,

$$x_1 + x_2 = k - 2, \quad x_1 x_2 = -\frac{k^2}{4} \leq 0$$

条件 $|x_1| = 2 + |x_2|$ 等价于

$$4 = (|x_1| - |x_2|)^2 = x_1^2 + x_2^2 - 2|x_1 x_2| = (x_1 + x_2)^2 - 2x_1 x_2 + 2|x_1 x_2|$$

解得

$$k = 0 \text{ 或 } 4$$

10. 解方程

$$(x+1)(x+2)(x+3)^2(x+4)(x+5) = 360$$

排版后有

$$(x+1)(x+5)(x+2)(x+4)(x+3)(x+3) = 360$$

$$(x^2 + 6x + 5)(x^2 + 6x + 8)(x^2 + 6x + 9) = 360$$

设 $y = x^2 + 6x$, 变为

$$(y+5)(y+8)(y+9) = 360$$

$$y(y^2 + 22y + 157) = 0$$

其中 $y^2 + 22y + 157 = 0$ 无实数解, 解 $x^2 + 6x = 0$ 可得

$$x = 0, -6$$

11. 解方程

$$9x^4 - 24x^3 - 2x^2 - 24x + 9 = 0 \quad x \in \mathbb{R}$$

此方程为倒数方程式, 将原方程写成

$$\begin{aligned} 9x^2 - 24x - 2 - \frac{24}{x} + \frac{9}{x^2} &= 0 \\ 9\left(x^2 + \frac{1}{x^2}\right) - 24\left(x + \frac{1}{x}\right) - 2 &= 0 \end{aligned}$$

设 $y = x + \frac{1}{x}$, 则

$$x^2 + \frac{1}{x^2} = y^2 - 2$$

代入方程得

$$9(y^2 - 2) - 24y - 2 = 0 \Rightarrow y = \frac{10}{3}, -\frac{2}{3}$$

当 $x + \frac{1}{x} = \frac{10}{3}$, 解得

$$x = \frac{1}{3}, \quad x = 3$$

当 $x + \frac{1}{x} = -\frac{2}{3}$, 方程

$$3x^2 + 2x + 3 = 0$$

的判别式 $2^2 - 4 \cdot 3 \cdot 3 = -32 < 0$, 故无实数解, 因此原方程式的实根为

$$x = \frac{1}{3}, \quad x = 3$$

12. 解

$$\frac{x^2 + 16x + 54}{x^2 + 11x + 35} = \frac{x^2 + 13x + 35}{x^2 + 14x + 54}$$

使得原式交叉相乘时能顺利平方差, 写成

$$\begin{aligned} \frac{x^2 + 15x + 54 + x}{x^2 + 12x + 35 - x} &= \frac{x^2 + 12x + 35 + x}{x^2 + 15x + 54 - x} \\ (x^2 + 15x + 54)^2 - x^2 &= (x^2 + 12x + 35)^2 - x^2 \end{aligned}$$

$$(x^2 + 15x + 54)^2 - (x^2 + 12x + 35)^2 = 0$$

再平方差得

$$(3x + 19)(2x^2 + 27x + 89) = 0$$

经检验, 原方程的解为 $x = -\frac{19}{3}, \frac{-27 \pm \sqrt{17}}{4}$

13. 解

$$(x+1)^5 + (x+1)^4(x-1) + (x+1)^3(x-1)^2 + (x+1)^2(x-1)^3 + (x+1)(x-1)^4 + (x-1)^5 = 0$$

其中 $x \in \mathbb{C}$ 。

利用恒等式

$$\frac{a^6 - b^6}{a - b} = a^5 + a^4b + a^3b^2 + a^2b^3 + ab^4 + b^5$$

则原式可写为

$$\frac{(x+1)^6 - (x-1)^6}{(x+1) - (x-1)} = 0(x+1)^6 - (x-1)^6 = 0$$

展开并化简得

$$x(3x^2 + 1)(x^2 + 3) = 0$$

解得

$$x = 0, \quad x = \pm \frac{\sqrt{3}}{3}i, \quad x = \pm \sqrt{3}i$$

14. 已知 α, β 是方程

$$x^2 + (m-2)x + 1 = 0$$

的根, 求

$$(1 + m\alpha + \alpha^2)(1 + m\beta + \beta^2).$$

由于 α, β 是方程

$$x^2 + mx - 2x + 1 = 0$$

的根, 故满足

$$\alpha^2 + m\alpha + 1 = 2\alpha, \quad \beta^2 + m\beta + 1 = 2\beta$$

于是

$$(1 + m\alpha + \alpha^2)(1 + m\beta + \beta^2) = (2\alpha)(2\beta) = 4\alpha\beta$$

由韦达定理, $\alpha\beta = 1$, 因此

$$(1 + m\alpha + \alpha^2)(1 + m\beta + \beta^2) = 4 \cdot 1 = 4$$

15. 若三次多项式 $x^3 + 3x - 2 = 0$ 的根为 a, b, c , 求以 $(a-b)^2, (b-c)^2, (c-a)^2$ 为根且首项系数为 1 的三次多项式。

由韦达定理,

$$a + b + c = 0, \quad ab + bc + ca = 3, \quad abc = 2.$$

且有

$$a^3 + 3a = b^3 + 3b = c^3 + 3c = 2.$$

因此

$$a^3 - b^3 + 3(a - b) = 0 \Rightarrow (a - b)(a^2 + ab + b^2 + 3) = 0 \Rightarrow a^2 + ab + b^2 = -3$$

于是

$$(a - b)^2 = -3 - 3ab = -3(ab + 1)$$

同理,

$$(b - c)^2 = -3(bc + 1), \quad (c - a)^2 = -3(ca + 1)$$

故

$$(a - b)^2 + (b - c)^2 + (c - a)^2 = -3(3 + ab + bc + ca) = -18$$

$$\begin{aligned} & (a - b)^2(b - c)^2 + (b - c)^2(c - a)^2 + (c - a)^2(a - b)^2 \\ &= 9((ab + 1)(bc + 1) + (bc + 1)(ca + 1) + (ca + 1)(ab + 1)) \\ &= 9(2(a + b + c) + 2(ab + bc + ca) + 3) = 81 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (a - b)^2(b - c)^2(c - a)^2 &= -27(ab + 1)(bc + 1)(ca + 1) \\ &= -27(abc(a + b + c) + (abc)^2 + ab + bc + ca + 1) = -216 \end{aligned}$$

所求三次多项式为

$$x^3 + 18x^2 + 81x + 216$$

16. 设 $a, b, c \in \mathbb{R}$, 证明方程式

$$\frac{b+c}{x-a} + \frac{c+a}{x-b} + \frac{a+b}{x-c} = 3$$

的根都是实根。

有

$$\begin{aligned} & \frac{b+c}{x-a} + \frac{c+a}{x-b} + \frac{a+b}{x-c} = 3 \\ & 1 - \frac{b+c}{x-a} + 1 - \frac{c+a}{x-b} + 1 - \frac{a+b}{x-c} = 0 \\ & \frac{x-a-b-c}{x-a} + \frac{x-a-b-c}{x-b} + \frac{x-a-b-c}{x-c} = 0 \\ & (x-a-b-c) \left(\frac{1}{x-a} + \frac{1}{x-b} + \frac{1}{x-c} \right) = 0 \\ & (x-a-b-c) \frac{x^2 - (b+c)x + bc + x^2 - (a+c)x + ac + x^2 - (a+b)x + ab}{(x-a)(x-b)(x-c)} = 0 \\ & (x-a-b-c) (3x^2 - 2(a+b+c)x + ab + bc + ca) = 0 \end{aligned}$$

故方程式

$$\frac{b+c}{x-a} + \frac{c+a}{x-b} + \frac{a+b}{x-c} = 3$$

有一实根 $x = a + b + c$, 现探讨另两根, 方程式

$$3x^2 - 2(a+b+c)x + ab + bc + ca = 0.$$

的判别式为

$$\Delta = 4(a+b+c)^2 - 12(ab+bc+ca) = 4(a^2+b^2+c^2 - ab - bc - ca).$$

由 AM-GM 不等式,

$$ab + bc + ca \leq \frac{a^2 + b^2}{2} + \frac{b^2 + c^2}{2} + \frac{c^2 + a^2}{2} = a^2 + b^2 + c^2.$$

故判别式为非负, 于是方程式 $3x^2 - 2(a+b+c)x + ab + bc + ca = 0$ 的根都是实根, 得证原方程式的根都是实根。

17. 设 $f(x) = x^3 + 4x^2 + 8x + 16$, 计算

$$f(x+7) - f(x+6) - f(x+5) + f(x+4) - f(x+3) + f(x+2) + f(x+1) - f(x).$$

设 $g(x) = f(x+1) - f(x)$, 则

$$g(x) = 3x^2 + 10x + 12$$

同理设 $h(x) = g(x+2) - g(x) = 12x + 24$, 原式可写成

$$g(x+6) - g(x+4) - g(x+2) + g(x) = h(x+4) - h(x) = 12(x+4) - 12x = 48$$

18. 已知关于 x 的方程 $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$ 的三个非零实数根成等比数列, 求 $a^3c - b^3$ 的值。

设方程 $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$ 的三根为 $\frac{\alpha}{r}, \alpha, \alpha r, \alpha \neq 0$, 由韦达定理,

$$-a = \frac{\alpha}{r} + \alpha + \alpha r = \alpha \left(\frac{1}{r} + 1 + r \right) \quad (1)$$

$$b = \frac{\alpha^2}{r} + \alpha^2 + \alpha^2 r = \alpha^2 \left(\frac{1}{r} + 1 + r \right) \quad (2)$$

$$-c = \alpha^3 \quad (3)$$

由 (1), (2) 得 $-\frac{b}{a} = \alpha$, 代入 (3) 得

$$-c = -\frac{b^3}{a^3} \Rightarrow a^3c - b^3 = 0$$

19. 已知 $\left(x + \frac{1}{x}\right)^2 = 3$, 求

$$x^{63} + x^{44} + x^{37} + x^{31} + x^{26} + x^9 + 6$$

的值。

由已知得

$$\left(x + \frac{1}{x}\right)^3 = x^3 + \frac{1}{x^3} + 3(1)(\sqrt{3}) = 3\sqrt{3}$$

给出

$$x^3 + \frac{1}{x^3} = 0$$

同理可得,

$$x^9 + \frac{1}{x^9} = 0, \quad x^{27} + \frac{1}{x^{27}} = 0$$

故

$$\begin{aligned} & x^{63} + x^{44} + x^{37} + x^{31} + x^{26} + x^9 + 6 \\ &= x^{36} \left(x^{27} + \frac{1}{x^{27}} \right) + x^{35} \left(x^9 + \frac{1}{x^9} \right) + x^{34} \left(x^3 + \frac{1}{x^3} \right) + 6 = 6 \end{aligned}$$

20. 已知实数 x 满足

$$x^3 + \frac{1}{x^3} = 18$$

求

$$x^{11} + \frac{1}{x^{11}}.$$

设 $a = x + \frac{1}{x}$, 则

$$a^3 - 3a = 18 \Rightarrow (a - 3)(a^2 + 3a + 6) = 0$$

所以

$$a = x + \frac{1}{x} = 3 \in \mathbb{R}$$

则

$$x^2 + \frac{1}{x^2} = 3^2 - 2 = 7$$

同理得

$$x^4 + \frac{1}{x^4} = 47, \quad x^8 + \frac{1}{x^8} = 2207$$

于是

$$\left(x^2 + \frac{1}{x^2} \right) \left(x^3 + \frac{1}{x^3} \right) = x^5 + \frac{1}{x^5} + x + \frac{1}{x} = 126 \Rightarrow x^5 + \frac{1}{x^5} = 123$$

且

$$\left(x^3 + \frac{1}{x^3} \right) \left(x^8 + \frac{1}{x^8} \right) = x^{11} + \frac{1}{x^{11}} + x^5 + \frac{1}{x^5} = 39726$$

故

$$x^{11} + \frac{1}{x^{11}} = 39726 - 123 = 39603$$

21. 已知 α, β, γ 是方程

$$x^3 - x - 1 = 0$$

的三根, 计算

$$\frac{1-\alpha}{1+\alpha} + \frac{1-\beta}{1+\beta} + \frac{1-\gamma}{1+\gamma}$$

的值。

由韦达定理, $\alpha + \beta + \gamma = 0$, $\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha = -1$, $\alpha\beta\gamma = 1$, 故

$$\begin{aligned}\frac{1-\alpha}{1+\alpha} + \frac{1-\alpha}{1+\beta} + \frac{1-\gamma}{1+\gamma} &= \frac{2}{1+\alpha} + \frac{2}{1+\beta} + \frac{2}{1+\gamma} - 3 \\&= 2 \cdot \frac{(1+\alpha)(1+\beta) + (1+\beta)(1+\gamma) + (1+\gamma)(1+\alpha)}{(1+\alpha)(1+\beta)(1+\gamma)} - 3 \\&= 2 \cdot \frac{3 + 2(\alpha + \beta + \gamma) + \alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha}{1 + \alpha + \beta + \gamma + \alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha + \alpha\beta\gamma} - 3 \\&= 2 \cdot \frac{3-1}{1-1+1} - 3 \\&= 1\end{aligned}$$

22. 已知 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 为 $x^4 + 2x^3 + x^2 + 2x + 1 = 0$ 的四根, 试求

$$(\alpha^2 + \alpha + 1)(\beta^2 + \beta + 1)(\gamma^2 + \gamma + 1)(\delta^2 + \delta + 1)$$

的值。

α 是方程

$$x^4 + 2x^3 + x^2 + 2x + 1 = 0$$

的根, 则

$$\alpha^4 + 2\alpha^3 + \alpha^2 + 2\alpha + 1 = 0 \Rightarrow (\alpha^2 + \alpha + 1)^2 = 2\alpha^2 \Rightarrow \alpha^2 + \alpha + 1 = \sqrt{2}\alpha$$

同理可得

$$\beta^2 + \beta + 1 = \sqrt{2}\beta, \quad \gamma^2 + \gamma + 1 = \sqrt{2}\gamma, \quad \delta^2 + \delta + 1 = \sqrt{2}\delta$$

由韦达定理,

$$(\alpha^2 + \alpha + 1)(\beta^2 + \beta + 1)(\gamma^2 + \gamma + 1)(\delta^2 + \delta + 1) = (\sqrt{2})^4 \cdot \alpha\beta\gamma\delta = 4 \cdot 1 = 4$$

23. 设方程 $x^3 - 4x + 1 = 0$ 的三个相异复数根为 a, b, c , 求

$$\frac{a+1}{(a-1)^4} + \frac{b+1}{(b-1)^4} + \frac{c+1}{(c-1)^4}$$

的值。

发现

$$\frac{a+1}{(a-1)^4} = \frac{1}{(a-1)^3} + \frac{2}{(a-1)^4}$$

, 因此欲求以 $\frac{1}{a-1}, \frac{1}{b-1}, \frac{1}{c-1}$ 为三根的多项式, 令 $x_1 = x - 1$ 代入原方程式

$$(x_1 + 1)^3 - 4(x_1 + 1) + 1 = 0 \Rightarrow x_1^3 + 3x_1^2 - x_1 - 2 = 0$$

再令 $x_2 = \frac{1}{x_1}$ 代入可得

$$\frac{1}{x_2^3} + \frac{3}{x_2^2} - \frac{1}{x_2} - 2 = 0 \Rightarrow x_2^3 + \frac{1}{2}x_2^2 - \frac{3}{2}x_2 - \frac{1}{2} = 0$$

故

$$\frac{a+1}{(a-1)^4} + \frac{b+1}{(b-1)^4} + \frac{c+1}{(c-1)^4} = (\alpha^3 + \beta^3 + \gamma^3) + 2(\alpha^4 + \beta^4 + \gamma^4) \quad (1)$$

设 $f(x) = x^3 + \frac{1}{2}x^2 - \frac{3}{2}x - \frac{1}{2}$, 则 $f'(x) = 3x^2 + x - \frac{3}{2}$, 利用长除法计算 $\frac{f'(x)}{f(x)}$:

$$\frac{f'(x)}{f(x)} = \frac{3}{x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{x^2} + \frac{13}{4} \cdot \frac{1}{x^3} - \frac{7}{8} \cdot \frac{1}{x^4} + \frac{81}{16} \cdot \frac{1}{x^5} + \cdots$$

由系数比较得

$$\alpha^3 + \beta^3 + \gamma^3 = -\frac{7}{8}, \quad \alpha^4 + \beta^4 + \gamma^4 = \frac{81}{16}$$

故所求为

$$-\frac{7}{8} + 2 \cdot \frac{81}{16} = \frac{37}{4}$$

24. 已知 $f(x) = x^4 + px^3 + qx^2 + rx + s$ 且 $f(1) = 59, f(2) = 118, f(3) = 177$, 求 $f(9) + f(-5)$ 。

考虑函数 $g(x) = 59x$, 则

$$f(1) = g(1) = 59, \quad f(2) = g(2) = 118, \quad f(3) = g(3) = 177$$

定义 $h(x) = f(x) - g(x)$, 则 $x = 1, 2, 3$ 为 $h(x)$ 的根且 $h(x)$ 首项系数为 1, 所以设

$$h(x) = (x-1)(x-2)(x-3)(x-a)$$

其中 a 是一实数, 于是

$$\begin{aligned} f(9) + f(-5) &= h(9) + g(9) + h(-5) + g(-5) \\ &= 336(9-a) + 9 \cdot 59 + 336(5+a) - 5 \cdot 59 \\ &= 4940 \end{aligned}$$

25. 已知 x_1, x_2, x_3 是方程

$$x^3 - 6x^2 + ax - a = 0$$

的根, 且满足

$$(x_1 - 3)^3 + (x_2 - 3)^3 + (x_3 - 3)^3 = 0,$$

求 a 的值。

令 $r_i = x_i - 3$, 则 r_1, r_2, r_3 是方程

$$(x + 3)^3 - 6(x + 3)^2 + a(x + 3) - a = 0$$

即方程

$$x^3 + 3x^2 + (a - 9)x + (2a - 27) = 0$$

的根, 由韦达定理,

$$r_1 + r_2 + r_3 = -3, \quad r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1 = a - 9, \quad r_1 r_2 r_3 = 27 - 2a$$

由立方和公式,

$$r_1^3 + r_2^3 + r_3^3 = -3(9 - 3(a - 9)) + 3(27 - 2a) = 0$$

解得

$$a = 9$$

26. 已知 x_1, x_2, x_3 为方程 $\sqrt{123}x^3 - 247x^2 + 2 = 0$ 的相异实根, 且 $x_1 < x_2 < x_3$, 求 $x_2(x_3^2 - x_1^2)$ 的值。

设 $\sqrt{123} = a$, 则方程 $\sqrt{123}x^3 - 247x^2 + 2 = 0$ 化为

$$ax^3 - (2a^2 + 1)x^2 + 2 = 0 \Rightarrow (ax - 1)(x^2 - 2ax - 2) = 0$$

所以方程的 3 个实数根为

$$\frac{1}{a}, a + \sqrt{a^2 + 2}, a - \sqrt{a^2 + 2}$$

因为 $a = \sqrt{123} > 1$, 所以

$$a - \sqrt{a^2 + 2} < 0 < \frac{1}{a} < 1 < a + \sqrt{a^2 + 2}$$

因此 $x_1 = a - \sqrt{a^2 + 2}, x_2 = \frac{1}{a}, x_3 = a + \sqrt{a^2 + 2}$, 而

$$x_2(x_3^2 - x_1^2) = \frac{1}{a} \cdot 2\sqrt{a^2 + 2} \cdot 2a = 20\sqrt{5}$$

27. 已知正整数 m, n 满足 $m^2 - n = 32$, 且 $\sqrt[5]{m + \sqrt{n}} + \sqrt[5]{m - \sqrt{n}}$ 是方程

$$x^5 - 10x^3 + 20x - 40 = 0$$

的一个实根, 求 m, n 的值。

令 $a = \sqrt[5]{m + \sqrt{n}}, b = \sqrt[5]{m - \sqrt{n}}$, 则 $x = a + b$ 是该方程的一个实根, 且

$$a^5 + b^5 = 2m, \quad a^5 b^5 = m^2 - n = 32 \Rightarrow ab = 2$$

考虑 $(a + b)^5$ 的展开式:

$$x^5 = a^5 + b^5 + 5ab(a^3 + b^3) + 10a^2b^2(a + b)$$

由 $a^3 + b^3 = (a + b)[(a + b)^2 - 3ab] = x(x^2 - 6)$, 得

$$x^5 = 2m + 10x(x^2 - 6) + 40x$$

整理得:

$$x^5 - 10x^3 + 20x - 2m = 0$$

对比原方程式得

$$m = 20, n = 368$$

28. 设方程式 $x^5 + x^4 - x^2 + 1 = 0$ 的五个根为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$, 若 $P(x) = x^4 - 1$, 求

$$P(\alpha_1)P(\alpha_2)P(\alpha_3)P(\alpha_4)P(\alpha_5)$$

的值。

设

$$f(x) = x^5 + x^4 - x^2 + 1 = (x - \alpha_1)(x - \alpha_2)(x - \alpha_3)(x - \alpha_4)(x - \alpha_5)$$

令 $x = 1$ 得

$$f(1) = (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_3)(1 - \alpha_4)(1 - \alpha_5) = 0$$

由于

$$P(x) = x^4 - 1 = (x^2 + 1)(x - 1)(x + 1)$$

故

$$\begin{aligned} & P(\alpha_1)P(\alpha_2)P(\alpha_3)P(\alpha_4)P(\alpha_5) \\ &= -(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)(1-\alpha_3)(1-\alpha_4)(1-\alpha_5) \prod_{k=1}^5 (\alpha_k^2 + 1)(\alpha_k + 1) \\ &= 0 \end{aligned}$$

29. 已知 $p(x)$ 是一个整系数多项式, 定义 $q(x) = \frac{p(x)}{x(1-x)}$, 若对所有 $x \neq 0, 1$ 都有

$$q(x) = q\left(\frac{1}{1-x}\right),$$

且 $p(2) = p(3) = 5$, 求 $p(4)$ 的值。

由 $q(x) = q\left(\frac{1}{1-x}\right)$ 可得

$$\frac{p(x)}{x(1-x)} = \frac{p\left(\frac{1}{1-x}\right)}{\frac{1}{1-x}\left(1-\frac{1}{1-x}\right)} \Rightarrow p(x) = (1-x)^3 p\left(\frac{1}{1-x}\right)$$

这说明 $\deg(p) \leq 3$, 设 $p(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$, 则

$$(1-x)^3 p\left(\frac{1}{1-x}\right) = d(1-x)^3 + c(1-x)^2 + b(1-x) + a$$

比较 x^3, x^2 系数得

$$a = d, \quad b = -c - 3d$$

且由 $p(2) = p(3) = 5$ 得

$$-3a - 2c = a - 6c = 5 \Rightarrow a = c = -1$$

于是

$$p(x) = -x^3 + 4x^2 - x - 1 \Rightarrow p(4) = -5$$

30. 已知多项式 $x^7 - 5$ 的七个相异根为 r_1, \dots, r_7 , 求

$$\prod_{1 \leq i < j \leq 7} (r_i + r_j)^2$$

的值。

设所求乘积为 P , 由韦达定理, 考虑

$$\begin{aligned} 2^7 \cdot 5 \cdot P &= \prod_{i=1}^7 2r_i \prod_{1 \leq i < j \leq 7} (r_i + r_j)^2 \\ &= \prod_{1 \leq i \leq j \leq 7} (r_i + r_j) \prod_{1 \leq i < j \leq 7} (r_i + r_j) \prod_{1 \leq j < i \leq 7} (r_i + r_j) \\ &= \prod_{i=1}^7 \prod_{j=1}^7 (r_i + r_j) \end{aligned}$$

且注意到

$$\prod_{j=1}^7 (x - r_j) = x^7 - 5 \Rightarrow \prod_{j=1}^7 (x + r_j) = x^7 + 5,$$

故

$$\prod_{j=1}^7 (r_i + r_j) = r_i^7 + 5 = 10$$

因此

$$2^7 \cdot 5 \cdot P = 10^7 \Rightarrow P = 5^6$$

31. 设 $P(x)$ 为次数为 10 的多项式, 且满足

$$P(2^i) = i, 0 \leq i \leq 10,$$

求 $P(x)$ 中 x 项的系数。

令 $Q(x) = P(2x) - P(x) - 1$, 则 $Q(2^i) = 0, 0 \leq i \leq 9$, 所以

$$Q(x) = \alpha \prod_{k=0}^9 (x - 2^k)$$

其中 α 为一常数, 又 $Q(0) = P(0) - P(0) - 1 = -1$, 且

$$\prod_{k=0}^9 (0 - 2^k) = 2^{45},$$

因此 $\alpha = -\frac{1}{2^{45}}$, 记

$$R(x) = \prod_{k=0}^9 (x - 2^k),$$

其 x 项系数为

$$\operatorname{coef}_x(R) = - \left(\prod_{k=0}^9 2^k \right) \sum_{k=0}^9 \frac{1}{2^k} = -2^{45} \left(2 - \frac{1}{2^9} \right)$$

因为 $P(2x) - P(x) - 1$ 的 x 项系数恰好等于 $P(x)$ 的 x 项系数, 故

$$\operatorname{coef}_x(Q) = \alpha \cdot \operatorname{coef}_x(R) = -\frac{1}{2^{45}} \cdot \left(-2^{45} \cdot \frac{1023}{512} \right) = \frac{1023}{512}$$

32. 已知 $x_1, x_2, \dots, x_{2015}$ 是方程

$$x^{2015} + x^{2014} + \dots + x^2 + x + 1 = 0$$

的根, 求

$$\frac{1}{1-x_1} + \frac{1}{1-x_2} + \dots + \frac{1}{1-x_{2015}}.$$

设

$$a_k = \frac{1}{1-x_k}, \quad k = 1, 2, \dots, 2015.$$

则

$$x_k = \frac{a_k - 1}{a_k}.$$

代入原方程, 得到

$$\frac{(a_k - 1)^{2015}}{a_k^{2015}} + \frac{(a_k - 1)^{2014}}{a_k^{2014}} + \dots + \frac{a_k - 1}{a_k} + 1 = 0.$$

两边同时乘以 a_k^{2015} , 得

$$(a_k - 1)^{2015} + a_k(a_k - 1)^{2014} + \dots + a_k^{2014}(a_k - 1) + a_k^{2015} = 0.$$

因此

$$a_1 + a_2 + \dots + a_{2015} = \frac{{}^{2015}C_1 + {}^{2014}C_1 + \dots + {}^1C_1}{2016} = \frac{2015}{2}$$

而当 $k = 1, 2, \dots, n$, $a_1 + a_2 + \dots + a_{2015} = \frac{n}{2}$

设

$$f(x) = x^{2015} + x^{2014} + \cdots + x + 1,$$

则

$$f(x) = \prod_{k=1}^{2015} (x - x_k) \Rightarrow \frac{f'(x)}{f(x)} = \sum_{k=1}^{2015} \frac{1}{x - x_k}.$$

取 $x = 1$, 得到

$$\sum_{k=1}^{2015} \frac{1}{1 - x_k} = \frac{f'(1)}{f(1)} = \frac{2015}{2}$$

其中

$$f(1) = 2016, \quad f'(1) = 2015 + 2014 + \cdots + 1 = \frac{2015 \cdot 2016}{2}$$

33. (a) 已知 α, β, γ 为三实数, 设 $t = -(\alpha + \beta + \gamma), v = \alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha$, 且满足

$$\alpha\beta\gamma = -1, \quad t + v = -3,$$

试证

$$\alpha^{\frac{1}{3}} + \beta^{\frac{1}{3}} + \gamma^{\frac{1}{3}} = \sqrt[3]{(-t-6) + 3\sqrt[3]{t^2 + 3t + 9}}.$$

设

$$f(x) = (x - \alpha)(x - \beta)(x - \gamma) = x^3 + tx^2 + vx + 1,$$

$$g(y) = (y - \alpha^{\frac{1}{3}})(y - \beta^{\frac{1}{3}})(y - \gamma^{\frac{1}{3}}) = y^3 + ay^2 + by + 1$$

由 $g(y) = 0$ 得 $y^3 + 1 = -y(ay + b)$, 于是

$$(y^3 + 1)^3 = -y^3(a^3y^3 + b^3 + 3aby(ay + b)) = -y^3(a^3y^3 + b^3 - 3ab(y^3 + 1))$$

令 $x = y^3$, 展开整理得

$$x^3 + (a^3 - 3ab + 3)x^2 + (b^3 - 3ab + 3)x + 1 = 0$$

于是 $a^3 - 3ab + 3 = t, b^3 - 3ab + 3 = v$, 令 $z = ab$, 则

$$\begin{aligned} z^3 &= (t + 3z - 3)(v + 3z - 3) \\ &= tv + 3z(t + v) - 3(t + v) + 9z^2 - 18z + 9 \\ &= t(-3 - t) + 3z(-3) - 3(-3) + 9z^2 - 18z + 9 \\ &= 9z^2 - 27z + (-t^2 - 3t + 18) \end{aligned}$$

即

$$(z-3)^3 = -t^2 - 3t - 9 \Rightarrow z = 3 - \sqrt[3]{t^2 + 3t + 9}$$

由韦达定理,

$$\alpha^{\frac{1}{3}} + \beta^{\frac{1}{3}} + \gamma^{\frac{1}{3}} = -a = -\sqrt[3]{t+3z-3} = \sqrt[3]{(-t-6) + 3\sqrt[3]{t^2+3t+9}}$$

故证毕。

(b) 据此, 试证

$$\sqrt[3]{\cos \frac{2\pi}{9}} + \sqrt[3]{\cos \frac{4\pi}{9}} + \sqrt[3]{\cos \frac{8\pi}{9}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2}(\sqrt[3]{9}-2)}$$

考虑

$$\alpha = 2 \cos \frac{2\pi}{9}, \quad \beta = 2 \cos \frac{4\pi}{9}, \quad \gamma = 2 \cos \frac{8\pi}{9}.$$

则由

$$\begin{aligned} \cos \frac{2\pi}{9} \cos \frac{4\pi}{9} \cos \frac{8\pi}{9} &= \frac{1}{2} \left(\cos \frac{6\pi}{9} + \cos \frac{2\pi}{9} \right) \cos \frac{8\pi}{9} \\ &= \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} + \cos \frac{2\pi}{9} \right) \cos \frac{8\pi}{9} \\ &= \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \cos \frac{8\pi}{9} + \cos \frac{2\pi}{9} \cos \frac{8\pi}{9} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \cos \frac{8\pi}{9} + \frac{1}{2} \left(\cos \frac{10\pi}{9} + \cos \frac{6\pi}{9} \right) \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \cos \frac{\pi}{9} - \frac{1}{2} \cos \frac{\pi}{9} - \frac{1}{4} \right) = -\frac{1}{8} \end{aligned}$$

满足已知 $\alpha\beta\gamma = -1$, 此时

$$\begin{aligned} t &= -(\alpha + \beta + \gamma) = -2 \left(\cos \frac{2\pi}{9} + \cos \frac{4\pi}{9} + \cos \frac{8\pi}{9} \right) \\ &= -2 \left(2 \cos \frac{3\pi}{9} \cos \frac{\pi}{9} + \cos \frac{8\pi}{9} \right) \\ &= -2 \left(\cos \frac{\pi}{9} + \cos \frac{8\pi}{9} \right) \\ &= -2 \cdot 2 \cos \frac{\pi}{2} \cos \frac{7\pi}{18} = 0 \end{aligned}$$

故

$$\alpha^{\frac{1}{3}} + \beta^{\frac{1}{3}} + \gamma^{\frac{1}{3}} = \sqrt[3]{-6 + 3\sqrt[3]{9}}$$

且

$$\sqrt[3]{\cos \frac{2\pi}{9}} + \sqrt[3]{\cos \frac{4\pi}{9}} + \sqrt[3]{\cos \frac{8\pi}{9}} = \frac{1}{\sqrt[3]{2}}(\alpha^{\frac{1}{3}} + \beta^{\frac{1}{3}} + \gamma^{\frac{1}{3}}) = \sqrt[3]{\frac{3}{2}(\sqrt[3]{9} - 2)}.$$

证毕。

34. 求

$$\frac{(1^4 + 18^2)(11^4 + 18^2)(23^4 + 18^2)(35^4 + 18^2)(47^4 + 18^2)}{(5^4 + 18^2)(7^4 + 18^2)(17^4 + 18^2)(29^4 + 18^2)(41^4 + 18^2)}$$

的值。

因式分解给出

$$a^4 + 18^2 = (a^2 + 18)^2 - (6a)^2 = (a^2 + 6a + 18)(a^2 - 6a + 18) = ((a + 3)^2 + 9)((a - 3)^2 + 9)$$

故

$$\begin{aligned} & \frac{(1^4 + 18^2)(11^4 + 18^2)(23^4 + 18^2)(35^4 + 18^2)(47^4 + 18^2)}{(5^4 + 18^2)(7^4 + 18^2)(17^4 + 18^2)(29^4 + 18^2)(41^4 + 18^2)} \\ &= \frac{(4^2 + 9)(2^2 + 9)(14^2 + 9)(8^2 + 9)(26^2 + 9)(20^2 + 9)(38^2 + 9)(32^2 + 9)(50^2 + 9)(44^2 + 9)}{(8^2 + 9)(2^2 + 9)(10^2 + 9)(4^2 + 9)(20^2 + 9)(14^2 + 9)(32^2 + 9)(26^2 + 9)(44^2 + 9)(38^2 + 9)} \\ &= \frac{50^2 + 9}{10^2 + 9} = \frac{2509}{109} \end{aligned}$$

35. 已知三实数 a, b, c 满足 $\sqrt{3}(a - b) + 3(b - c) + (c - a) = 0$, 且 $b \neq c$, 求

$$\frac{(a - b)(a - c)}{(b - c)^2}$$

的值。

令 $\alpha = a - b, \beta = b - c, \gamma = c - a$, 则

$$\alpha + \beta + \gamma = \sqrt{3}\alpha + 3\beta + \gamma = 0$$

由此得

$$\gamma = -(\alpha + \beta), \quad \alpha + \beta = \sqrt{3}\alpha + 3\beta \Rightarrow \beta = \frac{1 - \sqrt{3}}{2}\alpha$$

因此

$$\frac{(a - b)(a - c)}{(b - c)^2} = \frac{-\alpha\gamma}{\beta^2} = \frac{\alpha(\alpha + \beta)}{\left(\frac{1 - \sqrt{3}}{2}\alpha\right)^2} = \frac{\frac{3 - \sqrt{3}}{2}\alpha^2}{\frac{4 - 2\sqrt{3}}{4}\alpha^2} = \frac{3 - \sqrt{3}}{2 - \sqrt{3}} \cdot \frac{2 + \sqrt{3}}{2 + \sqrt{3}} = 3 + \sqrt{3}$$

36. 已知 $a + b + c = 6$, 且

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} = 2,$$

求

$$\frac{b+c}{a} + \frac{c+a}{b} + \frac{a+b}{c}$$

的值。

不难发现

$$\begin{aligned} & \frac{b+c}{a} + \frac{c+a}{b} + \frac{a+b}{c} \\ &= \left(\frac{b+c}{a} + 1 \right) + \left(\frac{c+a}{b} + 1 \right) + \left(\frac{a+b}{c} + 1 \right) - 3 \\ &= \frac{a+b+c}{a} + \frac{a+b+c}{b} + \frac{a+b+c}{c} - 3 \\ &= 6 \cdot 2 - 3 = 9 \end{aligned}$$

37. 已知 a, b, c 皆为实数, 若

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

求

$$\frac{a^2}{b+c} + \frac{b^2}{c+a} + \frac{c^2}{a+b}$$

的值。

有

$$\frac{a(a+b+c)}{b+c} + \frac{b(a+b+c)}{c+a} + \frac{c(a+b+c)}{a+b} = a+b+c$$

于是

$$\frac{a^2}{b+c} + a + \frac{b^2}{c+a} + b + \frac{c^2}{a+b} + c = a+b+c$$

即

$$\frac{a^2}{b+c} + \frac{b^2}{c+a} + \frac{c^2}{a+b} = 0$$

38. 已知 $abc = 1$, 证明

(a)

$$\frac{a}{ab+a+1} + \frac{b}{bc+b+1} + \frac{c}{ca+c+1} = 1$$

由 $abc = 1$,

$$\begin{aligned}
 & \frac{a}{ab+a+1} + \frac{b}{bc+b+1} + \frac{c}{ca+c+1} \\
 &= \frac{a}{ab+a+1} + \frac{ab}{abc+ab+a} + \frac{abc}{abca+abc+ab} \\
 &= \frac{a}{ab+a+1} + \frac{ab}{1+ab+a} + \frac{1}{a+1+ab} \\
 &= \frac{a+ab+1}{ab+a+1} \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

(b)

$$\frac{1}{ab+a+1} + \frac{1}{bc+b+1} + \frac{1}{ca+c+1} = 1$$

由 (a),

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{ab+a+1} + \frac{1}{bc+b+1} + \frac{1}{ac+c+1} \\
 &= \frac{c}{abc+ac+c} + \frac{a}{abc+ab+a} + \frac{b}{abc+bc+b} \\
 &= \frac{c}{1+ac+c} + \frac{a}{1+ab+a} + \frac{b}{1+bc+b} \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

39. 已知 a, b, c 为非零相异实数, 且 $a+b+c=0$, 求

$$\left(\frac{b-c}{a} + \frac{c-a}{b} + \frac{a-b}{c} \right) \left(\frac{a}{b-c} + \frac{b}{c-a} + \frac{c}{a-b} \right)$$

的值。

首先有

$$\begin{aligned}
 \frac{b-c}{a} + \frac{c-a}{b} + \frac{a-b}{c} &= \frac{b^2c - bc^2 + ac^2 - a^2c + a^2b - ab^2}{abc} \\
 &= -\frac{(a-b)(b-c)(c-a)}{abc}
 \end{aligned}$$

现令 $a' = b-c, b' = c-a, c' = a-b$, 发现

$$b' - c' = (c-a) - (a-b) = b+c-2a = -3a$$

由此得 $a = -\frac{b' - c'}{3}$, 同理有

$$b = -\frac{c' - a'}{3}, \quad c = -\frac{a' - b'}{3}$$

于是

$$\begin{aligned} \frac{a}{b-c} + \frac{b}{c-a} + \frac{c}{a-b} &= \frac{a}{a'} + \frac{b}{b'} + \frac{c}{c'} \\ &= -\frac{1}{3} \left(\frac{b' - c'}{a'} + \frac{c' - a'}{b'} + \frac{a' - b'}{c'} \right) \\ &= -\frac{1}{3} \left[-\frac{(a' - b')(b' - c')(c' - a')}{a'b'c'} \right] \\ &= \frac{1}{3} \frac{(-3c)(-3a)(-3b)}{(b-c)(c-a)(a-b)} \\ &= -9 \frac{abc}{(a-b)(b-c)(c-a)} \end{aligned}$$

故所求的值为

$$\begin{aligned} &\left(\frac{b-c}{a} + \frac{c-a}{b} + \frac{a-b}{c} \right) \left(\frac{a}{b-c} + \frac{b}{c-a} + \frac{c}{a-b} \right) \\ &= \left[-\frac{(a-b)(b-c)(c-a)}{abc} \right] \left[-9 \frac{abc}{(a-b)(b-c)(c-a)} \right] \\ &= 9 \end{aligned}$$

40. 已知 $x^5 = 1$ 且 $x \neq 1$, 求

$$\frac{x}{1+x^2} + \frac{x^2}{1+x^4} + \frac{x^3}{1+x} + \frac{x^4}{1+x^3}$$

的值。

由 $x^5 = 1$,

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

41. 设 $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ 且 $abcd \neq 0$, 又 $a + b + c + d = 0$, 求

$$S = a \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d} \right) + b \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{d} + \frac{1}{a} \right) + c \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + d \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right)$$

的值。

由 $a + b + c + d = 0$, 得

$$\begin{aligned} S &= a \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d} \right) + b \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{d} + \frac{1}{a} \right) + c \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + d \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right) \\ &= -(b + c + d) \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d} \right) - (a + c + d) \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{d} + \frac{1}{a} \right) \\ &\quad - (a + b + d) \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) - (a + b + c) \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right) \\ &= -12 - \frac{2(b + c + d)}{a} - \frac{2(a + c + d)}{b} - \frac{2(a + b + d)}{c} - \frac{2(a + b + c)}{d} \\ &= -12 - \frac{-2a}{a} - \frac{-2b}{b} - \frac{-2c}{c} - \frac{-2d}{d} \\ &= -4 \end{aligned}$$

42. 设 a, b, c 满足 $a + b + c = a^3 + b^3 + c^3 = 0$, n 为任意实数, 求 $a^{2n+1} + b^{2n+1} + c^{2n+1}$ 的值。

由恒等式

$$a^3 + b^3 + c^3 - 3abc = (a + b + c)(a^2 + b^2 + c^2 - ab - bc - ca)$$

将已知代入得

$$0 - 3abc = 0 \Rightarrow abc = 0.$$

若 $c = 0$, 由 $a + b + c = 0$ 可得 $b = -a$, 则

$$a^{2n+1} + b^{2n+1} + c^{2n+1} = a^{2n+1} + (-a)^{2n+1} + 0 = 0$$

同理若 $a = 0$ 或 $b = 0$, $a^{2n+1} + b^{2n+1} + c^{2n+1} = 0$

43. 已知 x, y, p, q 为实数, 且满足 $2x^2 + 3p^2 = 2y^2 + 3q^2 = (xq - yp)^2 = 6$, 求

$$(x^2 + y^2)(p^2 + q^2)$$

的值。

(待另三种解)

解法一:

设

$$x = \sqrt{3} \cos \alpha, \quad p = \sqrt{2} \sin \alpha, \quad y = \sqrt{3} \cos \beta, \quad q = \sqrt{2} \sin \beta$$

则

$$6 = (xq - yp)^2 = (\sqrt{6}(\cos \alpha \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha))^2 = 6 \sin^2(\beta - \alpha)$$

于是 $\sin^2(\beta - \alpha) = 1 \Rightarrow \beta - \alpha = \pm \frac{\pi}{2} + 2k\pi$, 因此有

$$\cos \beta = \mp \sin \alpha, \quad \sin \beta = \pm \cos \alpha$$

故

$$(x^2 + y^2)(p^2 + q^2) = \underbrace{(3 \cos^2 \alpha + 3 \cos^2 \beta)}_{=3(\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)=3} \underbrace{(2 \sin^2 \alpha + 2 \sin^2 \beta)}_{=2(\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)=2} = 6$$

44. 解方程

$$(x+1)^6 - 2(x-1)^6 = (x^2-1)^3$$

原方程两边除以 $(x-1)^6$, 得

$$\left(\frac{x+1}{x-1}\right)^6 - 2 = \left(\frac{x+1}{x-1}\right)^3$$

设 $y = \left(\frac{x+1}{x-1}\right)^3$, 得到二次方程:

$$y^2 - y - 2 = 0 \Rightarrow y = 2 \quad \text{或} \quad y = -1$$

解为

$$\frac{x+1}{x-1} = 2^{\frac{1}{3}} \Rightarrow x = \frac{2^{\frac{1}{3}} + 1}{2^{\frac{1}{3}} - 1} = 3 + 2^{\frac{2}{3}} + 2^{\frac{1}{3}}$$

或

$$\frac{x+1}{x-1} = -1 \Rightarrow x = 0$$

45. 若 a, b 为正实数, 解方程

$$(a+b)(ax+b)(a-bx) = (a^2x - b^2)(a+bx), \quad x \in \mathbb{R}.$$

首先设

$$f(x) = (a+b)(ax+b)(a-bx) - (a^2x - b^2)(a+bx)$$

不难发现 $f(1) = 0$, 故 $(x-1)$ 是 $f(x)$ 的因式。正所谓: 解决问题仍需暴力, 展开并整理得

$$\begin{aligned} f(x) &= a^3x + a^2bx^2 - a^2b - b^3x - (a^3x - a^2bx^2 + a^2b - ab^2x + a^2bx - ab^2x^2 + ab^2 - b^3x) \\ &= (2a^2b + ab^2)x^2 + (ab^2 - a^2b)x - (a^2b + ab^2) \\ &= ab[(2a+b)x^2 + (b-a)x - (a+2b)] \\ &= ab(x-1)((2a+b)x + a+2b) \end{aligned}$$

故 $f(x) = 0$ 给出了

$$x = 1 \quad \text{或} \quad x = -\frac{a+2b}{2a+b}$$

因式定理、余式定理

1. 设 $f(x) = ax^3 + bx^2 - 18x + 3$, $g(x) = ax^3 + 9x^2 + bx - 9$ 。当 $f(x)$ 和 $g(x)$ 除以 $2x - 1$ 时所得余数相同, 且当 $f(x)$ 除以 $x - 2$ 时余数是 -5 。

(a) 求 a, b 的值。

令 $x = \frac{1}{2}$, 有:

$$f\left(\frac{1}{2}\right) = g\left(\frac{1}{2}\right) \Rightarrow a \cdot \frac{1}{8} + b \cdot \frac{1}{4} - 9 + 3 = a \cdot \frac{1}{8} + \frac{9}{4} + \frac{b}{2} - 9 \Rightarrow b = 3$$

又

$$f(2) = 8a + 4b - 36 + 3 = -5 \Rightarrow a = 2$$

$$\therefore a = 2, b = 3$$

(b) 若 $x + 4$ 整除 $f(x) + kg(x)$, 求 k 。

有

$$f(-4) + kg(-4) = 0 \Rightarrow -128a + 16b + 72 + 3 + k(-128a + 144 - 4b - 9) = 0$$

代入 $a = 2, b = 3$ 得:

$$-133(1 + k) = 0 \Rightarrow k = -1$$

2. 已知 $f(x)$ 为三次多项式, 以 $x^2 + x + 2$ 除之得余式 $x + 3$, 以 $x^2 + x - 2$ 除之得余式 $5x + 7$, 求 $f(x)$ 。

据题意有 $f(1) = 5(1) + 7 = 12, f(-2) = 5(-2) + 7 = -3$, 设

$$f(x) = (x^2 + x + 2)(ax + b) + x + 3$$

令 $x = 1$,

$$f(1) = (1 + 1 + 2)(a + b) + 1 + 3 = 12 \Rightarrow a + b = 2$$

令 $x = -2$,

$$f(-2) = (4 - 2 + 2)(-2a + b) - 2 + 3 = -3 \Rightarrow -2a + b = -1$$

解得 $a = 1, b = 1$, 所以

$$f(x) = (x^2 + x + 2)(x + 1) + x + 3 = x^3 + 2x^2 + 4x + 5$$

3. 若 $f(x)$ 以 $x^2 - 1$ 除余 $3x + 2$, $g(x)$ 以 $x^2 + 2x - 3$ 除余 $5x + 2$, 求 $(x + 3)f(x) + (5x^2 + 1)g(x)$ 除以 $x - 1$ 的余式。

即求 $(1 + 3)f(1) + (5 + 1)g(1) = 4f(1) + 6g(1)$ 的值, 由已知

$$f(1) = 3 \cdot 1 + 2 = 5, g(1) = 5 \cdot 1 + 2 = 7$$

故 $(x + 3)f(x) + (5x^2 + 1)g(x)$ 除以 $x - 1$ 的余式为

$$4 \cdot 5 + 6 \cdot 7 = 62$$

4. 以 $x^2 + 2x + 3$ 除 $f(x)$ 余 $x + 12$, 以 $(x + 1)^2$ 除 $f(x)$ 余 $5x + 4$, 求以 $(x + 1)(x^2 + 2x + 3)$ 除 $f(x)$ 的余式。

同上, 设

$$f(x) = (x + 1)(x^2 + 2x + 3)Q(x) + a(x^2 + 2x + 3) + x + 12$$

据题意 $f(-1) = -5 + 4 = -1$, 现令 $x = -1$ 有

$$f(-1) = a(1 - 2 + 3) - 1 + 12 = -1 \Rightarrow a = -6$$

\therefore 以 $(x + 1)(x^2 + 2x + 3)$ 除 $f(x)$ 的余式为 $-6(x^2 + 2x + 3) + x + 12 = -6x^2 - 11x - 6$

5. $f(x)$ 以 $x(x - 1)$ 除之, 余式为 $-x + 3$; 以 $x(x + 1)$ 除之, 余式为 $-3x + 3$, 则 $f(x)$ 除以 $x(x^2 - 1)$ 的余式为?

设

$$f(x) = x(x^2 - 1)Q(x) + ax(x - 1) - x + 3$$

据题意 $f(-1) = 3 + 3 = 6$, 令 $x = -1$ 有

$$f(-1) = a(-1)(-2) + 1 + 3 = 6 \Rightarrow a = 1$$

$\therefore f(x)$ 除以 $x(x^2 - 1)$ 的余式为 $x(x - 1) - x + 3 = x^2 - 2x + 3$

6. 设多项式 $f(x)$ 除以 $(x+1)^3$ 得余式 $2x^2+8$, 除以 $(x-2)^2$ 得余式 $15x+40$, 且 $\deg f(x) \geq 4$, 则 $f(x)$ 除以 $(x+1)^3(x-2)$ 的余式为?

设

$$f(x) = (x+1)^3(x-2)Q(x) + a(x+1)^3 + 2x^2 + 8$$

据题意 $f(2) = 15 \cdot 2 + 40 = 70$, 令 $x = 2$ 有

$$f(2) = a(2+1)^3 + 2 \cdot 2^2 + 8 = 70 \Rightarrow a = 2$$

$\therefore f(x)$ 除以 $(x+1)^3(x-2)$ 的余式为 $2(x+1)^3 + 2x^2 + 8 = 2x^3 + 8x^2 + 6x + 10$

7. 设 $\deg f(x) \geq 3$, 且 $f(x)$ 以 $(x-1)^2$ 除之余 $3x+2$, 以 $(x+2)^2$ 除之余 $5x-3$, 求:

(a) 以 $x-1$ 除之余式。

$$\text{即 } f(1) = 3 \cdot 1 + 2 = 5$$

(b) 以 $(x-1)(x+2)$ 除之余式。

设

$$f(x) = (x-1)(x+2)Q(x) + ax + b$$

令 $x = 1$,

$$f(1) = a + b = 5$$

令 $x = -2$,

$$f(-2) = -2a + b = -13$$

解得 $a = 6$, $b = -1$, 故余式为 $6x - 1$

(c) 以 $(x-1)^2(x+2)$ 除之余式。

设

$$f(x) = (x-1)^2(x+2)Q(x) + a(x-1)^2 + 3x + 2$$

令 $x = -2$,

$$f(-2) = 9a + -4 = -13$$

解得 $a = -1$, 故余式为 $-x^2 + 5x + 1$

8. $f(x)$ 为一多项式, 若 $(x+1)f(x)$ 除以 x^2+x+1 的余式为 $5x+3$, 则 $f(x)$ 除以 x^2+x+1 的余式为何?

据题意有

$$(x+1)f(x) = (x+1)(x^2+x+1)Q(x) + a(x^2+x+1) + 5x+3$$

且设

$$f(x) = (x^2+x+1)Q(x) + ax+b$$

两边乘 $x+1$ 有

$$(x+1)f(x) = (x+1)(x^2+x+1)Q(x) + (x+1)(ax+b)$$

比较得

$$a(x^2+x+1) + 5x+3 = (x+1)(ax+b)$$

即

$$ax^2 + (a+b)x + b = ax^2 + (a+5)x + a+3$$

得知 $a=2$, $b=5$, 余式为 $2x+5$

9. 以 $(x+1)^3$ 除 $f(x)$ 余式为 x^2-2x+3 , 求以 $(x+1)^2$ 除 $f(x)$ 所得余式。

设

$$f(x) = Q(x)(x+1)^3 + x^2 - 2x + 3$$

有

$$f(x) = Q(x)(x+1)^3 + (x+1)^2 + (-4x+2) = (x+1)^2[Q(x)(x+1) + 1] + (-4x+2)$$

轻而易举得知余式为 $-4x+2$.

10. 设 $f(x)$ 为实系数三次多项式, 若 $f(x)$ 除以 $x-2$ 的余式为 -5 , 且 $(x+1)f(x)$ 除以 x^3-3 的余式为 $3x-1$, 求多项式 $f(x)$

设

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d,$$

则

$$(x+1)f(x) = ax^4 + (a+b)x^3 + (b+c)x^2 + (c+d)x + d.$$

由题意,

$$f(2) = 8a + 4b + 2c + d = -5 \quad (1)$$

且有

$$(x+1)f(x) = (x^3 - 3)(ax + (a+b)) + 3x - 1,$$

比较系数得:

$$b + c = 0 \quad (2)$$

$$3a + 3b + d = -1 \quad (3)$$

$$3a + c + d = 3 \quad (4)$$

由 (1) - (4) 联立解得

$$a = -1, \quad b = -1, \quad c = 1, \quad d = 5$$

因此

$$f(x) = -x^3 - x^2 + x + 5$$

11. 已知一多项式 $f(x) = x^{2025}(x^2 + ax + b)$, 其中 a, b 为实数, 如果将 $f(x)$ 除以 $(x-2)^2$ 得余式 $2^{2025}(x-2)$, 求 a, b 。

设

$$f(x) = x^{2025}(x^2 + ax + b) = (x-2)^2 p(x) + 2^{2025}(x-2)$$

对 x 求导有

$$f'(x) = 2025x^{2024}(x^2 + ax + b) + x^{2025}(2x + a) = 2(x-2)p(x) + (x-2)^2 p'(x) + 2^{2025}$$

现令 $x = 2$, 则

$$\begin{cases} 2^{2025}(4 + 2a + b) = 0 \\ 2025 \cdot 2^{2024}(4 + 2a + b) + 2^{2025}(4 + a) = 2^{2025} \end{cases}$$

解得

$$a = -3, b = 2$$

12. 设 $f(x) = x^4 + 5x^3 + ax^2 + bx + c$ 可被 $(x-1)^3$ 整除, 求 a, b, c 的值。

$$\begin{array}{r|rrrr}
1 & 5 & a & b & c \\
& 1 & 6 & a+6 & a+b+6 \\
\hline
1 & 6 & a+6 & a+b+6 & a+b+c+6 \\
& 1 & 7 & a+13 & \\
\hline
1 & 7 & a+13 & 2a+b+19 & \\
& 1 & 8 & & \\
\hline
1 & 8 & a+21 & & \\
& 1 & & & \\
\hline
1 & 9 & & &
\end{array}$$

连续综合除法得

$$f(x) = (x-1)^4 + 9(x-1)^3 + (a+21)(x-1)^2 + (2a+b+19)(x-1) + (a+b+c+6)$$

已知 $f(x)$ 可被 $(x-1)^3$ 整除, 则

$$\begin{cases} a+21=0 \\ 2a+b+19=0 \\ a+b+c+6=0 \end{cases} \Rightarrow (a, b, c) = (-21, 23, -8)$$

13. 已知 $x^2 - x + b$ 为多项式 $6x^4 - 7x^3 + ax^2 + 3x + 2$ 的因式, 求 a, b 的值。

设 $f(x) = 6x^4 - 7x^3 + ax^2 + 3x + 2 = (x^2 - x + b)(6x^2 + px + q)$, 展开右边得

$$(x^2 - x + b)(6x^2 + px + q) = 6x^4 + (p-6)x^3 + (q-p+6b)x^2 + (pb-q)x + bq$$

比较系数得

$$p-6 = -7 \quad (1)$$

$$q-p+6b = a \quad (2)$$

$$pb-q = 3 \quad (3)$$

$$bq = 2 \quad (4)$$

由 (3) 得 $q = -b - 3$, 代入 (4) 得

$$b(-b-3) = 2 \Rightarrow (b+1)(b+2) = 0 \Rightarrow b = -1 \text{ 或 } -2$$

当 $b = -1$ 时, $q = -2, a = -7$; 当 $b = -2$ 时, $q = -1, a = -12$

$\therefore (a, b) = (-7, -1)$ 或 $(-12, -2)$

14. 若 a, b, c 为相异实数, 分别用 $x - a, x - b, x - c$ 除多项式 $p(x)$, 所得的余数分别为 a, b, c , 求以 $(x - a)(x - b)(x - c)$ 除 $p(x)$ 的余式。

设

$$p(x) = (x - a)(x - b)(x - c)q(x) + r(x - a)(x - b) + s(x - a) + a,$$

令 $x = b$, 由 $a \neq b$,

$$p(b) = s(b - a) + a = b \Rightarrow s(b - a) = b - a \Rightarrow s = 1$$

令 $x = c$, 由 $a \neq c, b \neq c$,

$$p(c) = r(c - a)(c - b) + (c - a) + a = c \Rightarrow r(c - a)(c - b) = 0 \Rightarrow r = 0$$

因此以 $(x - a)(x - b)(x - c)$ 除 $p(x)$ 的余式为 x

15. 若 $g(x)$ 除以 $2x - 3$ 的余式为 1, 且 $f(x) = g(x)(2x - 3) + 5$, 求 $[f(x)]^2$ 除以 $(2x - 3)^2$ 的余式。

设

$$g(x) = (2x - 3)Q(x) + 1$$

由 $f(x) = g(x)(2x - 3) + 5$,

$$\begin{aligned} [f(x)]^2 &= [g(x)]^2(2x - 3)^2 + 10g(x)(2x - 3) + 25 \\ &= [g(x)]^2(2x - 3)^2 + 10[(2x - 3)Q(x) + 1](2x - 3) + 25 \\ &= [g(x)]^2(2x - 3)^2 + 10Q(x)(2x - 3)^2 + 10(2x - 3) + 25 \\ &= [g(x)]^2(2x - 3)^2 + 10Q(x)(2x - 3)^2 + 20x - 5 \end{aligned}$$

故 $[f(x)]^2$ 除以 $(2x - 3)^2$ 的余式为 $20x - 5$

16. 若多项式 $p(x) = x^2 + bx + c$, 其中 b, c 为实数, 且 $p(p(1)) = p(p(2)) = 0$, 且 $p(1) \neq p(2)$, 求 b, c 的值。

由 $p(p(1)) = p(p(2)) = 0$, 意味 $p(1)$ 和 $p(2)$ 是方程 $x^2 + bx + c = 0$ 的两根, 且

$$p(1) + p(2) = -b, \quad p(1)p(2) = c$$

即

$$(1 + b + c) + (4 + 2b + c) = -b \quad (1)$$

$$(1 + b + c)(4 + 2b + c) = c \quad (2)$$

由 (1) 得 $2b + c = -\frac{5}{2}$, 代入 (2):

$$(1 - \frac{5}{2} - b)(4 - \frac{5}{2}) = -\frac{5}{2} - 2b \Rightarrow b = -\frac{1}{2}, c = -\frac{3}{2}$$

17. a, b, c 为整数, 且 $0 < a < b$, 若 $x - c$ 是多项式 $x(x - a)(x - b) - 17$ 的因式, 求 (a, b, c) 。

已知 $f(x) = x(x - a)(x - b) - 17$ 且 $x - c$ 是它的因式, 于是

$$f(c) = c(c - a)(c - b) - 17 = 0 \Rightarrow c(c - a)(c - b) = 17.$$

由于 a, b, c 均为整数, 且 $0 < a < b$, 我们只需枚举整数三元组使得左边乘积为 17。

因为 17 是质数, 其非零整数因式只有:

$(\pm 1, \pm 1, \pm 17)$ 的排列组合。

枚举 $c = 1$,

$$1(1 - a)(1 - b) = 17 \Rightarrow (1 - a)(1 - b) = 17.$$

由于 $17 = 1 \times 17 = (-1) \times (-17)$, 列出可能组合:

- $1 - a = 1, 1 - b = 17 \Rightarrow a = 0, b = -16$, 不满足 $0 < a < b$ 。
- $1 - a = -1, 1 - b = -17 \Rightarrow a = 2, b = 18$, 满足条件!

若 $c = -1$:

$$(-1)(-1 - a)(-1 - b) = 17 \Rightarrow -(a + 1)(b + 1) = 17 \Rightarrow (a + 1)(b + 1) = -17$$

没有满足 $0 < a < b$ 的整数解, 尝试 $c = 17, -17$ 会得到更大的数, 不满足 $0 < a < b$ 。

因此, 唯一符合题意的解为:

$$(a, b, c) = (2, 18, 1)$$

18. 设 $f(x)$ 与 $g(x)$ 均为实系数二次多项式且首项系数都是 2。已知 $(f(x))^2$ 除以 $g(x)$ 的余式为 $5x + 3$, 而 $(g(x))^2$ 除以 $f(x)$ 的余式为 $x + 1$, 求 $f(x), g(x)$ 。

设

$$f(x) = 2x^2 + ax + b, \quad g(x) = f(x) - cx - d = 2x^2 + (a - c)x + b - d.$$

则

$$(f(x))^2 = (g(x) + cx + d)^2 = (g(x))^2 + 2(cx + d)g(x) + (cx + d)^2.$$

由已知 $(f(x))^2$ 除以 $g(x)$ 的余式为 $5x + 3$,

$$(cx + d)^2 = c^2x^2 + 2cdx + d^2 = \frac{c^2}{2}g(x) + \left(2cd - \frac{c^2}{2}(a - c)\right)x + \left(d^2 - \frac{c^2}{2}(b - d)\right).$$

比较系数得

$$\begin{cases} 4cd - ac^2 + c^3 = 10, \\ 2d^2 - bc^2 + c^2d = 6. \end{cases}$$

同理, 由 $(g(x))^2$ 除以 $f(x)$ 的余式为 $x + 1$ 得

$$\begin{cases} 4cd - ac^2 = 2, \\ 2d^2 - bc^2 = 2. \end{cases}$$

解得

$$c^3 = 8 \Rightarrow c = 2, \quad c^2d = 4 \Rightarrow d = 1, \quad a = \frac{3}{2}, \quad b = 0.$$

于是

$$f(x) = 2x^2 + \frac{3}{2}x, \quad g(x) = 2x^2 - \frac{1}{2}x - 1.$$

19. 求多项式 $(x + 1)^6$ 除以 $x^2 + 1$ 的余式。

有 $x^2 \equiv -1 \pmod{x^2 + 1}$, 则

$$(x + 1)^6 = (x^2 + 2x + 1)^3 \equiv (2x)^3 = 8x \cdot x^2 \equiv 8x \cdot (-1) = -8x \pmod{x^2 + 1}$$

20. 设 $f(x) = x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$, 求 $f(x^5)$ 除以 $f(x)$ 所得余式。

首先注意到

$$f(x) = x^4 + x^3 + x^2 + x + 1 = \frac{x^5 - 1}{x - 1}, \quad x \neq 1,$$

所以 $f(x) \mid x^5 - 1$, 即

$$x^5 \equiv 1 \pmod{f(x)}$$

故

$$f(x^5) = (x^5)^4 + (x^5)^3 + (x^5)^2 + x^5 + 1 \equiv 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 5 \pmod{f(x)}$$

21. 求以 $x^2 + 2x + 3$ 除 $(x^2 + 3x + 4)^4$ 所得的余式。

有

$$(x^2 + 3x + 4)^4 \equiv (x + 1)^4 = (x^2 + 2x + 1)^2 \equiv (-2)^2 = 4 \pmod{x^2 + 2x + 3}$$

22. 设 $f(x) = x^{37} - 2x^{26} + 4x^7 - 3$, 则

(a) 求 $f(x)$ 除以 $x^2 + 1$ 的余式。

有

$$\begin{aligned} f(x) &= x^{37} - 2x^{26} + 4x^7 - 3 \\ &= (x^2)^{18} \cdot x - 2(x^2)^{13} + 4(x^2)^3 \cdot x - 3 \\ &= (-1)^{18} \cdot x - 2(-1)^{13} + 4(-1)^3 \cdot x - 3 \\ &= x + 2 - 4x - 3 \\ &= -3x - 1 \pmod{x^2 + 1} \end{aligned}$$

(b) 求 $f(x)$ 除以 $x^2 + x + 1$ 的余式。

有 $x^3 \equiv 1 \pmod{x^2 + x + 1}$, 于是

$$\begin{aligned} f(x) &= x^{37} - 2x^{26} + 4x^7 - 3 \\ &= (x^3)^{12} \cdot x - 2(x^3)^8 \cdot x^2 + 4(x^3)^2 \cdot x - 3 \\ &\equiv x - 2x^2 + 4x - 3 \\ &= -2x^2 + 5x - 3 \\ &\equiv -2(-x - 1) + 5x - 3 \\ &= 7x - 1 \pmod{x^2 + x + 1} \end{aligned}$$

23. 求以 $x^4 - x$ 除 $x^{87} - 2x^{44} - x^3 + 3x^2 + 1$ 所得的余式。

有 $x^4 \equiv x \Rightarrow x^3 \equiv 1 \pmod{x^4 - x}$, 故

$$x^{87} - 2x^{44} - x^3 + 3x^2 + 1 \equiv 1 - 2x^2 - 1 + 3x^2 + 1 = x^2 + 1$$

24. 求 x^{100} 除以 $x^3 + 2x^2 + 2x + 1$ 的余式。

x^{100} 除以 $x + 1$ 的余式即 $(-1)^{100} = 1$, 又

$$x^3 \equiv 1 \pmod{x^2 + x + 1}$$

故 x^{100} 除以 $x^2 + x + 1$ 的余式为 $x^{100} \equiv x \pmod{x^2 + x + 1}$, 现设

$$x^{100} = (x + 1)(x^2 + x + 1)Q(x) + a(x^2 + x + 1) + x$$

令 $x = -1$ 有

$$1 = a(1 - 1 + 1) - 1 \Rightarrow a = 2$$

$\therefore x^{100}$ 除以 $x^3 + 2x^2 + 2x + 1$ 的余式为 $2x^2 + 3x + 2$

25. 求 x^{200} 除以 $(x - 1)^2$ 的余式。

发现 $f(x)$ 除以 $(x - 1)$ 的余式为 $f(1) = 1^{200} = 1$, 将所求写成

$$x^{200} = (x - 1)^2 Q(x) + a(x - 1) + 1$$

$$x^{200} - 1 = (x - 1)^2 Q(x) + a(x - 1)$$

$$(x - 1)(x^{199} + \cdots + x + 1) = (x - 1)^2 Q(x) + a(x - 1)$$

$$x^{199} + \cdots + x + 1 = (x - 1)Q(x) + a$$

两边代 $x = 1$, 得到

$$200 = 0 + a$$

故余式为 $200(x - 1) + 1 = 200x - 199$

设 $t = x - 1$, 则题目变成 $x^{200} = (t + 1)^{200}$ 除以 t^2 的余式。由二项式定理,

$$(t + 1)^{200} = {}^{200}C_{200}t^{200} + \cdots + {}^{200}C_2t^2 + {}^{200}C_1t + {}^{200}C_0$$

则显然, $(t + 1)^{200}$ 除以 t^2 的余式即为 ${}^{200}C_1t + {}^{200}C_0 = 200(x - 1) + 1 = 200x - 199$

26. 已知多项式 $f(x) = x^{130} - 1, g(x) = x^4 - x^3 + 2x^2 - x + 1$, 求 $f(x)$ 除以 $g(x)$ 的余式。

设

$$x^{130} - 1 = (x^2 + 1)(x^2 - x + 1)Q(x) + Ax^3 + Bx^2 + Cx + D.$$

令 $x = i$, 则

$$-1 - 1 = Ai^3 + Bi^2 + Ci + D = (-B + D) + (-A + C)i,$$

得

$$\begin{cases} -B + D = -2, \\ -A + C = 0 \end{cases}$$

$$\text{令 } \omega = \frac{1 + \sqrt{3}i}{2},$$

$$\omega^{130} - 1 = -\omega - 1 = -A + B(\omega - 1) + C\omega + D = (B + C)\omega - A - B + D$$

得到方程组

$$\begin{cases} B + C = -1 \\ -A - B + D = -1 \end{cases}$$

解得 $A = -1, B = 0, C = -1, D = -2$, 因此余式为 $-x^3 - x - 2$

27. 设 $f(x)$ 是一个次数有限的多项式, 且满足

$$(x + 9)f(x + 1) = (x + 3)f(x + 3),$$

已知 $f(0) = 1$, 求 $f(1)$ 的值。

令 $x = -3$ 得 $f(-2) = 0$, 所以 $f(x)$ 有因式 $(x + 2)$, 设 $f(x) = (x + 2)g(x)$ 得

$$(x + 9)(x + 3)g(x + 1) = (x + 3)(x + 5)g(x + 3) \Rightarrow (x + 9)g(x + 1) = (x + 5)g(x + 3)$$

同理, 令 $x = -5$ 得 $g(-4) = 0$, 故 $g(x)$ 有因式 $(x + 4)$, 设 $g(x) = (x + 4)h(x)$ 得

$$(x + 9)(x + 5)h(x + 1) = (x + 5)(x + 7)h(x + 3) \Rightarrow (x + 9)h(x + 1) = (x + 7)h(x + 3)$$

令 $x = -7$ 得 $h(-6) = 0$, 故 $h(x)$ 有因式 $(x+6)$, 设 $h(x) = (x+6)p(x)$ 得

$$(x+9)(x+7)p(x+1) = (x+7)(x+9)p(x+3) \Rightarrow p(x+1) = p(x+3)$$

即 $p(x)$ 是周期为 2 的函数, 因为 $p(x)$ 是次数有限的多项式, 故 $p(x) = c, c \in \mathbb{R}$

于是 $f(x) = c(x+2)(x+4)(x+6)$, 由 $f(0) = 1$ 得 $c = \frac{1}{48}$, 故

$$f(1) = \frac{1}{48}(3)(5)(7) = \frac{35}{16}$$

根式、绝对值

1. 求

$$\frac{\sqrt{10+\sqrt{1}}+\sqrt{10+\sqrt{2}}+\cdots+\sqrt{10+\sqrt{99}}}{\sqrt{10-\sqrt{1}}+\sqrt{10-\sqrt{2}}+\cdots+\sqrt{10-\sqrt{99}}}$$

之值。

由

$$\left(\sqrt{10+\sqrt{a}}-\sqrt{10-\sqrt{a}}\right)^2=20-2\sqrt{100-a}$$

于是有

$$\sqrt{10+\sqrt{a}}-\sqrt{10-\sqrt{a}}=\sqrt{2}\cdot\sqrt{10-\sqrt{100-a}}$$

令

$$L=\frac{\sqrt{10+\sqrt{1}}+\sqrt{10+\sqrt{2}}+\cdots+\sqrt{10+\sqrt{99}}}{\sqrt{10-\sqrt{1}}+\sqrt{10-\sqrt{2}}+\cdots+\sqrt{10-\sqrt{99}}}$$

则

$$\begin{aligned} L-1 &= \frac{(\sqrt{10+\sqrt{1}}-\sqrt{10-\sqrt{1}})+\cdots+(\sqrt{10+\sqrt{99}}-\sqrt{10-\sqrt{99}})}{\sqrt{10-\sqrt{1}}+\cdots+\sqrt{10-\sqrt{99}}} \\ &= \frac{\sqrt{2}\left(\sqrt{10-\sqrt{99}}+\sqrt{10-\sqrt{98}}+\cdots+\sqrt{10-\sqrt{1}}\right)}{\sqrt{10-\sqrt{1}}+\sqrt{10-\sqrt{2}}+\cdots+\sqrt{10-\sqrt{99}}}=\sqrt{2} \end{aligned}$$

因此

$$L=\sqrt{2}+1$$

2. 求根式方程

$$\sqrt{6x-9}+\sqrt{2x-5}=x-1$$

的实数根。

原方程式两边平方得

$$6x-9+2x-5+2\sqrt{(6x-9)(2x-5)}=x^2-2x+1$$

看来并不是明智之举。考虑

$$(\sqrt{6x-9}+\sqrt{2x-5})(\sqrt{6x-9}-\sqrt{2x-5})=(6x-9)-(2x-5)=4x-4$$

由于 $x \neq 1$, 化为

$$\sqrt{6x-9} - \sqrt{2x-5} = 4$$

消去 $\sqrt{2x-5}$ 可得

$$\sqrt{6x-9} = \frac{1}{2}(x-1+4)$$

两边平方,

$$4(6x-9) = x^2 + 6x + 9 \Rightarrow (x-3)(x-15) = 0$$

经检验得 $x=3$ 是增根, 且 $x=15$ 是原方程式的解。

3. 解方程

$$4 + \sqrt{x^2 - 6x + 13} = x + \sqrt{2x - 5}$$

由

$$\sqrt{x^2 - 6x + 13} = x - 4 + \sqrt{2x - 5}$$

设 $x - 4 = y$, 化简得

$$\sqrt{y^2 + 2y + 5} = y + \sqrt{2y + 3}$$

两边平方,

$$y^2 + 2y + 5 = y^2 + 2y\sqrt{2y+3} + 2y + 3 \Rightarrow 1 = y\sqrt{2y+3}$$

再次平方得

$$2y^3 + 3y^2 - 1 = 0 \Rightarrow (y+1)(2y^2 + y - 1) = 0$$

解得

$$y = -1, \quad y = \frac{1}{2} \Rightarrow x = 3, \quad x = \frac{9}{2}$$

经检验 $x=3$ 是增根, 原方程式的解为

$$x = \frac{9}{2}$$

4. 求所有实数 x 满足

$$x = \sqrt{x - \frac{1}{x}} + \sqrt{1 - \frac{1}{x}}.$$

原方程式变为

$$x - \sqrt{x - \frac{1}{x}} = \sqrt{1 - \frac{1}{x}}$$

两边平方得

$$(x^2 - 1) - 2\sqrt{x(x^2 - 1)} + x = 0 \implies (\sqrt{x^2 - 1} - \sqrt{x})^2 = 0$$

解得

$$x^2 - x - 1 = 0 \implies x = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} > 0$$

5. 解方程

$$\sqrt{7x+7} + \sqrt{7x-6} + 2\sqrt{49x^2+7x-42} = 181 - 14x$$

由原方程

$$\sqrt{7x+7} + \sqrt{7x-6} + 2\sqrt{(7x+7)(7x-6)} = 181 - 14x$$

设 $ya = \sqrt{7x+7} + \sqrt{7x-6}$, 则

$$y^2 = 14x + 1 + 2\sqrt{(7x+7)(7x-6)}$$

代回原方程得

$$y^2 - (14x + 1) + y = 181 - 14x \implies (y + 14)(y - 13) = 0$$

由于平方根之和为非负, 舍去 $y = -14$, 于是由

$$\sqrt{7x+7} + \sqrt{7x-6} = 13$$

两边平方,

$$14x + 1 + 2\sqrt{(7x+7)(7x-6)} = 169 \implies \sqrt{49x^2 - 6} = 84 - 7x$$

再次平方,

$$49x^2 - 6 = 7056 - 1176x + 49x^2 \implies x = 6$$

经检验, 原方程式的解为

$$x = 6$$

6. 解

$$x - \sqrt{\frac{x}{2} + \frac{7}{8}} - \sqrt{\frac{x}{8} + \frac{13}{64}} = 179$$

将两边乘以 4 得

$$4x - \sqrt{8x + 14} - 2\sqrt{8x + 13} = 716$$

观察到

$$8x + 14 - 2\sqrt{8x + 13} = (8x + 13) - 2\sqrt{8x + 13} + 1 = (\sqrt{8x + 13} - 1)^2$$

且由原方程知 $x \geq 179$, 故 $\sqrt{8x + 13} - 1 > 0$, 方程变为

$$4x - (\sqrt{8x + 13} - 1) = 716 \Rightarrow 8x + 13 - 2\sqrt{8x + 13} - 1443 = 0$$

因式分解得

$$(\sqrt{8x + 13} - 39)(\sqrt{8x + 13} + 37) = 0$$

由于 $\sqrt{8x + 13} \geq 0$, 所以

$$\sqrt{8x + 13} = 39 \Rightarrow x = 188.5$$

经检验, 原方程式的解为

$$x = 188.5$$

7. 解

$$\frac{x-7}{2+\sqrt{x-3}} + \frac{x-5}{1+\sqrt{x-4}} = \sqrt{10}$$

首先有

$$-\frac{4-(x-3)}{2+\sqrt{x-3}} - \frac{1-(x-4)}{1+\sqrt{x-4}} = \sqrt{10}$$

于是

$$-(2-\sqrt{x-3}) - (1-\sqrt{x-4}) = \sqrt{10} \Rightarrow \sqrt{x-3} - \sqrt{x-4} = \sqrt{10} + 3$$

两边移项得到

$$\sqrt{x-3} - \sqrt{10} = 3 + \sqrt{x-4}$$

两边平方,

$$x-3+10-2\sqrt{10(x-3)} = 9+x-4-6\sqrt{x-4} \Rightarrow \sqrt{10(x-3)} - 1 = 3\sqrt{x-4}$$

再次平方,

$$10(x-3)+1-2\sqrt{10(x-3)}=9(x-4)\Rightarrow x+7=2\sqrt{10(x-3)}$$

再再次平方,

$$x^2+14x+49=40(x-3)\Rightarrow (x-13)^2=0$$

经检验, 原方程的解为

$$x=13$$

8. (a) 已知相异非零实数 a, b, c, d 满足

$$\frac{a}{b}=\frac{c}{d},$$

证明

$$\frac{a+b}{a-b}=\frac{c+d}{c-d}$$

由 $\frac{a}{b}=\frac{c}{d}$, 得

$$\frac{a}{b}+1=\frac{c}{d}+1, \quad \frac{a}{b}-1=\frac{c}{d}-1$$

即

$$\frac{a+b}{b}=\frac{c+d}{d}, \quad \frac{a-b}{b}=\frac{c-d}{d}$$

两式相除, 得

$$\frac{a+b}{a-b}=\frac{c+d}{c-d}$$

证毕。

(b) 利用 (a) 或其他方法, 解方程

$$\frac{\sqrt{x+1}+\sqrt{x-1}}{\sqrt{x+1}-\sqrt{x-1}}=\frac{4x-1}{2}$$

由 (a), 原方程化为

$$\frac{(\sqrt{x+1}+\sqrt{x-1})+(\sqrt{x+1}-\sqrt{x-1})}{(\sqrt{x+1}+\sqrt{x-1})-(\sqrt{x+1}-\sqrt{x-1})}=\frac{(4x-1)+2}{(4x-1)-2}$$

即

$$\frac{2\sqrt{x+1}}{2\sqrt{x-1}}=\frac{4x+1}{4x-3}$$

两边平方,

$$\frac{x+1}{x-1} = \frac{(4x+1)^2}{(4x-3)^2} = \frac{16x^2+8x+1}{16x^2-24x+9}.$$

再由 (a) 得

$$\frac{(x+1)+(x-1)}{(x+1)-(x-1)} = \frac{(16x^2+8x+1)+(16x^2-24x+9)}{(16x^2+8x+1)-(16x^2-24x+9)}.$$

化简得

$$\frac{2x}{2} = \frac{32x^2-16x+10}{32x-8} \Rightarrow x = \frac{5}{4}$$

经检验, 原方程的解为

$$x = \frac{5}{4}$$

9. 解方程

$$\sqrt[3]{x} + \sqrt[3]{2x-3} = \sqrt[3]{12(x-1)}.$$

两边立方得

$$x + 2x - 3 + 3\sqrt[3]{x(2x-3)}(\sqrt[3]{x} + \sqrt[3]{2x-3}) = 12(x-1)$$

由原方程 $\sqrt[3]{x} + \sqrt[3]{2x-3} = \sqrt[3]{12(x-1)}$ 代入得

$$\sqrt[3]{x(2x-3)}12(x-1) = 3(x-1)$$

两边再立方,

$$(x-1)(x-3)^2 = 0 \Rightarrow x = 1, 3$$

经检验, 原方程式的解为

$$x = 1 \quad \text{或} \quad x = 3$$

10. 证明

$$\sqrt[3]{9+4\sqrt{5}} + \sqrt[3]{9-4\sqrt{5}} = 3$$

设

$$x = \sqrt[3]{9 + 4\sqrt{5}} + \sqrt[3]{9 - 4\sqrt{5}}$$

完全立方展开得

$$x^3 = 9 + 4\sqrt{5} + 9 - 4\sqrt{5} + 3\sqrt[3]{81 - 80}(x)$$

即解得

$$x^3 - 3x - 18 = 0 \Rightarrow (x - 3)(x^2 + 3x + 6) = 0 \Rightarrow x = 3 \in \mathbb{R}$$

因此得证

$$\sqrt[3]{9 + 4\sqrt{5}} + \sqrt[3]{9 - 4\sqrt{5}} = 3$$

11. 解方程

$$\sqrt{x + \sqrt{x}} - \sqrt{x - \sqrt{x}} = \frac{199}{100} \sqrt{\frac{x}{x + \sqrt{x}}}.$$

设 $a = x + \sqrt{x}$, $b = x - \sqrt{x}$, 则 $a - b = \sqrt{a} - \sqrt{b} = 2\sqrt{x}$, 原方程化为

$$\sqrt{a} + \sqrt{b} = \frac{200}{199} \sqrt{x + \sqrt{x}}, \quad \sqrt{a} - \sqrt{b} = \frac{199}{100} \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{x + \sqrt{x}}}$$

两式相加得

$$2\sqrt{x + \sqrt{x}} = \frac{200}{199} \sqrt{x + \sqrt{x}} + \frac{199}{100} \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{x + \sqrt{x}}}$$

解得

$$\sqrt{x}(19800\sqrt{x} - 19801) = 0 \Rightarrow \sqrt{x} = \frac{19801}{19800} > 0 \Rightarrow x = \frac{19801^2}{19800^2}$$

12. 设 a, b 为正实数, 且

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = 1, \quad 2022a^2 = 2023b^2,$$

求 $\sqrt{2022a + 2023b}$ 的值。

由 $2022a^2 = 2023b^2$ 得

$$\frac{b}{a} = \sqrt{\frac{2022}{2023}}.$$

记 $k = \sqrt{\frac{2022}{2023}}$, 则 $b = ka$ 。由 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = 1$ 得

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{ka} = 1 \Rightarrow a = 1 + \frac{1}{k}.$$

于是

$$\begin{aligned}2022a + 2023b &= 2022a + 2023ka \\&= a(2022 + 2023k) \\&= \left(1 + \frac{1}{k}\right)(2022 + 2023k) \\&= 2022 + 2023 + 2022 \cdot \frac{1}{k} + 2023k \\&= 2022 + 2023 + 2022\sqrt{\frac{2023}{2022}} + 2023\sqrt{\frac{2022}{2023}} \\&= 2022 + 2023 + \sqrt{2022 \cdot 2023} + \sqrt{2022 \cdot 2023} \\&= (\sqrt{2022} + \sqrt{2023})^2\end{aligned}$$

故

$$\sqrt{2022a + 2023b} = \sqrt{2022} + \sqrt{2023}.$$

13. 若

$$(x - \sqrt{x^2 - 2011})(y + \sqrt{y^2 - 2011}) + 2011 = 0,$$

求 $2x + y$ 的值。

原式两边乘以 $x + \sqrt{x^2 - 2011}$ 可得

$$2011(y + \sqrt{y^2 - 2011}) + 2011(x + \sqrt{x^2 - 2011}) = 0$$

$$2011(x + y + \sqrt{x^2 - 2011} + \sqrt{y^2 - 2011}) = 0$$

即

$$x + y = -(\sqrt{x^2 - 2011} + \sqrt{y^2 - 2011}) \quad (1)$$

同理, 原式两边乘以 $y - \sqrt{y^2 - 2011}$ 可得

$$(x - \sqrt{x^2 - 2011})2011 + 2011(y - \sqrt{y^2 - 2011}) = 0$$

$$2011(x + y - (\sqrt{x^2 - 2011} + \sqrt{y^2 - 2011})) = 0$$

$$x + y = \sqrt{x^2 - 2011} + \sqrt{y^2 - 2011} \quad (2)$$

由 (1) 及 (2) 可得

$$\sqrt{x^2 - 2011} + \sqrt{y^2 - 2011} = 0 \Rightarrow x = \pm\sqrt{2011}, y = \mp\sqrt{2011} \quad (\because x + y = 0)$$

故

$$2x + y = x + y + x = \pm\sqrt{2011}$$

14. 求

$$\left| \sqrt{x+1} - 2 \right| + \left| \sqrt{x+1} - 3 \right| = 1$$

的整数解集。

令 $t = \sqrt{x+1}$, 其中 $t \geq 0$, 则方程变为

$$|t - 2| + |t - 3| = 1$$

分三种情况讨论:

情况 1: 当 $0 \leq t < 2$ 时,

$$(2 - t) + (3 - t) = 1 \Rightarrow t = 2$$

这与 $t < 2$ 矛盾, 无解。

情况 2: 当 $2 \leq t \leq 3$ 时,

$$(t - 2) + (3 - t) = 1 \Rightarrow 1 = 1$$

恒成立, 因此 $t \in [2, 3]$ 。

情况 3: 当 $t > 3$ 时,

$$(t - 2) + (t - 3) = 1 \Rightarrow t = 3$$

这与 $t > 3$ 矛盾, 无解。

综合得 $2 \leq \sqrt{x+1} \leq 3$, 平方得

$$4 \leq x + 1 \leq 9 \Rightarrow 3 \leq x \leq 8$$

因此整数解集为 $\{3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ 。

15. 解

$$|x + 1| - |x| + 3|x - 1| - 2|x - 2| = x + 2$$

分情况讨论:

情况 1: 当 $x < -1$ 时,

$$-(x+1) + x - 3(x-1) + 2(x-2) = x+2 \Rightarrow x = -2$$

得一解 $x = -2$ 。

情况 2: 当 $-1 \leq x < 0$ 时,

$$(x+1) + x - 3(x-1) + 2(x-2) = x+2 \Rightarrow x = x+2$$

故无解。

情况 3: 当 $0 \leq x < 1$ 时,

$$(x+1) - x - 3(x-1) + 2(x-2) = x+2 \Rightarrow x = -1$$

这与 $0 \leq x < 1$ 矛盾, 故无解。

情况 4: 当 $1 \leq x < 2$ 时,

$$(x+1) - x + 3(x-1) + 2(x-2) = x+2 \Rightarrow x = 2$$

这与 $1 \leq x < 2$ 矛盾, 故无解。

情况 4: 当 $x \geq 2$ 时,

$$(x+1) - x + 3(x-1) - 2(x-2) = x+2 \Rightarrow x = x$$

恒成立, 因此 $x \geq 2$ 都是解。

结论: 原方程的解为 $x = -2$ 以及所有满足 $x \geq 2$ 的实数。

指数与对数

1. 设 $a = 2019^{2017}, b = 2019^{2018}, c = 2019^{2019}$, 计算

$$\frac{1}{2019^{a-a} + 2019^{a-b} + 2019^{a-c}} + \frac{1}{2019^{b-a} + 2019^{b-b} + 2019^{b-c}} + \frac{1}{2019^{c-a} + 2019^{c-b} + 2019^{c-c}}$$

观察到原式为

$$\frac{2019^{-a}}{2019^{-a} + 2019^{-b} + 2019^{-c}} + \frac{2019^{-b}}{2019^{-a} + 2019^{-b} + 2019^{-c}} + \frac{2019^{-c}}{2019^{-a} + 2019^{-b} + 2019^{-c}}$$

答案呼之欲出 $\Rightarrow 1$

2. 试证

$$2^{\sqrt{\log_2 3}} = 3^{\sqrt{\log_3 2}}$$

注意到

$$2^{\sqrt{\log_2 3}} = 2^{\frac{\log_2 3}{\sqrt{\log_2 3}}} = (2^{\log_2 3})^{\frac{1}{\sqrt{\log_2 3}}} = 3^{\frac{1}{\sqrt{\log_2 3}}}$$

故左式等于右式, 得证。

设 $x = 2^{\sqrt{\log_2 3}}, y = 3^{\sqrt{\log_3 2}}$, 则

$$\log x = \sqrt{\log_2 3} \cdot \log 2 = \sqrt{\frac{\log 3}{\log 2}} \cdot \log 2 = \sqrt{\log 2 \log 3}$$

同理

$$\log y = \sqrt{\log_3 2} \cdot \log 3 = \sqrt{\frac{\log 2}{\log 3}} \cdot \log 3 = \sqrt{\log 2 \log 3}$$

故

$$\log x = \log y \Rightarrow x = y \quad (\text{得证})$$

3. 解方程

$$2^{x+2}5^{6-x} = 10^{x^2},$$

两边取 \log 得

$$(x+2)\log 2 + (6-x)\log 5 = x^2 \Rightarrow x^2 - \left(\log \frac{2}{5}\right)x - 2\log 250 = 0$$

因式分解给出

$$(x-2)(x+\log 250) = 0 \Rightarrow x = 2, -\log 250$$

4. 求解方程

$$\frac{e^{2x} + 16^x}{(4e)^x} = \frac{4+e}{2\sqrt{e}}.$$

原方程即

$$\left(\frac{e}{4}\right)^x + \left(\frac{4}{e}\right)^x = \frac{\sqrt{e}}{2} + \frac{2}{\sqrt{e}}$$

令

$$y = \left(\frac{e}{4}\right)^x$$

则由

$$y^2 - \left(\left(\frac{e}{4}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{e}{4}\right)^{-\frac{1}{2}}\right)y + 1 = 0$$

因式分解得

$$\left(y - \left(\frac{e}{4}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\left(y - \left(\frac{e}{4}\right)^{-\frac{1}{2}}\right) = 0$$

解得

$$x = \frac{1}{2}, \quad x = -\frac{1}{2}$$

5. 解

$$x^{x^x} = (x^x)^x$$

原方程即

$$x^{x^x} = x^{x^2}$$

先考虑指数方程的特殊情况 $x = -1, 0, 1$, 可得解

$$x = -1, 1$$

当 $x \neq -1, 0, 1$ 时, 由底数相等所以指数相等的性质得,

$$x = 2$$

故原方程式的解为

$$x = -1 \quad \text{或} \quad x = 1 \quad \text{或} \quad x = 2$$

6. 已知

$$(x\sqrt{x}\sqrt[3]{x})^x = x^{x\sqrt{x}\sqrt[3]{x}},$$

试求 x^5 的值。

$$(x\sqrt{x}\sqrt[3]{x})^x = x^{x\sqrt{x}\sqrt[3]{x}}$$

$$x^{(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3})x} = x^{x^{1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}}}$$

$$x^{(\frac{11}{6})x} = x^{x^{\frac{11}{6}}}$$

考虑特殊情况 $x = -1, 0, 1$, 可得解 $x = 1$, 此时因底数相等所以指数相等, 得

$$\frac{11}{6}x = x^{\frac{11}{6}} \Rightarrow x^5 = \left(\frac{11}{6}\right)^6$$

故 x^5 的可能值为

$$x^5 = 1 \quad \text{或} \quad x^5 = \left(\frac{11}{6}\right)^6$$

7. 求满足方程

$$(x^2 + 2x)^{x^2 - 3x + 2} = 1$$

的实数解。

设 $A = x^2 + 2x$, $B = x^2 - 3x + 2$ 。欲使 $A^B = 1$, 仅以下三种情况成立:

- $B = 0$:

$$x^2 - 3x + 2 = 0 \Rightarrow (x - 1)(x - 2) = 0 \Rightarrow x = 1, 2$$

- $A = 1$:

$$x^2 + 2x = 1 \Rightarrow x = -1 \pm \sqrt{2}$$

- $A = -1$ 且 B 为偶数:

$$x^2 + 2x = -1 \Rightarrow (x + 1)^2 = 0 \Rightarrow x = -1$$

此时

$$B = (-1)^2 - 3(-1) + 2 = 6$$

为偶数, 成立。

综上, 解为

$$x \in \{1, 2, -1 + \sqrt{2}, -1 - \sqrt{2}, -1\}$$

8. 计算

$$5^{(\log 2)^3} \cdot 8^{(\log 5)^2} \cdot 5^{(\log 5)^3}$$

令 $a = \log 2$, $b = \log 5$, 则 $a + b = 1$, 原式为

$$L = 5^{a^3} \cdot 8^{b^2} \cdot 5^{b^3}$$

两边取对数, 则

$$\log L = (a^3 + b^3)b + 3ab^2 = (a + b)(a^2 - ab + b^2)b + 3ab^2 = b(a + b)^2 = \log 5$$

因此

$$L = 5$$

9. 已知正实数 x 满足

$$\log_2 x \log_4 x \log_6 x = \log_2 x \log_4 x + \log_2 x \log_6 x + \log_4 x \log_6 x,$$

求 x 。

设 $\log_2 x = a, \log_6 x = b$, 则 $\log_4 x = \frac{1}{2}a$, 原式为

$$\frac{1}{2}a^2b = \frac{1}{2}a^2 + ab + \frac{1}{2}ab \Rightarrow ab = a + 3b$$

将 $a = \frac{\log x}{\log 2}, b = \frac{\log x}{\log 6}$ 代入得

$$\frac{(\log x)^2}{(\log 2)(\log 6)} = \frac{\log x(\log 6 + 3\log 2)}{(\log 2)(\log 6)} \Rightarrow \log x(\log x - \log 48) = 0$$

所以

$$x = 1 \quad \text{或} \quad x = 48$$

10. 求

$$\sqrt{\log_3 \sqrt{6} + \sqrt{\log_3 2}} + \sqrt{\log_3 \sqrt{6} - \sqrt{\log_3 2}}$$

之值。

令

$$a = \log_3 \sqrt{6} = \frac{1}{2}(1 + \log_3 2), \quad b = \sqrt{\log_3 2} < 1$$

则有

$$a = \frac{b^2 + 1}{2}$$

因此

$$\begin{aligned} \sqrt{a+b} + \sqrt{a-b} &= \sqrt{\frac{b^2+1}{2} + b} + \sqrt{\frac{b^2+1}{2} - b} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}(b+1)^2} + \sqrt{\frac{1}{2}(b-1)^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(b+1) + \frac{1}{\sqrt{2}}(1-b) = \sqrt{2} \end{aligned}$$

11. 解不等式

$$\sqrt{\log_2 x - 1} + \frac{1}{2} \log_{\frac{1}{2}} x^3 + 2 > 0$$

设 $y = \log_2 x$, 则不等式化为

$$\sqrt{y-1} - \frac{3}{2}y + 2 > 0, \quad \text{且 } y \geq 1.$$

设 $z = \sqrt{y-1}$, 则 $y = z^2 + 1$, 方程变为

$$z - \frac{3}{2}(z^2 + 1) + 2 > 0 \Rightarrow (3z + 1)(z - 1) < 0$$

于是

$$-\frac{1}{3} < z < 1 \Rightarrow 0 \leq z^2 < 1 \Rightarrow 1 \leq y < 2$$

再考虑 y 的定义域 $y \geq 1$, 经检验有

$$2 \leq x < 4$$

12. 求不等式的解集

$$\log(x-40) + \log(60-x) < 2$$

变为

$$(x-40)(60-x) < 100$$

注意到 $(x-40)(60-x) = -(x-50)^2 + 100$, 所以不等式等价于

$$-(x-50)^2 + 100 < 100 \Rightarrow (x-50)^2 > 0 \Rightarrow x \neq 50$$

且由定义域

$$\begin{cases} x-40 > 0 \\ 60-x > 0 \end{cases} \Rightarrow 40 < x < 60$$

经检验得解集

$$(40, 50) \cup (50, 60).$$

13. 解不等式:

$$\left(\log_{\frac{1}{3}} x - 1\right) \left(\log_{\frac{1}{4}} x + 2\right) \left(\log_{\frac{1}{5}} x - 3\right) > 0.$$

换底得

$$\left(\frac{\log x}{-\log 3} - 1\right) \left(\frac{\log x}{-\log 4} + 2\right) \left(\frac{\log x}{-\log 5} - 3\right) > 0$$

即

$$(\log x + \log 3)(\log x - 2 \log 4)(\log x + 3 \log 5) < 0$$

符号分析得

$$-\log 3 < \log x < 2 \log 4, \quad \log x < -3 \log 5$$

解集为

$$\frac{1}{3} < x < 16 \quad \text{或} \quad 0 < x < \frac{1}{125}$$

14. 求

$$|x - 1|^{\log_2(4-x)} < |x - 1|^{\log_2(1+x)}$$

的解之范围。

由 $\log_2(4-x)$ 及 $\log_2(1+x)$ 的定义域, 得

$$x < 4 \quad \text{且} \quad x > -1$$

即 $x \in (-1, 4)$, 且 $x \neq 0, 1, 2$, 否则不等式不成立。分四种情况讨论:

情况 1: $x \in (-1, 0)$, 则

$$\begin{aligned} (1-x)^{\log_2(4-x)} < (1-x)^{\log_2(1+x)} &\Rightarrow \log_2(4-x) < \log_2(1+x) \\ &\Rightarrow 4-x < 1+x \\ &\Rightarrow x > \frac{3}{2} \end{aligned}$$

此情况解集为 $(-1, 0) \cap \left(\frac{3}{2}, \infty\right) = \emptyset$, 无解。

情况 2: $x \in (0, 1)$, 则

$$\begin{aligned} (1-x)^{\log_2(4-x)} < (1-x)^{\log_2(1+x)} &\Rightarrow \log_2(4-x) > \log_2(1+x) \\ &\Rightarrow 4-x > 1+x \\ &\Rightarrow x < \frac{3}{2} \end{aligned}$$

此情况解集为 $(0, 1) \cap \left(-\infty, \frac{3}{2}\right) = (0, 1)$ 。

情况 3: $x \in (1, 2)$, 则

$$\begin{aligned}(x-1)^{\log_2(4-x)} &< (x-1)^{\log_2(1+x)} \Rightarrow \log_2(4-x) > \log_2(1+x) \\ &\Rightarrow 4-x > 1+x \\ &\Rightarrow x < \frac{3}{2}\end{aligned}$$

此情况解集为 $(1, 2) \cap \left(-\infty, \frac{3}{2}\right) = \left(1, \frac{3}{2}\right)$ 。

情况 4: $x \in (2, 4)$, 则

$$\begin{aligned}(x-1)^{\log_2(4-x)} &< (x-1)^{\log_2(1+x)} \Rightarrow \log_2(4-x) < \log_2(1+x) \\ &\Rightarrow 4-x < 1+x \\ &\Rightarrow x > \frac{3}{2}\end{aligned}$$

此情况解集为 $(2, 4) \cap \left(\frac{3}{2}, \infty\right) = (2, 4)$ 。

综上所述, 原方程式的解集为 $\left(0, \frac{3}{2}\right) \cup (2, 4) \setminus \{1\}$ 。

15. 求所有实数 x , 使得

$$\sqrt{\log_2 x \cdot \log_2(4x) + 1} + \sqrt{\log_2 x \cdot \log_2\left(\frac{x}{64}\right) + 9} = 4$$

发现

$$\begin{aligned}f(x) &= \sqrt{\log_2 x \cdot \log_2(4x) + 1} + \sqrt{\log_2 x \cdot \log_2\left(\frac{x}{64}\right) + 9} \\ &= \sqrt{\log_2 x (2 + \log_2 x) + 1} + \sqrt{\log_2 x (\log_2 x - 6) + 9} \\ &= \sqrt{(\log_2 x + 1)^2} + \sqrt{(\log_2 x - 3)^2} \\ &= \begin{cases} -2\log_2 x + 2 & , \log_2 x \leq -1 \\ 4 & , -1 < \log_2 x \leq 3 \\ 2\log_2 x - 2 & , \log_2 x > 3 \end{cases}\end{aligned}$$

欲使 $f(x) = 4$, 当 $\log_2 x \leq -1, \log_2 x = -1$; 当 $-1 < \log_2 x \leq 3, f(x) = 4$ 恒成立; 当

$\log_2 x > 3$, 无解; 因此解为

$$-1 \leq \log_2 x \leq 3 \Rightarrow \frac{1}{2} \leq x \leq 8$$

16. 已知

$$\frac{\log a}{b-c} = \frac{\log b}{c-a} = \frac{\log c}{a-b},$$

其中 $a \neq b \neq c$, 试求 $a^a b^b c^c$ 的值。

设

$$\frac{\log a}{b-c} = \frac{\log b}{c-a} = \frac{\log c}{a-b} = k$$

则

$$\log a = k(b-c), \quad \log b = k(c-a), \quad \log c = k(a-b)$$

因此

$$\begin{aligned} \log(a^a b^b c^c) &= a \log a + b \log b + c \log c \\ &= ak(b-c) + bk(c-a) + ck(a-b) \\ &= k[ab - ac + bc - ab + ca - cb] \\ &= 0 \end{aligned}$$

即

$$a^a b^b c^c = 1$$

17. 设 a, b 同号, 且 $a^2 - 2ab - 9b^2 = 0$, 求

$$\log(a^2 + ab - 6b^2) - \log(a^2 + 4ab + 15b^2)$$

的值。

由 $a^2 - 2ab - 9b^2 = 0$ 解得

$$a = (\sqrt{10} + 1)b$$

故

$$\begin{aligned}& \log(a^2 + ab - 6b^2) - \log(a^2 + 4ab + 15b^2) \\&= \log(3ab + 3b^2) - \log(6ab + 24b^2) \\&= \log\left(\frac{3b(a+b)}{6b(a+4b)}\right) \\&= \log\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{a+b}{a+4b}\right) \\&= \log\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{(\sqrt{10}+2)b}{(\sqrt{10}+5)b}\right) \\&= \log\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{(\sqrt{10}+2)(5-\sqrt{10})}{(\sqrt{10}+5)(5-\sqrt{10})}\right) \\&= \log\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3\sqrt{10}}{15}\right) = \log\left(\frac{\sqrt{10}}{10}\right) = -\frac{1}{2}\end{aligned}$$

18. 设正实数 x, y ($x \neq 1, y \neq 1$) 满足

$$\log_2 x = \log_y 16, \quad xy = 64,$$

求

$$\left(\log_2 \frac{x}{y}\right)^2$$

由 $xy = 64$ 得 $x = \frac{64}{y}$, 代入第一式:

$$\log_2 \left(\frac{64}{y}\right) = \log_y 16 \Rightarrow 6 - \log_2 y = \frac{4}{\log_2 y}$$

设 $a = \log_2 y$, 则变为

$$6 - a = \frac{4}{a} \Rightarrow a^2 - 6a + 4 = 0$$

解得

$$\log_2 y = a = 3 \pm \sqrt{5}$$

所求为

$$(\log_2 x - \log_2 y)^2 = (a - (6 - a))^2 = (2a - 6)^2 = (\pm 2\sqrt{5})^2 = 20$$

19. 已知 $a^x = bc, b^y = ac, c^z = ab$, 证明

$$xyz = x + y + z + 2$$

由 $a^x = bc$, 两边取 yz 次方

$$(a^x)^{yz} = (bc)^{yz} \Rightarrow a^{xyz} = b^{yz} \cdot c^{yz}$$

由 $b^y = ac$, 得 $b^{yz} = (ac)^z = a^z c^z$; 由 $c^z = ab$, 得 $c^{yz} = (ab)^y = a^y b^y$; 于是

$$a^{xyz} = (a^z c^z)(a^y b^y) = a^{z+y} b^y c^z = a^{z+y} \cdot ac \cdot ab = a^{z+y+2} bc$$

又 $a^x = bc$, 故

$$a^{xyz} = a^{z+y+2} \cdot a^x = a^{x+y+z+2} \Rightarrow xyz = x + y + z + 2$$

20. 设 a, b, c 均为异于 1 的正数, 且满足 $abc = 1$, 证明

$$\log_a b + \log_a c + \log_b c + \log_b a + \log_c b + \log_c a = -3$$

有

$$\begin{aligned} & \log_a a + \log_a b + \log_a c + \log_b b + \log_b c + \log_b a + \log_c c + \log_c b + \log_c a \\ &= \log_a(abc) + \log_b(abc) + \log_c(abc) \\ &= 0 \end{aligned}$$

故原式得证。

21. 已知

$$\log_{10} \sin x + \log_{10} \cos x = -1,$$

且整数 n 满足

$$\log_{10}(\sin x + \cos x) = \frac{1}{2}(\log_{10} n - 1),$$

求 n 。

由

$$\log_{10} \sin x + \log_{10} \cos x = -1 \Rightarrow \sin x \cos x = 10^{-1} = \frac{1}{10}$$

$$\text{又 } \sin x + \cos x = \sqrt{1 + 2 \cdot \frac{1}{10}} = \sqrt{\frac{6}{5}}, \text{ 则}$$

$$\log_{10} n = 2 \log_{10} \sqrt{\frac{6}{5}} + 1 = \log_{10} \frac{6}{5} + \log_{10} 10 = \log_{10} 12 \Rightarrow n = 12$$

22. 解方程式

$$(\log_5 x)^2 + \log_{5x} \left(\frac{5}{x} \right) = 1$$

设 $\log_5 x = t$, 则

$$\log_{5x} \left(\frac{5}{x} \right) = \frac{\log_5 \frac{5}{x}}{\log_5 (5x)} = \frac{\log_5 5 - \log_5 x}{\log_5 5 + \log_5 x} = \frac{1-t}{1+t}$$

原方程式变为

$$t^2 + \frac{1-t}{1+t} = 1$$

$$t^2(1+t) + 1-t = 1+t$$

$$t^3 + t^2 - 2t = 0$$

$$t(t+2)(t-1) = 0$$

解得 $t = 0, -2, 1$, 即

$$x = 5^0 = 1, \quad \text{或} \quad x = 5^{-2} = \frac{1}{25}, \quad \text{或} \quad x = 5^1 = 5$$

经检验得 $x = 1, x = \frac{1}{25}, x = 5$ 都是原方程的解。

23. 解方程

$$\log_{2x} \left(48\sqrt[3]{3} \right) = \log_{3x} \left(162\sqrt[3]{2} \right)$$

原式变为

$$\frac{\log(48\sqrt[3]{3})}{\log(2x)} = \frac{\log(162\sqrt[3]{2})}{\log(3x)}.$$

又因

$$\log(48\sqrt[3]{3}) = 4\log 2 + \frac{4}{3}\log 3, \quad \log(162\sqrt[3]{2}) = \frac{4}{3}\log 2 + 4\log 3.$$

于是有

$$\frac{4\log 2 + \frac{4}{3}\log 3}{\log 2 + \log x} = \frac{\frac{4}{3}\log 2 + 4\log 3}{\log 3 + \log x}.$$

化简最终得到

$$\log x = \frac{1}{2}\log 6 \Rightarrow x = \sqrt{6}.$$

24. 求所有实数 x , 使得

$$\log_{5x+9}(x^2 + 6x + 9) + \log_{x+3}(5x^2 + 24x + 27) = 4.$$

原方程式化为

$$\begin{aligned} \frac{\log(x^2 + 6x + 9)}{\log(5x + 9)} + \frac{\log(5x^2 + 24x + 27)}{\log(x + 3)} &= 4 \\ \frac{2\log(x + 3)}{\log(5x + 9)} + \frac{\log(5x + 9) + \log(x + 3)}{\log(x + 3)} &= 4 \\ 2\frac{\log(x + 3)}{\log(5x + 9)} + \frac{\log(5x + 9)}{\log(x + 3)} + 1 &= 4 \end{aligned}$$

令 $t = \frac{\log(x + 3)}{\log(5x + 9)}$, 解得

$$2t + \frac{1}{t} = 3 \Rightarrow t = 1 \text{ 或 } t = \frac{1}{2}$$

当 $t = 1$, 解得

$$\log(x + 3) = \log(5x + 9) \Rightarrow x = -\frac{3}{2}$$

当 $t = \frac{1}{2}$, 则 $2\log(x + 3) = \log(5x + 9)$, 即

$$2\log(x + 3) = \log(5x + 9) \Rightarrow x = 0 \text{ 或 } x = -1$$

经检验得, 原方程的实数解为

$$x = 0, -1, -\frac{3}{2}$$

25. 求解下列方程组:

$$\begin{cases} (2x)^{\ln 2} = (3y)^{\ln 3} \\ 3^{\ln x} = 2^{\ln y} \end{cases}$$

两边取对数,

$$(\ln 2)^2 + \ln 2 \cdot \ln x = (\ln 3)^2 + \ln 3 \cdot \ln y \quad (1)$$

$$\ln x \cdot \ln 3 = \ln y \cdot \ln 2 \Rightarrow \ln x = \frac{\ln y \cdot \ln 2}{\ln 3} \quad (2)$$

将 (2) 代入 (1), 可解得

$$x = \frac{1}{2}, \quad y = \frac{1}{3}$$

26. 求下列方程组的所有实数解:

$$\begin{cases} x + \log_{10} x = y - 1 \\ y + \log_{10}(y - 1) = z - 1 \\ z + \log_{10}(z - 2) = x + 2 \end{cases}$$

将方程组改写为

$$x + \log_{10} x = y - 1$$

$$(y - 1) + \log_{10}(y - 1) = z - 2$$

$$(z - 2) + \log_{10}(z - 2) = x$$

令 $a = x, b = y - 1, c = z - 2$, 方程组可改写为:

$$a + \log_{10} a = b \quad (1)$$

$$b + \log_{10} b = c \quad (2)$$

$$c + \log_{10} c = a \quad (3)$$

容易验证 $(a, b, c) = (1, 1, 1)$ 是一解, 现考虑 $a > 1$, 则

$$\log_{10} a > 0 \Rightarrow b = a + \log_{10} a > a > 1 \Rightarrow c = b + \log_{10} b > b > a > 1$$

由 (3) 得 $a = c + \log_{10} c > c > b > a$, 矛盾。而当 $0 < a < 1$,

$$\log_{10} a < 0 \Rightarrow b = a + \log_{10} a < a < 1 \Rightarrow c = b + \log_{10} b < b < a < 1$$

由 (3) 得 $a = c + \log_{10} c < c < b < a$, 矛盾。因此 $(a, b, c) = (1, 1, 1)$ 是唯一解, 即

$$(x, y, z) = (1, 2, 3)$$

27. 若正实数 x, y, z 满足

$$\begin{cases} \log_2 x + \log_4 y + \log_4 z = 2 \\ \log_3 y + \log_9 z + \log_9 x = 2 \\ \log_4 z + \log_{16} x + \log_{16} y = 2 \end{cases}$$

求 xyz 。

原方程组给出

$$\begin{cases} \log_2 x + \log_2 \sqrt{y} + \log_2 \sqrt{z} = 2 \Rightarrow x\sqrt{yz} = 2^2 \\ \log_3 y + \log_3 \sqrt{z} + \log_3 \sqrt{x} = 2 \Rightarrow y\sqrt{xz} = 3^2 \\ \log_4 z + \log_4 \sqrt{x} + \log_4 \sqrt{y} = 2 \Rightarrow z\sqrt{xy} = 4^2 \end{cases}$$

将三式相乘得

$$(xyz)^2 = 2^6 \cdot 3^2 \Rightarrow xyz = 24$$

28. 解联立方程组

$$\begin{cases} \log x \log y - 3 \log 5y - \log 8x = -4 \\ \log y \log z - 4 \log 5y - \log 16z = 4 \\ \log z \log x - 4 \log 8x - 3 \log 625z = -18 \end{cases}$$

三式化简得

$$\log x \log y - 3 \log y - \log x = -1$$

$$\log y \log z - 4 \log y - \log z = 8$$

$$\log z \log x - 4 \log x - 3 \log z = -6$$

因式分解:

$$(\log x - 3)(\log y - 1) = 2 \quad (1)$$

$$(\log y - 1)(\log z - 4) = 12 \quad (2)$$

$$(\log z - 4)(\log x - 3) = 6 \quad (3)$$

三式相乘可得

$$(\log x - 3)(\log y - 1)(\log z - 4) = \pm\sqrt{2 \cdot 6 \cdot 12} = \pm 12 \quad (4)$$

分别作 $\frac{(4)}{(2)}, \frac{(4)}{(3)}, \frac{(4)}{(1)}$ 得解 $\log x - 3 = \pm 1, \log y - 1 = \pm 2, \log z - 4 = \pm 6$, 即

$$(x, y, z) = (10^4, 10^3, 10^{10}) \quad \text{或} \quad (10^2, 10^{-1}, 10^{-2})$$

方程组

1. 若 x, y, z 都是正数且满足

$$\begin{cases} x + \frac{1}{y} = 4, \\ y + \frac{1}{z} = 1, \\ z + \frac{1}{x} = \frac{7}{3}, \end{cases}$$

求 xyz 的值。

$$\begin{aligned} \left(x + \frac{1}{y}\right) \left(y + \frac{1}{z}\right) \left(z + \frac{1}{x}\right) &= xyz + x + \frac{1}{y} + y + \frac{1}{z} + z + \frac{1}{x} + \frac{1}{xyz} \\ &= xyz + 4 + 1 + \frac{7}{3} + \frac{1}{xyz} = \frac{28}{3} \end{aligned}$$

于是

$$xyz + \frac{1}{xyz} = 2 \Rightarrow (xyz)^2 - 2(xyz) + 1 = 0 \Rightarrow xyz = 1$$

2. 求满足方程组

$$\begin{cases} x^2 + x^2y^2 + x^2y^4 = 525 \\ x + xy + xy^2 = 35 \end{cases}$$

的所有实数序对 (x, y) 。

$$x^2 + x^2y^2 + x^2y^4 = 525 \quad (1)$$

$$x + xy + xy^2 = 35 \quad (2)$$

发现

$$525 = x^2 + x^2y^2 + x^2y^4 = (x - xy + xy^2)(x + xy + xy^2)$$

于是得到

$$x - xy + xy^2 = 15 \quad (3)$$

(2) - (3) 得

$$2xy = 20 \Rightarrow x = \frac{10}{y}$$

代回 (3) 解得

$$(x, y) = (5, 2), \left(20, \frac{1}{2}\right)$$

3. 若两正数 a, b 满足

$$\begin{cases} a\sqrt{a} + b\sqrt{b} = 50 \\ a\sqrt{b} + b\sqrt{a} = 25 \end{cases}$$

求 ab 之值。

$$a\sqrt{a} + b\sqrt{b} = 50 \quad (1)$$

$$a\sqrt{b} + b\sqrt{a} = 25 \quad (2)$$

由 $\frac{(1)}{(2)}$ 得

$$\frac{(\sqrt{a})^3 + (\sqrt{b})^3}{\sqrt{ab}(\sqrt{a} + \sqrt{b})} = \frac{a - \sqrt{ab} + b}{\sqrt{ab}} = 2 \Rightarrow a + b = 3\sqrt{ab} \Rightarrow a^2 + b^2 = 7ab \quad (3)$$

又由 (1) \times (2) 得

$$(a\sqrt{a} + b\sqrt{b})(a\sqrt{b} + b\sqrt{a}) = \sqrt{ab}(a^2 + b^2) + ab(a + b) = 1250 \quad (4)$$

将 (3) 代入 (4),

$$\sqrt{ab}(7ab) + ab(3\sqrt{ab}) = 10(\sqrt{ab})^3 = 1250 \Rightarrow ab = 25$$

4. 求正实数对 (x, y) 满足

$$\begin{cases} x^2 + x\sqrt[3]{xy^2} = 208 \\ y^2 + y\sqrt[3]{yx^2} = 1053 \end{cases}$$

原方程即

$$x^{\frac{4}{3}}(x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}}) = 208 \quad (1)$$

$$y^{\frac{4}{3}}(x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}}) = 1053 \quad (2)$$

两式相除得

$$\left(\frac{y}{x}\right)^{\frac{4}{3}} = \left(\frac{3}{2}\right)^4 \Rightarrow \frac{y}{x} = \left(\frac{3}{2}\right)^3 = \frac{27}{8},$$

将 $y = \frac{27}{8}x$ 代入 (1), 解得

$$x^2 \left(1 + \frac{9}{4}\right) = 208 \Rightarrow (x, y) = (8, 27).$$

5. 设相异实数 x, y 满足

$$\begin{cases} x^2 + \sqrt{3}y = 4 \\ y^2 + \sqrt{3}x = 4 \end{cases}$$

求 $\frac{x}{y} + \frac{y}{x}$ 的值。

$$x^2 + \sqrt{3}y = 4 \quad (1)$$

$$y^2 + \sqrt{3}x = 4 \quad (2)$$

由于 $x \neq y$, (1) - (2) 得

$$x^2 - y^2 = \sqrt{3}(x - y) \Rightarrow x + y = \sqrt{3}.$$

且 (1) + (2) 得

$$x^2 + y^2 + \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} = 8 \Rightarrow x^2 + y^2 = (\sqrt{3})^2 - 2xy = 5 \Rightarrow xy = -1$$

因此

$$\frac{x}{y} + \frac{y}{x} = \frac{x^2 + y^2}{xy} = \frac{5}{-1} = -5.$$

6. 已知实数 x, y, z 满足

$$\begin{cases} xy + 4z = 60 \\ yz + 4x = 60 \\ zx + 4y = 60 \end{cases}$$

求 x 的可能值。

$$xy + 4z = 60 \quad (1)$$

$$yz + 4x = 60 \quad (2)$$

$$zx + 4y = 60 \quad (3)$$

由 (1) - (2) 得

$$y(x - z) + 4(z - x) = 0 \Rightarrow (x - z)(y - 4) = 0 \Rightarrow y = 4 \text{ 或 } x = z$$

同理有

$$z = 4 \text{ 或 } x = y$$

及

$$x = 4 \text{ 或 } y = z$$

若 $x = 4$, 由 (1) 及 (2) 得

$$y + z = 15, \quad yz = 44$$

由此可知 y, z 是方程

$$t^2 - 15t + 44 = 0$$

的根, 解得

$$(x, y, z) = (4, 4, 11), (4, 11, 4)$$

若 $y = z$, 由 (2) - (1) 得

$$y^2 - (x + 4)y + 4x = 0 \Rightarrow (y - 4)(y - x) = 0$$

当 $y = 4$ 有

$$(x, y, z) = (11, 4, 4)$$

而当 $y = x$ 有 $x = y = z$, 代入 (1) 得

$$x^2 + 4x - 60 = 0 \Rightarrow (x + 10)(x - 6) = 0$$

给出

$$(x, y, z) = (-10, -10, -10), (6, 6, 6)$$

所以原方程组的解为

$$(x, y, z) = (-10, -10, -10), (6, 6, 6), (11, 4, 4), (4, 11, 4), (4, 4, 11)$$

7. 解方程组

$$\begin{cases} x + y + z = 6 \\ x^2 + y^2 + z^2 = 18 \\ \sqrt{x} + \sqrt{y} + \sqrt{z} = 4 \end{cases}$$

由

$$(x + y + z)^2 = x^2 + y^2 + z^2 + 2(xy + xz + yz)$$

给出

$$xy + xz + yz = \frac{1}{2}(6^2 - 18) = 9$$

又由

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

所以

$$4^2 = 6 + 2(\sqrt{xy} + \sqrt{xz} + \sqrt{yz}) \Rightarrow \sqrt{xy} + \sqrt{xz} + \sqrt{yz} = 5$$

对上式两边平方, 有

$$xy + xz + yz + 2\sqrt{xyz}(\sqrt{x} + \sqrt{y} + \sqrt{z}) = 25$$

即

$$9 + 2\sqrt{xyz} \cdot 4 = 25 \Rightarrow xyz = 4$$

由韦达定理, x, y, z 为三次方程

$$t^3 - 6t^2 + 9t - 4 = 0$$

的根, 因式分解得

$$(t - 1)^2(t - 4) = 0 \Rightarrow t = 1, 4$$

所以方程组的解为

$$(x, y, z) = (1, 1, 4), (1, 4, 1), (4, 1, 1)$$

8. 若 x, y, z 满足

$$\begin{cases} \frac{x}{3} + \frac{y}{3 + \log 2} + \frac{z}{3 + \log 5} = 1 \\ \frac{x}{7} + \frac{y}{7 + \log 2} + \frac{z}{7 + \log 5} = 1 \\ \frac{x}{11} + \frac{y}{11 + \log 2} + \frac{z}{11 + \log 5} = 1 \end{cases}$$

求 $x + y + z$ 之值。

不妨设

$$\frac{a}{t} + \frac{b}{t + \log 2} + \frac{c}{t + \log 5} = 1$$

则

$$f(t) = a(t + \log 2)(t + \log 5) + b t(t + \log 5) + c t(t + \log 2) - t(t + \log 2)(t + \log 5) = 0$$

由韦达定理, 三根之和为

$$a + b + c - 1 = 3 + 7 + 11 = 21 \Rightarrow a + b + c = 22$$

9. 已知 $x, y \in \mathbb{R}$, 求解方程组

$$\begin{cases} \sqrt{x} \left(1 + \frac{1}{x + y} \right) = 2 \\ \sqrt{y} \left(1 - \frac{1}{x + y} \right) = \sqrt{2} \end{cases}$$

$$1 + \frac{1}{x + y} = \frac{2}{\sqrt{x}} \quad (1)$$

$$1 - \frac{1}{x + y} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{y}} \quad (2)$$

$(1)^2 - (2)^2$:

$$\left(1 + \frac{1}{x + y} \right)^2 - \left(1 - \frac{1}{x + y} \right)^2 = \frac{4}{x} - \frac{2}{y} \Rightarrow \frac{4}{x + y} = \frac{4y - 2x}{xy}$$

整理得

$$x^2 + xy - 2y^2 = 0 \Rightarrow (x + 2y)(x - y) = 0$$

由于 $x, y \geq 0$, 取 $x = y$, 代入 (1) 解得

$$1 + \frac{1}{2x} = \frac{2}{\sqrt{x}} \Rightarrow 4x^2 - 12x + 1 = 0 \Rightarrow x = y = \frac{3 + 2\sqrt{2}}{2}$$

10. 解方程组

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{x+y}{x}} + \sqrt{\frac{x}{x+y}} = \frac{5}{2} \\ 2x^2 + y^2 = 176 \end{cases}$$

$$\sqrt{\frac{x+y}{x}} + \sqrt{\frac{x}{x+y}} = \frac{5}{2} \quad (1)$$

$$2x^2 + y^2 = 176 \quad (2)$$

设

$$u = \sqrt{\frac{x+y}{x}}$$

方程 (1) 变为

$$u + \frac{1}{u} = \frac{5}{2} \Rightarrow (2u-1)(u-2) = 0$$

当 $u = \frac{1}{2}$,

$$\frac{x+y}{x} = \frac{1}{4} \Rightarrow y = -\frac{3}{4}x$$

代入 (2), 解得

$$x = \pm 16\sqrt{\frac{11}{41}}, \quad y = -\frac{3}{4}x = \mp 12\sqrt{\frac{11}{41}}$$

而当 $u = 2$,

$$\frac{x+y}{x} = 16 \Rightarrow y = 3x$$

代入 (2), 解得

$$x = \pm 4, \quad y = 3x = \pm 12$$

故原方程组解为

$$(x, y) = (4, 12), (-4, -12), \left(16\sqrt{\frac{11}{41}}, -12\sqrt{\frac{11}{41}}\right), \left(-16\sqrt{\frac{11}{41}}, 12\sqrt{\frac{11}{41}}\right)$$

11. 解方程组

$$\begin{cases} (91-2x)^3 = 216xy^2 \\ (37-2y)^3 = 216x^2y \end{cases}$$

$$(91 - 2x)^3 = 216xy^2 \quad (1)$$

$$(37 - 2y)^3 = 216x^2y \quad (2)$$

令

$$x = u^3, \quad y = v^3.$$

将 (1),(2) 两边开立方得

$$91 - 2u^3 = 6uv^2, \quad 37 - 2v^3 = 6u^2v.$$

两式相加,

$$2(u + v)^3 = 128 \Rightarrow u + v = 4$$

将 $v = 4 - u$ 代入 (1),

$$6u(4 - u)^2 + 2u^3 = 91 \Rightarrow (2u - 7)(4u^2 - 10u + 13) = 0 \Rightarrow u = \frac{7}{2} \in \mathbb{R}$$

因此

$$v = 4 - u = \frac{1}{2}$$

最终解为

$$x = \frac{343}{8}, \quad y = \frac{1}{8}$$

12. 解

$$\begin{cases} 3(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}} = 125a \\ 4(a^2 + b^2) = -25b \end{cases}$$

$$3(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}} = 125a \quad (1)$$

$$4(a^2 + b^2) = -25b \quad (2)$$

由 $\frac{(1)}{(2)}$ 得

$$-\frac{20a}{3b} = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}$$

平方得

$$\frac{400a^2}{9b^2} = a^2 + b^2 \Rightarrow a^2 = \frac{9b^2}{400 - 9b^2}$$

代入 (2) 得

$$4 \left(\frac{9b^2}{400 - 9b^2} + b^2 \right) + 25b = 0 \Rightarrow b(b+4)(9b-100) = 0$$

经检验得 $b = \frac{100}{9}$ 是增根, 原方程组的解为

$$(a, b) = (0, 0) \quad \text{或} \quad (3, -4)$$

13. 解方程组

$$\begin{cases} x^3 + 9x^2y = -28 \\ y^3 + xy^2 = 1 \end{cases}$$

$$x^3 + 9x^2y = -28 \quad (1)$$

$$y^3 + xy^2 = 1 \quad (2)$$

(1) + 27 · (2), 得

$$x^3 + 9x^2y + 27xy^2 + 27y^3 = -1$$

即

$$(x + 3y)^3 = -1 \Rightarrow x + 3y = -1$$

将 $x = -1 - 3y$ 代入 (2),

$$y^3 + (-1 - 3y)y^2 = 1 \Rightarrow (y + 1)(2y^2 - y + 1) = 0$$

其中 $2y^2 - y + 1$ 的判别式

$$\Delta = (-1)^2 - 4 \cdot 2 \cdot 1 = -7 < 0$$

故 $2y^2 - y + 1 = 0$ 无实数解, 因此唯一实数解为

$$(x, y) = (2, -1)$$

14. 解方程组

$$\begin{cases} x^3 + 6xy^2 = 99 \\ 2y^3 + 3x^2y = 70 \end{cases}$$

$$x^3 + 6xy^2 = 99 \quad (1)$$

$$2y^3 + 3x^2y = 70 \quad (2)$$

观察到方程式齐次, 不妨设 $y = mx$, 其中 $m \neq 0$, 代入方程得到

$$x^3(1 + 6m^2) = 99, \quad x^3(2m^3 + 3m) = 70.$$

两式相除得

$$\frac{1 + 6m^2}{2m^3 + 3m} = \frac{99}{70} \Rightarrow (3m - 2)(66m^2 - 96m + 35) = 0$$

其中 $66m^2 - 96m + 35$ 的判别式为

$$\Delta = (-96)^2 - 4 \cdot 66 \cdot 35 = -24 < 0$$

故 $66m^2 - 96m + 35 = 0$ 无实根, 因此唯一实根为

$$m = \frac{2}{3} \Rightarrow y = \frac{2}{3}x$$

将之代入 (1),

$$x^3 + 6x \left(\frac{2}{3}x \right)^2 = 99 \Rightarrow x = 3$$

得到

$$(x, y) = (3, 2)$$

15. 求方程

$$\begin{cases} 36y^2(x+1) + 36x^2(y+1) = 7x^2y^2 \\ 6x + 6y + xy = 0 \end{cases}$$

的实数解。

$$36y^2(x+1) + 36x^2(y+1) = 7x^2y^2 \quad (1)$$

$$6x + 6y + xy = 0$$

由 (1),

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x^2} + \frac{1}{y} + \frac{1}{y^2} = \frac{7}{36} \quad (3)$$

由 (2),

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = -\frac{1}{6} \quad (4)$$

将 (3) 代入 (4), 得

$$\frac{1}{x^2} + \left(-\frac{1}{x} - \frac{1}{6}\right)^2 = \frac{13}{36} \Rightarrow (x-3)(x+2) = 0$$

故原方程式的解为

$$(x, y) = (3, 6), \quad \left(-2, -\frac{3}{2}\right)$$

16. 设 a, b, c 为相异非零实数, 且

$$\frac{1+a^3}{a} = \frac{1+b^3}{b} = \frac{1+c^3}{c}.$$

求 $a^3 + b^3 + c^3$ 的所有可能值。

设

$$\frac{1+a^3}{a} = \frac{1+b^3}{b} = \frac{1+c^3}{c} = k$$

则 a, b, c 是方程

$$x^3 - kx + 1 = 0$$

的三根, 故设

$$x^3 - kx + 1 = (x-a)(x-b)(x-c) = x^3 - (a+b+c)x^2 + (ab+ac+bc)x - abc$$

比较系数得

$$a+b+c=0, \quad abc=-1$$

故

$$a^3 + b^3 + c^3 = (a+b+c)(a^2 + b^2 + c^2 - ab - bc - ca) + 3abc = 0 + 3(-1) = -3$$

17. 若 $a, b, c \in \mathbb{R}^+$ 满足

$$abc = 120, \quad a+b+c = a^2 + b^2 + c^2 = a^3 + b^3 + c^3 = \lambda,$$

求 $\lambda \in \mathbb{Z}^+$ 。

已知

$$a+b+c = a^2 + b^2 + c^2 = a^3 + b^3 + c^3 = \lambda.$$

由 $a^2 + b^2 + c^2 = (a + b + c)^2 - 2(ab + bc + ca)$,

$$ab + bc + ca = \frac{\lambda^2 - \lambda}{2}.$$

由 $a^3 + b^3 + c^3 = (a + b + c)^3 - 3(a + b + c)(ab + bc + ca) + 3abc$,

$$\lambda = \lambda^3 - 3\lambda \left(\frac{\lambda^2 - \lambda}{2} \right) + 3 \cdot 120$$

解得

$$(\lambda - 10)(\lambda^2 + 7\lambda + 72) = 0 \Rightarrow \lambda = 10 \in \mathbb{Z}^+$$

18. 已知

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma = 6 \\ \alpha^3 + \beta^3 + \gamma^3 = 87 \\ (\alpha + 1)(\beta + 1)(\gamma + 1) = 33 \end{cases}$$

求

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\gamma}.$$

由 $\alpha^3 + \beta^3 + \gamma^3 - 3\alpha\beta\gamma = (\alpha + \beta + \gamma)((\alpha + \beta + \gamma)^2 - 3(\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha))$, 则

$$87 - 3\alpha\beta\gamma = 6(36 - 3(\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha)) \Rightarrow 6(\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha) - \alpha\beta\gamma = 43 \quad (1)$$

又由 $33 = (\alpha + 1)(\beta + 1)(\gamma + 1) = 1 + 6 + \alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha + \alpha\beta\gamma$,

$$\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha + \alpha\beta\gamma = 26 \quad (2)$$

联立 (1),(2) 得,

$$\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha = \frac{69}{7}, \quad \alpha\beta\gamma = \frac{113}{7}$$

因此

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\gamma} = \frac{\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha}{\alpha\beta\gamma} = \frac{69}{113}.$$

19. 已知 x, y, z 为实数满足

$$\begin{cases} \frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} = 1 \\ x^2 + y^2 + z^2 = \frac{3}{2} \\ x^3 + y^3 + z^3 = 1 \end{cases}$$

且 $x + y + z$ 为整数, 求 $x + y + z$ 的值。

$$\begin{cases} xy + yz + zx = xyz \\ x^2 + y^2 + z^2 = \frac{3}{2} \\ x^3 + y^3 + z^3 = 1 \end{cases}$$

令 $a = xyz$, 则

$$(x + y + z)^2 = \frac{3}{2} + 2a, \quad 1 - 3a = (x + y + z) \left(\frac{3}{2} - a \right)$$

联立得

$$\left(\frac{1 - 3a}{\frac{3}{2} - a} \right)^2 = \frac{3}{2} + 2a$$

解得

$$(4a + 1)(4a^2 - 28a + 19) = 0 \Rightarrow a = xyz = -\frac{1}{4}$$

故

$$x + y + z = \frac{1 - 3xyz}{\frac{3}{2} - xyz} = \frac{\frac{7}{4}}{\frac{7}{4}} = 1$$

20. 已知存在实数 a, b, x, y 满足以下方程:

$$\begin{cases} ax^{2014} + by^{2014} = 6 \\ ax^{2015} + by^{2015} = 7 \\ ax^{2016} + by^{2016} = 3 \\ ax^{2017} + by^{2017} = 50 \end{cases}$$

求 $ax^{2018} + by^{2018}$ 的值。

不妨设 $f(n) = ax^n + by^n$, 于是

$$f(2014) = 6, f(2015) = 7, f(2016) = 3, f(2017) = 50,$$

发现

$$(x+y)f(2015) = ax^{2016} + by^{2016} + ax^{2015}y + bxy^{2015} = f(2016) + xyf(2014)$$

$$(x+y)f(2016) = ax^{2017} + by^{2017} + ax^{2016}y + bxy^{2016} = f(2017) + xyf(2015)$$

解得

$$x+y = -9, \quad xy = -11$$

故

$$(x+y)f(2017) = f(2018) + xyf(2016) \Rightarrow ax^{2018} + by^{2018} = f(2018) = -417$$

21. 求联立方程

$$\begin{cases} x \left(2x^2 + y - \frac{1}{2} \right) = 0 \\ y \left(x - y + \frac{5}{2} \right) = 0 \end{cases}$$

的所有实数解 (x, y) 。

$$x \left(2x^2 + y - \frac{1}{2} \right) = 0 \tag{1}$$

$$y \left(x - y - \frac{5}{2} \right) = 0 \tag{2}$$

情况一: 若 $x = 0$, 由 (2) 得

$$y \left(0 - y - \frac{5}{2} \right) = 0 \Rightarrow y = 0 \text{ 或 } y = -\frac{5}{2}.$$

解为

$$(0, 0), \left(0, -\frac{5}{2} \right)$$

情况二: 若 $y = 0$, 由 (1) 得

$$x \left(2x^2 + 0 - \frac{1}{2} \right) = 0 \Rightarrow x = 0 \text{ 或 } x = \pm \frac{1}{2}.$$

其中 $x = 0$ 已考虑, 解为

$$\left(\frac{1}{2}, 0\right), \left(-\frac{1}{2}, 0\right)$$

情况三: 若 $x \neq 0$ 且 $y \neq 0$,

$$\begin{cases} 2x^2 + y - \frac{1}{2} = 0 \\ x - y - \frac{5}{2} = 0 \end{cases}$$

两式相加得

$$2x^2 + x - 3 = 0 \Rightarrow x = \frac{3}{2} \text{ 或 } x = -1$$

解为

$$\left(\frac{3}{2}, -1\right), \left(-1, -\frac{7}{2}\right)$$

\therefore 原方程组的所有解为

$$(0, 0), \left(0, -\frac{5}{2}\right), \left(\frac{1}{2}, 0\right), \left(-\frac{1}{2}, 0\right), \left(\frac{3}{2}, -1\right), \left(-1, -\frac{7}{2}\right)$$

22. 求联立方程

$$\begin{cases} x^2 - y - 2z = 4 \\ y^2 - 2z - 3x = -2 \\ 2z^2 - 3x - 5y = -22 \end{cases}$$

的所有实数解 (x, y, z) 。

三式相加得

$$x^2 - 6x + y^2 - 6y + 2z^2 - 4z = -20,$$

经配方后变为

$$(x - 3)^2 + (y - 3)^2 + 2(z - 1)^2 = 0$$

故 $x - 3 = 0, y - 3 = 0, z - 1 = 0$, 解为 $(3, 3, 1)$

23. 设实数 x, y, z 满足以下方程

$$\begin{cases} 4x + 2yz - 6z + 9xz^2 = 4 \\ xyz = 1 \end{cases}$$

求 $x + y + z$ 的所有可能值。

眼光发现 $xyz = 1$ 提示了换元 $x = \frac{a}{b}$, $y = \frac{b}{c}$, $z = \frac{c}{a}$, 第一式变为

$$4\left(\frac{a}{b}\right) + 2\left(\frac{b}{c}\right)\left(\frac{c}{a}\right) - 6\left(\frac{c}{a}\right) + 9\left(\frac{a}{b}\right)\left(\frac{c}{a}\right)^2 = 4$$

化简得

$$4a^2 - 4ab + 2b^2 - 6bc + 9c^2 = 0 \Rightarrow (2a - b)^2 + (b + 3c)^2 = 0$$

于是 $2a - b = 0$, $b + 3c = 0$, 即

$$x = \frac{a}{b} = \frac{1}{2}, y = \frac{b}{c} = -3, z = \frac{1}{xy} = -\frac{2}{3}$$

解得

$$(x, y, z) = \left(\frac{1}{2}, -3, -\frac{2}{3}\right) \Rightarrow x + y + z = -\frac{13}{6}$$

24. 求所有非零实数对 (x, y) , 使得满足

$$\frac{x}{x^2 + y} + \frac{y}{x + y^2} = -1 \quad \text{且} \quad \frac{1}{x} + \frac{1}{y} = 1$$

令 $u = x + y$, $v = xy$, 则第二式化为 $\frac{u}{v} = 1 \Rightarrow u = v$ 。

由第一式得

$$x(x + y^2) + y(x^2 + y) = -[(x^2 + y)(x + y^2)]$$

展开并代换为 u, v 得

$$u^2 - 2v + uv = -(u^3 - 3uv + v + v^2) \Rightarrow u^3 + u^2 - 2v + v^2 - v = 0$$

代入 $u = v$

$$v^3 - v = 0 \Rightarrow v(v^2 - 1) = 0$$

因 $xy \neq 0$, 故 $v = \pm 1$

若 $v = 1$, 则 $x + y = 1$, $xy = 1 \Rightarrow x^2 - x + 1 = 0$, 无实根。

若 $v = -1$, 则 $x + y = -1$, $xy = -1 \Rightarrow x^2 + x - 1 = 0$

解得

$$(x, y) = \left(\frac{-1 \pm \sqrt{5}}{2}, \frac{-1 \mp \sqrt{5}}{2}\right)$$

25. 解方程组

$$\begin{cases} x + y + z = 9 \\ x^2 + y^2 + z^2 = 41 \\ x^2(y + z) + y^2(z + x) + z^2(x + y) = 180 \end{cases}$$

$$x + y + z = 9 \quad (1)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = 41 \quad (2)$$

$$x^2(y + z) + y^2(z + x) + z^2(x + y) = 180 \quad (3)$$

由 (2),

$$(x + y + z)^2 - 2(xy + xz + yz) = 41 \Rightarrow xy + xz + yz = 20$$

由 (3),

$$x^2(9 - x) + y^2(9 - y) + z^2(9 - z) = 180$$

$$9(x^2 + y^2 + z^2) - (x^3 + y^3 + z^3) = 180$$

$$9(41) - [(x + y + z)(x^2 + y^2 + z^2 - xy - yz - zx) + 3xyz] = 180$$

$$369 - [9(41 - 20) + 3xyz] = 180$$

$$xyz = 0$$

由韦达定理, 实数 x, y, z 为方程式

$$t^3 - 9t^2 + 20t = 0 \Rightarrow t(t - 5)(t - 4) = 0.$$

的三根, 于是解为

$$(0, 5, 4), (0, 4, 5), (4, 5, 0), (4, 0, 5), (5, 0, 4), (5, 4, 0)$$

26. 已知实数 x, y, z 满足方程组

$$\begin{cases} x + y + z = -3 \\ \frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} = -\frac{1}{3} \\ x^2(y + z) + y^2(z + x) + z^2(x + y) = -24 \end{cases}$$

求 $x^2 + y^2 + z^2$ 的值。

$$x + y + z = -3 \quad (1)$$

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} = -\frac{1}{3} \quad (2)$$

$$x^2(y + z) + y^2(z + x) + z^2(x + y) = -24 \quad (3)$$

设 $x^2 + y^2 + z^2 = a$, 由 (1) 可得

$$(x + y + z)^2 = 9 = a + 2(xy + yz + zx) \Rightarrow xy + yz + zx = \frac{9 - a}{2}$$

由 (2) 得

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} = \frac{xy + yz + zx}{xyz} = -\frac{1}{3} \Rightarrow xyz = \frac{3(a - 9)}{2}$$

由 (3) 得

$$\begin{aligned} & x^2(y + z) + y^2(z + x) + z^2(x + y) \\ &= x^2(-3 - x) + y^2(-3 - y) + z^2(-3 - z) \\ &= -3(x^2 + y^2 + z^2) - (x^3 + y^3 + z^3) \\ &= -3a - \left[(x + y + z)((x^2 + y^2 + z^2) - (xy + yz + zx)) + 3xyz \right] \\ &= -3a - \left[(-3) \left(a - \frac{9 - a}{2} \right) + 3 \cdot \frac{3(a - 9)}{2} \right] \\ &= -3a + \frac{-9a + 27}{2} + \frac{9a - 81}{2} \\ &= -3a + 27 = -24 \Rightarrow a = 17 \end{aligned}$$

27. 已知方程组

$$\begin{cases} x + y + z = 0 \\ x^2 + y^2 + z^2 = 6 \\ x^3 + y^3 + z^3 = -3 \end{cases}$$

求 $x^4 + y^4 + z^4$ 之值。

$$x + y + z = 0 \quad (1)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = 6 \quad (2)$$

$$x^3 + y^3 + z^3 = -3 \quad (3)$$

由 (2),

$$(x + y + z)^2 - 2(xy + yz + xz) = 6 \Rightarrow xy + yz + xz = -3$$

由 (3),

$$x^3 + y^3 + z^3 = (x + y + z)(x^2 + y^2 + z^2 - xy - yz - xz) + 3xyz \Rightarrow xyz = -1$$

因此 x, y, z 为方程式

$$t^3 - 3t + 1 = 0$$

的三根, 于是有

$$x^3 = 3x - 1, \quad y^3 = 3y - 1, \quad z^3 = 3z - 1$$

故

$$x^4 + y^4 + z^4 = 3(x^2 + y^2 + z^2) - (x + y + z) = 3 \cdot 6 - 0 = 18$$

28. 求序对 (x, y, z) 满足

$$\begin{cases} (x + y)^3 = z, \\ (y + z)^3 = x, \\ (z + x)^3 = y. \end{cases}$$

不失一般性, 设 $x \geq y \geq z$, 则有

$$2x \geq x + y \geq x + z, \quad x + y \geq 2y \geq y + z, \quad x + z \geq y + z \geq 2z$$

立方可得

$$\begin{cases} 8x^3 \geq (x + y)^3 \geq (x + z)^3 \\ (x + y)^3 \geq 8y^3 \geq (y + z)^3 \\ (x + z)^3 \geq (y + z)^3 \geq 8z^3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 8x^3 \geq z \geq y \\ z \geq 8y^3 \geq x \\ y \geq x \geq z^3 \end{cases} \Rightarrow z \geq y \geq x$$

因此 $x = y = z$, 解 $(x + x)^3 = x$ 得

$$(x, y, z) = (0, 0, 0), \left(\frac{\sqrt{2}}{4}, \frac{\sqrt{2}}{4}, \frac{\sqrt{2}}{4} \right), \left(-\frac{\sqrt{2}}{4}, -\frac{\sqrt{2}}{4}, -\frac{\sqrt{2}}{4} \right)$$

29. 求满足

$$\begin{cases} (1 + x)(1 + x^2)(1 + x^4) = 1 + y^7, \\ (1 + y)(1 + y^2)(1 + y^4) = 1 + x^7 \end{cases}$$

的实数序对 (x, y) 个数。

情况一: $xy = 0$, 得解 $(0, 0)$ 。

情况二: $xy < 0$ 。不失一般性设 $x > 0 > y$, 则

$$(1+x)(1+x^2)(1+x^4) > 1$$

且 $1+y^7 < 1$, 故无解。

情况三: $x, y > 0, x \neq y$ 。不失一般性设 $x > y > 0$, 则

$$(1+x)(1+x^2)(1+x^4) > 1+x^7 > 1+y^7$$

无解。

情况四: $x, y < 0, x \neq 0$ 。不失一般性设 $x < y < 0$, 则

$$1-x^8 = (1+y^7)(1-x) = 1-x+y^7-xy^7 \quad (1)$$

$$1-y^8 = (1+x^7)(1-y) = 1-y+x^7-x^7y \quad (2)$$

(2) - (1) 得,

$$x^8 - y^8 = x - y + x^7 - y^7 - xy(x^6 - y^6)$$

由于 $x < y < 0$, 则 $x^8 - y^8 > 0, x - y < 0, x^7 - y^7 < 0, -xy < 0, x^6 - y^6 > 0$, 左式为正, 右式为负, 故无解。

情况五: $x = y$, 则

$$1-x^8 = 1-x+y^7-xy^7 = 1-x+x^7-x^8 \Rightarrow x = -1, 0, 1$$

其中只有 $(0, 0), (-1, -1)$ 成立。

综上, 解为 $(0, 0), (-1, -1)$, 共有 2 个实数序对。

30. 若非零实数 a, b, c 满足

$$\begin{cases} a^2 + b^2 + c^2 = 1, \\ a\left(\frac{1}{b} + \frac{1}{c}\right) + b\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{c}\right) + c\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) = -3, \end{cases}$$

求 $a + b + c$ 可能的取值个数。

由第二个方程式,

$$a^2(b+c) + b^2(a+c) + c^2(a+b) = -3abc \Rightarrow (a+b+c)(ab+bc+ca) = 0.$$

又 $(a+b+c)^2 = 1 - 2(ab+bc+ca)$, 所以

$$\frac{1}{2}(a+b+c)((a+b+c)^2 - 1) = 0 \Rightarrow a+b+c = -1, 0, 1$$

因此 $a+b+c$ 共有 3 个可能值。

31. 求在区间 $[0, 2]$ 内满足方程组

$$\begin{cases} 2x^2 - 4x + 7 = y, \\ 2y^2 - 4y + 7 = z, \\ 2z^2 - 4z + 7 = x \end{cases}$$

的无序三元组 (x, y, z) 个数。

令 $a = x - 1, b = y - 1, c = z - 1$, 则 $a, b, c \in [-1, 1]$, 方程组化为

$$\begin{cases} 2a^2 - 1 = b, \\ 2b^2 - 1 = c, \\ 2c^2 - 1 = a. \end{cases}$$

令 $a = \cos \theta, b = \cos 2\theta, c = \cos 4\theta, \theta \in [0, \pi]$, 得到

$$\cos \theta = \cos 8\theta \Rightarrow -2 \sin \frac{9\theta}{2} \sin \frac{7\theta}{2} = 0.$$

解得

$$\theta - 2n\pi = 0, \frac{2\pi}{9}, \frac{4\pi}{9}, \frac{6\pi}{9}, \frac{8\pi}{9}, \frac{2\pi}{7}, \frac{4\pi}{7}, \frac{6\pi}{7}, n \in \mathbb{Z}$$

在区间 $[-1, 1]$ 内的无序三元组 (a, b, c) 为

$$(0, 0, 0), \left(\cos \frac{2\pi}{7}, \cos \frac{4\pi}{7}, \cos \frac{8\pi}{7}\right), \left(\cos \frac{2\pi}{9}, \cos \frac{4\pi}{9}, \cos \frac{8\pi}{9}\right), \left(\cos \frac{2\pi}{3}, \cos \frac{2\pi}{3}, \cos \frac{2\pi}{3}\right)$$

故原方程式无序三元组个数为 4。

32. 若 x, y, z 为相异复数, 满足

$$\begin{cases} x + y + z = 1, \\ x^2 + y = y^2 + z = z^2 + x, \end{cases}$$

求 $(x - y)(y - z)(z - x)$ 的值。

由 $x^2 + y = y^2 + z$, 得

$$x^2 - y^2 = (x + y)(x - y) = (1 - z)(x - y) = z - y$$

同理得

$$(1 - x)(y - z) = x - z, \quad (1 - y)(z - x) = y - x$$

由于 $x \neq y \neq z$, 三式相乘可得

$$(1 - x)(1 - y)(1 - z) = -1 \quad (1)$$

且由 $(1 - z)(x - y) = z - y$ 展开得

$$x - z = xz - yz = z(x - y)$$

同理得

$$y - x = x(y - z), \quad z - y = y(z - x)$$

由于 $x \neq y \neq z$, 三式相乘可得

$$xyz = -1$$

现由 (1), 得

$$1 - (x + y + z) + xy + yz + zx - xyz = -1 \Rightarrow xy + yz + zx = -2$$

设 $k = x^2 + y = y^2 + z = z^2 + x$, 则

$$3k = x^2 + y^2 + z^2 + x + y + z = 1 - 2(-2) + 1 = 6 \Rightarrow x^2 + y = k = 2$$

则

$$x - y = x - (2 - x^2) = x^2 + x - 2 = (x - 1)(x + 2),$$

同理

$$y - z = (y - 1)(y + 2), \quad z - x = (z - 1)(z + 2)$$

于是

$$\begin{aligned} & (x - y)(y - z)(z - x) \\ &= (x - 1)(y - 1)(z - 1)(x + 2)(y + 2)(z + 2) \\ &= [xyz - (xy + yz + zx) + x + y + z - 1][xyz + 2(xy + yz + zx) + 4(x + y + z) + 8] = 7 \end{aligned}$$

33. 已知 $xyz \neq 0$, a, b, c 不全为零, 且满足方程组

$$\begin{cases} a = \frac{by}{z} + \frac{cz}{y} \\ b = \frac{cz}{x} + \frac{ax}{z} \\ c = \frac{ax}{y} + \frac{by}{x} \end{cases}$$

(a) 证明 $a^3x^3 + b^3y^3 + c^3z^3 + abcxyz = 0$ 。

将方程组改写为

$$\begin{cases} (-ax)\frac{1}{x} + (cz)\frac{1}{y} + (by)\frac{1}{z} = 0 \\ (cz)\frac{1}{x} + (-by)\frac{1}{y} + (ax)\frac{1}{z} = 0 \\ (by)\frac{1}{x} + (ax)\frac{1}{y} + (-cz)\frac{1}{z} = 0 \end{cases}$$

由与存在非零解 $\left(\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}\right)$, 则

$$\begin{vmatrix} -ax & cz & by \\ cz & -by & ax \\ by & ax & -cz \end{vmatrix} = 0$$

展开可得

$$a^3x^3 + b^3y^3 + c^3z^3 + abcxyz = 0$$

(b) 证明 $\frac{yz}{x^2} + \frac{zx}{y^2} + \frac{xy}{z^2} = -1$ 。

改写成

$$\begin{cases} -a + \frac{y}{z}b + \frac{z}{y}c = 0 \\ \frac{z}{x}a - b + \frac{x}{z}c = 0 \\ \frac{x}{y}a + \frac{y}{x}b - c = 0 \end{cases}$$

同理,

$$\begin{vmatrix} -1 & \frac{y}{z} & \frac{z}{y} \\ \frac{z}{x} & -1 & \frac{x}{z} \\ \frac{x}{y} & \frac{y}{x} & -1 \end{vmatrix} = 0$$

展开行列式可得

$$\frac{yz}{x^2} + \frac{zx}{y^2} + \frac{xy}{z^2} = -1$$

(c) 证明 $a^3 + b^3 + c^3 - 5abc = 0$ 。

由原方程组, 有

$$a^3 = \left(\frac{by}{z}\right)^3 + \left(\frac{cz}{y}\right)^3 + 3abc, \quad b^3 = \left(\frac{cz}{x}\right)^3 + \left(\frac{ax}{z}\right)^3 + 3abc, \quad c^3 = \left(\frac{ax}{y}\right)^3 + \left(\frac{by}{x}\right)^3 + 3abc$$

于是

$$2(a^3 + b^3 + c^3) = (a^3x^3 + b^3y^3 + c^3z^3) \left(\frac{1}{x^3} + \frac{1}{y^3} + \frac{1}{z^3}\right) + 9abc$$

由 (a), (b) 得

$$2(a^3 + b^3 + c^3) = -abcxyz \left(\frac{1}{x^3} + \frac{1}{y^3} + \frac{1}{z^3}\right) + 9abc = 10abc$$

即得证

$$a^3 + b^3 + c^3 - 5abc = 0$$

34. 求实数解 (a, b, c, d) 满足方程组

$$\begin{cases} a + 4b + 8c + 4d = 53 \\ 3a^2 + 4b^2 + 12c^2 + 2d^2 = 159 \\ 9a^3 + 4b^3 + 18c^3 + d^3 = 477 \end{cases}$$

由柯西不等式,

$$53 \cdot 477 = (a + 4b + 8c + 4d)(9a^3 + 4b^3 + 18c^3 + d^3) \geq (3a^2 + 4b^2 + 12c^2 + 2d^2)^2 = 159^2$$

此时等号成立, 有

$$\frac{a}{3a^2} = \frac{4b}{4b^2} = \frac{8c}{12c^2} = \frac{4d}{2d^2}.$$

设

$$\lambda = \frac{1}{3a} = \frac{1}{b} = \frac{2}{3c} = \frac{2}{d}.$$

则

$$a = \frac{1}{3\lambda}, \quad b = \frac{1}{\lambda}, \quad c = \frac{2}{3\lambda}, \quad d = \frac{2}{\lambda}$$

代入第一式得

$$\frac{1}{3\lambda} + \frac{4}{\lambda} + \frac{16}{3\lambda} + \frac{8}{\lambda} = \frac{29}{3\lambda} = 53 \Rightarrow \lambda = \frac{29}{159}$$

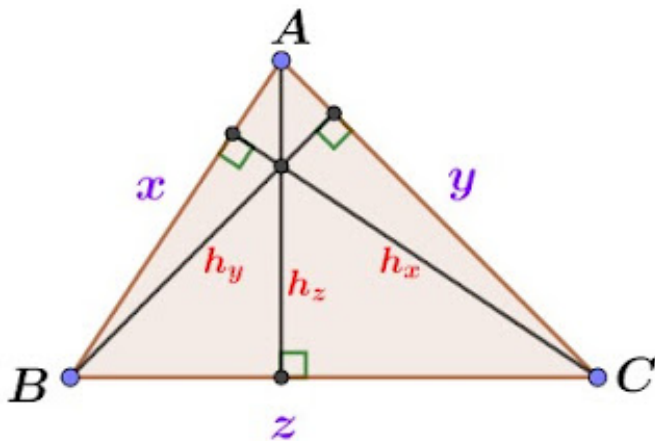
故实数解为

$$\left(\frac{159}{87}, \frac{159}{29}, \frac{106}{87}, \frac{318}{29} \right)$$

35. 设正实数 x, y, z 满足

$$\begin{cases} x = \sqrt{y^2 - \frac{1}{49}} + \sqrt{z^2 - \frac{1}{49}} \\ y = \sqrt{x^2 - \frac{1}{64}} + \sqrt{z^2 - \frac{1}{64}} \\ z = \sqrt{x^2 - \frac{1}{81}} + \sqrt{y^2 - \frac{1}{81}} \end{cases}$$

求 $x + y + z$ 。



考虑一边长为 x, y, z , 对应高为

$$h_x = \frac{1}{7}, \quad h_y = \frac{1}{8}, \quad h_z = \frac{1}{9}$$

的 $\triangle ABC$, 则 x, y, z 满足题意; $\triangle ABC$ 面积为

$$S = \frac{1}{2}xh_x = \frac{1}{2}yh_y = \frac{1}{2}zh_z \Rightarrow x : y : z = 7 : 8 : 9$$

设 $x = 7k, y = 8k, z = 9k$, 半周长 $s = \frac{1}{2}(x + y + z) = 12k$, 面积又为

$$S = \sqrt{12k \cdot 5k \cdot 4k \cdot 3k} = 12\sqrt{5}k^2$$

联立得

$$S = \frac{1}{2}xh_x = \frac{k}{2} = 12\sqrt{5}k^2 \Rightarrow k = \frac{1}{24\sqrt{5}}$$

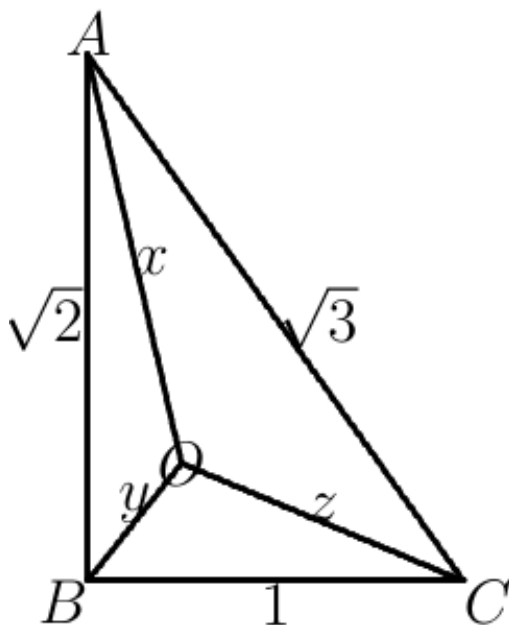
因此

$$x + y + z = 24k = \frac{\sqrt{5}}{5}$$

36. 已知正数 x, y, z 满足

$$\begin{cases} x^2 + xy + y^2 = 2 \\ y^2 + yz + z^2 = 1 \\ z^2 + zx + x^2 = 3 \end{cases}$$

求 $xy + yz + zx$ 。



方程组改写成

$$\begin{cases} x^2 - 2xy \cos 120^\circ + y^2 = (\sqrt{2})^2 \\ y^2 - 2yz \cos 120^\circ + z^2 = 1^2 \\ z^2 - 2zx \cos 120^\circ + x^2 = (\sqrt{3})^2 \end{cases}$$

考虑一边长为 $AB = \sqrt{2}, BC = 1, CA = \sqrt{3}$ 的 $\triangle ABC$, 其中

$$OA = x, OB = y, OC = z, \angle AOB = \angle BOC = \angle COA = 120^\circ$$

且满足

$$AB^2 + BC^2 = CA^2$$

故 $\triangle ABC$ 为直角三角形, 面积为

$$[ABC] = \frac{1}{2}(xy + yz + zx) \sin 120^\circ = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \sqrt{2}$$

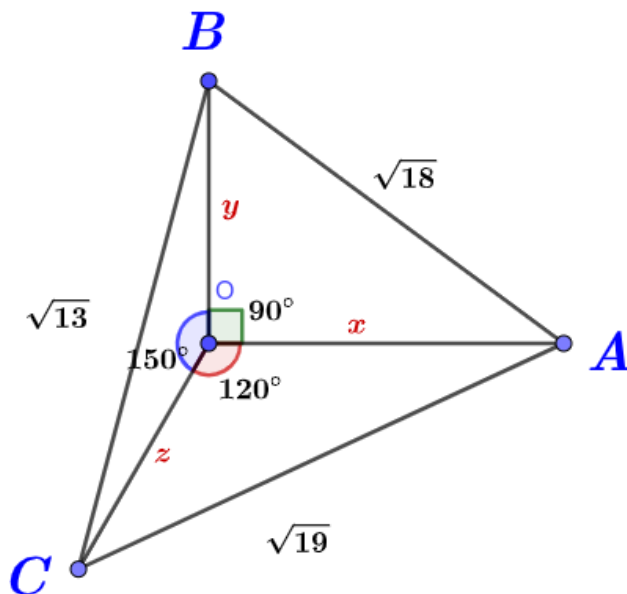
解得

$$xy + yz + zx = \frac{2\sqrt{6}}{3}$$

37. 已知 x, y, z 为实数且满足

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = 18 \\ y^2 + \sqrt{3}yz + z^2 = 13 \\ x^2 + xz + z^2 = 19 \end{cases}$$

求 $2xy + yz + \sqrt{3}xz$ 。



方程组改写成

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - 2xy \cos 90^\circ = (3\sqrt{2})^2 \\ y^2 + z^2 - 2yz \cos 150^\circ = (\sqrt{13})^2 \\ x^2 + z^2 - 2xz \cos 120^\circ = (\sqrt{19})^2 \end{cases}$$

构造 $\triangle ABC$, 满足边长:

$$AB = \sqrt{18}, \quad BC = \sqrt{13}, \quad AC = \sqrt{19}, \quad OA = x, \quad OB = y, \quad OC = z$$

及夹角

$$\angle AOB = 90^\circ, \quad \angle BOC = 150^\circ, \quad \angle AOC = 120^\circ$$

设半周长

$$s = \frac{\sqrt{18} + \sqrt{13} + \sqrt{19}}{2},$$

三角形面积为

$$S = \sqrt{s(s - \sqrt{18})(s - \sqrt{13})(s - \sqrt{19})} = 3\sqrt{\frac{11}{2}}.$$

面积也等于

$$\frac{1}{2} (xy \sin 90^\circ + yz \sin 150^\circ + zx \sin 120^\circ) = \frac{1}{2} \left(xy + \frac{1}{2}yz + \frac{\sqrt{3}}{2}xz \right).$$

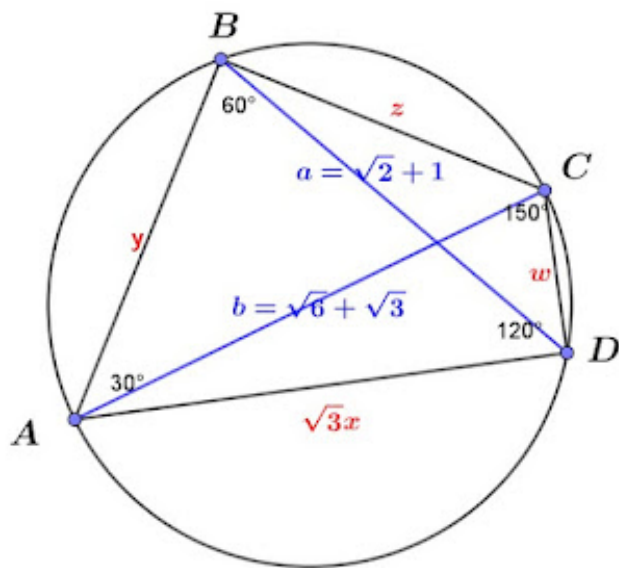
因此

$$\frac{1}{2} \left(xy + \frac{1}{2}yz + \frac{\sqrt{3}}{2}xz \right) = 3\sqrt{\frac{11}{2}} \implies 2xy + yz + \sqrt{3}xz = 6\sqrt{22}.$$

38. 已知联立方程组

$$\begin{cases} 3x^2 + y^2 - 3xy = 3 + 2\sqrt{2} \\ y^2 + z^2 - yz = 9 + 6\sqrt{2} \\ z^2 + w^2 + \sqrt{3}zw = 3 + 2\sqrt{2} \\ w^2 + 3x^2 + \sqrt{3}wx = 9 + 6\sqrt{2} \end{cases},$$

求 $\sqrt{3}xz + yw$ 之值。



设

$$3x^2 + y^2 - 3xy = 3 + 2\sqrt{2} = (\sqrt{2} + 1)^2 = a^2,$$

$$y^2 + z^2 - yz = 9 + 6\sqrt{2} = (\sqrt{6} + \sqrt{3})^2 = b^2,$$

$$z^2 + w^2 + \sqrt{3}zw = 3 + 2\sqrt{2} = a^2,$$

$$w^2 + 3x^2 + \sqrt{3}wx = 9 + 6\sqrt{2} = b^2.$$

考虑一圆内接四边形, 边长分别为 $\sqrt{3}x, y, z, w$, 对角线长为 a, b ; 由托勒密定理,

$$\sqrt{3}xz + yw = (\sqrt{2} + 1)(\sqrt{6} + \sqrt{3}) = 3\sqrt{3} + 2\sqrt{6}.$$

39. 已知实数 $x, y \in (0, 1)$ 满足

$$\begin{cases} \frac{1 - \sqrt{1 - x^2}}{x} + \frac{2y}{1 + \sqrt{1 - y^2} + y} = 1, \\ 25(1 - y^2) = 41 - 40\sqrt{1 - x^2} \end{cases}$$

求 (x, y) 的所有解。

设 $x = \sin \alpha, y = \sin \beta, 0 < \alpha, \beta < \frac{\pi}{2}$, 则第一式变为

$$\frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{2 \sin \beta}{1 + \cos \beta + \sin \beta} = 1$$

继续化简得

$$\tan \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{2 \sin \beta}{1 + \cos \beta + \sin \beta} = \frac{1 + \cos \beta - \sin \beta}{1 + \cos \beta + \sin \beta} = \frac{1 - \tan \frac{\beta}{2}}{1 + \tan \frac{\beta}{2}} = \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right)$$

故

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + n\pi, n \in \mathbb{Z} \Rightarrow \alpha + \beta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow y = \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \cos \alpha$$

于是第二方程可化为

$$25(1 - y^2) = 41 - 40y$$

解得

$$x = \frac{3}{5}, \quad y = \frac{4}{5}$$

40. 已知实数 $x > 0$ 且 y, z 均为实数, 求联立方程组

$$\begin{cases} 5 \left(x + \frac{1}{x} \right) = 12 \left(y + \frac{1}{y} \right) = 13 \left(z + \frac{1}{z} \right), \\ xy + yz + zx = 1 \end{cases}$$

的解 (x, y, z) 。

由条件 $x > 0, x, y, z \in \mathbb{R}$, 可设

$$x = \tan A, \quad y = \tan B, \quad z = \tan C,$$

其中 $0 < A < \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} < B, C < \frac{\pi}{2}$, 于是

$$5 \left(x + \frac{1}{x} \right) = 12 \left(y + \frac{1}{y} \right) = 13 \left(z + \frac{1}{z} \right) \Rightarrow 5 \cdot \frac{2}{\sin 2A} = 12 \cdot \frac{2}{\sin 2B} = 13 \cdot \frac{2}{\sin 2C},$$

且

$$\tan A \tan B + \tan B \tan C + \tan C \tan A = 1.$$

因此

$$\frac{5}{\sin 2A} = \frac{12}{\sin 2B} = \frac{13}{\sin 2C}, \quad A + B + C = 90^\circ.$$

由此得

$$\tan 2A = \frac{5}{12}, \quad \tan 2B = \frac{12}{5}, \quad \tan 2C = \infty,$$

故

$$\tan A = \frac{1}{5}, \quad \tan B = \frac{2}{3}, \quad \tan C = 1.$$

即

$$(x, y, z) = \left(\frac{1}{5}, \frac{2}{3}, 1\right)$$

41. 已知正实数 x, y, z 满足

$$\begin{cases} x + y + z = xyz \\ \frac{x^2}{16(1+x^2)} = \frac{y^2}{25(1+y^2)} = \frac{z^2}{36(1+z^2)} \end{cases}$$

求

$$\frac{x^2(1+x^2)^2}{z^2(1+z^2)^2}$$

的值。

考虑换元 $x = \tan A, y = \tan B, z = \tan C$, 其中 $A, B, C \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, 且注意到

$$\tan A + \tan B + \tan C = \tan A \tan B \tan C \iff A + B + C = \pi$$

于是可以将 A, B, C 视为某三角形的内角; 由

$$\frac{x^2}{16(1+x^2)} = \frac{y^2}{25(1+y^2)} = \frac{z^2}{36(1+z^2)}$$

化简得

$$\frac{4}{\sin A} = \frac{5}{\sin B} = \frac{6}{\sin C}$$

由正弦定理, 不妨设 $\triangle ABC$ 边长为 $a = 4k, b = 5k, c = 6k, k \neq 0$, 则由余弦定理,

$$\cos A = \frac{(5k)^2 + (6k)^2 - (4k)^2}{2 \cdot 5k \cdot 6k} = \frac{3}{4}, \quad \cos C = \frac{(4k)^2 + (5k)^2 - (6k)^2}{2 \cdot 4k \cdot 5k} = \frac{1}{8}$$

故

$$\frac{x^2(1+x^2)^2}{z^2(1+z^2)^2} = \frac{\tan^2 A \sec^4 A}{\tan^2 C \sec^4 C} = \frac{\left(\frac{\sqrt{7}}{3}\right)^2 \left(\frac{4}{3}\right)^4}{(\sqrt{63})^2 \cdot 8^4} = \frac{1}{186624}$$

42. 求所有 $(a, b, c) \in \mathbb{R}^3$ 满足方程组

$$\begin{cases} a^2 = \frac{b^3 + 9\sqrt{3}}{3b} = \frac{c^3 + 16}{3c} \\ b^2 = \frac{a^3 - 10}{3a} = \frac{c^3 + 28}{3c} \\ c^2 = \frac{b^3 + 45\sqrt{3}}{3b} = \frac{a^3 - 88}{3a} \end{cases}$$

由 (1), (2)

$$3a^2b - b^3 = 9\sqrt{3}, \quad a^3 - 3ab^2 = 10$$

此时展开式

$$(a \pm b)^3 = a^3 \pm 3a^2b + 3ab^2 \pm b^3$$

毫无帮助, 不妨考虑

$$(a + bi)^3 = a^3 - 3ab^2 + (3a^2b - b^3)i = 10 + 9\sqrt{3}i$$

两边取模得

$$(\sqrt{a^2 + b^2})^3 = \sqrt{10^2 + (9\sqrt{3})^2} \Rightarrow a^2 + b^2 = 7 \quad (3)$$

同理可得

$$b^2 + c^2 = 19, \quad c^2 + a^2 = 20 \quad (4)$$

由 (3), (4) 解得 $a^2 = 4, b^2 = 3, c^2 = 16$, 经检验得原方程组的解为

$$a = -2, \quad b = \sqrt{3}, \quad c = -4$$

取整

1. 求满足

$$\lfloor 0.5 + \lfloor x \rfloor \rfloor = 20$$

的所有 x 的取值范围。

由下取整定义, 原方程即

$$20 \leq 0.5 + \lfloor x \rfloor < 21 \Rightarrow 19.5 \leq \lfloor x \rfloor < 20.5$$

由于 $\lfloor x \rfloor \in \mathbb{Z}$,

$$\lfloor x \rfloor = 20 \Rightarrow 20 \leq x < 21$$

2. 求满足

$$\lceil \lceil x \rceil - 1.3 \rceil = 16$$

的所有 x 。

由上取整定义, 原方程即

$$15 \leq \lceil x \rceil - 1.3 < 16 \Rightarrow 16.3 \leq \lceil x \rceil < 17.3$$

由于 $\lceil x \rceil \in \mathbb{Z}$,

$$\lceil x \rceil = 17 \Rightarrow 16 < x \leq 17$$

3. 解方程

$$2x = \lfloor x \rfloor + \frac{16}{5}$$

发现 $x \neq \lfloor x \rfloor$, 由于

$$\lfloor x \rfloor < x < \lfloor x \rfloor + 1 \Rightarrow 2\lfloor x \rfloor < 2x < 2\lfloor x \rfloor + 2,$$

观察右式的取值范围可知

$$2[x] < [x] + \frac{16}{5} < 2[x] + 2 \Rightarrow \frac{6}{5} < [x] < \frac{16}{5}$$

因此

$$[x] = 2, 3 \Rightarrow x = \frac{13}{5}, \frac{31}{10}$$

4. 解方程

$$2[x] + 3x = 4 - 5\{x\}$$

设 $x = n + r$, 其中 $n = [x], r = \{x\}$, 代入方程得

$$2n + 3(n + r) = 4 - 5r \Rightarrow 5x = 4 - 3r$$

由 $0 \leq r < 1$, 有

$$1 < 4 - 3r \leq 4 \Rightarrow \frac{1}{5} < x \leq \frac{4}{5}$$

由此可得 $x = \{x\}$, 即 $[x] = 0$, 此时

$$2 \cdot 0 + 3x = 4 - 5x \Rightarrow x = \frac{1}{2}$$

5. 令

$$f(x) = \left\lfloor x + \frac{1}{2} \right\rfloor + \left\lfloor x - \frac{1}{2} \right\rfloor - [2x],$$

证明只有当 $\frac{1}{2} \leq \{x\} < 1$ 时, 满足方程 $f(x) = 0$ 。

设 $x = n + \{x\}$, 其中 n 为整数, 且 $0 \leq \{x\} < 1$, 将 n 从取整符号中提出,

$$f(x) = \left\lfloor \{x\} + \frac{1}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \{x\} - \frac{1}{2} \right\rfloor - [2\{x\}]$$

当 $0 \leq \{x\} < \frac{1}{2}$ 时,

$$f(x) = 0 + (-1) - 0 = -1 \neq 0$$

而当 $\frac{1}{2} \leq \{x\} < 1$ 时,

$$f(x) = 1 + 0 - 1 = 0$$

得证只有当 $\frac{1}{2} \leq \{x\} < 1$ 时, $f(x) = 0$ 。

6. 解

$$8[3x] - 5[2x] = 3$$

令 $x = n + r$, 其中 $n \in \mathbb{Z}, 0 \leq r < 1$, 原方程变为

$$3n + 8[3r] - 5[2r] = 3$$

当 $0 \leq r < \frac{1}{3}$ 时, $[3r] = 0, [2r] = 0$, 有

$$3n = 3 \Rightarrow n = 1$$

当 $\frac{1}{3} \leq r < \frac{1}{2}$ 时, $[3r] = 1, [2r] = 0$, 有

$$3n + 8 = 3 \Rightarrow n = -\frac{5}{3} \notin \mathbb{Z}$$

当 $\frac{1}{2} \leq r < \frac{2}{3}$ 时, $[3r] = 1, [2r] = 1$, 有

$$3n + 8 - 5 = 3 \Rightarrow n = 0$$

当 $\frac{2}{3} \leq r < 1$ 时, $[3r] = 2, [2r] = 1$, 有

$$3n + 16 - 5 = 3 \Rightarrow n = -\frac{8}{3} \notin \mathbb{Z}$$

综上, 解为

$$n = 1, 0 \leq r < \frac{1}{3} \Rightarrow 1 \leq x < \frac{4}{3}$$

或

$$n = 0, \frac{1}{2} \leq r < \frac{2}{3} \Rightarrow \frac{1}{2} \leq x < \frac{2}{3}$$

7. 已知

$$\begin{cases} [b] + [a] + \{c\} = 16 \\ [c] + [b] + \{a\} = 11.3 \\ [a] + [c] + \{b\} = 9.7 \end{cases}$$

求 $a + b + c$ 的值。

由题意可知, 小数部分分别为

$$\{a\} = 0.3, \quad \{b\} = 0.7, \quad \{c\} = 0$$

原方程组变为

$$\begin{cases} [b] + [a] + 1 = 16 \\ [c] + [b] + 1 = 11 \\ [a] + [c] = 9 \end{cases}$$

由第二式与第三式可得

$$[a] = 7, \quad [b] = 9 - 1 = 8, \quad [c] = 2$$

因此

$$a = 7.3, \quad b = 8.7, \quad c = 2 \Rightarrow a + b + c = 18$$

8. 已知 $\frac{1}{3 - \sqrt{7}}$ 的整数部分为 a , 小数部分为 b , 求 $a^2 + (1 + \sqrt{7})ab$ 。

有理化得

$$\frac{1}{3 - \sqrt{7}} = \frac{3 + \sqrt{7}}{2}$$

由

$$2 < \sqrt{7} < 3 \Rightarrow \frac{5}{2} < \frac{3 + \sqrt{7}}{2} < 3,$$

得

$$a = 2, \quad b = \frac{3 + \sqrt{7}}{2} - a = \frac{\sqrt{7} - 1}{2}$$

故

$$\begin{aligned} a^2 + (1 + \sqrt{7})ab &= 4 + (1 + \sqrt{7}) \cdot 2 \cdot \frac{\sqrt{7} - 1}{2} \\ &= 4 + (\sqrt{7} + 1)(\sqrt{7} - 1) \\ &= 10 \end{aligned}$$

9. 求大于 $(\sqrt{3} + \sqrt{2})^6$ 的最小整数。

令

$$a = \sqrt{3} + \sqrt{2}, \quad b = \sqrt{3} - \sqrt{2}$$

则

$$a^2 = 5 + 2\sqrt{6}, \quad b^2 = 5 - 2\sqrt{6}, \quad ab = 1$$

所以

$$a^6 + b^6 = (a^2 + b^2)(a^4 + b^4 - a^2b^2) = 10(10^2 - 3) = 970$$

由于 $0 < b^2 < 1$, 所以

$$969 < a^6 < 970 \quad \Rightarrow \quad [a^6] = 970$$

10. 求满足

$$[\sqrt{x}] = [\sqrt{x+34}]$$

的最小整数 x 。

设 $y, y+1$ 为连续正整数, 使得他们的平方根的差不小于 34, 则

$$(y+1)^2 - y^2 > 34 \Rightarrow y > 16.5$$

由于 $y \in \mathbb{Z}$, 最小的 x 为

$$x = y^2 = 17^2 = 289$$

11. 解

$$[x][2x] = 15$$

设

$$x = n - r, \quad n \in \mathbb{Z}, \quad 0 < r \leq 1$$

当 $r < \frac{1}{2}$, 原方程即

$$n(2n) = 15 \Rightarrow n = \sqrt{\frac{15}{2}} \notin \mathbb{Z}$$

当 $r \geq \frac{1}{2}$, 原方程即

$$n(2n-1) = 15 \Rightarrow (n-3)(2n+5) = 0 \Rightarrow n = 3 \in \mathbb{Z}$$

故 x 的取值范围为

$$2 < x \leq 2.5$$

12. 求正实数 x 满足

$$x^2 + \{x\}^2 = 27$$

设

$$x = n + r, \quad n \in \mathbb{Z}, \quad 0 < r \leq 1$$

且注意到

$$x^2 \leq x^2 + \{x\}^2 < x^2 + 1$$

因此

$$26 < x^2 \leq 27 \Rightarrow n = 5$$

代入原方程得

$$(5 + r)^2 + r^2 = 27 \Rightarrow r = \frac{-5 + \sqrt{29}}{2}$$

于是

$$x = 5 + r = \frac{5 + \sqrt{29}}{2}$$

13. 解

$$x^2 - 6[x] + 5 = 0$$

原方程化为

$$x^2 - 6[x] + 5 = 0 \Rightarrow x^2 - 6x + 5 = -6\{x\}$$

$-6\{x\}$ 的值域为 $(-6, 0]$, 且对于 $x \in [1, 5]$, 有

$$x^2 - 6x + 5 \in (-6, 0]$$

当 $x \in [1, 2)$, 有 $[x] = 1$, 则

$$x^2 = 6 \cdot 1 - 5 \Rightarrow x = 1$$

类似地,

$$\lfloor x \rfloor = 2 \Rightarrow x^2 = 7 \Rightarrow x = \sqrt{7}$$

$$\lfloor x \rfloor = 3 \Rightarrow x^2 = 13 \Rightarrow x = \sqrt{13}$$

$$\lfloor x \rfloor = 4 \Rightarrow x^2 = 19 \Rightarrow x = \sqrt{19}$$

$$\lfloor x \rfloor = 5 \Rightarrow x^2 = 25 \Rightarrow x = 5$$

因此, 方程的解为

$$x = 1, \sqrt{7}, \sqrt{13}, \sqrt{19}, 5$$

14. 解

$$\lfloor x^2 \rfloor - \lfloor x \rfloor^2 = 1999$$

设 $x = n + r$, 其中 $n = \lfloor x \rfloor$, $r = \{x\}$, 则

$$\lfloor x^2 \rfloor - n^2 = \lfloor (n + r)^2 - n^2 \rfloor = \lfloor 2nr + r^2 \rfloor$$

故

$$\lfloor x^2 \rfloor - \lfloor x \rfloor^2 = 1999 \Rightarrow 2nr + r^2 \geq 1999$$

最小的 n 满足

$$2nr \geq 1999 \implies n \geq \lceil 1999/2 \rceil = 1000.$$

此时有

$$r^2 + 2000r - 1999 = 0 \Rightarrow r = -1000 + \sqrt{1001999}$$

所以

$$x = n + r = \sqrt{1001999}$$

15. 解

$$\left\lfloor \frac{4x+3}{5} \right\rfloor = \frac{3(2x+1)}{4}$$

令

$$m = \frac{3(2x+1)}{4} \Rightarrow x = \frac{4m-3}{6},$$

代回原方程化简得到

$$\left\lfloor \frac{8m+3}{15} \right\rfloor = m$$

有

$$0 \leq \frac{8m+3}{15} - m < 1 \Rightarrow -\frac{12}{7} < m \leq \frac{3}{7}$$

由于 $m \in \mathbb{Z}$ 于是

$$m = 0, -1 \Rightarrow x = -\frac{1}{2}, -\frac{7}{6}$$

16. 求满足以下条件的正整数 x 的个数:

$$\left\lfloor \frac{x}{99} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{x}{101} \right\rfloor.$$

设

$$\left\lfloor \frac{x}{99} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{x}{101} \right\rfloor = m \in \mathbb{Z}$$

由定义有

$$m \leq \frac{x}{99} < m+1 \Rightarrow 99m \leq x < 99(m+1)$$

$$m \leq \frac{x}{101} < m+1 \Rightarrow 101m \leq x < 101(m+1)$$

因此

$$101m \leq x < 99(m+1)$$

当 $m > 49$ 时, $101m > 99(m+1)$, 无解。对于 $0 \leq m \leq 49$, 由于 $x = 0$ 不是正整数, 可行整数个数为

$$\sum_{m=0}^{49} (99(m+1) - 101m) = \sum_{m=0}^{49} (99 - 2m) - 1 = 99 \cdot 50 - 2 \cdot \frac{49 \cdot 50}{2} - 1 = 2499$$

17. 求解 $x \in \mathbb{Z}$ 满足

$$\left\lfloor \frac{x}{1!} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{x}{2!} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{x}{3!} \right\rfloor = 224$$

原方程给出

$$\frac{x}{1} + \frac{x}{2} + \frac{x}{6} - 3 < 224 < \frac{x}{1} + \frac{x}{2} + \frac{x}{6}$$

化简得

$$134.4 \leq x < 136.2$$

由于 $x \in \mathbb{Z}$, 且 $x = 136$ 不满足原方程, 故原方程式的解只有

$$x = 135$$

18. 求满足

$$\frac{[x]}{x} = \frac{9}{10}$$

的最大实数 x 。

由 $x = [x] + \{x\}$, 交叉相乘得

$$10[x] = 9([x] + \{x\}) \Rightarrow [x] = 9\{x\}$$

由于 $0 \leq \{x\} < 1$, $\{x\}$ 的可能值为

$$\frac{1}{9}, \frac{2}{9}, \dots, \frac{8}{9},$$

取最大值 $\{x\} = \frac{8}{9}$, 于是

$$x = [x] + \{x\} = \frac{80}{9}$$

19. 18. 如 $x > 0$ 且满足 $[x]^2 = x(x - [x])$, 求 $x - \frac{1}{x}$ 。

设 $n = [x]$ 。由于 $x > 0$, 故 $n \geq 0$ 。方程变为

$$n^2 = x(x - n) \Rightarrow x^2 - nx - n^2 = 0$$

由于 $x > 0$, 取正根

$$x = \frac{(1 + \sqrt{5})n}{2}$$

根据 $[x] = n$ 的定义, 必须满足

$$n \leq \frac{(1 + \sqrt{5})n}{2} < n + 1 \quad (1)$$

对于 $n = 0, (1)$ 成立但 $x = 0$, 与 $x > 0$ 矛盾。对于 $n \geq 1, (1)$ 左侧

$$\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1.618 \geq 1$$

恒成立, 而右侧

$$\frac{(1 + \sqrt{5})n}{2} < n + 1 \implies 0.618n < 1 \implies n < \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$$

故只能 $n = 1$, 此时

$$x - \frac{1}{x} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} - \frac{2}{1 + \sqrt{5}} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} - \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = 1$$

20. 证明方程 $\lfloor x \rfloor + \lfloor 2x \rfloor + \lfloor 4x \rfloor + \lfloor 8x \rfloor = 147$ 无实数解。

设 $x = n + \alpha$, 其中 $n = \lfloor x \rfloor$ 为整数部分, $\alpha \in [0, 1)$ 为小数部分。将 α 表示为二进制形式:

$$\alpha = (0.b_1b_2b_3b_4\dots)_2 = \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{4} + \frac{b_3}{8} + \frac{b_4}{16} + \dots$$

其中 $b_i \in \{0, 1\}$ 。

利用性质 $\lfloor m + y \rfloor = m + \lfloor y \rfloor$ (m 为整数) 以及二进制移位性质:

$$\lfloor x \rfloor = n$$

$$\lfloor 2x \rfloor = 2n + \lfloor 2\alpha \rfloor = 2n + b_1$$

$$\lfloor 4x \rfloor = 4n + \lfloor 4\alpha \rfloor = 4n + 2b_1 + b_2$$

$$\lfloor 8x \rfloor = 8n + \lfloor 8\alpha \rfloor = 8n + 4b_1 + 2b_2 + b_3$$

将上述结果代入原方程左式 (LHS):

$$\begin{aligned} \text{LHS} &= (n + 2n + 4n + 8n) + (b_1 + 2b_1 + 4b_1) + (b_2 + 2b_2) + b_3 \\ &= 15n + 7b_1 + 3b_2 + b_3 \end{aligned}$$

已知方程为 $15n + 7b_1 + 3b_2 + b_3 = 147$ 。由于 $b_1, b_2, b_3 \in \{0, 1\}$, 系数部分 $7b_1 + 3b_2 + b_3$ 的最大取值为:

$$7(1) + 3(1) + 1(1) = 11$$

这意味着对于特定的 n , 函数值的波动范围仅为 $[15n, 15n + 11]$ 。

若 $n = 9$, 最大值为 $15(9) + 11 = 135 + 11 = 146$ 。若 $n = 10$, 最小值为 $15(10) + 0 = 150$ 。数值 147 恰好落在两个区间之间 ($146 < 147 < 150$), 因此该方程在实数范围内无解。(待验证)

21. 解

$$\lceil x \lfloor x \rfloor \rceil + \lfloor x \lceil x \rceil \rfloor = 111$$

令 $x = n + r$, 其中 $n \in \mathbb{Z}, 0 \leq r < 1$, 则

$$\lceil (n+r)\lfloor (n+r) \rfloor \rceil + \lfloor (n+r)\lceil (n+r) \rceil \rfloor = 111$$

展开得

$$2n^2 + n + \lceil nr \rceil + \lfloor (n+1)r \rfloor = 111$$

解不等式组

$$\begin{cases} 2n^2 + n + 1 \leq 111 \\ 2n^2 + 3n \geq 111 \end{cases}$$

得 $n = 7$, 因此解

$$\lceil 7r \rceil + \lfloor 8r \rfloor = 6$$

得

$$\frac{3}{8} \leq r \leq \frac{3}{7} \Rightarrow \frac{59}{8} \leq x \leq \frac{52}{7}$$

22. (a) 求方程

$$\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{6} \right\rfloor = n$$

的正整数解个数, 其中 $1 \leq n \leq 100$ 。

原方程化为

$$\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{6} \right\rfloor = \frac{n}{2} + \frac{n}{3} + \frac{n}{6}$$

明示了

$$\frac{n}{2}, \frac{n}{3}, \frac{n}{6}$$

皆为整数, 于是 n 必须为 6 的倍数, 因此正整数解共有 $\left\lfloor \frac{100}{6} \right\rfloor = 16$ 个。

(b) 求方程

$$\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{6} \right\rfloor = n - 1$$

的正整数解个数, 其中 $1 \leq n \leq 100$ 。

设

$$f(n) = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{6} \right\rfloor,$$

则

$$f(n+6) = f(n) + 6$$

定义 $g(n) = f(n) - (n - 1)$, 则

$$g(n+6) = g(n).$$

且有

$$g(1) = g(2) = g(3) = g(4) = 0, \quad g(5) \neq 0, \quad g(6) \neq 0.$$

因此正整数解共有

$$17 + 17 + 17 + 17 = 68$$

个。

23. 求数列

$$\left\lfloor \frac{1^2}{2016} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{2^2}{2016} \right\rfloor, \dots, \left\lfloor \frac{2016^2}{2016} \right\rfloor$$

中相异整数的个数。

考虑连续两项的差

$$\frac{n^2}{2016} - \frac{(n-1)^2}{2016} = \frac{2n-1}{2016} < 1 \implies n < 1007.5$$

由于

$$\frac{1007^2}{2016} \approx 503.0005 > 503$$

前 1007 项即整数 $0, 1, 2, \dots, 503$, 共有 504 个不同整数。对于第 1008 项到 2016 项, 每项至少比前一项大 1, 因此产生

$$2016 - 1008 + 1 = 1009$$

个不同整数, 因此数列中相异整数的个数为

$$504 + 1009 = 1513$$

24. 求

$$\sum_{k=1}^{512} \lfloor \log_2 k \rfloor$$

一般地, 对所有整数 $n \geq 0, k \geq 1$,

$$2^n \leq k \leq 2^{n+1} \lfloor \log_2 k \rfloor = n$$

因此

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{512} \lfloor \log_2 k \rfloor &= 0 + (4-2) \cdot 1 + (8-4) \cdot 2 + \cdots + (512-256) \cdot 8 + 9 \\ &= 2 \cdot 1 + 2^2 \cdot 2 + \cdots + 2^8 \cdot 8 + 9 \\ &= 3595 \end{aligned}$$

25. 计算

$$\sum_{r=1}^{34} \left\lfloor \frac{18r}{35} \right\rfloor$$

将整数部分与小数部分分开,

$$\sum_{r=1}^{34} \left\lfloor \frac{18r}{35} \right\rfloor = \sum_{r=1}^{34} \frac{18r}{35} - \sum_{r=1}^{34} \left\{ \frac{18r}{35} \right\}$$

其中

$$\sum_{r=1}^{34} \frac{18r}{35} = \frac{18}{35} \cdot \frac{34 \cdot 35}{2} = 306$$

注意到对任意正整数 $1 \leq r \leq 34$,

$$\left\{ \frac{18r}{35} \right\} + \left\{ \frac{18(35-r)}{35} \right\} = 1$$

当 r 从 1 到 34 时, 可以配成 17 对, 因此

$$\sum_{r=1}^{34} \left\{ \frac{18r}{35} \right\} = 17$$

于是

$$\sum_{r=1}^{34} \left\lfloor \frac{18r}{35} \right\rfloor = 289$$

对任意正整数 $1 \leq r \leq 34$, 有

$$\frac{18r}{35} + \frac{18(35-r)}{35} = 18$$

因此

$$\left\lfloor \frac{18r}{35} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{18(35-r)}{35} \right\rfloor + \left\{ \frac{18r}{35} \right\} + \left\{ \frac{18(35-r)}{35} \right\} = 18$$

又因为

$$\left\{ \frac{18r}{35} \right\} + \left\{ \frac{18(35-r)}{35} \right\} = 1$$

所以

$$\left\lfloor \frac{18r}{35} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{18(35-r)}{35} \right\rfloor = 17$$

因此

$$\sum_{r=1}^{34} \left\lfloor \frac{18r}{35} \right\rfloor = 17 \cdot 17 = 289$$

26. 设 r 为实数, 且满足

$$\left\lfloor r + \frac{19}{100} \right\rfloor + \left\lfloor r + \frac{20}{100} \right\rfloor + \cdots + \left\lfloor r + \frac{91}{100} \right\rfloor = 546$$

求 $\lfloor 100r \rfloor$ 的值。

从 $\frac{19}{100}$ 到 $\frac{91}{100}$, 共有

$$91 - 19 + 1 = 73$$

项, 这些取整值只可能为 7 或 8。

若全部等于 7, 则和为 $73 \cdot 7 = 511$; 若全部等于 8, 则和为 $73 \cdot 8 = 581$,

设前 k 项等于 7, 其余 $73 - k$ 项等于 8, 则

$$7k + 8(73 - k) = 546 \Rightarrow k = 38$$

这表示

$$\left\lfloor r + \frac{56}{100} \right\rfloor = 7, \quad \left\lfloor r + \frac{57}{100} \right\rfloor = 8$$

于是

$$\lfloor 100r \rfloor = \lfloor r \rfloor + \cdots + \left\lfloor r + \frac{56}{100} \right\rfloor + \left\lfloor r + \frac{57}{100} \right\rfloor + \cdots + \left\lfloor r + \frac{99}{100} \right\rfloor = 57 \cdot 7 + 43 \cdot 8 = 743$$

27. 证明

$$\lfloor \sqrt{1} \rfloor + \lfloor \sqrt{2} \rfloor + \cdots + \lfloor \sqrt{n^2 - 1} \rfloor = \frac{n(n-1)(4n+1)}{6}$$

考虑满足

$$\lfloor \sqrt{k} \rfloor = m \quad (1)$$

的正整数 k 的个数。(1) 等价于

$$m \leq \sqrt{k} < m+1 \iff m^2 \leq k < (m+1)^2$$

因此, 对于每一个确定的 m , 满足条件的 k 有

$$(m+1)^2 - m^2 = 2m + 1$$

个, 于是

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{n^2-1} \lfloor \sqrt{k} \rfloor &= \sum_{m=1}^{n-1} m(2m+1) \\ &= 2 \sum_{m=1}^{n-1} m^2 + \sum_{m=1}^{n-1} m \\ &= 2 \cdot \frac{(n-1)n(2n-1)}{6} + \frac{(n-1)n}{2} \\ &= \frac{n(n-1)(4n+1)}{6} \end{aligned}$$

得证。

28. 计算

$$\lceil \sqrt{1} \rceil + \lceil \sqrt{2} \rceil + \lceil \sqrt{3} \rceil + \cdots + \lceil \sqrt{2025} \rceil$$

注意到 $\sqrt{2025} = 45$, 当 $(m-1)^2 < k \leq m^2$ 时有

$$\lceil \sqrt{k} \rceil = m$$

因此可按 $m = 1, 2, \dots, 45$ 分组求和,

$$\sum_{k=1}^{2025} \lceil \sqrt{k} \rceil = \sum_{m=1}^{45} \sum_{k=(m-1)^2+1}^{m^2} m$$

对固定的 m , 求和的项数为 $m^2 - (m-1)^2 = 2m-1$, 于是

$$\sum_{k=1}^{2025} [\sqrt{k}] = \sum_{m=1}^{45} m(2m-1) = 2 \sum_{m=1}^{45} m^2 - \sum_{m=1}^{45} m = 2 \cdot \frac{45 \cdot 46 \cdot 91}{6} - \frac{45 \cdot 46}{2} = 61755$$

29. 求

$$[1] + [1.7] + [2.4] + [3.1] + \cdots + [999.9]$$

首先发现

$$[1] + [8] + \cdots + [995] = \frac{143}{2}(1+995)$$

$$[1.7] + [8.7] + \cdots + [995.7] = \frac{143}{2}(2+996)$$

以此类推, 原式即

$$\begin{aligned} & [1] + [8] + \cdots + [995] + [1.7] + [8.7] + \cdots + [995.7] \\ & + \cdots + [6.6] + [13.6] + \cdots + [993.6] + [7.3] + [14.3] + \cdots + [994.3] \\ & = \frac{143}{2}(1+995+2+996+3+997+4+998+4+998+5+999+6+1000+6+1000) \\ & \quad + \frac{142}{2}(7+994+8+995) \\ & = 715285 \end{aligned}$$

30. 求

$$\sum_{n=0}^{1000} \left\lfloor \frac{2^n}{3} \right\rfloor$$

利用二项式展开,

$$\begin{aligned} a_n &= \left\lfloor \frac{(3-1)^n}{3} \right\rfloor \\ &= \left\lfloor 3^{n-1} - n \cdot 3^{n-2} + n(n-1)3^{n-3} + \cdots + (-1)^{n-1} + \frac{(-1)^n}{3} \right\rfloor \\ &= 3^{n-1} - n \cdot 3^{n-2} + n(n-1)3^{n-3} + \cdots + (-1)^{n-1} \end{aligned}$$

且注意到

$$a_n = \begin{cases} \frac{2^n - 1}{3}, & n \text{ 为偶数} \\ \frac{2^n - 2}{3}, & n \text{ 为奇数} \end{cases} = \frac{2^n}{3} - \frac{1}{2} + \frac{(-1)^n}{6}$$

因此

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{1000} \left\lfloor \frac{2^n}{3} \right\rfloor &= \sum_{n=0}^{1000} \left(\frac{2^n}{3} - \frac{1}{2} + \frac{(-1)^n}{6} \right) \\ &= \frac{1}{3} \cdot \frac{2^{1001} - 1}{2 - 1} - \frac{1001}{2} + \frac{1}{6} \\ &= \frac{2^{1001} - 1502}{3} \end{aligned}$$

31. 设 m, n 是整数, $n \geq 1$, 证明

$$\left\lfloor \frac{m+1}{n} \right\rfloor = \begin{cases} \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor & , n \nmid m+1 \\ \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor + 1 & , n \mid m+1 \end{cases}$$

当 n 不整除 $m+1$, 有 $m+1 = kn + r$, 其中 $k \in \mathbb{Z}, 1 \leq r \leq n-1$, 此时欲证

$$\left\lfloor \frac{m+1}{n} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor \quad (1)$$

观察左式为

$$\left\lfloor \frac{m+1}{n} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{kn+r}{n} \right\rfloor = \left\lfloor k + \frac{r}{n} \right\rfloor = k$$

右式为

$$\left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{kn+r-1}{n} \right\rfloor = \left\lfloor k + \frac{r-1}{n} \right\rfloor = k$$

故 (1) 得证。当 n 整除 $m+1$ 时, 即 $m+1 = kn$, 欲证

$$\left\lfloor \frac{m+1}{n} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor + 1 \quad (2)$$

此时左式为

$$\left\lfloor \frac{m+1}{n} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{kn}{n} \right\rfloor = \lfloor k \rfloor = k$$

右式为

$$\left\lfloor \frac{m}{n} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{kn-1}{n} \right\rfloor = \left\lfloor k - \frac{1}{n} \right\rfloor = k-1$$

故 (2) 得证。

32. 证明对任意实数 α, β 有

$$\lfloor 2\alpha \rfloor + \lfloor 2\beta \rfloor \geq \lfloor \alpha \rfloor + \lfloor \beta \rfloor + \lfloor \alpha + \beta \rfloor$$

令

$$\alpha = n_1 + r_1, \beta = n_2 + r_2, \quad n_1, n_2 \in \mathbb{Z}, \quad 0 \leq r_1, r_2 < 1$$

则原不等式等价于

$$\lfloor 2r_1 \rfloor + \lfloor 2r_2 \rfloor \geq \lfloor r_1 + r_2 \rfloor \quad (1)$$

若 $0 \leq r_1 < \frac{1}{2}$ 且 $0 \leq r_2 < \frac{1}{2}$, 则左式 $= 0 + 0 = 0$ 。由于 $r_1 + r_2 < 1$, 右式 $= 0$, (1) 成立;

若 r_1, r_2 中有一个大于等于 $\frac{1}{2}$, 不妨设 $r_1 \geq \frac{1}{2}$, 则左式 $\geq 1 + 0 = 1$ 。而 $r_1 + r_2 < 2$, 右式最大为 1, (1) 成立;

若 $r_1 \geq \frac{1}{2}$ 且 $r_2 \geq \frac{1}{2}$, 则左式 $= 1 + 1 = 2$ 。由于 $r_1 + r_2 < 2$, 右式最大为 1, (1) 也成立。

综上, 原不等式成立。

33. 证明对任意实数 x, y 有

$$\lfloor x - y \rfloor \leq \lfloor x \rfloor - \lfloor y \rfloor \leq \lfloor x - y \rfloor + 1$$

由取整函数的性质可知

$$x - 1 < \lfloor x \rfloor \leq x, \quad -(y - 1) > -\lfloor y \rfloor \geq -y$$

由 $x = (x - y) + y$ 得

$$\lfloor x \rfloor = \lfloor (x - y) + y \rfloor \geq \lfloor x - y \rfloor + \lfloor y \rfloor$$

移项得

$$\lfloor x \rfloor - \lfloor y \rfloor \geq \lfloor x - y \rfloor$$

得证左边不等式, 又因 $x - y = x + (-y)$ 得

$$\lfloor x - y \rfloor = \lfloor x + (-y) \rfloor \geq \lfloor x \rfloor + \lfloor -y \rfloor$$

由于

$$\lfloor -y \rfloor = \begin{cases} -\lfloor y \rfloor & , y \in \mathbb{Z} \\ -\lfloor y \rfloor - 1 & , y \notin \mathbb{Z} \end{cases}$$

即

$$\lfloor -y \rfloor \geq -\lfloor y \rfloor - 1$$

代入得

$$\lfloor x - y \rfloor \geq \lfloor x \rfloor - \lfloor y \rfloor - 1$$

得证右边不等式, 综上原不等式成立。

34. 证明埃尔米特恒等式: 对所有实数 x 及所有正整数 n , 以下恒等式成立:

$$\sum_{k=0}^{n-1} \left\lfloor x + \frac{k}{n} \right\rfloor = \lfloor nx \rfloor$$

将 x 分解为整数部分和小数部分, 即

$$x = \lfloor x \rfloor + \{x\}$$

在 $\{1, \dots, n\}$ 中, 恰好存在一个 k' 使得:

$$\lfloor x \rfloor = \left\lfloor x + \frac{k' - 1}{n} \right\rfloor \leq x < \left\lfloor x + \frac{k'}{n} \right\rfloor = \lfloor x \rfloor + 1$$

通过在不等式左右两边的取整符号内减去同一个整数 $\lfloor x \rfloor$, 可以重写为:

$$0 = \left\lfloor \{x\} + \frac{k' - 1}{n} \right\rfloor \leq \{x\} < \left\lfloor \{x\} + \frac{k'}{n} \right\rfloor = 1$$

因此有

$$1 - \frac{k'}{n} \leq \{x\} < 1 - \frac{k' - 1}{n}$$

即求点

$$n - k' \leq n\{x\} < n - k' + 1$$

这意味着 $\lfloor n\{x\} \rfloor = n - k'$, 于是

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{n-1} \left\lfloor x + \frac{k}{n} \right\rfloor &= \sum_{k=0}^{k'-1} \lfloor x \rfloor + \sum_{k=k'}^{n-1} (\lfloor x \rfloor + 1) \\ &= k' \lfloor x \rfloor + (n - k')(\lfloor x \rfloor + 1) \\ &= n \lfloor x \rfloor + n - k' \\ &= n \lfloor x \rfloor + \lfloor n\{x\} \rfloor \\ &= \lfloor n \lfloor x \rfloor + n\{x\} \rfloor \\ &= \lfloor nx \rfloor \end{aligned}$$

得证。

函数

1. 求下列函数的值域:

(a) $f(x) = x^2 - 2x + 5$, 其中 $D_f = [-1, 2]$

配方法得

$$f(x) = x^2 - 2x + 5 = (x - 1)^2 + 4$$

当 $x = 1$, $f_{\min} = 4$; 当 $x = -1$, $f_{\max} = 8$, 故

$$R_f = [4, 8]$$

(b) $f(x) = x + \sqrt{x(2-x)}$

设 $y = x + \sqrt{x(2-x)}$, 则

$$2x^2 - 2(y+1)x + y^2 = 0$$

由于 $x \in \mathbb{R}$, 判别式为非负,

$$4(y+1)^2 - 8y \geq 0 \Rightarrow 1 - \sqrt{2} \leq y \leq 1 + \sqrt{2}$$

但 $0 \leq x \leq 2$, $y = x + \sqrt{x(2-x)} \geq 0$, 故 $y_{\min} = 0$ 。

而当 $y = 1 + \sqrt{2}$, $x_1 = \frac{2 + \sqrt{2} - 2\sqrt[4]{2}}{\sqrt{2}} \in [0, 2]$, 故 $y_{\max} = 1 + \sqrt{2}$ 。

于是

$$R_f = [0, 1 + \sqrt{2}]$$

(c) $f(x) = \frac{3x+4}{5x+6}$

设 $y = \frac{3x+4}{5x+6}$, 则 $x = \frac{4-6y}{5y-3}$, 故反函数

$$f^{-1}(x) = \frac{4-6x}{5x-3}$$

的定义域为

$$D_{f^{-1}} = \left(-\infty, \frac{3}{5}\right) \cup \left(\frac{3}{5}, \infty\right)$$

即 R_f 。

(d) $f(x) = \frac{3x+2}{x+1}$

发现

$$f(x) = \frac{3x+2}{x+1} = 3 - \frac{1}{x+1} \neq 3$$

故

$$R_f = (-\infty, 3) \cup (3, \infty)$$

(e) $f(x) = \frac{\cos x}{\sin x - 3}$

设 $y = \frac{\cos x}{\sin x - 3}$, 则

$$3y = y \sin x - \cos x = \sqrt{y^2 + 1} \cos(x - \alpha) \Rightarrow \cos(x - \alpha) = \frac{3y}{\sqrt{y^2 + 1}}$$

由于 $\cos(x - \alpha) \in [-1, 1]$, 解得

$$-1 \leq \frac{3y}{\sqrt{y^2 + 1}} \leq 1 \Rightarrow -\frac{\sqrt{2}}{4} \leq y \leq \frac{\sqrt{2}}{4}$$

即

$$R_f = \left[-\frac{\sqrt{2}}{4}, \frac{\sqrt{2}}{4} \right]$$

(f) $f(x) = 2^{x-5} + \log_3 \sqrt{x-1}$, 其中 $D_f = [2, 10]$

由于 2^{x-5} 与 $\log_3 \sqrt{x-1}$ 在 $[2, 10]$ 上皆为增函数, 故 $f(x)$ 也为增函数。

当 $x = 2$, $f(x) = \frac{1}{8}$; 当 $x = 10$, $f(x) = 33$ 。故

$$R_f = \left[\frac{1}{8}, 33 \right]$$

(g) $f(x) = \sqrt{x+1} - \sqrt{x-1}$

发现

$$f(x) = \frac{2}{\sqrt{x+1} + \sqrt{x-1}}$$

由 $x \geq 1$, 得 $\sqrt{x+1} + \sqrt{x-1} \geq 2$, 于是

$$0 < \frac{2}{\sqrt{x+1} + \sqrt{x-1}} \leq \frac{2}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}$$

即

$$R_f = (0, \sqrt{2}]$$

(h) $f(x) = x + 2 + \sqrt{1 - (x+1)^2}$

由于 $1 - (x+1)^2 \geq 0$, 有 $(x+1)^2 \leq 1$, 不妨设 $x+1 = \cos \alpha, \alpha \in [0, \pi]$, 则

$$f(x) = \cos \alpha + 1 + \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \sin \alpha + \cos \alpha + 1 = \sqrt{2} \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{4} \right) + 1$$

由 $\alpha \in [0, \pi]$, 可知

$$-\frac{\sqrt{2}}{2} \leq \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{4} \right) \leq 1 \Rightarrow 0 \leq \sqrt{2} \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{4} \right) + 1 \leq 1 + \sqrt{2}$$

即

$$R_f = [0, 1 + \sqrt{2}]$$

(i) $f(x) = \frac{x^3 - x}{x^4 + 2x^2 + 1}$

首先有

$$f(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{2x}{1+x^2} \cdot \frac{1-x^2}{1+x^2}$$

令 $x = \tan \beta$, 则

$$f(x) = \frac{1}{2} \sin 2\beta \cos 2\beta = \frac{1}{4} \sin 4\beta$$

若 $k \in \mathbb{Z}$, 当 $\beta = \frac{k\pi}{2} - \frac{\pi}{8}$, $f_{\max} = \frac{1}{4}$; 当 $\beta = \frac{k\pi}{2} + \frac{\pi}{8}$, $f_{\min} = -\frac{1}{4}$, 且此时 $\tan \beta$ 有意义, 于是

$$R_f = \left[-\frac{1}{4}, \frac{1}{4} \right]$$

(j) $f(x) = x + 4 + \sqrt{5 - x^2}$

由 $5 - x^2 \geq 0$ 得 $|x| \leq \sqrt{5}$, 令 $x = \sqrt{5} \cos \alpha, \alpha \in [0, \pi]$, 则

$$f(x) = \sqrt{5} \cos \alpha + 4 + \sqrt{5} \sin \alpha = 4 + \sqrt{10} \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{4} \right)$$

由于 $\alpha \in [0, \pi], \alpha - \frac{\pi}{4} \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4} \right]$, 故

$$f_{\max} = 4 + \sqrt{10} \cdot 1, \quad f_{\min} = 4 + \sqrt{10} \cdot \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} \right)$$

故

$$R_f = [4 - \sqrt{5}, 4 + \sqrt{10}]$$

(k) $f(x) = \frac{\sqrt{x+2}}{x+3}$

设 $t = \sqrt{x+2}, t \geq 0$, 则 $x+3 = t^2 + 1$ 。当 $t > 0$,

$$f(x) = \frac{t}{t^2 + 1} = \frac{1}{t + \frac{1}{t}} \leq \frac{1}{2}$$

等号成立当且仅当 $t = 1$ 即 $x = -1$, 于是

$$0 < f(x) \leq \frac{1}{2}$$

而当 $t = 0$ 时, $f(x) = 0$, 故

$$R_f = \left[0, \frac{1}{2}\right]$$

(l) $f(x) = (\sin x + 1)(\cos x + 1), x \in \left[-\frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{2}\right]$

由

$$f(x) = \sin x \cos x + \sin x + \cos x + 1$$

令 $t = \sin x + \cos x$, 则 $\sin x \cos x = \frac{1}{2}(t^2 - 1)$, 化为

$$f(x) = \frac{1}{2}(t^2 - 1) + t + 1 = \frac{1}{2}(t + 1)^2$$

又由 $t = \sin x + \cos x = \sqrt{2} \cos\left(x - \frac{\pi}{4}\right), x \in \left[-\frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{2}\right]$ 知

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \leq t \leq \sqrt{2}$$

当 $t = \sqrt{2}, f_{\max} = \frac{3}{2} + \sqrt{2}$; 当 $t = \frac{\sqrt{2}}{2}, f_{\min} = \frac{3}{4} + \frac{\sqrt{2}}{2}$, 于是

$$R_f = \left[\frac{3}{4} + \frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{3}{2} + \sqrt{2}\right]$$

(m) $f(x) = \left(\sin x + \frac{1}{\sin x}\right)^2 + \left(\cos x + \frac{1}{\cos x}\right)^2$

展开得

$$f(x) = \sin^2 x + \cos^2 x + \csc^2 x + \sec^2 x + 4 = 7 + \tan^2 x + \cot^2 x$$

由 AM-GM 不等式,

$$f(x) \geqslant 7 + 2\sqrt{1} = 9$$

等号成立当且仅当 $\tan x = \cot x$ 即 $x = k\pi \pm \frac{\pi}{4}, k \in \mathbb{Z}$, 故

$$R_f = [9, \infty)$$

(n) $f(x) = 2 \sin x \sin 2x$

由 AM-GM 不等式,

$$[f(x)]^2 = 16 \sin^4 x \cos^2 x = 8 \sin^2 x \sin^2 x (2 - 2 \sin^2 x) \leqslant 8 \cdot \left(2 \cdot \frac{1}{3}\right)^3 = \frac{64}{27}$$

等号成立当且仅当 $\sin^2 x = 2 - 2 \sin^2 x$ 即 $\sin^2 x = \frac{2}{3}$, 故

$$R_f = \left[-\frac{8\sqrt{3}}{9}, \frac{8\sqrt{3}}{9}\right]$$

(o) $f(x) = |x - 2| + |x + 8|$

在一维数轴上设 $A = -8, B = 2$, 当动点 P 在线段 AB 上,

$$f(x) = |x - 2| + |x + 8| = |AB| = 10$$

当动点 P 在线段 AB 外,

$$f(x) = |x - 2| + |x + 8| > |AB| = 10$$

故

$$R_f = [10, \infty)$$

(p) $f(x) = \sqrt{x^2 - 6x + 13} + \sqrt{x^2 + 4x + 5}$

写成

$$f(x) = \sqrt{(x - 3)^2 + (0 - 2)^2} + \sqrt{(x + 2)^2 + (0 + 1)^2}$$

即 x 轴上的动点 $P(x, 0)$ 到两定点 $A(3, 2), B(-2, -1)$ 的距离之和, 而当 P 为线段与 x

轴的交点时,

$$f_{\min} = |AB| = \sqrt{(3+2)^2 + (2+1)^2} = \sqrt{43}$$

于是

$$R_f = [\sqrt{43}, \infty)$$

(q) $f(x) = \sqrt{x^2 - 6x + 13} - \sqrt{x^2 + 4x + 5}$

写成

$$f(x) = \sqrt{(x-3)^2 + (0-2)^2} - \sqrt{(x+2)^2 + (0-1)^2}$$

即 AP 距离与 BP 距离之差, 其中 $A(3, 2), B(-2, 1), P(x, 0)$ 。当 P 在 x 轴上且不是直线 AB 与 x 轴的交点时, 即 P' , 则构成 $\triangle ABP'$, 有

$$||AP'| - |BP'|| < |AB| = \sqrt{(3+2)^2 + (2-1)^2} = \sqrt{26}$$

即

$$-\sqrt{26} < f(x) < \sqrt{26}$$

而当 P 恰好在直线 AB 与 x 轴的交点时, 有

$$||AP'| - |BP'|| = |AB| = \sqrt{26}$$

故

$$R_f = (-\sqrt{26}, \sqrt{26}]$$

(r) $f(x) = x^2 + \sqrt{x^4 - 3x^2 + 2x + 5}$

变形可得

$$f(x) = x^2 + \sqrt{(x^2 - 2)^2 + (x + 1)^2}$$

发现 $f(x)$ 表示抛物线 $y = x^2$ 上动点 $P(x, x^2)$ 到点 $A(-1, 2)$ 和 x 轴的距离之和。

过 P 点作 $PB \perp x$ 轴于 B , 过 A 点作 $AC \perp x$ 轴于 C , BC 交抛物线 $y = x^2$ 于点 P_0 , 故

$$|PA| + |PB| \geq |P_0A| + |P_0C| = |AC| = 2$$

所以

$$R_f = [2, \infty)$$

2. 设函数 $f: \mathbb{R} \setminus \{0, -b\} \rightarrow \mathbb{R} \setminus \{1\}$ 满足

$$f(x) = \frac{x+a}{x+b}$$

求出所有实数对 (a, b) 使得

$$f(f(x)) = -\frac{1}{x}$$

据题意,

$$f(f(x)) = \frac{\frac{x+a}{x+b} + a}{\frac{x+a}{x+b} + b} = \frac{(1+a)x + a + ab}{(1+b)x + a + b^2} = -\frac{1}{x}$$

整理得

$$(1+a)x^2 + (a(1+b) + 1+b)x + a + b^2 = 0.$$

解得

$$\begin{cases} 1+a=0 \\ a+b^2=0 \end{cases} \Rightarrow a=-1, b=\pm 1$$

经检验, $(-1, -1)$ 不合题意, 故解为 $(-1, 1)$

3. 已知函数 $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 互为反函数, 且函数

$$F(x) = f(x+1) - 2, \quad G(x) = g(2x+1),$$

也互为反函数, 若 $f(1) = 4$, 求 $f(100)$ 。

由于 F, G 互为反函数, 有

$$G(F(x)) = g(2F(x) + 1) = g(2(f(x+1) - 2) + 1) = x$$

又 f, g 互为反函数, 则

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

由 $f(1) = 4$, 可依次得到

$$f(2) = 3 + \frac{1}{2}, \quad f(3) = 3 + \frac{1}{4}, \dots$$

归纳可得

$$f(n) = 3 + \frac{1}{2^{n-1}}, \quad n \in \mathbb{N}$$

因此

$$f(100) = 3 + \frac{1}{2^{99}}$$

4. 已知函数 $g(x) = 2x - 4$, 其反函数为 g^{-1} , 且函数 f 对任意实数 x 皆满足

$$g(f(g^{-1}(x))) = 2x^2 + 16x + 26,$$

求 $f(\pi)$ 的值。

已知 g 可逆, 令 $x = g(y)$, 则 $y = g^{-1}(x)$, 由题意得

$$g(f(y)) = 2(g(y))^2 + 16g(y) + 26 = 2(2y - 4)^2 + 16(2y - 4) + 26 = 8y^2 - 6$$

于是有

$$f(y) = g^{-1}(g(f(y))) = g^{-1}(8y^2 - 6) = \frac{8y^2 - 6 + 4}{2} = 4y^2 - 1$$

所以

$$f(\pi) = 4\pi^2 - 1$$

由 $y = g(x) = 2x - 4$, 得

$$x = g^{-1}(y) = \frac{y + 4}{2}$$

由 $g(f(g(x))) = 2x^2 + 16x + 26$,

$$f(g(x)) = g^{-1}(2x^2 + 16x + 26) = x^2 + 8x + 15 = (x + 4)^2 - 1$$

且

$$f(g(x)) = f\left(\frac{x + 4}{2}\right) = (x + 4)^2 - 1$$

令 $\frac{x + 4}{2} = \pi$, 则

$$f(\pi) = 4\pi^2 - 1.$$

请问是哪一行有误?

5. 已知 $f(x) + 2f(4 - x) = x + 8$, 求 $f(16)$ 。

令 $x = -12, 16$, 可得联立方程

$$\begin{cases} f(-12) + 2f(16) = -4 \\ f(16) + 2f(-12) = 24 \end{cases}$$

解得

$$f(16) = -\frac{32}{3}$$

6. 若 $f(x)$ 为实系数二次多项式, 已知 p, q, r 为三相异非零实数, 使得 $f(p) = qr, f(q) = rp, f(r) = pq$, 证明 $f(p+q+r) = f(p) + f(q) + f(r)$ 。

取 $g(x) = xf(x) - pqr$, 则 $g(p) = g(q) = g(r) = 0$, 且有

$$g(x) = xf(x) - pqr = a(x-p)(x-q)(x-r)$$

于是

$$f(x) = \frac{1}{x} (ax^3 - a(p+q+r)x^2 + a(pq+qr+rp)x - apqr + pqr)$$

由于 $f(x)$ 为二次多项式, 因此 $-apqr + pqr = 0 \Rightarrow a = 1$, 得

$$f(x) = x^2 - (p+q+r)x + pq + qr + rp$$

故得证

$$f(p+q+r) = pq + qr + rp = f(p) + f(q) + f(r)$$

7. 设 $Q(x)$ 是一个 2017 次多项式, 且满足

$$Q'(r) = \frac{2017!}{r}, r = 1, 2, 3, \dots, 2017$$

另定义

$$P(x) = xQ(x) - \int Q(x) dx.$$

若多项式 $P(x)$ 的所有根之和为 a , 求 $a \pmod{1000}$ 。

有

$$P'(x) = xQ'(x) + Q(x) - Q(x) \Rightarrow P(x) = \int xQ'(x) dx$$

考虑函数

$$R(x) = xQ(x) - 2017!$$

则 $R(r) = 0, r = 1, 2, 3, \dots, 2017$, 故可设

$$R(x) = A(x-1)(x-2)(x-3)\cdots(x-2017)$$

令 $x = 0$ 可得 $A = 1$, 故

$$Q'(x) = \frac{(x-1)(x-2)(x-3)\cdots(x-2017) + 2017!}{x}$$

且

$$\begin{aligned} P(x) &= \int xQ'(x) dx = \int ((x-1)(x-2)(x-3)\cdots(x-2017) + 2017!) dx \\ &= \int \left(x^{2017} - \frac{2017 \cdot 2018}{2} x^{2016} + \cdots \right) dx \\ &= \frac{1}{2018} x^{2018} - 1009 x^{2017} + \cdots \end{aligned}$$

由韦达定理, $P(x)$ 的所有根之和为

$$a = 1009 \cdot 2018 \equiv 162 \pmod{1000}$$

8. 定义函数 $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, 使得对所有实数 x 有

$$f(f(x)) = x^2 - x + 1.$$

求 $f(0)$ 。

设 $f(0) = b$, 则

$$f(b) = f(f(0)) = 0^2 - 0 + 1 = 1$$

又有

$$f(f(b)) = f(1) = b^2 - b + 1$$

因为 $f(b) = 1$, 所以

$$f(f(b)) = f(1) = 1 = b^2 - b + 1 \implies b(b-1) = 0.$$

若 $b = 0$, 则 $f(0) = 0$, 但 $f(f(0)) = f(0) = 0 \neq 1$, 矛盾。故 $b = 1$, 即

$$f(0) = 1$$

9. 已知 $f(x) = e(x) + o(x)$, 其中 $e(x)$ 为偶函数, $o(x)$ 为奇函数, 且

$$e(x) + x^2 = o(x),$$

求 $f(2)$ 。

由已知 $e(x) = f(x) - o(x)$, 换元得

$$e(-x) = f(-x) - o(-x) \Rightarrow e(x) = f(-x) + o(x)$$

故

$$f(-x) = -x^2 \Rightarrow f(2) = 4$$

10. 定义 f 在 $[0, 1]$ 上满足

$$2f\left(\frac{x}{3}\right) = f(x), \quad f(x) + f(1-x) = 1,$$

求 $f\left(\frac{1}{3}\right)$ 。

由递推公式, 则

$$f\left(\frac{1}{13}\right) + f\left(\frac{12}{13}\right) = 1,$$

且

$$f\left(\frac{12}{13}\right) = 2f\left(\frac{4}{13}\right) = 2\left[1 - f\left(\frac{9}{13}\right)\right] = 2 - 2f\left(\frac{9}{13}\right) = 2 - 4f\left(\frac{3}{13}\right) = 2 - 8f\left(\frac{1}{13}\right)$$

解得

$$f\left(\frac{1}{13}\right) = \frac{1}{7}.$$

11. 已知 $f(x)$ 是定义在 \mathbb{R} 上的函数, 且对任意实数 x 均有 $2f(x) + f(x^2 - 1) = 1$, 试求 $f(\sqrt{2})$ 的值。

分别令 $x = -1, 0, 1, \sqrt{2}$ 可得

$$2f(-1) + f(0) = 1 \tag{1}$$

$$2f(0) + f(-1) = 1 \tag{2}$$

$$2f(1) + f(0) = 1 \tag{3}$$

$$2f(\sqrt{2}) + f(1) = 1 \tag{4}$$

由 (1), (2), (3) 解得

$$f(-1) = f(0) = f(1) = \frac{1}{3}$$

故由 (4) 得

$$f(\sqrt{2}) = \frac{1}{3}$$

12. 设函数 $f(x) = \cos x + \log_2 x$, 其中 $x > 0$, 若正实数 a 满足 $f(a) = f(2a)$, 求 $f(2a) - f(4a)$ 的值。

由条件得

$$\cos a + \log_2 a = \cos 2a + \log_2 2a = 2\cos^2 a - 1 + \log_2 a + 1$$

所以

$$\cos a(2\cos a - 1) = 0 \Rightarrow (\cos a, \cos 2a) = (0, -1) \text{ 或 } \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right)$$

于是

$$\begin{aligned} f(2a) - f(4a) &= \cos 2a + \log_2 2a - \cos 4a - \log_2 4a \\ &= \cos 2a - 2\cos^2 2a \\ &= \begin{cases} -3, & \text{若 } \cos 2a = -1, \\ -1, & \text{若 } \cos 2a = -\frac{1}{2} \end{cases} \end{aligned}$$

13. 已知函数 $f(x)$ 的定义域为 \mathbb{R} , 且 $f(x+2) - 2$ 为奇函数, $f(2x+1)$ 为偶函数。若 $f(1) = 0$, 求 $f(1) + f(2) + \cdots + f(2023)$ 的值。

$f(x+2) - 2$ 为奇函数, 则

$$f(-x+2) - 2 + f(x+2) - 2 = 0 \Rightarrow f(2-x) + f(2+x) = 4$$

于是 $f(2) = 2$, $f(x)$ 的图象关于点 $(2, 2)$ 对称, 又由 $f(2x+1)$ 为偶函数,

$$f(-2x+1) = f(2x+1) \Rightarrow f(1-2x) = f(1+2x)$$

即

$$f(1-x) = f(1+x)$$

$f(x)$ 图象关于直线 $x = 1$ 对称, 由上可得

$$f(x) = f(2-x) = 4 - f(2+x) = 4 - f(-x) = 4 - [4 - f(x+4)] = f(x+4)$$

所以 $f(x)$ 是周期为 4 的函数, 且

$$f(1) = 0, f(2) = 2, f(3) = 4, f(4) = 2$$

故

$$\begin{aligned} & f(1) + f(2) + \cdots + f(2023) \\ &= 505[f(1) + f(2) + f(3) + f(4)] + f(1) + f(2) + f(3) \\ &= 4046 \end{aligned}$$

14. 设 f 为实值函数, 且对任意实数 x 满足

$$f(10+x) = f(10-x), \quad f(20+x) = -f(20-x)$$

(a) 证明 f 是奇函数。

$$f(10+x) = f(10-x) \quad (1)$$

$$f(20+x) = -f(20-x) \quad (2)$$

由 (1), 令 $x = y - 10$,

$$f(y) = f(20-y)$$

由 (2), 令 $x = -y$,

$$f(20-y) = -f(20+y)$$

因此

$$f(y) = -f(20+y)$$

由 (1), 令 $x = y + 10$,

$$f(y+20) = f(-y)$$

结合上式可得

$$f(y) = -f(20+y) = f(-y),$$

所以得证 f 是奇函数。

(b) 证明 f 是周期函数。

由 (2), 令 $x = y - 20$ 在 (b) 中, 则

$$f(y) = -f(40-y)$$

由于 f 是奇函数, 有 $-f(40-y) = f(y-40)$, 所以

$$f(y) = f(y-40),$$

因此得证 f 是周期函数。

15. 函数 $f(x)$ 在 \mathbb{R} 上定义, 且满足

$$f(-x) = f(x), f(0) = 993,$$

若另一函数 $g(x)$ 满足

$$g(-x) = -g(x), g(x) = f(x-1)$$

求 $f(1992)$ 的值。

由 $g(-x) = -g(x)$ 及 $g(x) = f(x-1)$ 得

$$f(-x-1) = -f(x-1)$$

结合 $f(x)$ 为偶函数, 有

$$f(x+1) = f(-x-1) = -f(x-1)$$

从而 $f(x+2) = -f(x)$, 进而 $f(x+4) = f(x)$, 发现 $f(x)$ 是周期为 4 的函数, 故

$$f(1992) = f(4 \cdot 498) = f(0) = 993$$

16. 若实数 x, y, z 满足

$$\begin{cases} \frac{x}{1^2+4^2} + \frac{y}{1^2+5^2} + \frac{z}{1^2+6^2} = 1 \\ \frac{x}{2^2+4^2} + \frac{y}{2^2+5^2} + \frac{z}{2^2+6^2} = 1 \\ \frac{x}{3^2+4^2} + \frac{y}{3^2+5^2} + \frac{z}{3^2+6^2} = 1 \end{cases}$$

求 $x+y+z$ 。

设

$$f(k) = \frac{x}{k+4^2} + \frac{y}{k+5^2} + \frac{z}{k+6^2} - 1,$$

据题意

$$f(1^2) = f(1) = 0, \quad f(2^2) = f(4) = 0, \quad f(3^2) = f(9) = 0$$

因此 $f(k)$ 有三个根 $k = 1, 4, 9$, 所以

$$(k-1)(k-4)(k-9)$$

与

$$(k+4^2)(k+5^2)(k+6^2) - x(k+5^2)(k+6^2) - y(k+4^2)(k+6^2) - z(k+4^2)(k+5^2)$$

相等, 比较 k^2 系数得

$$-(1+4+9) = 4^2 + 5^2 + 6^2 - (x+y+z) \Rightarrow x+y+z = 91$$

17. 已知实数 α, β 满足

$$3^{\frac{\alpha}{2}} = \sqrt{3} - \alpha, \quad \log_3 \beta = 2\sqrt{3} - 2\beta$$

求

$$(\alpha + \beta)^2 - 2(\sqrt{3})^\alpha - \log_3 \beta$$

将底改为 $\sqrt{3}$:

$$\sqrt{3}^\alpha = \sqrt{3} - \alpha, \quad \log_{\sqrt{3}} \beta = \sqrt{3} - \beta$$

设 $A(\alpha, \sqrt{3}-\alpha)$ 为两图形 $y = \sqrt{3}^x$ 与 $y = \sqrt{3}-x$ 的交点, $B(\beta, \sqrt{3}-\beta)$ 为两图形 $y = \log_{\sqrt{3}} x$ 与 $y = \sqrt{3}-x$ 的交点。

由于 $y = \sqrt{3}^x$ 与 $y = \log_{\sqrt{3}} x$ 关于 $y = x$ 对称,

$$\alpha = \sqrt{3} - \beta \Rightarrow \alpha + \beta = \sqrt{3}$$

因此

$$(\alpha + \beta)^2 - 2(\sqrt{3})^\alpha - \log_3 \beta = (\sqrt{3})^2 - 2(\sqrt{3} - \alpha) - 2(\sqrt{3} - \beta) = 3 - 2\sqrt{3}$$

18. 设实数 α, β 满足

$$\begin{cases} \alpha^3 - 6\alpha^2 + 13\alpha = 6 \\ \beta^3 - 6\beta^2 + 13\beta = 14 \end{cases}$$

求 $\alpha + \beta$ 。

令

$$f(x) = x^3 - 6x^2 + 13x \Rightarrow f(\alpha) = 6, f(\beta) = 14$$

又

$$f'(x) = 3x^2 - 12x + 13 \Rightarrow f''(x) = 6x - 12 = 0 \Rightarrow x = 2$$

因此图形 $y = f(x)$ 的对称中心为 $(2, f(2) = 10)$, 所以 $P(\alpha, 6), Q(\beta, 14)$ 的对称点为

$$P' = (4 - \alpha, 14), Q' = (4 - \beta, 6)$$

于是由 $P = Q', Q = P'$ 解得

$$\alpha = 4 - \beta, \quad \beta = 4 - \alpha \Rightarrow \alpha + \beta = 4$$

19. 解方程

$$e^{x-1} \ln x + e^{y-1} \ln y = \ln(xy)$$

原式化为:

$$(e^{x-1} - 1) \ln x + (e^{y-1} - 1) \ln y = 0$$

考虑函数 $f(t) = (e^{t-1} - 1) \ln t$,

- 当 $t > 1$ 时, $e^{t-1} - 1 > 0, \ln t > 0$, 故 $f(t) > 0$
- 当 $0 < t < 1$ 时, $e^{t-1} - 1 < 0, \ln t < 0$, 故 $f(t) > 0$
- 当 $t = 1$ 时, $e^{t-1} - 1 = 0, \ln 1 = 0$, 故 $f(1) = 0$

故

$$f(x) + f(y) = 0 \Rightarrow x = y = 1$$

20. 已知 $x, y \in \mathbb{R}$, 且满足

$$\begin{cases} (x+1)^3 + 2023(x+1) = -2023 \\ (y+1)^3 + 2023(y+1) = 2023 \end{cases}$$

求 $x + y$ 的值。

考虑函数 $f(t) = t^3 + 2023t$, 据题意有

$$f(x+1) = -2023, \quad f(y+1) = 2023$$

注意到 $f(t)$ 是奇函数,

$$f(x+1) = -f(y+1) = f(-(y+1))$$

且导数为

$$f'(t) = 3t^2 + 2023 > 0, \quad \forall t \in \mathbb{R}$$

所以 f 在 \mathbb{R} 上严格递增, 故 f 一对一, 因此有

$$x+1 = -(y+1) \Rightarrow x+y = -2$$

21. 求定义于 $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ 上的所有实值函数满足

$$\frac{1}{x}f(-x) + f\left(\frac{1}{x}\right) = x$$

令 $x = \frac{1}{y}$,

$$yf\left(-\frac{1}{y}\right) + f(y) = \frac{1}{y} \quad (1)$$

令 $x = -y$ 代入, 得

$$-\frac{1}{y}f(y) + f\left(-\frac{1}{y}\right) = -y \quad (2)$$

联立 (1),(2), 解得

$$f(x) = \frac{x^3 + 1}{2x}, \quad x \neq 0$$

22. 解函数方程

$$xf(y) + yf(x) = (x+y)f(x)f(y)$$

令 $x = y = 1$, 得 $2f(1) = 2f^2(1)$, 因此 $f(1) = 0$ 或 1 。若 $f(1) = 0$, 令 $y = 1$, 得

$$xf(1) + 1 \cdot f(x) = (x+1)f(x)f(1) \Rightarrow f(x) = 0$$

若 $f(1) = 1$, 令 $y = 1$, 得

$$x + f(x) = (x + 1)f(x) \Rightarrow x[f(x) - 1] = 0$$

故解为

$$f(x) = 0 \quad \text{或} \quad f(x) = \begin{cases} 1, & x \neq 0 \\ a, & x = 0, a \in \mathbb{R} \end{cases}$$

23. 已知函数 $f(x)$ 满足

$$f(m + n) = f(m) + f(n) + mn, \quad \forall m, n \in \mathbb{N}$$

且 $f(1) = 1$, 求 $f(x)$ 。

令 $m = 1$, 则

$$f(n + 1) = f(n) + f(1) + n = f(n) + (n + 1)$$

当 $n = 1, \dots, n - 1$ 时, 由累加法,

$$f(n) = f(1) + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n(n + 1)}{2}$$

即

$$f(x) = \frac{x(x + 1)}{2}, \quad x \in \mathbb{N}$$

24. 已知函数 $f(x)$ 满足 $f(0) = 1, f\left(\frac{\pi}{2}\right) = 2$, 且对任意的 $x, y \in \mathbb{R}$,

$$f(x + y) + f(x - y) = 2f(x) \cos y,$$

求 $f(x)$ 。

令 $x = 0, y = t$,

$$f(t) + f(-t) = 2f(0) \cos t = 2 \cos t \quad (1)$$

令 $x = \frac{\pi}{2} + t, y = \frac{\pi}{2}$,

$$f(t + \pi) + f(t) = 2f\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos \frac{\pi}{2} = 0 \Rightarrow f(t + \pi) = -f(t) \quad (2)$$

再令 $x = \frac{\pi}{2}, y = \frac{\pi}{2} + t$,

$$f(\pi + t) + f(-t) = 2f\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} + t\right) = -4 \sin t \quad (3)$$

将 (2) 代入 (3),

$$-f(t) + f(-t) = -4 \sin t \quad (4)$$

(1) + (4), 给出

$$f(-t) = \cos t - 2 \sin t$$

于是

$$f(x) = \cos(-x) - 2 \sin(-x) = \cos x + 2 \sin x$$

25. 已知 $f(x)$ 为多项式, 解

$$f(x+1) + f(x-1) = 2x^2 - 4x$$

若 $f(x)$ 是一 n 次多项式, 则不难看出 $f(x+1) + f(x-1)$ 也为 n 次多项式, 据此 $f(x)$ 必为二次多项式, 设

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

代入原式, 整理得

$$2ax^2 + 2bx + 2a + 2c = 2x^2 - 4x$$

比较系数, 解得

$$a = 1, b = -2, c = -1$$

故

$$f(x) = x^2 - 2x - 1$$

26. 设函数 $f(x)$ 满足 $f(1) = 1, f(2) = 8$ 且

$$f(n) = \sqrt{f(n-1)f(n-2)}, \quad n \geqslant 3$$

求 $f(n)$ 。

令 $g(n) = \log_2 f(n)$, 对方程两边取以 2 为底的对数, 则

$$g(n) = \frac{1}{2}[g(n-1) + g(n-2)],$$

特征方程为

$$2r^2 - r - 1 = 0$$

解得 $r_1 = 1, r_2 = -\frac{1}{2}$, 故

$$g(n) = c_1 + c_2 \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-1}$$

代入 $g(1) = \log_2 1 = 0, g(2) = \log_2 8 = 3$ 可解得 $c_1 = 2, c_2 = -2$, 于是

$$g(n) = 2 - 2 \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-1} = 2 + 4 \left(-\frac{1}{2}\right)^n$$

最后由 $f(n) = 2^{g(n)}$ 可得

$$f(n) = 2^{2+(-2)^{2-n}}$$

27. 设 $ab \neq 0, a^2 \neq b^2$, 求方程

$$af(x) + bf\left(\frac{1}{x}\right) = cx$$

的解。

已知

$$af(x) + bf\left(\frac{1}{x}\right) = cx \quad (1)$$

以 $\frac{1}{x}$ 代替 x 得

$$af\left(\frac{1}{x}\right) + bf(x) = \frac{c}{x} \quad (2)$$

联立 (1),(2) 解得

$$f(x) = \frac{c}{a^2 - b^2} \left(ax - \frac{b}{x}\right), \quad x \neq 0$$

其中 $ab \neq 0, a^2 \neq b^2$ 。

28. 求函数 $f(x)$ 满足

$$af(x^n) + f(-x^n) = bx,$$

其中 $a^2 \neq 1, n$ 是奇数。

已知

$$af(x^n) + f(-x^n) = bx \quad (1)$$

以 $-x$ 代替 x , 由于 n 为奇数, 得

$$af(-x^n) + f(x^n) = -bx \quad (2)$$

联立 (1),(2) 解得

$$f(x^n) = \frac{bx(a+1)}{(a+1)(a-1)} = \frac{bx}{a-1}$$

即

$$f(x) = \frac{bx^{\frac{1}{n}}}{a-1}$$

29. 解函数方程

$$2f(x^2) + f\left(\frac{1}{x^2}\right) = x$$

其中 $x > 0$ 。

已知

$$2f(x^2) + f\left(\frac{1}{x^2}\right) = x \quad (1)$$

以 $\frac{1}{x}$ 代替 x 得

$$2f\left(\frac{1}{x^2}\right) + f(x^2) = \frac{1}{x} \quad (2)$$

联立 (1),(2) 得

$$3f(x^2) = 2x - \frac{1}{x}$$

令 $t = x^2 \Rightarrow x = \sqrt{t}$, 则

$$f(t) = \frac{1}{3} \left(2\sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}} \right)$$

即

$$f(x) = \frac{2x - 1}{3\sqrt{x}}, \quad x > 0$$

30. 已知 $f(1) = \frac{1}{5}$, 且当 $n > 1$ 时,

$$\frac{f(n-1)}{f(n)} = \frac{2nf(n-1) + 1}{1 - 2f(n)},$$

求 $f(n)$ 。

原方程式即

$$\frac{1}{f(n)} - \frac{1}{f(n-1)} = 2(n+1)$$

利用累加法,

$$\frac{1}{f(n)} = \frac{1}{f(1)} + \sum_{i=2}^n 2(i+1) = 5 + 2 \left[\frac{(n+1)(n+2)}{2} - 3 \right]$$

整理得

$$f(n) = \frac{1}{n^2 + 3n + 1}, \quad n > 1$$

31. 解函数方程

$$[f(x+y)]^2 = [f(x)]^2 + [f(y)]^2$$

令 $x = y = 0$, 则有

$$[f(0)]^2 = 2[f(0)]^2 \Rightarrow f(0) = 0$$

令 $y = -x$, 得到

$$[f(x)]^2 + [f(-x)]^2 = [f(0)]^2 = 0$$

由于平方数在 \mathbb{R} 是非负的, 解为

$$f(x) = 0, \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

32. 设函数 $f: (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$, 满足

$$f\left(1 - \frac{1}{1+t}\right) + f\left(\frac{1+t}{t}\right) \log(1+t) = f\left(\frac{1+t}{t}\right) \log t + 2022,$$

求 $f(1000)$ 。

令

$$x = \frac{t}{1+t} = 1 - \frac{1}{1+t},$$

则原式变为

$$f(x) + f\left(\frac{1}{x}\right) \log(1+t) = f\left(\frac{1}{x}\right) \log t + 2022$$

即

$$f(x) - f\left(\frac{1}{x}\right) \log x = 2022 \quad (1)$$

再换元得

$$f\left(\frac{1}{x}\right) - f(x) \log \frac{1}{x} = 2022 \Rightarrow f\left(\frac{1}{x}\right) + f(x) \log x = 2022$$

代入 (1) 得

$$f(x) - 2022 \log x + f(x)(\log x)^2 = 2022 \Rightarrow f(x) = \frac{2022(1 + \log x)}{1 + (\log x)^2}$$

故

$$f(1000) = \frac{2022 \cdot 4}{1 + 9} = 808.8$$

33. 设函数 $f: \mathbb{R} \setminus \{0, 1\} \rightarrow \mathbb{R}$ 使得

$$f(x) + f\left(\frac{1}{1-x}\right) = \frac{1}{x(1-x)}.$$

求 $f(x)$ 。

代入 x , $\frac{1}{1-x}$, 及 $\frac{x-1}{x}$ 得

$$f(x) + f\left(\frac{1}{1-x}\right) = \frac{1}{x(1-x)} \quad (1)$$

$$f\left(\frac{1}{1-x}\right) + f\left(\frac{x-1}{x}\right) = -\frac{(x-1)^2}{x} \quad (2)$$

$$f\left(\frac{x-1}{x}\right) + f(x) = \frac{x^2}{x-1} \quad (3)$$

(1) + (3) - (2), 得

$$\begin{aligned} 2f(x) &= \frac{1}{x(1-x)} + \frac{x^2}{x-1} + \frac{(x-1)^2}{x} \\ &= \frac{-1 + x^3 + (x-1)^3}{x(x-1)} \\ &= \frac{(x^2 + x + 1) + (x^2 - 2x + 1)}{x} \\ &= \frac{2x^2 - x + 2}{x} \end{aligned}$$

故

$$f(x) = x + \frac{1}{x} - \frac{1}{2}$$

34. 已知函数 $f(x)$ 定义在 \mathbb{R} 上, 且满足 $f(1) = 1$, 对所有实数 x 有

$$f(x+5) \geq x+5, \quad f(x+1) \leq f(x)+1.$$

若定义函数 $g(x) = f(x) + 1 - x$, 求 $g(2002)$ 。

$\forall x \in \mathbb{R}$, 由 $f(x+1) \leq f(x)+1$,

$$g(x+1) = f(x+1) + 1 - (x+1) \leq f(x) + 1 - x = g(x)$$

即 $g(x)$ 是递减函数, 且由 $f(x+5) \geq x+5$,

$$g(x+5) = f(x+5) + 1 - (x+5) \geq x+5 + 1 - (x+5) = 1$$

因为 $g(1) = f(1) + 1 - 1 = 1$, 故 $g(x) = 1 \quad \forall x \in \mathbb{R}$, 即 $g(2002) = 1$

35. 设 $f: \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, 使得对于所有非零实数 x, y 有

$$xy(f(x) - f(y)) + 2x = xf(x) - yf(y) + 2y$$

若 $f'(1) = 2018$, 求 $f(2018)$ 。

令 $y = 1$, 有

$$xf(x) - xf(1) + 2x = xf(x) - f(1) + 2 \Rightarrow f(1) = 2$$

令 $y = -1$, 有

$$-x(f(x) - f(-1)) + 2x = xf(x) + f(-1) - 2 \Rightarrow f(x) = \frac{f(-1) + 2}{2} + \frac{2 - f(-1)}{2x}$$

求导得

$$f'(x) = \frac{f(-1) - 2}{2x^2}$$

故由

$$f'(1) = \frac{f(-1) - 2}{2} = 2018$$

得 $f(-1) = 4038$, 于是

$$f(x) = 2020 - \frac{2018}{x}$$

经检验, 原方程式左式 = 右式 = $2020x - 2018y$, 故

$$f(2018) = 2019$$

将原式写成

$$\begin{aligned}xf(x)(y-1)+2x &= yf(y)(x-1)+2y \\xf(x)(y-1)+2(x-1) &= yf(y)(x-1)+2(y-1) \\ \frac{xf(x)}{x-1} + \frac{2}{y-1} &= \frac{yf(y)}{y-1} + \frac{2}{x-1} \\ \frac{xf(x)-2}{x-1} &= \frac{yf(y)-2}{y-1} \quad \forall x, y \neq 0, 1\end{aligned}$$

设

$$\frac{xf(x)-2}{x-1} = c \Rightarrow f(x) = \frac{c(x-1)+2}{x} = c + \frac{2-c}{x}$$

求导得

$$f'(x) = \frac{c-2}{x^2}$$

由 $f'(1) = 2018$ 得 $c = 2020$, 故

$$f(x) = 2020 - \frac{2018}{x}$$

经检验, 原方程式左式 = 右式 = $2020x - 2018y$, 故

$$f(2018) = 2019$$

36. 设函数 $f(x), g(x)$ 在 \mathbb{R} 上连续且满足

$$\begin{cases} f(x+y) = f(x)g(y) + g(x)f(y) \\ g(x+y) = f(x)f(y) + g(x)g(y) \end{cases}$$

且 $g(x)$ 为偶函数, $g(x) > 0$ 恒成立, $g(0) \neq \frac{1}{2}$, 已知 $f(2) + g(2) = \frac{\sqrt{5}}{15}$, 求 $f(8) - g(8)$ 。

两式相加得

$$f(x+y) + g(x+y) = (f(x) + g(x))(f(y) + g(y))$$

设 $h(x) = f(x) + g(x)$, 则 $h(x+y) = h(x)h(y)$, 得 $h(x) = a^x$ 。两式相减得

$$g(x+y) - f(x+y) = (g(x) - f(x))(g(y) - f(y))$$

设 $k(x) = g(x) - f(x)$, 同理得 $k(x) = b^x$, 于是

$$f(x) = \frac{h(x) - k(x)}{2} = \frac{a^x - b^x}{2}, \quad g(x) = \frac{h(x) + k(x)}{2} = \frac{a^x + b^x}{2}$$

由于 $g(x)$ 为偶函数, $g(x) = g(-x)$, 即

$$\frac{a^x + b^x}{2} = \frac{a^{-x} + b^{-x}}{2} \Rightarrow (a^x + b^x)a^x b^x = b^x + a^x \Rightarrow (ab)^x = 1 \Rightarrow ab = 1, b = \frac{1}{a}$$

故

$$f(x) = \frac{a^x - a^{-x}}{2}, \quad g(x) = \frac{a^x + a^{-x}}{2}$$

由 $f(2) + g(2) = \frac{\sqrt{5}}{15}$ 可知

$$h(2) = a^2 = \frac{\sqrt{5}}{15} \Rightarrow a^8 = \left(\frac{\sqrt{5}}{15}\right)^4 = \frac{1}{2025}$$

所以

$$f(8) - g(8) = -k(8) = -b^8 = -\frac{1}{a^8} = -2025$$

37. 设 $a, b > 0$ 使得关于 x 的方程 $\sqrt{|x|} + \sqrt{|x+a|} = b$ 恰有三个相异实数解 x_1, x_2, x_3 , 且 $x_1 < x_2 < x_3 = b$, 求 $a+b$ 的值。

令 $t = x + \frac{a}{2}$, 则关于 t 的方程

$$\sqrt{\left|t - \frac{a}{2}\right|} + \sqrt{\left|t + \frac{a}{2}\right|} = b$$

恰有三个不同的实数解

$$t_i = x_i + \frac{a}{2}, i = 1, 2, 3$$

由于 $f(t) = \sqrt{\left|t - \frac{a}{2}\right|} + \sqrt{\left|t + \frac{a}{2}\right|}$ 为偶函数, 故方程 $f(t) = b$ 的三个实数解关于原点对称分布, 从而必有 $b = f(0) = \sqrt{2a}$

现求方程 $f(t) = \sqrt{2a}$ 的实数解:

- 当 $|t| \leq \frac{a}{2}$ 时, $f(t) = \sqrt{\frac{a}{2} - t} + \sqrt{\frac{a}{2} + t} = \sqrt{a + \sqrt{a^2 - 4t^2}} \leq \sqrt{2a}$, 等号成立当且仅当 $t = 0$
- 当 $t > \frac{a}{2}$ 时, $f(t)$ 单调递增, 且当 $t = \frac{5a}{8}$ 时 $f(t) = \sqrt{2a}$
- 当 $t < -\frac{a}{2}$ 时, $f(t)$ 单调递减, 且当 $t = -\frac{5a}{8}$ 时 $f(t) = \sqrt{2a}$

从而方程 $f(t) = \sqrt{2a}$ 恰有三个实数解

$$t_1 = -\frac{5a}{8}, t_2 = 0, t_3 = \frac{5a}{8}$$

由条件知 $b = x_3 = t_3 - \frac{a}{2} = \frac{a}{8}$, 结合 $b = \sqrt{2a}$ 得 $a = 128$, 于是 $a + b = \frac{9a}{8} = 144$

不等式

1. 求满足不等式

$$\frac{4x^2}{(1 - \sqrt{1 + 2x})^2} < 2x + 9$$

的实数 x 的集合。

首先定义域要求 $1 + 2x \geq 0$, 即 $x \geq -\frac{1}{2}$, 且分母不为零, 即 $1 - \sqrt{1 + 2x} \neq 0$, 得 $x \neq 0$, 发现

$$\frac{4x^2}{(1 - \sqrt{1 + 2x})^2} = \left(\frac{1 - (1 + 2x)}{1 - \sqrt{1 + 2x}} \right)^2 = (1 + \sqrt{1 + 2x})^2$$

由 $(1 + \sqrt{1 + 2x})^2 < 2x + 9$ 解得

$$\sqrt{1 + 2x} < \frac{7}{2} \Rightarrow x < \frac{45}{8}.$$

故 x 的取值范围为

$$\left[-\frac{1}{2}, 0 \right) \cup \left(0, \frac{45}{8} \right).$$

2. 已知

$$\begin{cases} \sqrt{x(x-3)} + \frac{8}{y^2} + \frac{y^2}{\sqrt{x(x-3)}} = 6, \\ x + y < 0 \end{cases}$$

求 (x, y) 。

据题意,

$$6 = \sqrt{x(x-3)} + \frac{8}{y^2} + \frac{y^2}{\sqrt{x(x-3)}} \geq 2|y| + \frac{8}{y^2} \Rightarrow 3y^2 \geq y^2|y| + 4 \quad (1)$$

当 $y > 0$, 化简得

$$y^3 - 3y^2 + 4 = (y + 1)(y - 2)^2 \leq 0$$

由于 $(y - 2)^2 \geq 0$ 且 $y + 1 > 0$, 故

$$y = 2 \Rightarrow x = -1, 4$$

经检验得 $(-1, 2), (4, 2)$ 均不合题意; 同理当 $y < 0$ 可解得

$$y = -2, \Rightarrow x = -1, 4$$

经检验得, 原方程式只有唯一解 $(-1, -2)$

3. 解不等式

$$|x|^3 - 2x^2 - 4|x| + 3 < 0,$$

令 $t = |x|$, 不等式化为

$$t^3 - 2t^2 - 4t + 3 < 0$$

求根得 $t = 3$ 和 $t = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ 。于是

$$\frac{\sqrt{5}-1}{2} < |x| < 3$$

解得

$$x \in \left(-3, -\frac{\sqrt{5}-1}{2}\right) \cup \left(\frac{\sqrt{5}-1}{2}, 3\right)$$

4. 假设 $a > 1$ 且 $x, y > 0$ 满足

$$(\log_a x)^2 + (\log_a y)^2 - \log_a(x^2 y^2) \leq 2, \quad \log_a y \geq 1.$$

求 $\log_a(x^2 y)$ 的取值区间。

设 $u = \log_a x, v = \log_a y$ 。不等式化为

$$u^2 + v^2 - 2(u + v) \leq 2, \quad v \geq 1.$$

这是以 $(1, 1)$ 为圆心、半径为 2 的半圆的上半部分。我们要求 $2u + v$ 的取值范围。

最小值在左下角 $(-1, 1)$, 得 $2u + v = -1$ 。

最大值出现在斜率为 -2 的直线与半圆切点, 即联立

$$v - 1 = \frac{1}{2}(u - 1), \quad (u - 1)^2 + (v - 1)^2 = 4.$$

解得

$$(u, v) = \left(1 + \frac{4}{\sqrt{5}}, 1 + \frac{2}{\sqrt{5}}\right) \implies 2u + v = 3 + 2\sqrt{5}.$$

因此区间为 $[-1, 3 + 2\sqrt{5}]$ 。

5. 已知不等式

$$|x^2 + ax + 2| \geq |x + 1|$$

对任意 $x \in \mathbb{R}$ 恒成立, 求实数 a 的取值范围。

将不等式两边平方得

$$(x^2 + ax + 2)^2 \geq (x + 1)^2$$

$$(x^2 + ax + 2)^2 - (x + 1)^2 \geq 0$$

$$[(x^2 + ax + 2) - (x + 1)][(x^2 + ax + 2) + (x + 1)] \geq 0$$

$$[x^2 + (a - 1)x + 1][x^2 + (a + 1)x + 3] \geq 0$$

因为两个二次式领导系数为正, 两个因式需对任意 x 恒非负。

对二次式 $x^2 + (a - 1)x + 1$,

$$\Delta_1 = (a - 1)^2 - 4 \leq 0 \implies -1 \leq a \leq 3$$

对二次式 $x^2 + (a + 1)x + 3$,

$$\Delta_2 = (a + 1)^2 - 12 \leq 0 \implies -1 - 2\sqrt{3} \leq a \leq -1 + 2\sqrt{3}$$

综上所述,

$$a \in [-1, -1 + 2\sqrt{3}]$$

6. 求

$$|2|x - 2| - 5| \leq 3$$

的正整数解。

情况一: $|2|x - 2| - 5| = 3$

$$\implies \begin{cases} 2|x - 2| - 5 = 3 \implies |x - 2| = 4 \implies \begin{cases} x - 2 = 4 \implies x = 6 \\ x - 2 = -4 \implies x = -2 \notin \mathbb{N} \end{cases} \\ 2|x - 2| - 5 = -3 \implies |x - 2| = 1 \implies \begin{cases} x = 3 \\ x = 1 \end{cases} \end{cases}$$



情况二: $|2|x - 2| - 5| = 2$

$$\Rightarrow \begin{cases} 2|x - 2| - 5 = 2 \Rightarrow |x - 2| = \frac{7}{2} \notin \mathbb{Z} \\ 2|x - 2| - 5 = -2 \Rightarrow |x - 2| = \frac{3}{2} \notin \mathbb{Z} \end{cases}$$

情况三: $|2|x - 2| - 5| = 1$

$$\Rightarrow \begin{cases} 2|x - 2| - 5 = 1 \Rightarrow |x - 2| = 3 \Rightarrow \begin{cases} x = 5 \\ x = -1 \notin \mathbb{N} \end{cases} \\ 2|x - 2| - 5 = -1 \Rightarrow |x - 2| = 2 \Rightarrow \begin{cases} x = 4 \\ x = 0 \notin \mathbb{N} \end{cases} \end{cases}$$

情况四: $|2|x - 2| - 5| = 0$

$$\Rightarrow |x - 2| = \frac{5}{2} \notin \mathbb{Z}$$

综上, 正整数解为

$$x = 1, 3, 4, 5, 6$$

7. 若实数 a 可使得对任意实数 x , 不等式

$$|4x - 3a| + |5x - 4a| \geq a^2$$

恒成立, 求 a 的范围。

记

$$f(x) = |4x - 3a| + |5x - 4a| = 4 \left(\left| x - \frac{3}{4}a \right| + \left| x - \frac{4}{5}a \right| \right) + \left| x - \frac{4}{5}a \right|$$

由三角不等式得

$$f(x) \geq 4 \left| \left(x - \frac{3}{4}a \right) - \left(x - \frac{4}{5}a \right) \right| + \left| x - \frac{4}{5}a \right| = \frac{|a|}{5} + \left| x - \frac{4}{5}a \right|$$

取 $x = \frac{4}{5}a$, 得 $f(x)$ 的最小值为 $\frac{|a|}{5}$, 欲使不等式对任意 x 恒成立需有

$$\frac{|a|}{5} \geq |a|^2 \Rightarrow |a|(5|a| - 1) \leq 0 \Rightarrow 0 \leq |a| \leq \frac{1}{5}$$

8. 已知实数 a, b 满足 $a + b \geq 3$, 试证

$$|a - 2b^2| + |b - 2a^2| \geq 6$$

由三角不等式,

$$\begin{aligned} |a - 2b^2| + |b - 2a^2| &\geq |a - 2b^2 + b - 2a^2| \\ &= |2(a^2 + b^2) - (a + b)| \\ &\geq 2(a^2 + b^2) - (a + b) \\ &= (a + b)^2 + (a - b)^2 - (a + b) \\ &\geq 3^2 - 3 = 6 \end{aligned}$$

故原不等式得证。

9. 若二次实系数多项式函数 $f(x)$ 满足

$$\begin{cases} -1 \leq f(1) \leq 3 \\ 6 \leq f(2) \leq 10 \\ 2 \leq f(4) \leq 24 \end{cases}$$

求 $f(7)$ 的最大值。

设 $f(x) = ax^2 + bx + c$, 则

$$f(1) = a + b + c, \quad f(2) = 4a + 2b + c, \quad f(4) = 16a + 4b + c$$

解得

$$a = \frac{1}{3}f(1) - \frac{1}{2}f(2) + \frac{1}{6}f(4), \quad b = -2f(1) + \frac{5}{2}f(2) - \frac{1}{2}f(4), \quad c = \frac{8}{3}f(1) - 2f(2) + \frac{1}{3}f(4)$$

因此

$$f(7) = 49a + 7b + c = 5f(1) - 9f(2) + 5f(4)$$

取 $f(1) = 3, f(2) = 6, f(4) = 24$, 得

$$f(7)_{\max} = 5 \cdot 3 - 9 \cdot 6 + 5 \cdot 24 = 81$$

10. 若 $a < b$, 已知对任意实数 x , 均有 $ax^2 + bx + c \geq 0$, 且 $m < \frac{4a + 3b + 2c}{b - a}$ 恒成立, 求实数 m 的范围。

由 $ax^2 + bx + c \geq 0$ ($\forall x$), 可知二次项系数满足

$$a > 0, \quad b^2 - 4ac \leq 0$$

写成

$$\frac{4a + 3b + 2c}{b - a} = \frac{4 \cdot \frac{a}{b} + 3 + 2 \cdot \frac{c}{b}}{1 - \frac{a}{b}}$$

记 $t = \frac{a}{b}$, 则 $0 < t < 1$ 。由 $b^2 - 4ac \leq 0$ 得 $\frac{c}{b} \geq \frac{b}{4a} = \frac{1}{4t}$, 于是

$$\frac{4a + 3b + 2c}{b - a} \geq \frac{4t + 3 + 2 \cdot \frac{1}{4t}}{1 - t} = \frac{4t + 3 + \frac{1}{2t}}{1 - t}$$

记

$$k = \frac{4t + 3 + \frac{1}{2t}}{1 - t}$$

其中 $0 < t < 1$, 整理得关于 t 的二次方程

$$(2k + 8)t^2 + (6 - 2k)t + 1 = 0$$

为使该方程在 $0 < t < 1$ 上有解, 判别式必须非负,

$$(6 - 2k)^2 - 4(2k + 8) \geq 0 \Rightarrow k^2 - 8k + 1 \geq 0$$

解得

$$k \geq 4 + \sqrt{15} > 0$$

于是对任意符合条件的 a, b, c , 都有

$$\frac{4a + 3b + 2c}{b - a} \geq 4 + \sqrt{15}$$

由题意 m 满足 $m < \frac{4a + 3b + 2c}{b - a}$ 恒成立, 故

$$m < 4 + \sqrt{15}$$

11. 已知 $a > 0, b > 0, a + b = 1$, 证明不等式

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{ab} \geq 8$$

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned}\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{ab} &= \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{a+b}{ab} \\ &= 2 \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \\ &= 2 \cdot \frac{a+b}{ab} \\ &= 4 + 2 \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) \\ &\geq 4 + 2 \cdot 2 = 8\end{aligned}$$

12. 设 a, b 均为正数, 求

$$f(a, b) = ab(72 - 3a - 4b)$$

的最大值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned}f(a, b) &= \frac{1}{12} \cdot 3a \cdot 4b \cdot (72 - 3a - 4b) \\ &\leq \frac{1}{12} \left(\frac{3a + 4b + 72 - 3a - 4b}{3} \right)^3 = 1152\end{aligned}$$

当 $a = b = \frac{1}{2}$ 时等号成立。

13. 设 a, b, c 为正实数且满足 $a + b^2 + c^3 = 11$, 求 abc 的最大值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned}11 &= \frac{a}{6} + \frac{a}{6} + \frac{a}{6} + \frac{a}{6} + \frac{a}{6} + \frac{a}{6} + \frac{b^2}{3} + \frac{b^2}{3} + \frac{b^2}{3} + \frac{c^3}{2} + \frac{c^3}{2} \\ &= 11 \sqrt[11]{\left(\frac{a}{6}\right)^6 \left(\frac{b^2}{3}\right)^3 \left(\frac{c^3}{2}\right)^2} = 11 \sqrt[11]{\frac{(abc)^6}{6^6 \cdot 27 \cdot 4}}\end{aligned}$$

即

$$abc \leq 6\sqrt{3} \sqrt[3]{2}$$

当且仅当

$$\frac{a}{6} = \frac{b^2}{3} = \frac{c^3}{2} = 1,$$

即 $a = 6$, $b = \sqrt{3}$, $c = \sqrt[3]{2}$ 时等号成立。

14. 实数 x, y, z 满足 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, 求 $\sqrt{2}xy + yz$ 的最大值。

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{\sqrt{3}}{2}x^2 + \frac{1}{\sqrt{3}}y^2 \geq 2\sqrt{\frac{1}{2}x^2y^2} = \sqrt{2}xy,$$

$$\frac{1}{2\sqrt{3}}y^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}z^2 \geq 2\sqrt{\frac{1}{4}y^2z^2} = yz.$$

将两式相加得

$$\sqrt{2}xy + yz \leq \frac{\sqrt{3}}{2}(x^2 + y^2 + z^2) = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

15. 设 x, y, z 为不全为 0 的实数, 求分式

$$\frac{xy + 2yz}{x^2 + y^2 + z^2}$$

的最大值。

由 AM-GM 不等式,

$$x^2 + \frac{1}{5}y^2 \geq 2\sqrt{\frac{1}{5}x^2y^2} = \frac{2}{\sqrt{5}}xy$$

同理,

$$\frac{4}{5}y^2 + z^2 \geq 2\sqrt{\frac{4}{5}y^2z^2} = \frac{4}{\sqrt{5}}yz$$

两式相加得

$$x^2 + y^2 + z^2 \geq \frac{2}{\sqrt{5}}(xy + 2yz) \Rightarrow \frac{xy + 2yz}{x^2 + y^2 + z^2} \leq \frac{\sqrt{5}}{2}.$$

16. 求

$$f(x) = \frac{x^4 + 2x^3 + 3x^2 + 2x + 10}{x^2 + x + 1}$$

的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} f(x) &= x^2 + x + 1 + \frac{9}{x^2 + x + 1} \\ &\geq 2\sqrt{(x^2 + x + 1) \cdot \frac{9}{x^2 + x + 1}} = 6 \end{aligned}$$

当 $(x^2 + x + 1)^2 = 9$ 即 $x = 2$ 或 $x = -1$ 时, $f(x)$ 取得最大值 6

17. 求函数

$$y = \frac{4^x + 1}{2^x + 1}$$

的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} y &= \frac{4^x - 1}{2^x + 1} + \frac{2}{2^x + 1} = 2^x + 1 + \frac{2}{2^x + 1} - 2 \\ &\geq 2\sqrt{(2^x + 1) \cdot \frac{2}{2^x + 1}} - 2 = 2\sqrt{2} - 2 \end{aligned}$$

当 $(2^x + 1)^2 = 2$ 即 $x = \log_2(\sqrt{2} - 1)$ 时, y 取得最大值 $2\sqrt{2} - 2$

18. 求函数

$$f(x) = \log 2 \log 5 - \log 2x \log 5x$$

的最大值。

$$\begin{aligned} f(x) &= \log 2 \log 5 - (\log 2 + \log x)(\log 5 + \log x) \\ &= -(\log 2 + \log 5) \log x - \log^2 x \\ &= -\log x - \log^2 x \\ &= -\left(\log x + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \leq \frac{1}{4} \end{aligned}$$

当 $\log x = -\frac{1}{2}$ 即 $x = \frac{\sqrt{10}}{10}$ 时, $f(x)$ 取得最大值 $\frac{1}{4}$.

19. 求函数

$$f(x, y) = x^2 + 2xy + 2y^2 + 2x + 4y + 5$$

的最小值。

配方求最小值:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= x^2 + 2xy + 2y^2 + 2x + 4y + 5 \\ &= x^2 + 2(y + 1)x + (y + 1)^2 + y^2 + 2y + 4 \\ &= [x + (y + 1)]^2 + (y + 1)^2 + 3 \geq 3 \end{aligned}$$

当 $x = 0, y = -1$ 时 $f(x, y)$ 取到最小值 3。

20. $x, y \in \mathbb{R}$, 求

$$x^4 + 4x^3 + 8x^2 + 4xy + 6x + 4y^2 + 10$$

的最小值。

先配 y 项, 写成

$$f(x, y) = (x + 2y)^2 + x^4 + 4x^3 + 7x^2 + 6x + 10$$

再用火眼金睛注意到

$$x^4 + 4x^3 + 7x^2 + 6x + 2 = (x + 1)^2(x^2 + 2x + 2)$$

故原式为

$$(x + 2y)^2 + (x + 1)^2(x^2 + 2x + 2) + 8 \geq 8$$

当 $x = -1, y = \frac{1}{2}$ 时, $f(x, y)$ 取得最小值 8.

21. 已知 $x, y > 0$, 证明

$$\sqrt{x^2 + y^2} > \sqrt[3]{x^3 + y^3}$$

发现 $\sqrt{x^2 + y^2} > \sqrt[3]{x^3 + y^3}$ 等价于

$$x^6 + 3x^4y^2 + 3x^2y^4 + y^6 > x^6 + 2x^3y^3 + y^6 \Leftrightarrow x^2y^2(3x^2 - 2xy + 3y^2) > 0$$

其中关于 x 的二次函数 $3x^2 - 2xy + 3y^2$ 判别式为

$$\Delta = 4y^2 - 4(3)(3)(y^2) = -32y^2 < 0$$

故 $3x^2 - 2xy + 3y^2 > 0$, 得证

$$x^2y^2(3x^2 - 2xy + 3y^2) > 0$$

22. 已知实数 a, b, c 满足 $c < b < a, a + b + c = 1, a^2 + b^2 + c^2 = 1$, 求证

$$1 < a + b < \frac{4}{3}.$$

由 $a^2 + b^2 + c^2 = 1, a + b + c = 1$ 可得

$$ab = \frac{(a+b)^2 - (a^2 + b^2)}{2} = \frac{(1-c)^2 - (1-c^2)}{2} = c^2 - c.$$

所以 $a + b = 1 - c$, 且 a, b 是方程

$$x^2 - (1-c)x + c^2 - c = 0$$

的两个相异实根, 其中判别式为

$$\Delta = (1-c)^2 - 4(c^2 - c) > 0 \Rightarrow -\frac{1}{3} < c < 1.$$

又有

$$(c-a)(c-b) = c^2 - c(a+b) + ab = c^2 - c(1-c) + c^2 - c = 3c^2 - 2c.$$

因为 $c < b < a$, 所以 $c - a < 0, c - b < 0$, 故 $(c-a)(c-b) > 0$, 即

$$3c^2 - 2c > 0 \implies c < 0 \text{ 或 } c > \frac{2}{3}.$$

综合 $-\frac{1}{3} < c < 1$ 与上述条件, 得到

$$-\frac{1}{3} < c < 0 \text{ 或 } \frac{2}{3} < c < 1.$$

若 $\frac{2}{3} < c < 1$, 则

$$0 < a + b < \frac{1}{3}$$

但由 $c < b < a$ 得 $a + b > c > \frac{2}{3}$, 矛盾, 因此只能有 $-\frac{1}{3} < c < 0$, 则

$$1 < a + b < \frac{4}{3}$$

23. 已知 a, b, c 为正实数, 求

$$\left\lfloor \frac{a+b}{c} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{b+c}{a} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{c+a}{b} \right\rfloor$$

的最小值。

由 $[x] > x - 1$, $x \notin \mathbb{Z}$ 及 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} S &= \left\lfloor \frac{a+b}{c} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{b+c}{a} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{c+a}{b} \right\rfloor > \frac{a}{b} + \frac{b}{a} + \frac{b}{c} + \frac{c}{b} + \frac{c}{a} + \frac{a}{c} - 3 \\ &\geq 2 + 2 + 2 - 3 = 3 \end{aligned}$$

由于 $S \in \mathbb{Z}$, 最小值为 $S_{\min} = 4$, 例如可在 $a = 6, b = 8, c = 9$ 时取得。

24. 已知 $x > 0$, 求

$$x[x] + \left\lfloor \frac{1}{x} \right\rfloor + x + \frac{1}{x} + x[x] + \left\lceil \frac{1}{x} \right\rceil$$

的最小值。

设

$$f(x) = x[x] + \left\lfloor \frac{1}{x} \right\rfloor + x + \frac{1}{x} + x[x] + \left\lceil \frac{1}{x} \right\rceil$$

观察到 $f(1) = 6$, 若 $x > 1$, 即 $0 < \frac{1}{x} \leq 1$,

$$x[x] + \left\lfloor \frac{1}{x} \right\rfloor \geq x > 1, \quad x[x] + \left\lceil \frac{1}{x} \right\rceil \geq 2x + 1 > 3, \quad x + \frac{1}{x} > 2$$

于是当 $x > 1$, $f(x) > 6 = f(1)$ 。若 $0 < x \leq \frac{1}{2}$, 即 $2 \leq \frac{1}{x}$

$$x[x] + \left\lfloor \frac{1}{x} \right\rfloor \geq 2, \quad x[x] + \left\lceil \frac{1}{x} \right\rceil \geq x + 2 > 2, \quad x + \frac{1}{x} > 2$$

于是当 $0 < x \leq \frac{1}{2}$, $f(x) > 6 = f(1)$ 。若 $\frac{1}{2} < x < 1$, 即 $1 < \frac{1}{x} < 2$,

$$f(x) = 1 + x + \frac{1}{x} + x + 2 = 3 + 2x + \frac{1}{x} \geq 3 + 2\sqrt{2}$$

等号成立当且仅当

$$2x = \frac{1}{x}$$

即 $x = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 。由于 $3 + 2\sqrt{2} < 6$, $f(x)$ 的最小值为 $3 + 2\sqrt{2}$ 。

25. 若实数 x, y 满足 $4x^2 - 2xy + 2y^2 = 1$, 则 $3x^2 + xy + y^2$ 的最大值与最小值的和为

(待解)

26. 求函数

$$y = \sqrt{x^2 - 3x + 2} + \sqrt{2 + 3x - x^2}$$

的最大值和最小值。

考虑

$$1 = \frac{\sqrt{x^2 - 3x + 2}}{y} + \frac{\sqrt{2 + 3x - x^2}}{y}$$

令

$$\cos^2 \alpha = \frac{\sqrt{x^2 - 3x + 2}}{y}, \sin^2 \alpha = \frac{\sqrt{2 + 3x - x^2}}{y}$$

则

$$\cos^4 \alpha + \sin^4 \alpha = \frac{x^2 - 3x + 2}{y^2} + \frac{2 + 3x - x^2}{y^2} = \frac{4}{y^2}$$

于是

$$y^2 = \frac{4}{\cos^4 \alpha + \sin^4 \alpha} = \frac{8}{2 - \sin^2 2\alpha}$$

由于 $0 \leq \sin^2 2\alpha \leq 1$, 所以

$$4 \leq y^2 \leq 8 \Rightarrow 2 \leq y \leq 2\sqrt{2}$$

27. 若

$$x^6 + \frac{y^3}{3} + \frac{z}{4} = 1,$$

求 $x^{12}y^6z^3$ 的最大值, 其中 $x, y, z \in \mathbb{R}^+$ 。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} 1 &= x^6 + \frac{y^3}{3} + \frac{z}{4} = \frac{x^6}{2} + \frac{x^6}{2} + \frac{y^3}{6} + \frac{y^3}{6} + \frac{z}{12} + \frac{z}{12} + \frac{z}{12} \\ &\geq 7 \sqrt[7]{\frac{x^{12}y^6z^3}{2^2 \cdot 6^2 \cdot 12^3}} \end{aligned}$$

因此

$$x^{12}y^6z^3 \leq \frac{12^5}{7^7},$$

等号成立当且仅当

$$\frac{x^6}{2} = \frac{y^3}{6} = \frac{z}{12} = \frac{1}{7}$$

即

$$x = \sqrt[6]{\frac{2}{7}}, \quad y = \sqrt[3]{\frac{6}{7}}, \quad z = \frac{12}{7}$$

28. 已知正实数 x, y, z , 求函数

$$f(x, y, z) = \frac{x}{y} + \sqrt{\frac{y}{z}} + \sqrt[3]{\frac{z}{x}},$$

的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} f(x, y, z) &= \frac{x}{y} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{y}{z}} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{y}{z}} + \frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{z}{x}} + \frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{z}{x}} + \frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{z}{x}} \\ &\geqslant 6 \cdot \sqrt[6]{\frac{x}{y} \cdot \frac{1}{2}\sqrt{\frac{y}{z}} \cdot \frac{1}{2}\sqrt{\frac{y}{z}} \cdot \frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{z}{x}} \cdot \frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{z}{x}} \cdot \frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{z}{x}}} \\ &= 6 \cdot \sqrt[6]{\frac{1}{2^2 \cdot 3^3} \cdot \frac{xyz}{yzx}} = \sqrt[3]{4} \cdot \sqrt{3} \end{aligned}$$

等号成立当且仅当

$$\frac{x}{y} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{y}{z}} = \frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{z}{x}} \Rightarrow x : y : z = 2 : 2\sqrt[3]{2}\sqrt{3} : 3\sqrt{3}$$

29. 已知 x, y, z 均为正实数, 求

$$\frac{xy + yz}{x^2 + y^2 + z^2}$$

的最大值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} \frac{xy + yz}{x^2 + y^2 + z^2} &= \frac{\frac{x}{y} + \frac{z}{y}}{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1 + \left(\frac{z}{y}\right)^2} \\ &= \frac{\frac{x}{y} + \frac{z}{y}}{\left[\left(\frac{x}{y}\right)^2 + \frac{1}{2}\right] + \left[\left(\frac{z}{y}\right)^2 + \frac{1}{2}\right]} \\ &\leqslant \frac{\frac{x}{y} + \frac{z}{y}}{2\left(\frac{x}{y}\right)\sqrt{\frac{1}{2}} + 2\left(\frac{z}{y}\right)\sqrt{\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \end{aligned}$$

等号成立当且仅当

$$\frac{1}{2} = \left(\frac{x}{y}\right)^2 = \left(\frac{z}{y}\right)^2 \Rightarrow x = z = \frac{\sqrt{2}}{2}y$$

30. 证明

$$x + \frac{4}{x-1} \geqslant 2\sqrt{x+3},$$

其中 $x > 1$ 。

利用比较法。令 $u = x - 1 > 0$, 原不等式即

$$u + 1 + \frac{4}{u} \geqslant 2\sqrt{u+4},$$

现在比较 $u + 1 + \frac{4}{u}$ 与 $2\sqrt{u+4}$ 的大小,

$$\frac{u + 1 + \frac{4}{u}}{2\sqrt{u+4}} = \frac{u^2 + (u+4)}{2u\sqrt{u+4}} \geqslant \frac{2\sqrt{u^2(u+4)}}{2u\sqrt{u+4}} = 1$$

等号在 $u^2 = u + 4$ 即 $u = \frac{1 + \sqrt{17}}{2}$ 时成立, 故原不等式得证。

31. 已知 $x_1 + x_2 = 2$, 证

$$\frac{1}{1+x_1} + \frac{1}{1+x_2} \geqslant \frac{x_1}{1+x_1^2} + \frac{x_2}{1+x_2^2},$$

其中 x_1, x_2 都是正数。

由右式

$$\frac{x_1}{1+x_1^2} + \frac{x_2}{1+x_2^2} = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + x_1} + \frac{1}{\frac{1}{x_2} + x_2} \leqslant \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

由左式

$$\frac{1}{1+x_1} + \frac{1}{1+x_2} \geqslant 2\sqrt{\frac{1}{(1+x_1)(1+x_2)}}$$

考虑分母

$$(1+x_1)(1+x_2) = 1 + x_1 + x_2 + x_1x_2 = 1 + 2 + x_1(2-x_1) = -x_1^2 + 2x_1 + 3 = -(x_1-1)^2 + 4 \leqslant 4$$

于是

$$\frac{1}{1+x_1} + \frac{1}{1+x_2} \geqslant 2\sqrt{\frac{1}{4}} = 1$$

因此左式 $\geqslant 1 \geqslant$ 右式, 原不等式成立, 等号成立当且仅当 $x_1 = x_2 = 1$ 。

32. 若 a, b, c 是 $\triangle ABC$ 的三边, 证明

$$\frac{1}{4} < \frac{(a+b)(b+c)(c+a)}{(a+b+c)^3} \leq \frac{8}{27}$$

由 AM-GM 不等式,

$$(a+b) + (b+c) + (c+a) \geq 3\sqrt[3]{(a+b)(b+c)(c+a)}$$

于是有

$$\frac{(a+b)(b+c)(c+a)}{(a+b+c)^3} \leq \frac{8}{27}$$

等号成立当且仅当 $a = b = c$, 又

$$a+b > c \Rightarrow 2a+2b > a+b+c \Rightarrow \frac{a+b}{a+b+c} > \frac{1}{2},$$

同理可得

$$\frac{b+c}{a+b+c} > \frac{1}{2}, \quad \frac{c+a}{a+b+c} > \frac{1}{2}$$

设

$$\frac{a+b}{a+b+c} = \frac{1+x}{2}, \quad \frac{b+c}{a+b+c} = \frac{1+y}{2}, \quad \frac{c+a}{a+b+c} = \frac{1+z}{2}$$

由于

$$\frac{a+b}{a+b+c} + \frac{b+c}{a+b+c} + \frac{c+a}{a+b+c} = 2 \Rightarrow x+y+z = 1$$

于是

$$\frac{(a+b)(b+c)(c+a)}{(a+b+c)^3} = \frac{(1+x)(1+y)(1+z)}{8} > \frac{1+x+y+z}{8} = \frac{1}{4}$$

故得证。

33. 若 $a > b > c$, 求证

$$\frac{1}{a-b} + \frac{1}{b-c} \geq \frac{4}{a-c}$$

因为 $a-c > 0$, 由柯西不等式,

$$(a-c) \left(\frac{1}{a-b} + \frac{1}{b-c} \right) = [(a-b) + (b-c)] \left(\frac{1}{a-b} + \frac{1}{b-c} \right) \geq (1+1)^2 = 4$$

故原不等式得证, 当 $a-b = b-c$, 即 $b = \frac{a+c}{2}$ 时等号成立。

34. 证

$$(x+y+z)\left(\frac{1}{y+z} + \frac{1}{x+z} + \frac{1}{x+y}\right) \geq \frac{9}{2}$$

由柯西不等式,

$$\begin{aligned} & (x+y+z)\left(\frac{1}{y+z} + \frac{1}{x+z} + \frac{1}{x+y}\right) \\ &= \frac{1}{2}[(x+y) + (y+z) + (z+x)]\left(\frac{1}{y+z} + \frac{1}{x+z} + \frac{1}{x+y}\right) \\ &\geq \frac{1}{2}(1+1+1)^2 = \frac{9}{2} \end{aligned}$$

等号成立当且仅当 $x = y = z$ 。

35. 设 a, b 为不相等的正数, 试证

$$(a+b)(a^3+b^3) > (a^2+b^2)^2$$

由柯西不等式, 左式改写为

$$[(\sqrt{a})^2 + (\sqrt{b})^2][(\sqrt{a^3})^2 + (\sqrt{b^3})^2] \geq (\sqrt{a} \cdot \sqrt{a^3} + \sqrt{b} \cdot \sqrt{b^3})^2 = (a^2 + b^2)^2$$

若等号成立, 则必有一实数 k 存在, 使得 $\sqrt{a^3} = k\sqrt{a}$, $\sqrt{b^3} = k\sqrt{b}$ 于是 $a = b = k$, 与 a, b 不相等的假设矛盾, 故得证

$$(a+b)(a^3+b^3) > (a^2+b^2)^2$$

36. 已知 a, b, c 为正实数, 求证

$$\frac{a}{b+c} + \frac{b}{c+a} + \frac{c}{a+b} \geq \frac{3}{2}$$

由柯西不等式,

$$\begin{aligned}& \frac{a}{b+c} + \frac{b}{c+a} + \frac{c}{a+b} + 3 \\&= \frac{a+b+c}{b+c} + \frac{b+c+a}{c+a} + \frac{c+a+b}{a+b} \\&= (a+b+c) \left(\frac{1}{b+c} + \frac{1}{c+a} + \frac{1}{a+b} \right) \\&= \frac{1}{2} [(b+c) + (c+a) + (a+b)] \left(\frac{1}{b+c} + \frac{1}{c+a} + \frac{1}{a+b} \right) \\&\geq \frac{1}{2} (1+1+1)^2 = \frac{9}{2}\end{aligned}$$

故原不等式得证, 等号成立当且仅当 $a=b=c$ 。

37. 已知 a, b, c 为 $\triangle ABC$ 的三边, 求证

$$\frac{a^2}{b+c-a} + \frac{b^2}{c+a-b} + \frac{c^2}{a+b-c} \geq a+b+c.$$

由柯西不等式,

$$\begin{aligned}& (a+b+c) \left(\frac{a^2}{b+c-a} + \frac{b^2}{c+a-b} + \frac{c^2}{a+b-c} \right) \\&= [(b+c-a) + (c+a-b) + (a+b-c)] \left(\frac{a^2}{b+c-a} + \frac{b^2}{c+a-b} + \frac{c^2}{a+b-c} \right) \\&\geq (a+b+c)^2\end{aligned}$$

整理即得原不等式, 等号成立当且仅当 $a=b=c$ 。

38. 当 $\alpha, \beta \in \left[0, \frac{\pi}{4}\right]$, 求

$$\sin(\alpha - \beta) + 2\sin(\alpha + \beta)$$

的最大值。

由柯西不等式,

$$\begin{aligned}\sin(\alpha - \beta) + 2\sin(\alpha + \beta) &= 3\sin\alpha\cos\beta + \sin\beta\cos\alpha \\ &\leq \sqrt{(9\sin^2\alpha + \cos^2\alpha)(\cos^2\beta + \sin^2\beta)} \\ &= \sqrt{8\sin^2\alpha + 1} \\ &\leq \sqrt{8\sin^2\frac{\pi}{4} + 1} = \sqrt{5}\end{aligned}$$

等号在 $\alpha = \frac{\pi}{4}, \beta = \tan^{-1}\frac{1}{3}$ 成立。

39. 若 $x, y, z \in \mathbb{R}^+$ 满足

$$\frac{1}{x^3} + \frac{3}{y^3} + \frac{12}{z^3} = 1,$$

求 xy^2z 的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$1 = \frac{1}{x^3} + \frac{3}{2y^2} + \frac{3}{2y^2} + \frac{12}{z} \geq 4\sqrt[4]{\frac{27}{(xy^2z)^3}}$$

即

$$xy^2z \geq 12\sqrt[3]{4}$$

等号成立当且仅当 $x = \sqrt[3]{4}, y = \sqrt[3]{6}, z = 2\sqrt[3]{6}$ 。

40. 求多元函数

$$f(x, y, z) = \sqrt[4]{\frac{2x}{y}} + \sqrt{\frac{3y}{2z}} + \frac{z}{2x}$$

的最小值, 其中 $D_f = \mathbb{R}^+$ 。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned}f(x, y, z) &= \frac{1}{4}\sqrt[4]{\frac{2x}{y}} + \frac{1}{4}\sqrt[4]{\frac{2x}{y}} + \frac{1}{4}\sqrt[4]{\frac{2x}{y}} + \frac{1}{4}\sqrt[4]{\frac{2x}{y}} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3y}{2z}} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3y}{2z}} + \frac{z}{2x} \\ &= 7\sqrt[7]{\frac{1}{4^4} \cdot \frac{1}{2^2} \cdot 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2}} = \frac{7}{4}\sqrt[7]{24}\end{aligned}$$

等号成立当且仅当

$$\frac{1}{4}\sqrt[4]{\frac{2x}{y}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3y}{2z}} = \frac{z}{2x} \Rightarrow x : y : z = 2 \cdot 24^{\frac{4}{7}} : 4 : 24^{\frac{5}{7}}$$

41. 设 x, y, z 为实数, 若

$$\frac{(x-1)^2}{9} + \frac{(y+1)^2}{4} + \frac{(z-2)^2}{3} = 1,$$

求 $x + y + z$ 之最大值及最小值。

由柯西不等式,

$$1 = \frac{(x-1)^2}{9} + \frac{(y+1)^2}{4} + \frac{(z-2)^2}{3} \geq \frac{(x-1+y+1+z-2)^2}{9+4+3}$$

给出

$$(x-1+y+1+z-2)^2 \leq 16 \Rightarrow -2 \leq x+y+z \leq 6$$

等号成立当且仅当比例相等, 即

$$\frac{x-1}{9} = \frac{y+1}{4} = \frac{z-2}{3} = k$$

代入约束条件:

$$9k^2 + 4k^2 + 3k^2 = 1 \Rightarrow k = \pm \frac{1}{4}$$

当 $k = \frac{1}{4}$ 时, $x = \frac{13}{4}, y = 0, z = \frac{11}{4}$, 取得最大值 6, 当 $k = -\frac{1}{4}$ 时, $x = -\frac{5}{4}, y = -2, z = \frac{5}{4}$, 此时取得最小值 -2。

42. 设 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$, 试求

$$\frac{3}{\cos \theta} + \frac{2}{\sin \theta}$$

的最小值。

由赫尔德不等式,

$$\left(\frac{3}{\cos \theta} + \frac{2}{\sin \theta} \right)^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \geq (\sqrt[3]{9} + \sqrt[3]{4})^3$$

故最小值为 $(\sqrt[3]{9} + \sqrt[3]{4})^{\frac{3}{2}}$, 当 $\tan \theta = \sqrt[3]{\frac{2}{3}}$ 时等号成立。不安全, 赫尔德不等式不给出最小值

43. 设实数 x, y 满足

$$x^2 + y^2 = 6x - 4y - 9,$$

求 $2x - 3y$ 的最大值和最小值。

原方程配方得圆的方程:

$$(x-3)^2 + (y+2)^2 = 4$$

设 $x = 3 + 2\cos\alpha, y = -2 + 2\sin\alpha$, 则

$$\begin{aligned} 2x - 3y &= 2(3 + 2\cos\alpha) - 3(-2 + 2\sin\alpha) \\ &= 12 + 4\cos\alpha - 6\sin\alpha \\ &= 12 + 2\sqrt{13}\sin(\phi - \alpha) \end{aligned}$$

其中 ϕ 满足

$$\sin\phi = \frac{2}{\sqrt{13}}, \cos\phi = \frac{3}{\sqrt{13}},$$

当 $\sin(\phi - \alpha) = 1$ 时, 取得最大值 $12 + 2\sqrt{13}$, 此时

$$x = 3 + \frac{4}{\sqrt{13}}, y = -2 - \frac{6}{\sqrt{13}}$$

当 $\sin(\phi - \alpha) = -1$ 时, 取得最小值 $12 - 2\sqrt{13}$, 此时

$$x = 3 - \frac{4}{\sqrt{13}}, y = -2 + \frac{6}{\sqrt{13}}$$

44. 若 a, b 均为实数且满足

$$a\sqrt{1-b^2} + b\sqrt{1-a^2} = 1,$$

求 $a^2 + b^2$ 的值。

由根号的定义可知

$$1 - a^2 \geq 0, 1 - b^2 \geq 0 \Rightarrow a^2 \leq 1, b^2 \leq 1$$

设

$$a = \sin\alpha, \quad b = \sin\beta, \quad \alpha, \beta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$

原式变为

$$\sin\alpha \cos\beta + \sin\beta \cos\alpha = \sin(\alpha + \beta) = 1$$

由此得

$$\alpha + \beta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$$

则

$$b = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \cos\alpha$$

因此

$$a^2 + b^2 = \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

(移走)

由根号的定义可知

$$1 - a^2 \geq 0, 1 - b^2 \geq 0 \Rightarrow a^2 \leq 1, b^2 \leq 1$$

由柯西不等式,

$$1 = \left(a\sqrt{1-b^2} + b\sqrt{1-a^2} \right)^2 \leq (a^2 + b^2)(1 - b^2 + 1 - a^2)$$

设 $x = a^2 + b^2$, 上式变为

$$1 \leq x(2 - x) \Rightarrow x^2 - 2x + 1 \leq 0 \Rightarrow (x - 1)^2 \leq 0$$

由于实数的平方非负, 因此上述不等式只有在等号成立时有解

$$(x - 1)^2 = 0 \Rightarrow a^2 + b^2 = x = 1$$

45. 当点 P 沿着直线 $y = 2x + 6$ 移动, 点 Q 在椭圆

$$\frac{x^2}{6} + \frac{y^2}{4} = 1$$

运动时, 求线段 PQ 的长度最小值。

线段 PQ 的最小值即为平行于已知直线的椭圆切线与该直线之间的距离。设与 $y = 2x + 6$ 平行的椭圆切线方程为 $y = 2x + k$, 代入椭圆方程整理得,

$$2x^2 + 3(4x^2 + 4kx + k^2) = 12 \Rightarrow 14x^2 + 12kx + (3k^2 - 12) = 0$$

令判别式 $\Delta = (12k)^2 - 4(14)(3k^2 - 12) = 0$:

$$\Delta = (12k)^2 - 4(14)(3k^2 - 12) = 144k^2 - 168k^2 + 672 = 0 \Rightarrow k = \pm 2\sqrt{7}$$

取较近的切线 $y = 2x + 2\sqrt{7}$, 故

$$PQ_{\min} = \frac{|6 - 2\sqrt{7}|}{\sqrt{2^2 + (-1)^2}} = \frac{6 - 2\sqrt{7}}{\sqrt{5}} = \frac{6\sqrt{5} - 2\sqrt{35}}{5}$$

(移走)

46. 若 a, b 都是正数, 证明

$$a + b \geq \sqrt[3]{a^2b} + \sqrt[3]{b^2a}$$

由因式分解得

$$\begin{aligned} a + b - \left(\sqrt[3]{a^2b} + \sqrt[3]{b^2a} \right) &= (\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{b})(\sqrt[3]{a^2} - \sqrt[3]{ab} + \sqrt[3]{b^2}) - \sqrt[3]{ab}(\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{b}) \\ &= (\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{b})(\sqrt[3]{a^2} - 2\sqrt[3]{ab} + \sqrt[3]{b^2}) \\ &= (\sqrt[3]{a} + \sqrt[3]{b})(\sqrt[3]{a} - \sqrt[3]{b})^2 \geq 0 \end{aligned}$$

故原不等式成立。

由赫尔德不等式,

$$(a + b)(a + b)(b + a) \geq \left(\sqrt[3]{a^2b} + \sqrt[3]{b^2a} \right)^3$$

故原不等式成立。

47. 设 $a, b, c \in \mathbb{R}$, 证明

$$a^2 + ac + c^2 + 3b(a + b + c) \geq 0.$$

欲证

$$3b^2 + 3(a + c)b + (a^2 + ac + c^2) \geq 0$$

对于二次函数 $f(b) = 3b^2 + 3(a + c)b + (a^2 + ac + c^2)$, 其判别式为

$$\Delta = [3(a + c)]^2 - 4(3)(a^2 + ac + c^2) = -3(a - c)^2$$

因为 $-3(a - c)^2 \leq 0$ 且二次项系数 $3 > 0$, 故该二次式恒大于或等于 0, 故原不等式得证。

由配方法,

$$a^2 + ac + c^2 + 3b(a + b + c) = 3 \left(b + \frac{a + c}{2} \right)^2 + \frac{1}{4}(a - c)^2 \geq 0$$

48. 已知 x, y, z 是正实数, 求

$$\frac{x}{y} + \left(\frac{y}{z}\right)^2 + \left(\frac{z}{x}\right)^3$$

的最小值。

由 AM-GM 不等式, 原式即

$$6 \cdot \frac{x}{6y} + 3 \cdot \frac{y^2}{3z^2} + 2 \cdot \frac{z^3}{2x^3} \geq 11 \sqrt[11]{\frac{1}{6^6 \cdot 3^3 \cdot 2^2}} = \frac{11}{6} \sqrt[11]{72}$$

49. 设 a, b, c, d 为实数, 满足 $a^2 + b^2 = c^2 + d^2$, 求

$$\frac{20bc + 14bd + 20ad - 14ac}{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}$$

的最大值。

由柯西不等式,

$$(a(20d - 14c) + b(20c + 14d))^2 \leq (a^2 + b^2)((20d - 14c)^2 + (20c + 14d)^2) \\ 596(c^2 + d^2)$$

由此可知

$$|20bc + 14bd + 20ad - 14ac| \leq \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{596(c^2 + d^2)}$$

记 $a^2 + b^2 = c^2 + d^2 = S$, 代入上式得

$$\frac{20bc + 14bd + 20ad - 14ac}{2S} \leq \frac{\sqrt{S} \cdot \sqrt{596S}}{2S} = \frac{\sqrt{596S}}{2S} = \frac{\sqrt{596}}{2} = \sqrt{149}$$

50. 实数 x, y, z, t 满足

$$x^2 + y^2 = 16, \quad z^2 + t^2 = 25, \quad xt - yz = 20,$$

求 xz 的最大值。

由柯西不等式,

$$16 \cdot 25 = (x^2 + y^2)(t^2 + (-z)^2) \geq (xt - yz)^2 = 20^2$$

此时等号成立, 可解得

$$\frac{x}{t} = \frac{y}{-z} = \frac{4}{5} \Rightarrow xz = -\frac{5}{4}xy$$

由 $x^2 + y^2 = 16$ 可得

$$|xy| \leq \frac{x^2 + y^2}{2} = 8$$

所以

$$-10 = -\frac{5}{4} \cdot 8 \leq xz \leq -\frac{5}{4} \cdot (-8) = 10$$

因此 xz 的最大值为 10。

51. 设 a_1, a_2, \dots, a_{18} 均为大于 1 的实数, 求

$$\frac{\log_{a_1} 2023 + \log_{a_2} 2023 + \dots + \log_{a_{18}} 2023}{\log_{a_1 a_2 \dots a_{18}} 2023}$$

的最小值。

利用换底公式, 原式即

$$\frac{\sum_{i=1}^{18} \frac{1}{\log_{2023} a_i}}{\frac{1}{\sum_{i=1}^{18} \log_{2023} a_i}} = \left(\sum_{i=1}^{18} \frac{1}{\log_{2023} a_i} \right) \left(\sum_{i=1}^{18} \log_{2023} a_i \right).$$

由柯西不等式,

$$\left(\sum_{i=1}^{18} \log_{2023} a_i \right) \left(\sum_{i=1}^{18} \frac{1}{\log_{2023} a_i} \right) \geq \left(\sum_{i=1}^{18} 1 \right)^2 = 18^2 = 324.$$

52. 存在 2017 个正实数 $x_1, x_2, \dots, x_{2017}$ 使得

$$\sum_{i=1}^{2017} x_i = \sum_{i=1}^{2017} \frac{1}{x_i} = 2018,$$

求

$$x_1 + \frac{1}{x_1}$$

的最大可能值。

由柯西不等式,

$$(2018 - x_1) \left(2018 - \frac{1}{x_1} \right) = \left(\sum_{i=2}^{2017} x_i \right) \left(\sum_{i=2}^{2017} \frac{1}{x_i} \right) \geq 2016^2.$$

展开左边得

$$2018^2 - 2018 \left(x_1 + \frac{1}{x_1} \right) + 1 \geqslant 2016^2.$$

于是

$$x_1 + \frac{1}{x_1} \leqslant \frac{8069}{2018}.$$

等号成立当且仅当 $x_i = \frac{1}{x_i}$, 即 $x_i = 1, i = 2, 3, \dots, 2017$

53. 已知 a, b, c 为正数, 且 $a + b + c = 1$ 。求

$$\left(\frac{1}{a} - 1 \right) \left(\frac{1}{b} - 1 \right) \left(\frac{1}{c} - 1 \right)$$

的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \left(\frac{1}{b} - 1 \right) \left(\frac{1}{c} - 1 \right) &= \left(\frac{1-a}{a} \right) \left(\frac{1-b}{b} \right) \left(\frac{1-c}{c} \right) \\ &= \left(\frac{b+c}{a} \right) \left(\frac{a+c}{b} \right) \left(\frac{a+b}{c} \right) \\ &\geqslant \left(\frac{2\sqrt{bc}}{a} \right) \left(\frac{2\sqrt{ac}}{b} \right) \left(\frac{2\sqrt{ab}}{c} \right) = 8 \end{aligned}$$

当且仅当 $a = b = c = \frac{1}{3}$ 时等号成立。

54. 已知 a, b, c 为三角形三边, 证明不等式

$$\frac{a}{b+c-a} + \frac{b}{c+a-b} + \frac{c}{a+b-c} \geqslant 3$$

发现

$$\begin{aligned} &\frac{a}{b+c-a} + \frac{b}{c+a-b} + \frac{c}{a+b-c} \geqslant 3 \\ \Leftrightarrow &\left(\frac{2a}{b+c-a} + 1 \right) + \left(\frac{2b}{c+a-b} + 1 \right) + \left(\frac{2c}{a+b-c} + 1 \right) \geqslant 9 \\ \Leftrightarrow &(a+b+c) \left(\frac{1}{b+c-a} + \frac{1}{c+a-b} + \frac{1}{a+b-c} \right) \geqslant 9 \end{aligned}$$

由于

$$(b+c-a) + (c+a-b) + (a+b-c) = a+b+c,$$

且

$$b+c-a > 0, c+a-b > 0, a+b-c > 0$$

由 AM-HM 不等式或柯西不等式, 原不等式得证。

55. 设 x, y, z 为正实数且 $xyz = 1$, 证明:

$$\frac{x}{y} + \frac{y}{z} + \frac{z}{x} \geq x + y + z.$$

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{1}{3} \left(\frac{x}{y} + \frac{x}{y} + \frac{y}{z} \right) \geq \sqrt[3]{\frac{x^2}{yz}} = x,$$

$$\frac{1}{3} \left(\frac{y}{z} + \frac{y}{z} + \frac{z}{x} \right) \geq \sqrt[3]{\frac{y^2}{xz}} = y,$$

$$\frac{1}{3} \left(\frac{z}{x} + \frac{z}{x} + \frac{x}{y} \right) \geq \sqrt[3]{\frac{z^2}{xy}} = z.$$

三式相加得

$$\frac{x}{y} + \frac{y}{z} + \frac{z}{x} \geq x + y + z.$$

故证毕。

56. 若 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, 求 $x + 2y + 3z$ 的最大值。

由柯西不等式,

$$(x^2 + y^2 + z^2)(1^2 + 2^2 + 3^2) \geq (x + 2y + 3z)^2 \Rightarrow x + 2y + 3z \leq \sqrt{14}$$

当且仅当 $(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{14}}(1, 2, 3)$ 时等号成立。

57. 若 $x, y, z \in \mathbb{R}^+$ 且 $x + y + z = 3$, 求 $\frac{yz + 4xz + 9xy}{xyz}$ 的最小值。

由柯西不等式,

$$\frac{x^2}{1^2} + \frac{y^2}{2^2} + \frac{z^2}{3^2} \geq \frac{(x+y+z)^2}{1+4+9} = \frac{9}{14}.$$

当且仅当 $(x, y, z) = \left(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}\right)$ 时等号成立。

58. 若 $a, b, c \in \mathbb{R}^+$ 且 $a+b+c=6$, 求

$$\left(a + \frac{1}{b}\right)^2 + \left(b + \frac{1}{c}\right)^2 + \left(c + \frac{1}{a}\right)^2$$

的最小值。

由柯西不等式,

$$\begin{aligned} \left(a + \frac{1}{b}\right)^2 + \left(b + \frac{1}{c}\right)^2 + \left(c + \frac{1}{a}\right)^2 &\geq \frac{\left(a+b+c + \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}\right)^2}{1+1+1} \\ &\geq \frac{\left(6 + \frac{9}{a+b+c}\right)^2}{1+1+1} = \frac{75}{4} \end{aligned}$$

等号成立当且仅当 $a=b=c=2$ 。

59. 已知实数 a, b, c, d 满足

$$ab+bc+cd=8, \quad b^2+c^2=2,$$

试求 a^2+d^2 的最小值。

首先有

$$b^2+c^2 \geq 2bc \Rightarrow bc \leq 1$$

由柯西不等式,

$$(a^2+d^2)(b^2+c^2) \geq (ab+cd)^2$$

即

$$(a^2+d^2) \geq \frac{(ab+cd)^2}{b^2+c^2} = \frac{(8-bc)^2}{2} \geq \frac{(8-1)^2}{2} = \frac{49}{2}$$

当 $bc=1$ 且 $\frac{a}{c} = \frac{d}{b}$, 即 $b=c=-1, a=d=-\frac{7}{2}$ 时等号成立, 此时 a^2+d^2 取最小值 $\frac{49}{2}$ 。

60. 若 $3a+4b=15$, 求 $\sqrt{a^2+b^2}$ 的最小值。

由柯西不等式,

$$5\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{3^2+4^2} \cdot \sqrt{a^2+b^2} \geq |3a+4b| = 15 \implies \sqrt{a^2+b^2} \geq 3$$

当且仅当 $a = \frac{9}{5}, b = \frac{12}{5}$ 时等号成立。

61. 若 $abcd = 1$, 求 $(1+a)(1+b)(1+c)(1+d)$ 的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$(1+a)(1+b)(1+c)(1+d) \geq (2\sqrt{a})(2\sqrt{b})(2\sqrt{c})(2\sqrt{d}) = 16$$

等号成立当且仅当 $a = b = c = d = 1$ 。

62. 若 $x \in \mathbb{R}$, 求

$$\frac{x^2 + 2 - \sqrt{x^4 + 4}}{x}$$

的最大值。

设 $x > 0$, 由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} \frac{x^2 + 2 - \sqrt{x^4 + 4}}{x} &= x + \frac{2}{x} - \sqrt{x^2 + \frac{4}{x^2}} \\ &= \sqrt{x^2 + \frac{4}{x^2}} + 4 - \sqrt{x^2 + \frac{4}{x^2}} \\ &= \frac{4}{\sqrt{x^2 + \frac{4}{x^2}} + 4} \\ &\leq \frac{4}{\sqrt{4+4} + \sqrt{4}} = 2\sqrt{2} - 2 \end{aligned}$$

当且仅当 $x = \sqrt{2}$ 时等号成立。

63. 若 a, b 为正实数且满足 $ab(a+b) = 2000$, 求 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{ab}$ 的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$2000 = ab(a+b) \leq \left(\frac{a+b}{2}\right)(a+b) \Rightarrow a+b \geq 20$$

再由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned}\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{ab} &= \frac{1}{2a} + \frac{1}{2a} + \frac{1}{2b} + \frac{1}{2b} + \frac{1}{a+b} \\ &\geq 5\sqrt[5]{\frac{1}{16a^2b^2(a+b)}} \\ &= 5\sqrt[5]{\frac{a+b}{16a^2b^2(a+b)^2}} \\ &\geq 5\sqrt[5]{\frac{20}{16 \cdot 2000^2}} = \frac{1}{4}\end{aligned}$$

等号成立当且仅当 $a = b = 10$ 。以下为错误示范:

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{ab} \geq 3\sqrt[3]{\frac{1}{ab(a+b)}} = 3\sqrt[3]{\frac{1}{2000}} = \frac{3\sqrt[3]{4}}{20}$$

但等号成立当且仅当 $a = b = 0$, 不合题意。

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{ab} = \frac{a+b}{ab} + \frac{1}{ab} = \frac{(a+b)^2}{2000} + \frac{1}{2(a+b)} + \frac{1}{2(a+b)} \geq 3\sqrt[3]{\frac{1}{8000}} = \frac{3}{20}$$

但等号成立当且仅当 $a+b=10$ 且 $ab=200$, 解得 a, b 为非实数, 不合题意。

64. 若 a, b, c 皆为正实数满足 $a+b+c=100$, 求 $\sqrt{a} + \sqrt{ab} + \sqrt{abc}$ 的最大值。

由 AM-GM 不等式,

$$\sqrt{a} + \sqrt{ab} + \sqrt{abc} = a + 2\sqrt{\frac{a}{4} \cdot b} + 3\sqrt{\frac{a}{12} \cdot \frac{b}{3} \cdot \frac{4c}{3}} \leq a + \frac{a}{4} + b + \frac{a}{12} + \frac{b}{3} + \frac{4c}{3} = \frac{4}{3}(a+b+c) = \frac{400}{3}$$

等号成立当且仅当 $a = \frac{160}{21}, b = \frac{40}{21}, c = \frac{10}{21}$ 。

65. 若 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 为实数, 且

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 8, \quad x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 = 16$$

求 x_5 的最大值。

由柯西不等式,

$$(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2)(1 + 1 + 1 + 1) \geq (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)^2 \Rightarrow 4(16 - x_5^2) \geq (8 - x_5)^2$$

解得

$$0 \leq x_5 \leq \frac{16}{5}$$

当 $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = \frac{6}{5}, x_5 = \frac{16}{5}$ 时等号成立。

66. 若 a, b, c 为正实数且 $a + b + c \leq 9$, 求 $(a^2 + b^2 + c^2)(2ab + 2bc + 2ca + 5)$ 的最大值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned}(a^2 + b^2 + c^2)(2ab + 2bc + 2ca + 5) &\leq \left(\frac{a^2 + b^2 + c^2 + 2ab + 2bc + 2ca + 5}{2} \right)^2 \\&= \left(\frac{(a + b + c)^2 + 5}{2} \right)^2 \\&\leq \left(\frac{9^2 + 5}{2} \right)^2 = 1849\end{aligned}$$

当 $a^2 + b^2 + c^2 = 43, ab + bc + ca = 19$ 时等号成立。

67. x, y, z 为正实数且满足 $x + y + z = 91$, 求

$$\frac{yz}{x} + \frac{xz}{y} + \frac{xy}{z}$$

的最小值。

由排序不等式,

$$\sum_{cyc} \frac{xy}{z} \geq \sum_{cyc} \frac{xy}{y} = x + y + z = 91$$

68. 已知正实数 a, b 满足 $a + b = 1$, 求

$$\left(a + \frac{1}{a}\right)^2 + \left(b + \frac{1}{b}\right)^2$$

的最小值。

由柯西不等式或 QM-AM 不等式,

$$\left(a + \frac{1}{a}\right)^2 + \left(b + \frac{1}{b}\right)^2 \geq \frac{1}{2} \left(a + b + \frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)^2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{ab}\right)^2$$

又由 AM-GM 不等式,

$$ab \leq \left(\frac{a+b}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$$

故

$$\left(a + \frac{1}{a}\right)^2 + \left(b + \frac{1}{b}\right)^2 \geq \frac{1}{2} \cdot (1+4)^2 = \frac{25}{2}$$

当且仅当 $a = b = \frac{1}{2}$ 时等号成立, 此时有最小值 $\frac{25}{2}$ 。

69. 已知 x, y, z 为正实数, 求 $\frac{(x^4+1)(y^4+1)(z^4+1)}{xy^2z}$ 的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} \frac{(x^4y^4+1)(y^4z^4+1)(z^4x^4+1)}{xy^2z} &= \left(x^3 + \frac{1}{3x} + \frac{1}{3x} + \frac{1}{3x}\right) \left(y^2 + \frac{1}{y^2}\right) \left(z^3 + \frac{1}{3z} + \frac{1}{3z} + \frac{1}{3z}\right) \\ &\geq 4\sqrt[3]{\frac{1}{27}} \cdot 2 \cdot 4\sqrt[3]{\frac{1}{27}} = \frac{32\sqrt{3}}{9} \end{aligned}$$

70. 已知 $x \in [0, 2]$, 求 $\sqrt{x} + 4\sqrt{1 - \frac{x}{2}}$ 的最大值。

发现

$$\sqrt{x} + 4\sqrt{1 - \frac{x}{2}} = \sqrt{x} + \sqrt{2^3} \cdot \sqrt{2-x}$$

由柯西不等式,

$$(\sqrt{x} + \sqrt{2^3} \cdot \sqrt{2-x})^2 \leq (1+8)(x+2-x) = 18 \Leftrightarrow \sqrt{x} + 4\sqrt{1 - \frac{x}{2}} \leq 3\sqrt{2}$$

等号成立当且仅当 $x = \frac{2}{9}$

71. 若 x, y 为正数, 且

$$x^2 + \frac{y^2}{45} = 1,$$

试求

$$\frac{2}{1-x} + \frac{75}{10-y}$$

的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{1-x+\frac{x}{2}+\frac{x}{2}}{3} \geq \sqrt[3]{\frac{x^2(1-x)}{4}}$$

于是

$$\frac{2}{1-x} = \frac{x^2}{2} \cdot \frac{4}{x^2(1-x)} \geq \frac{x^2}{2} \cdot \left(\frac{3}{1-x+\frac{x}{2}+\frac{x}{2}} \right)^3 = \frac{27x^2}{2} \quad (1)$$

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{y+(10-y)}{2} \geq \sqrt{y(10-y)}$$

故

$$\frac{75}{10-y} = \frac{75}{10} \left(\frac{y}{10-y} + 1 \right) \geq \frac{15}{2} \cdot \frac{y^2}{\left(\frac{y+(10-y)}{2} \right)^2} + \frac{15}{2} = \frac{15}{2} \cdot \frac{y^2}{25} + \frac{15}{2} \quad (2)$$

由 (1), (2),

$$\frac{2}{1-x} + \frac{75}{10-y} \geq \frac{27}{2} \left(x^2 + \frac{y^2}{45} \right) + \frac{15}{2} = 21$$

等号成立当且仅当 $x = \frac{2}{3}, y = 5$ 。

72. 若正实数 a, b, c 满足 $a + b + c = 21$, 求 $a^2 + 3b^2 + 5c^2$ 的最小值。

由排序不等式,

$$\begin{aligned} a^2 + 3b^2 + 5c^2 &= a^2 + b^2 + c^2 + 2b^2 + 2c^2 + 2c^2 \\ &\geq a^2 + b^2 + c^2 + 2ab + 2ac + 2bc = (a + b + c)^2 = 441 \end{aligned}$$

当 $(a, b, c) = (21, 0, 0), \left(\frac{21}{2}, \frac{21}{2}, 0 \right), (7, 7, 7)$ 时等号成立。

73. 已知 x, y 为实数, 求 $x^6 + y^6 - 54xy$ 的最小值。

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{x^6 + y^6 + 27 + 27 + 27 + 27}{6} \geq \sqrt[6]{x^6 y^6 \cdot 3^{12}} \Rightarrow x^6 y^6 - 54xy \geq -108$$

当 $x = y = \pm\sqrt{3}$ 时等号成立。

74. 若 x, y, z 为正实数, 且满足 $x + y + z = 1$, 求 $x(x+y)^2(y+z)^3(z+x)^4$ 的最大值。

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{5(x+y+z)}{10} = \frac{x+2(x+y)+3(y+z)+4\left(\frac{z+x}{2}\right)}{10} \geq \sqrt[10]{\frac{x(x+y)^2(y+z)^3(z+x)^4}{2^4}}$$

故

$$x(x+y)^2(y+z)^3(z+x)^4 \leq \frac{1}{64}$$

等号成立 $y = 0, x = z = \frac{1}{2}$?

75. 设 a, b, c, d 为正实数, 且满足 $abcd = 1$, 求

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + ab + ac + ad + bc + bd + cd$$

的最小值。

由 AM-GM 不等式, 有

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + ab + ac + ad + bc + bd + cd \geq \sqrt[4]{(abcd)^2} + \sqrt[6]{(abcd)^3} = 4 + 6 = 10$$

等号成立当且仅当 $a = b = c = d = 1$ 。

76. 设 a, b, c 为正实数, 且满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$, 证明

$$\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \geq 3 + \frac{2(a^3 + b^3 + c^3)}{abc}.$$

考虑左式减右式, 有

$$\begin{aligned} & \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} - 3 - \frac{2(a^3 + b^3 + c^3)}{abc} \\ &= \frac{a^2 + b^2 + c^2}{a^2} + \frac{a^2 + b^2 + c^2}{b^2} + \frac{a^2 + b^2 + c^2}{c^2} - 3 - 2\left(\frac{a^2}{bc} + \frac{b^2}{ca} + \frac{c^2}{ab}\right) \\ &= \frac{b^2 + c^2}{a^2} + \frac{a^2 + c^2}{b^2} + \frac{a^2 + b^2}{c^2} - 2\left(\frac{a^2}{bc} + \frac{b^2}{ca} + \frac{c^2}{ab}\right) \\ &= a^2\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c}\right)^2 + b^2\left(\frac{1}{c} - \frac{1}{a}\right)^2 + c^2\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)^2 \geq 0 \end{aligned}$$

等号成立当且仅当 $a = b = c$ 。

77. 若 a, b, c 为实数且 $a + b + c = 12$, 且

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{abc} = 1,$$

求 $abc - (a + 2b - 3c)$ 的最大值。

由

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{abc} = 1,$$

则

$$2abc = 2ab + 2bc + 2ca + 2 = 144 - a^2 - b^2 - c^2 + 2$$

所以

$$\begin{aligned} 2abc - 2(a + 2b - 3c) &= 146 - (a^2 + 2a) - (b^2 + 4b) - (c^2 - 6c) \\ &= 160 - [(a + 1)^2 + (b + 2)^2 + (c - 3)^2] \\ &\leq 160 - 3 \left(\frac{a + 1 + b + 2 + c - 3}{3} \right)^2 = 112 \end{aligned}$$

因此

$$abc - (a + 2b - 3c) \leq 56$$

等号成立当且仅当 $a = 3, b = 2, c = 7$ 。

78. 设 a, b, c 为正实数, 且 $a + b + c = 1$, 求

$$\sqrt{a^2 + b^2} + \sqrt{b^2 + c^2} + \sqrt{c^2 + a^2}$$

的最小值。

由柯西不等式,

$$(1^2 + 1^2)(a^2 + b^2) \geq (a + b)^2 \Rightarrow \sqrt{a^2 + b^2} \geq \frac{a + b}{\sqrt{2}},$$

同理

$$\sqrt{b^2 + c^2} \geq \frac{b + c}{\sqrt{2}}, \quad \sqrt{c^2 + a^2} \geq \frac{c + a}{\sqrt{2}}.$$

相加得

$$\sqrt{a^2 + b^2} + \sqrt{b^2 + c^2} + \sqrt{c^2 + a^2} \geq \frac{2(a + b + c)}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}.$$

当 $a = b = c = \frac{1}{3}$ 时取等号, 故最小值为 $\sqrt{2}$ 。

79. 已知 $x > 1, y > 1, z > 1$ 且 $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} = 2$, 试证

$$\sqrt{x+y+z} \geq \sqrt{x-1} + \sqrt{y-1} + \sqrt{z-1}$$

首先有

$$\frac{x-1}{x} + \frac{y-1}{y} + \frac{z-1}{z} = 3 - \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z}\right) = 3 - 2 = 1$$

由柯西不等式,

$$\left(\frac{x-1}{x} + \frac{y-1}{y} + \frac{z-1}{z}\right)(x+y+z) \geq \left(\sqrt{x-1} + \sqrt{y-1} + \sqrt{z-1}\right)^2$$

左式为 $1 \cdot (x+y+z) = x+y+z$, 因此

$$\sqrt{x+y+z} \geq \sqrt{x-1} + \sqrt{y-1} + \sqrt{z-1}$$

故证毕。

80. (a) 已知 $a, b, c > 0$, 证明

$$\frac{a^2}{2a+b} + \frac{b^2}{2b+c} + \frac{c^2}{2c+a} \geq \frac{a+b+c}{3}$$

由柯西不等式,

$$\left(\frac{a^2}{2a+b} + \frac{b^2}{2b+c} + \frac{c^2}{2c+a}\right)(2a+b+2b+c+2c+a) \geq (a+b+c)^2$$

所以得证

$$\frac{a^2}{2a+b} + \frac{b^2}{2b+c} + \frac{c^2}{2c+a} \geq \frac{a+b+c}{3}$$

(b) 已知 $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2 > 0$, 证明

$$(a_1^3 + a_2^3)(b_1^3 + b_2^3)(c_1^3 + c_2^3) \geq (a_1 b_1 c_1 + a_2 b_2 c_2)^3$$

令

$$r_1 = \frac{a_2}{a_1}, \quad r_2 = \frac{b_2}{b_1}, \quad r_3 = \frac{c_2}{c_1}$$

则

$$(a_1^3 + a_2^3)(b_1^3 + b_2^3)(c_1^3 + c_2^3) = a_1^3 b_1^3 c_1^3 (1 + r_1^3)(1 + r_2^3)(1 + r_3^3)$$

$$(a_1 b_1 c_1 + a_2 b_2 c_2)^3 = a_1^3 b_1^3 c_1^3 (1 + r_1 r_2 r_3)^3$$

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned}(1 + r_1^3)(1 + r_2^3)(1 + r_3^3) &= 1 + (r_1^3 + r_2^3 + r_3^3) + (r_1 r_2)^3 + (r_2 r_3)^3 + (r_3 r_1)^3 + r_1^3 r_2^3 r_3^3 \\ &\geq 1 + 3r_1 r_2 r_3 + 3r_1^2 r_2^2 r_3^2 + r_1^3 r_2^3 r_3^3 \\ &= (1 + r_1 r_2 r_3)^3\end{aligned}$$

因此得证

$$(a_1^3 + a_2^3)(b_1^3 + b_2^3)(c_1^3 + c_2^3) \geq (a_1 b_1 c_1 + a_2 b_2 c_2)^3$$

81. 设 a, b, c 均为正数, 且 $a + b + c = 3$, 证明

$$\frac{a}{b^2 + 1} + \frac{b}{c^2 + 1} + \frac{c}{a^2 + 1} \geq \frac{3}{2}.$$

由不等式

$$(b - 1)^2 = b^2 + 1 - 2b \geq 0 \Rightarrow \frac{1}{b^2 + 1} \leq \frac{1}{2b},$$

因此

$$\frac{a}{b^2 + 1} = a - \frac{ab^2}{b^2 + 1} \geq a - \frac{ab^2}{2b} = a - \frac{ab}{2}.$$

同理得

$$\frac{b}{c^2 + 1} \geq b - \frac{bc}{2}, \quad \frac{c}{a^2 + 1} \geq c - \frac{ac}{2}.$$

又由柯西不等式,

$$(a^2 + b^2 + c^2)(1^2 + 1^2 + 1^2) \geq (a + b + c)^2 \Rightarrow a^2 + b^2 + c^2 \geq 3.$$

因为

$$ab + bc + ca = \frac{(a + b + c)^2 - (a^2 + b^2 + c^2)}{2} \leq \frac{9 - 3}{2} = 3$$

故

$$\frac{a}{b^2 + 1} + \frac{b}{c^2 + 1} + \frac{c}{a^2 + 1} \geq (a + b + c) - \frac{1}{2}(ab + bc + ca) \geq 3 - \frac{3}{2} = \frac{3}{2}.$$

故证毕。

82. 设 a, b, c 为正实数, 证明

$$\sqrt{ab(a+b)} + \sqrt{bc(b+c)} + \sqrt{ca(c+a)} \leq \frac{3}{2} \sqrt{(a+b)(b+c)(c+a)}.$$

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} 3 &= \frac{b}{b+c} + \frac{c}{c+a} + \frac{a}{a+b} + \frac{c}{b+c} + \frac{b}{a+b} + \frac{a}{c+a} \\ &\geq 2 \left(\sqrt{\frac{ab}{(b+c)(c+a)}} + \sqrt{\frac{bc}{(a+b)(c+a)}} + \sqrt{\frac{ca}{(a+b)(b+c)}} \right) \end{aligned}$$

即得证

$$\sqrt{ab(a+b)} + \sqrt{bc(b+c)} + \sqrt{ca(c+a)} \leq \frac{3}{2} \sqrt{(a+b)(b+c)(c+a)}.$$

83. 证明对任意实数 x, y, z 皆有

$$\frac{y^2 - x^2}{2x^2 + 1} + \frac{z^2 - y^2}{2y^2 + 1} + \frac{x^2 - z^2}{2z^2 + 1} \geq 0$$

由 AM-GM 不等式,

$$\begin{aligned} \frac{y^2 - x^2}{2x^2 + 1} + \frac{z^2 - y^2}{2y^2 + 1} + \frac{x^2 - z^2}{2z^2 + 1} + \frac{3}{2} &= \frac{1}{2} \left(\frac{2y^2 + 1}{2x^2 + 1} + \frac{2z^2 + 1}{2y^2 + 1} + \frac{2x^2 + 1}{2z^2 + 1} \right) \\ &\geq \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{2y^2 + 1}{2x^2 + 1} \cdot \frac{2z^2 + 1}{2y^2 + 1} \cdot \frac{2x^2 + 1}{2z^2 + 1}} = \frac{3}{2} \end{aligned}$$

故

$$\frac{y^2 - x^2}{2x^2 + 1} + \frac{z^2 - y^2}{2y^2 + 1} + \frac{x^2 - z^2}{2z^2 + 1} \geq 0$$

84. 设 $a > 0, b > 0, c > 0$, 求

$$\frac{a+3c}{a+2b+c} + \frac{4b}{a+b+2c} - \frac{8c}{a+b+3c} + 17$$

的最小值。

由于

$$\begin{cases} a + 2b + c = x \\ a + b + 2c = y \\ a + b + 3c = z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = -x + 5y - 3z \\ b = x - 2y + z \\ c = -y + z \end{cases}$$

故

$$\begin{aligned} & \frac{a+3c}{a+2b+c} + \frac{4b}{a+b+2c} - \frac{8c}{a+b+3c} + 17 \\ &= \frac{-x+2y}{x} + \frac{4x-8y+4z}{y} - \frac{-8y+8z}{z} + 17 \\ &= \left(\frac{2y}{x} + \frac{4x}{y} \right) + \left(\frac{4z}{y} + \frac{8y}{z} \right) \\ &\geq 2\sqrt{\frac{2y}{x} \cdot \frac{4x}{y}} + 2\sqrt{\frac{4z}{y} \cdot \frac{8y}{z}} = 12\sqrt{2} \end{aligned}$$

85. 证明对所有自然数 n , 有

$$1 + \frac{2}{3n-2} \leq \sqrt[n]{3} \leq 1 + \frac{2}{n}.$$

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{n+2}{n} = \frac{3 + \overbrace{1+\cdots+1}^{n-1 \uparrow 1}}{n} \geq \sqrt[n]{3 \cdot 1^{n-1}} = \sqrt[n]{3} \Rightarrow \sqrt[n]{3} \leq 1 + \frac{2}{n}$$

且

$$\frac{3n-2}{3n} = \frac{1/3 + \overbrace{1+\cdots+1}^{n-1 \uparrow 1}}{n} \geq \sqrt[n]{(1/3) \cdot 1^{n-1}} = \frac{1}{\sqrt[n]{3}} \Rightarrow \sqrt[n]{3} \geq 1 + \frac{2}{3n-2}.$$

综上所述得到

$$1 + \frac{2}{3n-2} \leq \sqrt[n]{3} \leq 1 + \frac{2}{n}$$

86. 已知 $0 \leq x \leq 1$, $n \in \mathbb{N}$, 证明:

$$0 \leq x^n - x^{n+1} \leq \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}}.$$

由 $0 \leq x \leq 1$, 有

$$0 \leq 1 - x \Rightarrow 0 \leq x^n(1 - x) = x^n - x^{n+1} \quad (1)$$

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{\overbrace{\frac{x}{n} + \cdots + \frac{x}{n}}^{n \uparrow} + (1 - x)}{n + 1} \geq \sqrt[n+1]{\left(\frac{x}{n}\right)^n (1 - x)}$$

即

$$\frac{n^n}{(n + 1)^{n+1}} \geq x^n(1 - x) = x^n - x^{n+1} \quad (2)$$

由 (1) 与 (2), 得证

$$0 \leq x^n - x^{n+1} \leq \frac{n^n}{(n + 1)^{n+1}}.$$

87. 已知 $\triangle ABC$ 的面积为 27, R 为其外接圆半径, r 为其内切圆半径。求 Rr^3 的最大值。

设 $\triangle ABC$ 边长为 $a, b, c > 0$, 面积为

$$[\triangle ABC] = \frac{1}{2}(a + b + c)r = \frac{abc}{4R} = 27$$

由 AM-GM 不等式,

$$\frac{2 \cdot 27}{3r} = \frac{a + b + c}{3} \geq \sqrt[3]{abc} = \sqrt[3]{4R \cdot 27} \Rightarrow Rr^3 \leq 54$$

等号成立当且仅当 $a = b = c$ 即 $\triangle ABC$ 为等边三角形。

88. 设实数 x, y 满足 $\sin x + \cos y = 1$, 求 $\cos x + \sin y$ 的最大值。

注意到

$$(\sin x + \cos y)^2 + (\cos x + \sin y)^2 = 2 + 2\sin(x + y) \leq 4$$

由题设 $\sin x + \cos y = 1$, 代入上式

$$1^2 + (\cos x + \sin y)^2 \leq 4 \Rightarrow \cos x + \sin y \leq \sqrt{3}$$

当 $x = \frac{\pi}{6}$, $y = \frac{\pi}{3}$ 时, $\sin x + \cos y = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$, $\cos x + \sin y = \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}$ 取到最大值。

89. 若 $x \in \mathbb{R} \setminus \left\{ \frac{\pi}{2} + k\pi, k\pi \mid k \in \mathbb{Z} \right\}$, 试求

$$f(x) = |\sin x + \cos x + \tan x + \cot x + \sec x + \csc x|$$

的最小值。

设 $t = \cos x + \sin x$, 有

$$\sin x \cos x = \frac{t^2 - 1}{2}$$

且

$$\tan x + \cot x = \frac{\sin^2 x + \cos^2 x}{\sin x \cos x} = \frac{2}{t^2 - 1}$$

$$\sec x + \csc x = \frac{\sin x + \cos x}{\cos x \sin x} = \frac{2t}{t^2 - 1}$$

故

$$f(x) = g(t) = \left| t + \frac{2}{t^2 - 1} + \frac{2t}{t^2 - 1} \right| = \left| t - 1 + \frac{2}{t - 1} + 1 \right| \geqslant \left| -2\sqrt{2} + 1 \right| = 2\sqrt{2} - 1$$

90. 已知 $x^2 + y^2 = 1$, 求 $\frac{y-3}{x+2}$ 的最大值。

设 $k = \frac{y-3}{x+2}$, 则直线方程为

$$kx - y + 2k + 3 = 0$$

当直线与圆 $x^2 + y^2 = 1$ 相切时, k 取得最大值或最小值, 此时圆心 $(0, 0)$ 到直线的距离等于半径:

$$\frac{|2k + 3|}{\sqrt{k^2 + 1}} = 1 \Rightarrow 3k^2 + 12k + 8 = 0$$

解得最大值为

$$k_{\max} = \frac{-12 + \sqrt{144 - 96}}{6} = \frac{-6 + 2\sqrt{3}}{3}$$

91. 已知实数 x, y 满足 $3x - 4y = 5$, 求 $x^2 + y^2$ 的最小值。

$x^2 + y^2$ 的最小值即为原点 $(0, 0)$ 到直线 $3x - 4y - 5 = 0$ 距离的平方:

$$d = \frac{|-5|}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = 1$$

所以最小值为 $1^2 = 1$ 。

92. 已知实数 x, y 满足 $12x + 5y = 1$, 求 $x^2 + y^2 + 4x - 6y + 20$ 的最小值。

原式可配方为 $(x+2)^2 + (y-3)^2 + 7$, 其几何意义为点 $(-2, 3)$ 到直线 $12x + 5y - 1 = 0$ 距离的平方加 7, 该距离为

$$d = \frac{|12(-2) + 5(3) - 1|}{\sqrt{12^2 + 5^2}} = \frac{10}{13}$$

最小值即 $d^2 + 7 = \frac{1283}{169}$ 。

93. 已知实数 x, y 满足 $x^2 + y^2 + 2x - 2y = 7$, 求 $\sqrt{(x-5)^2 + (y-6)^2}$ 的最小值。

圆方程配方为 $(x+1)^2 + (y-1)^2 = 3^2$, 圆心 $A(-1, 1)$, 半径 $r = 3$ 。设点 $B(5, 6)$, 则 $\sqrt{(x-5)^2 + (y-6)^2}$ 的最小值即

$$AB - r = \sqrt{(5+1)^2 + (6-1)^2} - 3 = \sqrt{61} - 3$$

94. 求 $\sqrt{x^2 + 6x + 73} + \sqrt{x^2 - 4x + 8}$ 的最小值。

原式可化为

$$\sqrt{(x+3)^2 + (0-8)^2} + \sqrt{(x-2)^2 + (0-2)^2},$$

即为 x 轴上的点 $(x, 0)$ 到两点 $A(-3, 8)$ 和 $B(2, 2)$ 距离之和, 找 B 关于 x 轴的对称点 $B'(2, -2)$, 最小值为线段 AB' 的长度

$$AB' = \sqrt{(-3-2)^2 + (8+2)^2} = 5\sqrt{5}$$

95. 求 $\frac{3 - \sin x}{2 + \cos x}$ 的最大值及最小值。

设 $y = \frac{3 - \sin x}{2 + \cos x}$, 则

$$3 - 2y = y \cos x + \sin x = \sqrt{y^2 + 1} \cos(x - \alpha)$$

其中 α 为锐角, 由 $|\cos(x - \alpha)| \leq 1$ 得

$$\left| \frac{3 - 2y}{\sqrt{y^2 + 1}} \right| \leq 1 \Rightarrow 3y^2 - 12y + 8 \leq 0$$

解方程 $3y^2 - 12y + 8 = 0$ 得

$$y = 2 \pm \frac{2\sqrt{3}}{3}$$

所以最大值为 $2 + \frac{2\sqrt{3}}{3}$, 最小值为 $2 - \frac{2\sqrt{3}}{3}$ 。

96. 求代数式 $\sqrt{x^2 - 12x + 40} + \sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{y^2 - 8y + 20}$ 的最小值。

将各式进行配方, 转化为两点间距离公式:

$$\sqrt{(x-6)^2 + (0+2)^2} + \sqrt{(x-0)^2 + (0-y)^2} + \sqrt{(0+2)^2 + (y-4)^2}$$

构造直角坐标系, 考虑坐标内四点

$$A = (6, -2), \quad B = (x, 0), \quad C = (0, y), \quad D = (-2, 4)$$

则根式之和即 $AB + BC + CD$ 。当 A, B, C, D 四点共线时, 长度之和取得最小值, 最小距离即为点 $A = (6, -2)$ 与点 $D = (-2, 4)$ 之间的距离:

$$\sqrt{(6 - (-2))^2 + (-2 - 4)^2} = 10$$

因此, 原式的最小值为 10。

97. 已知 a, b 为正实数, 求 $\sqrt{49 + a^2 - 7\sqrt{2}a} + \sqrt{a^2 + b^2 - \sqrt{2}ab} + \sqrt{50 + b^2 - 10b}$ 的最小值。

由余弦定理, 观察到

$$\begin{aligned}\sqrt{a^2 + 49 - 7\sqrt{2}a} &= \sqrt{a^2 + 7^2 - 2 \cdot a \cdot 7 \cos 45^\circ} \\ \sqrt{a^2 + b^2 - \sqrt{2}ab} &= \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cos 45^\circ} \\ \sqrt{b^2 + 50 - 10b} &= \sqrt{b^2 + (5\sqrt{2})^2 - 2 \cdot b \cdot 5\sqrt{2} \cos 45^\circ}\end{aligned}$$

在平面上构造三角形 $\triangle OAB, \triangle OBC, \triangle OCD$, 使得

$$OA = 7, \quad OB = a, \quad OC = b, \quad OD = 5\sqrt{2}, \quad \angle AOB = \angle BOC = \angle COD = 45^\circ$$

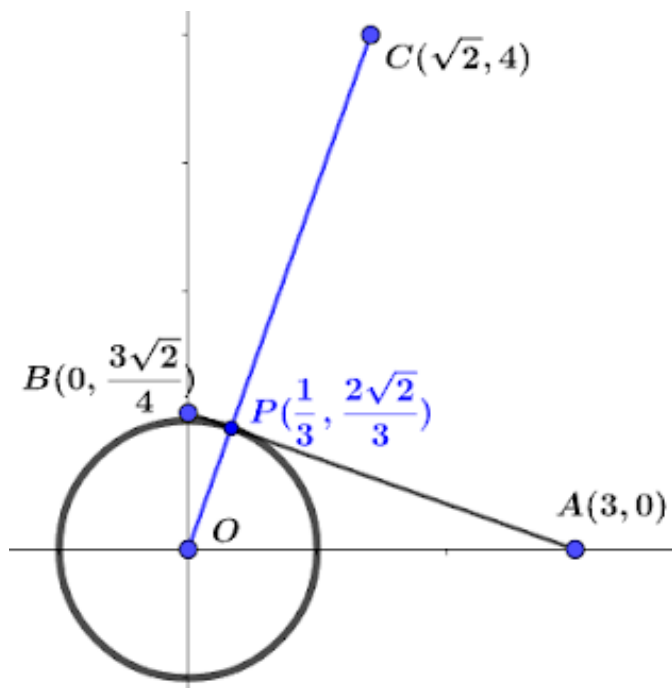
故原式即 $AB + BC + CD$ 的长度, 欲使其为最小, 调整正实数 a, b 使得 A, B, C, D 四点共线, 在 $\triangle OAD$ 中, 由余弦定理, 最小值为

$$AD = \sqrt{7^2 + 50 - 2 \cdot 7 \cdot 5\sqrt{2} \cos 135^\circ} = 13$$

98. 试求

$$\sqrt{10 - 6 \cos \theta} + \frac{1}{4} \sqrt{34 - 24\sqrt{2} \sin \theta} + \sqrt{19 - 2\sqrt{2} \cos \theta - 8 \sin \theta}$$

的最小值。



发现

$$\sqrt{10 - 6\cos\theta} = \sqrt{(\cos\theta - 3)^2 + \sin^2\theta}$$

$$\frac{1}{4}\sqrt{34 - 24\sqrt{2}\sin\theta} = \sqrt{\cos^2\theta - \left(\sin\theta - \frac{3}{4}\sqrt{2}\right)^2}$$

$$\sqrt{19 - 2\sqrt{2}\cos\theta - 8\sin\theta} = \sqrt{(\cos\theta - \sqrt{2})^2 + (\sin\theta - 4)^2}$$

构造坐标系, 设 $P(\cos\theta, \sin\theta)$ 在单位圆上, $A(3, 0)$, $B(0, \frac{3\sqrt{2}}{4})$, $C(\sqrt{2}, 4)$, 原式即为

$$PA + PB + PC$$

直线 AB 方程式为

$$\sqrt{2}x + 4y = 3\sqrt{2},$$

故圆心 O 到 AB 的距离为 1, 且当 $P = \left(\frac{1}{3}, \frac{2\sqrt{2}}{3}\right)$, OPC 共线, 于是 $PA + PB + PC$ 最小值为

$$AB + OC - 1 = \sqrt{9 + \frac{18}{16}} + \sqrt{18} - 1 = \frac{21\sqrt{2}}{4} - 1$$

99. 若锐角 A, B, C 满足 $\sin^2 A + \sin^2 B + \sin^2 C = 2$, 求

$$\frac{1}{\sin^2 A \cos^4 B} + \frac{1}{\sin^2 B \cos^4 C} + \frac{1}{\sin^2 C \cos^4 A}$$

的最小值。

由柯西不等式,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sin^2 A \cos^4 B} + \frac{1}{\sin^2 B \cos^4 C} + \frac{1}{\sin^2 C \cos^4 A} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sin^2 A \cos^4 B} + \frac{1}{\sin^2 B \cos^4 C} + \frac{1}{\sin^2 C \cos^4 A} \right) (\sin^2 A + \sin^2 B + \sin^2 C) \\ &\geq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\cos^2 B} + \frac{1}{\cos^2 C} + \frac{1}{\cos^2 A} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{\cos^2 A} + \frac{1}{\cos^2 B} + \frac{1}{\cos^2 C} \right) (\cos^2 A + \cos^2 B + \cos^2 C) \right]^2 \geq \frac{81}{2} \end{aligned}$$

当 $\sin^2 A = \sin^2 B = \sin^2 C = \frac{2}{3}$, $\cos^2 A = \cos^2 B = \cos^2 C = \frac{1}{3}$ 时等号成立,

$$\frac{1}{\sin^2 A \cos^4 B} + \frac{1}{\sin^2 B \cos^4 C} + \frac{1}{\sin^2 C \cos^4 A} = \frac{27}{2} \cdot 3 = \frac{81}{2}.$$

100. 设 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{2025}$ 皆为锐角, 且

$$\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2 + \dots + \sin^2 \theta_{2025} = 1,$$

求

$$\frac{\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \dots + \sin \theta_{2025}}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2 + \dots + \cos \theta_{2025}}$$

的最大值。

由题意,

$$\sin^2 \theta_2 + \dots + \sin^2 \theta_{2025} = 1 - \sin^2 \theta_1 = \cos^2 \theta_1$$

由柯西不等式,

$$\cos^2 \theta_1 = (\sin^2 \theta_2 + \dots + \sin^2 \theta_{2025})(1^2 + 1^2 + \dots + 1^2) \geq (\sin \theta_2 + \sin \theta_3 + \dots + \sin \theta_{2025})^2$$

即

$$\cos \theta_1 \geq \frac{\sin \theta_2 + \dots + \sin \theta_{2025}}{\sqrt{2024}}$$

同理,

$$\cos \theta_2 \geq \frac{\sin \theta_1 + \sin \theta_3 + \dots + \sin \theta_{2025}}{\sqrt{2024}}, \dots, \cos \theta_{2025} \geq \frac{\sin \theta_1 + \dots + \sin \theta_{2024}}{\sqrt{2024}}$$

将以上不等式相加得

$$\cos \theta_1 + \cdots + \cos \theta_{2025} \geq \frac{2024}{\sqrt{2024}} (\sin \theta_1 + \cdots + \sin \theta_{2025})$$

故

$$\frac{\sin \theta_1 + \cdots + \sin \theta_{2025}}{\cos \theta_1 + \cdots + \cos \theta_{2025}} \leq \frac{\sqrt{2024}}{2024} = \frac{\sqrt{506}}{1012}$$

101. 设 a, b, c 为三角形的三边长, Δ 为此三角形面积, 试证:

$$\Delta \leq \frac{\sqrt{3}}{4} \left(\frac{a+b+c}{3} \right)^2$$

且等号成立当且仅当 $a = b = c$ 。

由海伦公式, 三角形面积为

$$\Delta = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$$

其中 s 为半周长, 由 AM-GM 不等式,

$$\frac{s}{3} = \frac{(s-a) + (s-b) + (s-c)}{3} \geq \sqrt[3]{(s-a)(s-b)(s-c)}$$

故

$$\Delta \leq \sqrt{s \cdot \left(\frac{s}{3} \right)^3} = \frac{s^2}{3\sqrt{3}} = \frac{(a+b+c)^2}{12\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{4} \left(\frac{a+b+c}{3} \right)^2$$

等号成立条件为 $s-a = s-b = s-c$, 即 $a = b = c$ 时, 该三角形为正三角形, 面积为 $\frac{\sqrt{3}}{4}a^2$

102. 设 a, b, c 是一个三角形的三边, 周长为 2。证明

$$\frac{3}{2} < a^2 + b^2 + c^2 + 2abc < 2.$$

由于周长为 2, 有 $a, b, c < 1$, 则三角形面积

$$A = \frac{1}{2}bc \sin \alpha < \frac{1}{2}$$

由海伦公式,

$$A^2 = (1-a)(1-b)(1-c),$$

因此展开

$$0 < (1-a)(1-b)(1-c) < \frac{1}{4}$$

可得

$$1 < (ab+ac+bc) - abc < \frac{5}{4}$$

且由

$$a^2 + b^2 + c^2 = (a+b+c)^2 - 2(ab+ac+bc),$$

因此

$$4 - \frac{5}{2} < a^2 + b^2 + c^2 + 2abc < 4 - 2 \Rightarrow \frac{3}{2} < a^2 + b^2 + c^2 + 2abc < 2$$

103. 在 $\triangle ABC$ 中, 角 A, B, C 所对的边为 a, b, c , 且

$$a^2 + b^2 + 2c^2 = 8$$

求 $\triangle ABC$ 面积的最大值。

由余弦定理

$$\cos C = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} = \frac{8 - 3c^2}{2ab}$$

又

$$S = \frac{1}{2}ab \sin C = \frac{1}{2}ab \sqrt{1 - \left(\frac{8 - 3c^2}{2ab}\right)^2} = \frac{1}{4}\sqrt{4a^2b^2 - (8 - 3c^2)^2}$$

由不等式 $a^2 + b^2 \geq 2ab$,

$$S \leq \frac{1}{4}\sqrt{(a^2 + b^2)^2 - (8 - 3c^2)^2} = \frac{1}{4}\sqrt{(8 - 2c^2)^2 - (8 - 3c^2)^2} = \frac{1}{4}\sqrt{16c^2 - 5c^4}$$

对于 c^2 的函数 $f(c^2) = 16c^2 - 5c^4$, 令导数为零得 $c^2 = \frac{8}{5}$, 代入得

$$S_{\max} = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{64}{5}} = \frac{2\sqrt{5}}{5}$$

以 AB 所在直线为 x 轴, AB 中垂线为 y 轴, 设 $A(-\frac{c}{2}, 0), B(\frac{c}{2}, 0), C(x, y)$, 由条件

$$a^2 + b^2 + 2c^2 = 8$$

得

$$(x - \frac{c}{2})^2 + y^2 + (x + \frac{c}{2})^2 + y^2 + 2c^2 = 8$$

即

$$x^2 + y^2 = 4 - \frac{5c^2}{4}$$

$\triangle ABC$ 面积为

$$S = \frac{1}{2}c|y|$$

由 $y^2 \leq 4 - \frac{5c^2}{4}$, 得

$$S \leq \frac{1}{2}c\sqrt{4 - \frac{5c^2}{4}} = \frac{1}{4}\sqrt{16c^2 - 5c^4}$$

解法同上。

104. 在 $\triangle ABC$ 中, 试求

$$\frac{2\sin^2 A + \sin B \sin C}{\sin A \sin B \sin C}$$

的最小值。

由余弦定理,

$$\cos A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} \geq 1 - \frac{a^2}{2bc} \Rightarrow \frac{2a^2}{bc} \geq 4 - 4\cos A$$

由正弦定理,

$$\frac{2\sin^2 A + \sin B \sin C}{\sin A \sin B \sin C} = \frac{1}{\sin A} \left(\frac{2a^2}{bc} + 1 \right) \geq \frac{5 - 4\cos A}{\sin A}$$

设 $\tan \frac{A}{2} = t > 0$, 则

$$\cos A = \frac{1 - t^2}{1 + t^2}, \quad \sin A = \frac{2t}{1 + t^2}$$

代入得

$$\frac{5 - 4\cos A}{\sin A} = \frac{5 - 4 \cdot \frac{1-t^2}{1+t^2}}{\frac{2t}{1+t^2}} = \frac{9t^2 + 1}{2t}$$

由 AM-GM 不等式:

$$\frac{9t^2 + 1}{2t} \geq \frac{2\sqrt{9t^2 \cdot 1}}{2t} = 3$$

当 $A = \arcsin \frac{3}{5}$, $B = C = \frac{\pi - A}{2}$ 时等号成立, 原式取最小值 3

105. 在锐角三角形 $\triangle ABC$ 中, 角 A, B, C 所对的边为 a, b, c , 且

$$a^2 + 2ab \cos C = 3b^2$$

求 $\tan A \tan B \tan C$ 的最小值。

由余弦定理, 有

$$2ab \cos C = a^2 + b^2 - c^2$$

代入原式得

$$a^2 + (a^2 + b^2 - c^2) = 3b^2 \Rightarrow c^2 = 2a^2 - 2b^2 \Rightarrow b^2 + c^2 - a^2 = \frac{c^2}{2} \Rightarrow \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc} = \frac{c^2}{4bc}$$

由正、余弦定理得

$$\cos A = \frac{\sin C}{4 \sin B} \Rightarrow 4 \sin B \cos A = \sin C = \sin(A + B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B$$

有 $3 \sin B \cos A = \sin A \cos B$.

$\because \triangle ABC$ 是锐角三角形, $\cos A \neq 0, \cos B \neq 0, \therefore \tan A = 3 \tan B$

现设 $\tan B = t$, 又

$$\tan C = -\tan(A + B) = -\frac{\tan A + \tan B}{1 - \tan A \tan B} = \frac{4t}{3t^2 - 1}$$

所以

$$\tan A \tan B \tan C = 3t \cdot t \cdot \frac{4t}{3t^2 - 1} = \frac{12t^3}{3t^2 - 1}$$

对函数

$$f(t) = \frac{12t^3}{3t^2 - 1}, t > 0$$

求导

$$f'(t) = \frac{36t^2(3t^2 - 1) - 12t^3 \cdot 6t}{(3t^2 - 1)^2} = \frac{36t^2(t^2 - 1)}{(3t^2 - 1)^2}$$

令 $f'(t) = 0$, 解得 $t = 1$; 当 $t \in (0, 1)$, $f'(t) < 0$, 当 $t \in (1, \infty)$, $f'(t) > 0$,

$\therefore f(t)$ 在 $t = 1$ 有最小值 $f(1) = 6$ 。

以 AB 所在直线为 x 轴, AB 中垂线为 y 轴, 设 $A(-\frac{c}{2}, 0), B(\frac{c}{2}, 0), C(x, y)$, 由距离公式

$$a^2 = (x - \frac{c}{2})^2 + y^2, \quad b^2 = (x + \frac{c}{2})^2 + y^2$$

代入已知条件

$$2b^2 + c^2 - 2a^2 = 0 \implies 2 \left[(x + \frac{c}{2})^2 + y^2 \right] + c^2 - 2 \left[(x - \frac{c}{2})^2 + y^2 \right] = 0$$

展开化简得

$$4cx + c^2 = 0 \implies x = -\frac{c}{4}$$

作 $CD \perp AB$ 于 D , 则 D 点坐标为 $(x, 0) = \left(-\frac{c}{4}, 0\right)$ 。发现

$$AD = \left| -\frac{c}{2} - \left(-\frac{c}{4}\right) \right| = \frac{c}{4} \quad \text{且} \quad BD = \left| \frac{c}{2} - \left(-\frac{c}{4}\right) \right| = \frac{3c}{4}$$

所以 $BD = 3AD$, 又

$$\tan A = \frac{CD}{AD} = \frac{y}{\frac{c}{4}}$$

$$\tan B = \frac{CD}{BD} = \frac{y}{\frac{3c}{4}}$$

因此有

$$\tan A = 3 \tan B$$

解法同上。

106. 已知非负实数 a, b, c, d 满足 $a \leq 1, a + b \leq 5, a + b + c \leq 14, a + b + c + d \leq 30$, 试证

$$\sqrt{a} + \sqrt{b} + \sqrt{c} + \sqrt{d} \leq 10$$

由柯西不等式,

$$\begin{aligned} & (\sqrt{a} + \sqrt{b} + \sqrt{c} + \sqrt{d})^2 \\ &= \left(\sqrt{a} + \frac{\sqrt{b}}{2} + \frac{\sqrt{b}}{2} + \frac{\sqrt{c}}{3} + \frac{\sqrt{c}}{3} + \frac{\sqrt{c}}{3} + \frac{\sqrt{d}}{4} + \frac{\sqrt{d}}{4} + \frac{\sqrt{d}}{4} + \frac{\sqrt{d}}{4} \right)^2 \\ &\leq \left(a + \frac{b}{2} + \frac{b}{2} + \frac{c}{9} + \frac{c}{9} + \frac{c}{9} + \frac{d}{16} + \frac{d}{16} + \frac{d}{16} + \frac{d}{16} \right) (1 + \dots + 1) = 10 \left(a + \frac{b}{2} + \frac{c}{3} + \frac{d}{4} \right) \end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned} a + \frac{b}{2} + \frac{c}{3} + \frac{d}{4} &= \frac{1}{4}(a + b + c + d) + \frac{1}{12}(a + b + c) + \frac{1}{6}(a + b) + \frac{1}{2}a \\ &\leq \frac{30}{4} + \frac{14}{12} + \frac{5}{6} + \frac{1}{2} = 10 \end{aligned}$$

故

$$\sqrt{a} + \sqrt{b} + \sqrt{c} + \sqrt{d} \leq 10$$

107. 已知 a, b, c 为正实数, 且满足 $abc = 1$, 试证明:

$$\frac{1}{a^3(b+c)} + \frac{1}{b^3(a+c)} + \frac{1}{c^3(a+b)} \geq \frac{3}{2}$$

由柯西不等式,

$$\left(\frac{1}{a^3(b+c)} + \frac{1}{b^3(a+c)} + \frac{1}{c^3(a+b)} \right) (a(b+c) + b(a+c) + c(a+b)) \geq \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right)^2$$

注意到

$$a(b+c) + b(a+c) + c(a+b) = 2(ab+bc+ca),$$

且

$$\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right)^2 = \left(\frac{ab+bc+ca}{abc} \right)^2 = (ab+bc+ca)^2$$

故由 AM-GM 不等式,

$$\frac{1}{a^3(b+c)} + \frac{1}{b^3(a+c)} + \frac{1}{c^3(a+b)} \geq \frac{1}{2}(ab+bc+ca) \geq \frac{3}{2}\sqrt[3]{(abc)^2} = \frac{3}{2}$$

由 $abc = 1$, 有

$$\sum_{cyc} \frac{1}{a^3(b+c)} = \sum_{cyc} \frac{bc}{a^2(b+c)} = \sum_{cyc} \frac{(\frac{1}{a})^2}{\frac{1}{b} + \frac{1}{c}}$$

由 AM-GM 不等式, 可推出

$$\frac{x^2}{y} \geq x - \frac{y}{4}, \quad x, y > 0,$$

据此得到

$$\sum_{cyc} \frac{(\frac{1}{a})^2}{\frac{1}{b} + \frac{1}{c}} \geq \sum_{cyc} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right) \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right)$$

再由 AM-GM 不等式,

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right) \geq \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{1}{abc}} = \frac{3}{2}$$

因此原不等式成立。

108. 已知 $0 \leq x, y, z \leq 1$ 且

$$xyz = (1-x)(1-y)(1-z),$$

证明

$$x(1-z) + y(1-x) + z(1-y) \geq \frac{3}{4}.$$

由于 $0 \leq x \leq 1$, 有

$$(x - \frac{1}{2})^2 \geq 0 \Rightarrow 0 \leq x(1-x) \leq \frac{1}{4},$$

对 y, z 同理成立。于是

$$xyz(1-x)(1-y)(1-z) \leq \frac{1}{64}$$

由已知关系 $xyz = (1-x)(1-y)(1-z)$ 得

$$(xyz)^2 \leq \frac{1}{64} \Rightarrow xyz \leq \frac{1}{8}$$

于是

$$x(1-z) + y(1-x) + z(1-y) = x + y + z - (xy + yz + zx) = 1 - 2xyz \geq 1 - 2 \cdot \frac{1}{8} = \frac{3}{4}$$

当 $x = y = z = \frac{1}{2}$ 时等号成立,

109. 设正实数 a, b, c, x, y, z 满足 $a + b + c = x + y + z$, 证明

$$\frac{2a^2}{a+x} + \frac{2b^2}{b+y} + \frac{2c^2}{c+z} \geq a + b + c$$

由柯西不等式,

$$\left(\frac{2a^2}{a+x} + \frac{2b^2}{b+y} + \frac{2c^2}{c+z} \right) (2(a+x) + 2(b+y) + 2(c+z)) \geq (2a + 2b + 2c)^2$$

又 $a + b + c = x + y + z$, 得

$$\frac{2a^2}{a+x} + \frac{2b^2}{b+y} + \frac{2c^2}{c+z} \geq a + b + c.$$

110. 已知 $a, b, c, d > 0$, 证明不等式

$$\frac{a^3 + b^3 + c^3}{a^2 + b^2 + c^2} + \frac{b^3 + c^3 + d^3}{b^2 + c^2 + d^2} + \frac{c^3 + d^3 + a^3}{c^2 + d^2 + a^2} + \frac{d^3 + a^3 + b^3}{d^2 + a^2 + b^2} \geq a + b + c + d.$$

由 $a, b > 0$, 有

$$0 \leqslant (a+b)(a-b)^2 = (a^2 - b^2)(a-b) = a^3 - a^2b - b^2a + b^3$$

可知

$$a^3 + b^3 \geqslant a^2b + ab^2, \quad b^3 + c^3 \geqslant b^2c + bc^2, \quad c^3 + a^3 \geqslant c^2a + ca^2.$$

于是

$$\begin{aligned} 3(a^3 + b^3 + c^3) &\geqslant a^3 + b^3 + c^3 + a^2b + ab^2 + b^2c + bc^2 + c^2a + ca^2 \\ &= (a+b+c)(a^2 + b^2 + c^2) \end{aligned}$$

因此

$$\frac{a^3 + b^3 + c^3}{a^2 + b^2 + c^2} \geqslant \frac{a+b+c}{3}$$

故

$$\begin{aligned} &\frac{a^3 + b^3 + c^3}{a^2 + b^2 + c^2} + \frac{b^3 + c^3 + d^3}{b^2 + c^2 + d^2} + \frac{c^3 + d^3 + a^3}{c^2 + d^2 + a^2} + \frac{d^3 + a^3 + b^3}{d^2 + a^2 + b^2} \\ &\geqslant \frac{1}{3} \cdot 3(a+b+c+d) = a+b+c+d \end{aligned}$$

111. 已知正实数 a, b, c, d , 求

$$\frac{ab+bc+cd}{a^2+b^2+c^2+d^2}$$

的最大值。

对任意正数 t , 由 AM-GM 不等式,

$$ab \leqslant \frac{t}{2}a^2 + \frac{1}{2t}b^2, \quad bc \leqslant \frac{1}{2}b^2 + \frac{1}{2}c^2, \quad cd \leqslant \frac{1}{2t}c^2 + \frac{t}{2}d^2.$$

取 $t = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{5})$, 使得

$$\frac{t}{2} = \frac{1}{2t} + \frac{1}{2}$$

则

$$ab + bc + cd \leqslant \frac{t}{2}(a^2 + b^2 + c^2 + d^2).$$

因此最大值为

$$\frac{t}{2} = \frac{\sqrt{5} + 1}{4}$$

当 $ta = b = c = td$ 时等号成立。

112. 已知正数 a, b, c 满足 $abc > 1$, 求 $\frac{abc(a+b+c+8)}{abc-1}$ 的最小值。

设 $\lambda = \frac{abc(a+b+c+8)}{abc-1} > 0$, 整理得

$$a+b+c+\frac{\lambda}{abc}=\lambda-8$$

由 AM-GM 不等式得

$$a+b+c+\frac{\lambda}{abc} \geqslant 4\sqrt[4]{abc \cdot \frac{\lambda}{abc}} = 4\sqrt[4]{\lambda}$$

于是

$$\lambda-8 \geqslant 4\sqrt[4]{\lambda}$$

令 $k = \sqrt[4]{\lambda} > 0$, 则不等式转化为

$$k^4-4k-8 \geqslant 0 \Rightarrow (k-2)(k^3+2k^2+4k+4) \geqslant 0$$

由于 $k > 0, k^3+2k^2+4k+4 > 0$, 故 $k \geqslant 2$, 即

$$\lambda \geqslant 2^4 = 16$$

等号成立当且仅当 $a=b=c=2$

113. 已知 $x^2+y^2+z^2 \leqslant 1$, 求 $x^2+2y-2z+3$ 的取值范围。

由柯西不等式,

$$[y+(-z)]^2 \leqslant (1+1)[y^2+(-z)^2] \leqslant 2(x^2+y^2+z^2) \leqslant 2$$

则 $y-z \geqslant -\sqrt{2}$, 且 $x^2 \geqslant 0$, 可得

$$x^2+2y-2z+3 \geqslant 0+2(-\sqrt{2})+3=3-2\sqrt{2}$$

当且仅当 $x=0, y=-\frac{\sqrt{2}}{2}, z=\frac{\sqrt{2}}{2}$ 时, 等号成立;

又因为 $x^2+y^2+z^2 \leqslant 1$, 则 $x^2 \leqslant 1-y^2-z^2$, 可得

$$x^2+2y-2z+3 \leqslant 4-(y^2+z^2-2y+2z)$$

且

$$y^2+z^2-2y+2z=(y-1)^2+(z+1)^2-2,$$

设点 $A(-1, 1)$ 和标准单位圆上一点 $P(y, z)$, 则

$$(y-1)^2 + (z+1)^2 - 2 = |PA|^2 - 2,$$

又因为 $|PA|^2 \geq (|OA| - 1)^2 = 3 - 2\sqrt{2}$, 可得 $(y-1)^2 + (z+1)^2 - 2 \geq 1 - 2\sqrt{2}$, 则

$$x^2 + 2y - 2z + 3 \leq 4 - (y^2 + z^2 - 2y + 2z) \leq 3 + 2\sqrt{2},$$

当且仅当 $x = 0, y = \frac{\sqrt{2}}{2}, z = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ 时, 等号成立。

\therefore 取值范围是 $[3 - 2\sqrt{2}, 3 + 2\sqrt{2}]$.

114. 已知 $x, y, z > 0$, 求

$$\frac{\sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{y^2 + 4z^2} + \sqrt{z^2 + 16x^2}}{9x + 3y + 5z}$$

的最小值。

(待解)

115. 证明

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n}(n+1)} < 2.$$

首先证明对任意正整数 n , 都有如下不等式成立

$$\frac{1}{\sqrt{n}(n+1)} < \frac{2}{\sqrt{n}} - \frac{2}{\sqrt{n+1}} \quad (1)$$

将不等式 (1) 两边同乘以 $\sqrt{n}(n+1)$, 可得其等价形式

$$1 < 2(n+1) - 2\sqrt{n(n+1)} \iff 2\sqrt{n(n+1)} < n + (n+1)$$

由 AM-GM 不等式, 显然上述等价形式成立, 故

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n}(n+1)} < \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\sqrt{n}} - \frac{2}{\sqrt{n+1}} \right)$$

右端为裂项级数, 其前 k 项部分和为

$$\sum_{n=1}^k \left(\frac{2}{\sqrt{n}} - \frac{2}{\sqrt{n+1}} \right) = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k+1}} \right)$$

当 $k \rightarrow \infty$ 时, $S_k \rightarrow 2$, 因此

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n}(n+1)} < 2$$

116. 设实数 $a, b, c \in [-1, 1]$ 满足

$$1 + 2abc \geq a^2 + b^2 + c^2.$$

证明对所有正整数 n 有

$$1 + 2(abc)^n \geq a^{2n} + b^{2n} + c^{2n}.$$

条件可改写为

$$(a - bc)^2 \leq (1 - b^2)(1 - c^2). \quad (1)$$

由柯西不等式,

$$\begin{aligned} (a^{n-1} + a^{n-2}bc + \cdots + b^{n-1}c^{n-1})^2 &\leq (|a|^{n-1} + |a|^{n-2}|bc| + \cdots + |bc|^{n-1})^2 \\ &\leq (1 + |bc| + \cdots + |bc|^{n-1})^2 \\ &\leq (1 + |b|^2 + \cdots + |b|^{2(n-1)})(1 + |c|^2 + \cdots + |c|^{2(n-1)}) \end{aligned}$$

乘以不等式 (1), 得到

$$\begin{aligned} (a - bc)^2(a^{n-1} + a^{n-2}bc + \cdots + b^{n-1}c^{n-1})^2 &\leq ((1 - b^2)(1 + |b|^2 + \cdots + |b|^{2(n-1)})) \\ &\quad \cdot ((1 - c^2)(1 + |c|^2 + \cdots + |c|^{2(n-1)})) \end{aligned}$$

即

$$(a^n - b^n c^n)^2 \leq (1 - b^{2n})(1 - c^{2n})$$

从而得到

$$1 + 2(abc)^n \geq a^{2n} + b^{2n} + c^{2n}$$

117. 设 a_1, \dots, a_n 为正实数, 且设 $s = a_1 + \cdots + a_n$, 试证明

$$(1 + a_1)(1 + a_2) \cdots (1 + a_n) \leq 1 + \frac{s}{1!} + \frac{s^2}{2!} + \cdots + \frac{s^n}{n!}.$$

由 AM-GM 不等式,

$$\prod_{j=1}^n (1 + a_j) \leq \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (1 + a_j) \right)^n = \left(1 + \frac{s}{n} \right)^n$$

二项展开得

$$\left(1 + \frac{s}{n} \right)^n = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} \frac{s^j}{n^j} = \sum_{j=0}^n \frac{n!}{(n-j)! j!} \frac{s^j}{n^j}.$$

注意当 $0 \leq j \leq n$ 时,

$$\frac{n!}{(n-j)! j!} = \prod_{k=0}^{j-1} \left(1 - \frac{k}{n} \right) \leq 1,$$

因此每一项满足

$$\frac{n!}{(n-j)! j!} \frac{s^j}{n^j} \leq \frac{s^j}{j!}.$$

代入二项和得到

$$\prod_{j=1}^n (1 + a_j) \leq \sum_{j=0}^n \frac{s^j}{j!},$$

即

$$(1 + a_1) \cdots (1 + a_n) \leq 1 + \frac{s}{1!} + \frac{s^2}{2!} + \cdots + \frac{s^n}{n!},$$

证毕。

118. 设 n 个正实数的最小值为 m , 最大值为 M , 记它们的算术平均为 A , 几何平均为 G 。证明

$$A - G \geq \frac{1}{n} \left(\sqrt{M} - \sqrt{m} \right)^2.$$

设 n 个正实数为 x_1, \dots, x_n , 不妨令 $x_1 = m, x_n = M$ 。不等式等价于

$$\begin{aligned} A - G &\geq \frac{\left(\sqrt{M} - \sqrt{m} \right)^2}{n} \\ \iff \sum_{j=1}^n x_j - n \left(\prod_{j=1}^n x_j \right)^{\frac{1}{n}} &\geq M - 2\sqrt{Mm} + m \\ \iff \sum_{j=2}^{n-1} x_j + 2\sqrt{Mm} &\geq n \left(\prod_{j=1}^n x_j \right)^{\frac{1}{n}} \end{aligned}$$

对这 n 个数

$$\sqrt{Mm}, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, \sqrt{Mm}$$

应用 AM-GM 不等式, 有

$$\frac{1}{n} \left(\sum_{j=2}^{n-1} x_j + 2\sqrt{Mm} \right) \geq \left(Mm \prod_{j=2}^{n-1} x_j \right)^{\frac{1}{n}} = \left(x_1 x_n \prod_{j=2}^{n-1} x_j \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{j=1}^n x_j \right)^{\frac{1}{n}}$$

即

$$\sum_{j=2}^{n-1} x_j + 2\sqrt{Mm} \geq n \left(\prod_{j=1}^n x_j \right)^{\frac{1}{n}}$$

故原不等式得证。

119. 设 $x_1, \dots, x_n \geq -1$, 且

$$\sum_{i=1}^n x_i^3 = 0,$$

证明

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq \frac{n}{3}.$$

当 $x \geq -1$ 时, 有不等式

$$0 \leq x^3 - \frac{3}{4}x + \frac{1}{4} = (x+1) \left(x - \frac{1}{2} \right)^2$$

将 x_1, \dots, x_n 代入上式并求和, 得到

$$0 \leq \sum_{i=1}^n x_i^3 - \frac{3}{4} \sum_{i=1}^n x_i + \frac{n}{4}$$

由已知条件

$$\sum_{i=1}^n x_i^3 = 0,$$

可得

$$0 \leq -\frac{3}{4} \sum_{i=1}^n x_i + \frac{n}{4} \Rightarrow \sum_{i=1}^n x_i \leq \frac{n}{3}$$

当且仅当 $n = 9k$, 其中 k 个 $x_i = -1$, 其余 $8k$ 个 $x_i = \frac{1}{2}$ 时取等号。

120. 已知非负实数 x_1, x_2, \dots, x_5 满足 $x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_5^2 = 4$. 求下式的最大值:

$$S = \sum_{i=1}^5 \frac{1}{x_i + 1} \sum_{i=1}^5 x_i$$

当 $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 1, x_5 = 0$ 时, $S = 12$, 下面证明 $S \leq 12$. 注意到

$$\frac{x(x-1)^2}{x+1} \geq 0$$

对 $x \geq 0$ 成立, 由此可得

$$\sum_{i=1}^5 \frac{x_i(x_i-1)^2}{x_i+1} \geq 0$$

展开可知

$$\sum_{i=1}^5 \left(x_i^2 - 3x_i + 4 - \frac{4}{x_i+1} \right) \geq 0$$

整理得

$$\sum_{i=1}^5 \frac{1}{x_i+1} \leq 6 - \frac{3}{4} \sum_{i=1}^5 x_i$$

由上式及 AM-GM 不等式可知

$$S \leq \frac{4}{3} \left(6 - \frac{3}{4} \sum_{i=1}^5 x_i \right) \left(\frac{3}{4} \sum_{i=1}^5 x_i \right) \leq \frac{4}{3} \cdot 3^2 = 12$$

数列与级数

1. 设 a, b, c 三数成等比数列, 且满足 $a + b + c = 9$ 及 $a^2 + b^2 + c^2 = 189$, 求 b 。

关键: 运用恒等式

$$(a + b + c)^2 = a^2 + b^2 + c^2 + 2(ab + bc + ac)$$

又已知 $b^2 = ac$, 故

$$81 = 189 + 2(b(9 - b) + b^2) \Rightarrow b = 6$$

2. 已知 a, b, c, d 成等差数列, 且实数 x, y, z, u 满足

$$\begin{cases} a + b + c + d = 60 \\ x + y + z + u = 12 \\ az + bu + cx + dy = 168 \end{cases}$$

求 $ay + bx + cu + dz$ 。

已知 a, b, c, d 成等差数列, 于是

$$\begin{aligned} ay + bx + cu + dz + 168 &= ay + bx + cu + dz + (az + bu + cx + dy) \\ &= (a + d)(y + z) + (b + c)(x + u) \\ &= 30(x + y + z + u) = 360 \end{aligned}$$

故

$$ay + bx + cu + dz = 192$$

3. 已知 $a_1 = -1, a_{n+1} = 2a_n - 3$, 求 a_{2017} 。

由递推式,

$$a_{n+1} - 3 = 2(a_n - 3),$$

所以 $a_1 - 3, a_2 - 3, \dots$ 成等比数列, 公比为 2。

$$a_{n+1} - 3 = 2^n(a_1 - 3) = 2^n(-1 - 3) = -2^{n+2} \Rightarrow a_{2017} = -2^{2018} + 3.$$

由

$$a_{n+1} - a_n = 2a_n - 3 - (2a_{n-1} - 3) = 2(a_n - a_{n-1}),$$

所以 $\{a_{n+1} - a_n\}$ 为等比数列, 公比为 2, 因此

$$\begin{aligned} a_n &= (a_2 - a_1) + (a_3 - a_2) + \cdots + (a_n - a_{n-1}) + a_1 \\ &= \frac{(a_2 - a_1)(2^{n-1} - 1)}{2 - 1} - 1 \\ &= (2a_1 - 3 - a_1)(2^{n-1} - 1) = -2^{n+1} + 3 \end{aligned}$$

所以

$$a_{2017} = -2^{2018} + 3$$

4. 若整数 $m \geqslant 1$, 函数 f 满足

$$f(m+1) = m(-1)^{m+1} - 2f(m), \quad f(1) = f(2001),$$

求 $f(1) + f(2) + \cdots + f(2000)$ 。

由递推式可得

$$f(2) = 1 - 2f(1), \quad f(3) = -2 - 2f(2), \quad f(4) = 3 - 2f(3), \quad \dots, \quad f(2001) = 2000 - 2f(2000),$$

将 $f(2001)$ 替换为 $f(1)$ 并将所有式子相加, 得

$$\sum_{i=1}^{2000} f(i) = 1 - 2 + 3 - 4 + \cdots + 1999 - 2000 - 2 \sum_{i=1}^{2000} f(i)$$

所以

$$\sum_{i=1}^{2000} f(i) = \frac{1}{3} \left(\frac{2000}{2} - 2000 \right) = -\frac{1000}{3}$$

5. 已知数列 $\{a_n\}$ 定义为

$$a_{n+1} = a_n + \frac{2n}{n^4 + n^2 + 1}, \quad a_1 = 0, \quad n \in \mathbb{N},$$

求 a_{61} 的值。

由递推关系, 对 $n = 1, 2, \dots, 60$ 累加得

$$a_{61} = a_1 + \sum_{n=1}^{60} \frac{2n}{n^4 + n^2 + 1} = \sum_{n=1}^{60} \left(\frac{1}{n^2 - n + 1} - \frac{1}{n^2 + n + 1} \right)$$

再由累加法,

$$a_{61} = \frac{1}{1^2 - 1 + 1} - \frac{1}{60^2 + 60 + 1} = 1 - \frac{1}{3661} = \frac{3660}{3661}$$

6. 数列 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$ 满足 $a_0 = 3$, 且

$$(3 - a_{n-1})(6 + a_n) = 18,$$

证明

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{a_k} = \frac{1}{3} (2^{n+2} - n - 4)$$

由递推关系

$$(3 - a_{n+1})(a_n + 6) = 18 \implies a_{n+1} = \frac{3a_n}{a_n + 6} \quad (1)$$

两边加 3 得到

$$a_{n+1} + 3 = \frac{3a_n}{a_n + 6} + 3 = \frac{6(a_n + 3)}{a_n + 6} \quad (2)$$

两式相比得

$$\frac{a_{n+1} + 3}{a_{n+1}} = \frac{2(a_n + 3)}{a_n}$$

故数列 $\left\{ \frac{a_n + 3}{a_n} \right\}$ 是首项为 2, 公比为 2 的等比数列, 解得

$$\frac{a_n + 3}{a_n} = 2^{n+1} \implies a_n = \frac{3}{2^{n+1} - 1}$$

因此

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{a_k} = \sum_{k=1}^n \frac{2^{k+1} - 1}{3} = \frac{1}{3} (2^{n+2} - n - 4)$$

7. 设一函数 f 的定义域为所有正整数, 如果 $f(1) = 101$, 且对所有正整数 $n > 1$ 皆有

$$f(1) + f(2) + f(3) + \dots + f(n) = n^2 f(n)$$

求 $f(100)$ 的值。

发现

$$f(n) = \sum_{k=1}^n f(k) - \sum_{k=1}^{n-1} f(k) = n^2 f(n) - (n-1)^2 f(n-1)$$

即

$$f(n) = \frac{n-1}{n+1} f(n-1)$$

于是

$$f(100) = \frac{99 \cdot 98 \cdots 1}{101 \cdot 100 \cdots 3} f(1) = \frac{2}{101 \cdot 100} \cdot 101 = \frac{1}{50}$$

8. 已知数列 $\{a_n\}$ 满足: $a_1 = 1$, $a_{n+1} = a_n + \frac{1}{a_n}$, 则 $[a_{2025}] =$

由题意可知

$$a_{n+1}^2 = a_n^2 + \frac{1}{a_n^2} + 2$$

所以有

$$a_{2025}^2 = a_1^2 + 2 \times (2025 - 1) + \left(\frac{1}{a_1^2} + \frac{1}{a_2^2} + \cdots + \frac{1}{a_{2024}^2} \right)$$

又因为 $a_1 = 1$, 且有

$$\frac{1}{a_1^2} + \frac{1}{a_2^2} + \cdots + \frac{1}{a_{2024}^2} < 47$$

所以

$$63 = \sqrt{3969} < a_{2025} < \sqrt{4096} = 64$$

故 $[a_{2025}] = 63$.

9. 设 $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$ 满足 $f(1) = \frac{3}{2}$, 且对所有 $n \in \mathbb{N}$ 且满足

$$f(n+1) = \left(1 + \frac{1}{n+1}\right) f(n) + \left(1 + \frac{n}{2}\right) f(1) + n^2 + 2n,$$

求 $f(40)$ 。

将递推式改写为

$$f(n+1) = \frac{n+2}{n+1} f(n) + g(n),$$

其中 $g(n) = (n+2) \left(n + \frac{3}{4} \right)$, 于是

$$\begin{aligned}
 f(40) &= \frac{41}{40}f(39) + g(39) \\
 &= \frac{41}{39}f(38) + \frac{41}{40}g(38) + g(39) \\
 &= \dots \\
 &= \frac{41}{2}f(1) + \sum_{k=1}^{39} \frac{41}{k+2} g(k) \\
 &= \frac{41}{2} \cdot \frac{3}{2} + 41 \sum_{k=1}^{39} \left(k + \frac{3}{4} \right) \\
 &= \frac{123}{4} + \frac{39 \cdot 40}{2} + 39 \cdot \frac{3}{4} \\
 &= 33210
 \end{aligned}$$

10. 已知数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_1 = a_2 = a_3 = 1$, 令 $b_n = a_n + a_{n+1} + a_{n+2}$, $n \in \mathbb{N}$, 若 $\{b_n\}$ 是公比为 3 的等比数列, 求 a_{100} 的值。

由条件知

$$b_n = b_1 \cdot 3^{n-1} = 3^n$$

因此

$$a_{n+3} - a_n = b_{n+1} - b_n = 3^{n+1} - 3^n = 2 \cdot 3^n$$

于是

$$\begin{aligned}
 a_{100} &= a_1 + \sum_{k=1}^{33} (a_{3k+1} - a_{3k-2}) = 1 + \sum_{k=1}^{33} 2 \cdot 3^{3k-2} \\
 &= 1 + 6 \cdot \frac{27^{33} - 1}{27 - 1} = 1 + \frac{3}{13} (3^{99} - 1) = \frac{3^{100} + 10}{13}
 \end{aligned}$$

11. 已知递归数列满足

$$a_1 = \frac{1}{2}, \quad a_{n+1} = \frac{a_n + 3}{2a_n - 4},$$

求通项公式 a_n 。

先求不动点, 设 $x = \frac{x+3}{2x-4}$, 得 $2x^2 - 5x - 3 = 0$, 所以不动点为 $x = -\frac{1}{2}, 3$, 于是

$$R_n = \frac{a_n + \frac{1}{2}}{a_n - 3}.$$

且

$$R_{n+1} = \frac{a_{n+1} + \frac{1}{2}}{a_{n+1} - 3} = -\frac{2}{5}R_n,$$

即 $\{R_n\}$ 为公比 $-\frac{2}{5}$ 的等比数列, 由于 $R_1 = \frac{a_1 + \frac{1}{2}}{a_1 - 3} = -\frac{2}{5}$, 故

$$R_n = \left(-\frac{2}{5}\right)^n$$

于是

$$a_n = \frac{3R_n + \frac{1}{2}}{R_n - 1} = \frac{6\left(-\frac{2}{5}\right)^n + 1}{2\left(\left(-\frac{2}{5}\right)^n - 1\right)} = \frac{5^n + 6(-2)^n}{2((-2)^n - 5^n)}.$$

12. 设实数数列 $\{a_n\}$ 满足

$$a_n a_{n+2} - a_{n+1}^2 - (n+1)a_n a_{n+1} = 0$$

已知 $a_1 = 1, a_2 = 2018$, 求

$$\frac{a_{2018} \cdot a_{2016}}{a_{2017}^2}$$

由递推关系得

$$\frac{a_{n+2}}{a_{n+1}} = \frac{a_{n+1}}{a_n} + (n+1)$$

由 $\frac{a_2}{a_1} = 2018$, 有

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = 2018 + \sum_{k=2}^n k = 2017 + \frac{n(n+1)}{2}$$

故

$$\frac{a_{2018} a_{2016}}{a_{2017}^2} = \frac{2017 \left(1 + \frac{2018}{2}\right)}{2017 \left(1 + \frac{2016}{2}\right)} = \frac{1010}{1009}$$

13. 设数列 $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$ 满足 $a_1 = a_2 = 1, a_3 = 2$, 且对任意自然数 n , 都有

$$a_n a_{n+1} a_{n+2} a_{n+3} = a_n + a_{n+1} + a_{n+2} + a_{n+3},$$

且 $a_n a_{n+1} a_{n+2} \neq 1$, 求 $a_1 + a_2 + \cdots + a_{100}$ 。

由

$$a_n a_{n+1} a_{n+2} a_{n+3} = a_n + a_{n+1} + a_{n+2} + a_{n+3}$$

及

$$a_{n+1} a_{n+2} a_{n+3} a_{n+4} = a_{n+1} + a_{n+2} + a_{n+3} + a_{n+4}$$

两式相减得

$$(a_{n+1} a_{n+2} a_{n+3} - 1)(a_{n+4} - a_n) = 0$$

因为 $a_{n+1} a_{n+2} a_{n+3} \neq 1$, 所以 $a_{n+4} = a_n$, 数列 $\{a_n\}$ 周期为 4, 数列的前四项为 1, 1, 2, 4, 于是

$$a_1 + a_2 + \cdots + a_{100} = 25 \cdot (1 + 1 + 2 + 4) = 200$$

14. 已知函数

$$f(x) = \frac{(x+1)^4 + (x-1)^4}{(x+1)^4 - (x-1)^4}, \quad x \neq 0$$

在数列 $\{a_n\}$ 中, $a_1 = 2, a_{n+1} = f(a_n)$ 。求数列 $\{a_n\}$ 的通项公式。

观察到

$$\frac{a_{n+1} - 1}{a_{n+1} + 1} = \frac{f(a_n) - 1}{f(a_n) + 1} = \frac{(a_n - 1)^4}{(a_n + 1)^4} = \left(\frac{a_n - 1}{a_n + 1} \right)^4$$

令 $b_n = \frac{a_n - 1}{a_n + 1}$, 则有

$$b_{n+1} = b_n^4$$

已知 $b_1 = \frac{2-1}{2+1} = \frac{1}{3}$, 由此可得

$$b_n = b_1^{4^{n-1}} = \left(\frac{1}{3} \right)^{4^{n-1}}$$

由

$$b_n = \frac{a_n - 1}{a_n + 1} \Rightarrow a_n = \frac{1 + b_n}{1 - b_n},$$

代入得

$$a_n = \frac{3^{4^{n-1}} + 1}{3^{4^{n-1}} - 1}$$

15. 已知数列 $\{a_n\}$ 中, $a_1 = 2$,

$$a_n = \frac{1 + a_{n-1}}{1 - a_{n-1}},$$

求 $\{a_n\}$ 的通项公式。

通过计算数列的前几项寻找规律:

$$a_1 = 2$$

$$a_2 = \frac{1+2}{1-2} = -3$$

$$a_3 = \frac{1-3}{1-(-3)} = -\frac{1}{2}$$

$$a_4 = \frac{1-1/2}{1-(-1/2)} = \frac{1}{3}$$

$$a_5 = \frac{1+1/3}{1-1/3} = 2 = a_1$$

由此可知数列 $\{a_n\}$ 是以 4 为周期的周期数列, 通项公式为

$$a_n = \begin{cases} 2 & n = 4k - 3 \\ -3 & n = 4k - 2 \\ -\frac{1}{2} & n = 4k - 1 \\ \frac{1}{3} & n = 4k \end{cases}, k \in \mathbb{N}$$

16. 已知数列 $\{a_n\}$ 由递推关系定义如下:

$$a_0 = 1, \quad a_{n+1} = \frac{a_n}{2(n+1)}, \quad n \geq 0,$$

若函数 f 定义为

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n,$$

求 $f(2)$ 的精确值。

根据递推关系, 可以看出所有奇数项 $a_{2n+1} = 0$, 偶数项为

$$a_0 = 1, \quad a_2 = \frac{1}{2}, \quad a_4 = \frac{1}{8}, \quad a_6 = \frac{1}{48}, \dots$$

满足

$$a_{2n} = \frac{1}{2^n n!}$$

因此函数 f 可表示为

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n} x^{2n} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^n n!} x^{2n} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{x^2}{2}\right)^n = e^{\frac{x^2}{2}}$$

所以

$$f(2) = e^2$$

17. 设 $\{b_n\}_{n=0}^{\infty}$ 为一列正实数, 且 $b_0 = 1$,

$$b_n = 2 + \sqrt{b_{n-1}} - 2\sqrt{1 + \sqrt{b_{n-1}}},$$

计算

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n 2^n.$$

令 $a_n = 1 + \sqrt{b_n}$, 其中 $n \geq 0$, 则 $a_n > 1$, $a_0 = 2$, 并且

$$a_n = 1 + \sqrt{1 + a_{n-1} - 2\sqrt{a_{n-1}}} = \sqrt{a_{n-1}}$$

因此

$$a_n = 2^{2^{-n}}$$

于是

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N b_n 2^n &= \sum_{n=1}^N (a_n - 1)^2 2^n \\ &= \sum_{n=1}^N (a_n^2 2^n - a_n 2^{n+1} + 2^n) \\ &= \sum_{n=1}^N ((a_{n-1} - 1)^2 2^n - (a_n - 1)^2 2^{n+1}) \\ &= (a_0 - 1)^2 2 - (a_N - 1)^2 2^{N+1} \\ &= 2 - 2 \frac{2^{2^{-N}} - 1}{2^{-N}} \end{aligned}$$

令 $x = 2^{-N}$, 当 $N \rightarrow \infty$ 时有 $x \rightarrow 0$, 由洛必达法则,

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n 2^n = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(2 - 2 \frac{2^{2^{-N}} - 1}{2^{-N}} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(2 - 2 \frac{2^x - 1}{x} \right) = 2 - 2 \ln 2$$

18. 一列 11 个正实数 a_1, a_2, \dots, a_{11} 满足 $a_1 = 4, a_{11} = 1024$, 并且对 $2 \leq n \leq 11$ 有

$$a_n + a_{n-1} = \frac{5}{2} \sqrt{a_n a_{n-1}}.$$

求满足条件的序列数量 S 。

设 $a_n = x, a_{n-1} = y$, 解

$$x + y = \frac{5}{2} \sqrt{xy}$$

得

$$x = 4y \text{ 或 } x = \frac{y}{4}.$$

考虑二叉树, 每一步可以乘以 4 或除以 4。从 $a_1 = 4$ 到 $a_{11} = 1024$ 共 10 步:

$$4^m \cdot 4^{-(10-m)} = 4^4 \Rightarrow m = 7$$

即有 7 步乘以 4, 3 步除以 4。可能序列数为选择 3 步除以 4 的位置数:

$$S = {}^{10}C_3 = 120$$

19. 已知复数列 $\{z_n\}$ 满足 $z_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}, z_{n+1} = \overline{z_n}(1 + z_n i)$, 其中 $n \in \mathbb{N}$, 求 z_{2021} 的值。

对 $n \in \mathbb{N}$, 设 $z_n = a_n + b_n i$, $a_n, b_n \in \mathbb{R}$, 则

$$a_{n+1} + b_{n+1} i = z_{n+1} = \overline{z_n}(1 + z_n i) = \overline{z_n} + |z_n|^2 i = a_n - b_n i + (a_n^2 + b_n^2) i$$

因此

$$a_{n+1} = a_n = a_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}, b_{n+1} = a_n^2 + b_n^2 - b_n = b_n^2 - b_n + \frac{3}{4}$$

即

$$b_{n+1} - \frac{1}{2} = b_n^2 - b_n + \frac{1}{4} = (b_n - \frac{1}{2})^2$$

所以当 $n \geq 2$,

$$b_n = \frac{1}{2} + (b_1 - \frac{1}{2})^{2^{n-1}} = \frac{1}{2} + (-\frac{1}{2})^{2^{n-1}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2^{2^{n-1}}}$$

于是

$$z_{2021} = a_{2021} + b_{2021} i = \frac{\sqrt{3}}{2} + (\frac{1}{2} + \frac{1}{2^{2^{2020}}}) i$$

20. 已知 $a_0 = \frac{1}{2}$,

$$a_n = \left(\frac{1 + a_{n-1}}{2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \forall n \in \mathbb{N},$$

求 $\lim_{n \rightarrow \infty} 4^n \cdot (1 - a_n)$ 。

由

$$\cos \theta = \left(\frac{1 + \cos 2\theta}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

可得 $a_0 = \cos \frac{\pi}{3} = \frac{1}{2}$, 从而

$$a_1 = \cos \frac{\pi}{3 \cdot 2} = \left(\frac{1 + \frac{1}{2}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{3}}{2}, a_2 = \cos \frac{\pi}{3 \cdot 2^2}, \dots, a_n = \cos \frac{\pi}{3 \cdot 2^n}$$

由泰勒展开,

$$a_n = \cos \frac{\pi}{3 \cdot 2^n} = 1 - \frac{\left(\frac{\pi}{3 \cdot 2^n} \right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{\pi}{3 \cdot 2^n} \right)^4}{4!} - \dots$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} 4^n \cdot (1 - a_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} 4^n \cdot \left(\frac{\left(\frac{\pi}{3 \cdot 2^n} \right)^2}{2!} - \frac{\left(\frac{\pi}{3 \cdot 2^n} \right)^4}{4!} + \dots \right) = \frac{\pi^2}{9} \cdot \frac{1}{2!} = \frac{\pi^2}{18}$$

21. Let a_1, a_2, \dots be a sequence of real numbers satisfying

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} - \frac{a_{n+2}}{a_n} - \frac{a_{n+1}a_{n+2}}{a_n^2} = \frac{na_{n+2}a_{n+1}}{a_n}.$$

Given that $a_1 = -1$ and $a_2 = -\frac{1}{2}$, find the value of $\frac{a_9}{a_{20}}$.

(待解)

22. 数列 1, 2, 2, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 5, ... 的第 100 项是?

一般地, 数字 n 出现 n 项, 因此从数字 1 到数字 n 共出现

$$1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}$$

项, 由 $\frac{n(n+1)}{2} \leq 100$ 得 $n < 14$, 取 $n = 13$ 时共有 91 项, 因此第 100 项为 14。

23. 等差数列 1, 3, 5, 7, 9, 11, ... 按如下方法分组

$$(1), (3, 5), (7, 9, 11), (13, 15, 17, 19), \dots$$

求第 n 组中 n 个数的和 S_n 。

等差数列 $1, 3, 5, 7, \dots$ 的通项公式为

$$a_n = 2n - 1.$$

第 n 组有 n 个奇数, 因此第 n 组的第 n 个奇数是等差数列中的第

$$1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}$$

个奇数, 且第 n 组的第 1 个奇数是等差数列中的第

$$\frac{n(n+1)}{2} - (n-1) = \frac{n^2 - n + 2}{2}$$

故第 n 组中第 n 个奇数是

$$2 \cdot \frac{n(n+1)}{2} - 1 = n^2 + n - 1$$

第 n 组中第 1 个奇数是

$$2 \cdot \frac{n^2 - n + 2}{2} - 1 = n^2 - n + 1$$

所以

$$S_n = \frac{n[(n^2 + n - 1) - (n^2 - n + 1)]}{2} = n^3$$

24. 已知数列 $\{a_n\}$, 且 $a_1 = 1$, 定义 $S_n = n^2 a_n$. 求 a_n 和 S_n .

由

$$a_n = S_n - S_{n-1} = n^2 a_n - (n-1)^2 a_{n-1} \Rightarrow (n^2 - 1)a_n = (n-1)^2 a_{n-1}$$

于是

$$\frac{a_n}{a_{n-1}} = \frac{n-1}{n+1}.$$

因此

$$a_n = \frac{a_n}{a_{n-1}} \cdot \frac{a_{n-1}}{a_{n-2}} \cdots \frac{2}{4} \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 = \frac{2}{n(n+1)}$$

且

$$S_n = n^2 a_n = \frac{2n}{n+1}.$$

25. 已知等差数列 $\{a_n\}$ 公差 $d = 2$, $a_1 + a_2 + \dots + a_{100} = 100$, 求 $a_4 + a_8 + \dots + a_{100}$ 的值。

由

$$a_1 + a_2 + \cdots + a_{100} = 100,$$

解得

$$100a_1 + \frac{100 \cdot 99}{2} \cdot 2 = 100 \Rightarrow a_1 = -98$$

于是 $a_4 = -92, a_{100} = 100$,

$$a_4 + a_8 + \cdots + a_{100} = \frac{25}{2}(-92 + 100) = 100.$$

26. 已知 $F_1 = 0, F_2 = 1$, 求斐波那契数列 $F_n + F_{n+1} = F_{n+2}$ 的通项 F_n 。

数列

$$F_n + F_{n+1} = F_{n+2}$$

的特征方程为

$$1 + \lambda = \lambda^2$$

解得

$$\lambda_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}, \lambda_2 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}$$

于是

$$F_n = C_1 \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^{n-1} + C_2 \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^{n-1}$$

代入初值 $F_1 = 0, F_2 = 1$ 解得

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{5}}, \quad C_2 = -\frac{1}{\sqrt{5}}$$

因此

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^{n-1} - \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^{n-1} \right]$$

27. 已知数列 $a_1 = 1, a_2 = 5$, 且 $a_{n+1} = 4a_n - 4a_{n-1}, n \geq 2$, 求通项公式 a_n 。

此数列对应特征方程为

$$\lambda^2 - 4\lambda + 4 = 0$$

解得 $\lambda_1 = \lambda_2 = 2$, 设此数列的通项公式为

$$a_n = (C_1 + nC_2) \cdot 2^n$$

代入初值 $a_1 = 1, a_2 = 5$ 可知

$$C_1 = -\frac{1}{4}, \quad C_2 = \frac{3}{4}$$

所以

$$a_n = (3n - 1) \cdot 2^{n-2}$$

28. 设数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_0 = 1, a_1 = 4$, 且

$$a_{n+2} - 14a_{n+1} + a_n + 6 = 0.$$

求证 a_n 是完全平方数。

将递推式化为

$$\left(a_{n+2} - \frac{1}{2}\right) - 14\left(a_{n+1} - \frac{1}{2}\right) + \left(a_n - \frac{1}{2}\right) = 0$$

令 $b_n = a_n - \frac{1}{2}$, 且 $b_0 = \frac{1}{2}, b_1 = \frac{7}{2}$, 则

$$b_{n+2} - 14b_{n+1} + b_n = 0$$

由特征方程 $\lambda^2 - 14\lambda + 1 = 0$ 得两根

$$\lambda_1 = 7 + 4\sqrt{3}, \lambda_2 = 7 - 4\sqrt{3}$$

故设

$$b_n = C_1\lambda_1^n + C_2\lambda_2^n,$$

由 $n = 0, 1$ 时条件解得 $C_1 = C_2 = \frac{1}{4}$, 因此

$$b_n = \frac{1}{4}(7 + 4\sqrt{3})^n + \frac{1}{4}(7 - 4\sqrt{3})^n = \frac{1}{4}(2 + \sqrt{3})^{2n} + \frac{1}{4}(2 - \sqrt{3})^{2n}$$

则

$$a_n = b_n + \frac{1}{2} = \frac{1}{4}(2 + \sqrt{3})^{2n} + \frac{1}{4}(2 - \sqrt{3})^{2n} + \frac{1}{2} = \left[\frac{(2 + \sqrt{3})^n + (2 - \sqrt{3})^n}{2} \right]^2$$

因为 $(2 + \sqrt{3})^n + (2 - \sqrt{3})^n$ 为偶数, 所以 a_n 是完全平方数, 故得证。

29. 设

$$D_1 = 4, \quad D_2 = \begin{vmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}, \quad D_3 = \begin{vmatrix} 4 & 2 & 0 \\ 2 & 4 & 2 \\ 0 & 2 & 4 \end{vmatrix}, \dots$$

求 D_{10} 。

观察到

$$D_n = 4D_{n-1} - 4D_{n-2}$$

特征方程为

$$\lambda^2 = 4\lambda - 4$$

解得 $\lambda_1 = \lambda_2 = 2$, 设

$$D_n = (C_1 + nC_2) \cdot 2^{n-1}$$

由 $D_1 = 4, D_2 = 12$, 解得 $C_1 = 2, C_2 = 2$, 因此

$$D_n = (2 + 2n) \cdot 2^{n-1} = (n + 1) \cdot 2^n$$

当 $n = 10$ 时,

$$D_{10} = 11 \cdot 1024 = 11264$$

30. 已知对任意 x ,

$$f(x+1) + f(x-1) = \sqrt{2}f(x),$$

且 $f(1) = 2, f(2) = 1$, 求 $f(2010)$ 。

将 $f(x+1) + f(x-1) = \sqrt{2}f(x)$ 化为

$$a_{n+2} + a_n = \sqrt{2}a_{n+1}$$

且 $a_1 = 2, a_2 = 1$, 特征方程为

$$\lambda^2 - \sqrt{2}\lambda + 1 = 0$$

解得

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{2} \pm i \frac{\sqrt{2}}{2} = \cos \frac{\pi}{4} \pm i \sin \frac{\pi}{4}$$

则

$$a_n = C_1 \cos \frac{n\pi}{4} + C_2 \sin \frac{n\pi}{4}$$

代入 $a_1 = 2, a_2 = 1$ 得 $C_1 = 2\sqrt{2} - 1, C_2 = 1$, 于是

$$a_{2010} = (2\sqrt{2} - 1) \cos \frac{2010\pi}{4} + \sin \frac{2010\pi}{4} = 1$$

31. 一实数列 $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 定义为

$$u_1 = \sqrt{2}, \quad u_2 = \pi, \quad u_n = u_{n-1} - u_{n-2} \quad \forall n \geq 3$$

求 u_n, u_{2008} 及 u_{2016} 。

由递推关系 $u_n - u_{n-1} + u_{n-2} = 0$, 其特征方程为

$$x^2 - x + 1 = 0$$

求得特征根为

$$x = \frac{1 \pm \sqrt{3}i}{2} = \cos \frac{\pi}{3} \pm i \sin \frac{\pi}{3}$$

因此数列的通项公式形式为

$$u_n = C_1 \cos \frac{n\pi}{3} + C_2 \sin \frac{n\pi}{3}$$

代入初始条件 $u_1 = \sqrt{2}, u_2 = \pi$, 解得

$$C_1 = \sqrt{2} - \pi, \quad C_2 = \frac{\sqrt{2} + \pi}{\sqrt{3}}$$

故通项公式为

$$u_n = (\sqrt{2} - \pi) \cos \frac{n\pi}{3} + \frac{\sqrt{2} + \pi}{\sqrt{3}} \sin \frac{n\pi}{3}$$

令 $n = 2016$, 可得

$$u_{2016} = \sqrt{2} - \pi$$

32. 已知数列 $\{a_n\}$ 中, $a_1 = 1$,

$$S_n = \frac{S_{n-1}}{2S_{n-1} + 1},$$

求 $\{a_n\}$ 的通项公式。

有

$$\frac{1}{S_n} = \frac{2S_{n-1} + 1}{S_{n-1}} = \frac{1}{S_{n-1}} + 2$$

说明数列 $\left\{\frac{1}{S_n}\right\}$ 是以 $\frac{1}{S_1} = \frac{1}{a_1} = 1$ 为首项, 2 为公差的等差数列, 则

$$\frac{1}{S_n} = 1 + (n-1) \cdot 2 = 2n-1 \Rightarrow S_n = \frac{1}{2n-1}$$

当 $n \geq 2$ 时,

$$a_n = S_n - S_{n-1} = \frac{1}{2n-1} - \frac{1}{2n-3} = -\frac{2}{(2n-1)(2n-3)}$$

故通项公式为

$$a_n = \begin{cases} 1 & , n=1 \\ -\frac{2}{(2n-1)(2n-3)} & , n \geq 2 \end{cases}$$

33. 已知正数数列 $\{a_n\}$ 的前 n 项和

$$S_n = \frac{1}{2} \left(a_n + \frac{1}{a_n} \right),$$

求 $\{a_n\}$ 的通项公式。

当 $n=1$ 时,

$$a_1 = S_1 = \frac{1}{2} \left(a_1 + \frac{1}{a_1} \right) \Rightarrow a_1^2 = 1 \Rightarrow a_1 = 1 > 0$$

当 $n \geq 2$ 时, 有

$$a_n = S_n - S_{n-1} = \frac{1}{2} \left(a_n + \frac{1}{a_n} - a_{n-1} - \frac{1}{a_{n-1}} \right)$$

$$a_n + a_{n-1} = \frac{1}{a_n} - \frac{1}{a_{n-1}} = \frac{a_{n-1} - a_n}{a_n a_{n-1}}$$

由于 $a_n + a_{n-1} > 0$, 等式两边同除以 $(a_n + a_{n-1})$ 得:

$$1 = \frac{a_{n-1} - a_n}{(a_n + a_{n-1})a_n a_{n-1}}$$

经观察或递推可得 $S_n = \sqrt{n}$ 满足原式, 则 $a_n = \sqrt{n} - \sqrt{n-1}$ 。验证: 当 $a_n = \sqrt{n} - \sqrt{n-1}$ 时, $\frac{1}{a_n} = \sqrt{n} + \sqrt{n-1}$, 则 $\frac{1}{2}(a_n + \frac{1}{a_n}) = \frac{1}{2}(\sqrt{n} - \sqrt{n-1} + \sqrt{n} + \sqrt{n-1}) = \sqrt{n} = S_n$, 符合题意。故 $a_n = \sqrt{n} - \sqrt{n-1}$ 。(待验证)

34. 数列 $\{a_n\}$ 中, $a_1 = 1$ 且 $a_n a_{n+1} = 4^n$, 求前 n 项和 S_n 。

由题意,

$$\frac{a_{n+2}}{a_n} = \frac{a_{n+2}}{a_{n+1}} \cdot \frac{a_{n+1}}{a_n} = 4,$$

故 $\{a_1, a_3, a_5, \dots\}$ 与 $\{a_2, a_4, a_6, \dots\}$ 皆为公比为 4 的等比数列, 其中

$$a_1 = 1, a_2 = 4,$$

当 n 为奇数,

$$\begin{aligned} S_n &= (a_1 + a_3 + \dots + a_n) + (a_2 + a_4 + \dots + a_{n-1}) \\ &= \frac{1(1 - 4^{\frac{n+1}{2}})}{1 - 4} + \frac{4(1 - 4^{\frac{n-1}{2}})}{1 - 4} = \frac{2^{n+1} - 1}{3} + \frac{2^{n+1} - 4}{3} = \frac{4}{3} \cdot 2^n - \frac{5}{3}. \end{aligned}$$

当 n 为偶数,

$$\begin{aligned} S_n &= (a_1 + a_3 + \dots + a_{n-1}) + (a_2 + a_4 + \dots + a_n) \\ &= \frac{1(1 - 4^{\frac{n}{2}})}{1 - 4} + \frac{4(1 - 4^{\frac{n}{2}})}{1 - 4} = \frac{5}{3} \cdot 2^n - \frac{5}{3}. \end{aligned}$$

综上,

$$S_n = \frac{9 + (-1)^n}{3} \cdot 2^{n-1} - \frac{5}{3}$$

35. 已知数列 $\{x_n\}$ 的首项 $x_1 = 3$, 通项

$$x_n = 2^n p + nq, \quad n \in \mathbb{N}, \quad p, q \in \mathbb{R},$$

且 x_1, x_4, x_5 成等差数列, 求:

(a) p, q 的值;

由 $x_1 = 3$, 得

$$2p + q = 3 \tag{1}$$

又 $x_1 + x_5 = 2x_4$, 得

$$3 + 2^5 p + 5q = 2(2^4 p + 4q) \tag{2}$$

解得

$$p = 1, \quad q = 1$$

(b) 数列 $\{x_n\}$ 的前 n 项的和 S_n 的公式。

有

$$S_n = (2^1 + 2^2 + \cdots + 2^n) + (1 + 2 + \cdots + n) = 2^{n+1} - 2 + \frac{n(n+1)}{2}$$

36. 设数列 $\{a_n\}$ 的前 n 项和为

$$S_n = 2a_n - 2^n.$$

(a) 求 a_1, a_4 ;

当 $n = 1$ 时, 解得

$$S_1 = a_1 = 2a_1 - 2 \Rightarrow a_1 = 2$$

由 $S_n = 2a_n - 2^n$, 得

$$2a_{n+1} = S_{n+1} + 2^{n+1} = a_{n+1} + S_n + 2^{n+1}$$

从而

$$a_{n+1} = S_n + 2^{n+1}$$

因此

$$a_2 = S_1 + 2^2 = 6, S_2 = 8, a_3 = S_2 + 2^3 = 16, S_3 = 24, a_4 = S_3 + 2^4 = 40.$$

(b) 证明 $\{a_{n+1} - 2a_n\}$ 是等比数列;

由上式可得

$$a_{n+1} - 2a_n = (S_n + 2^{n+1}) - (S_n + 2^n) = 2^n$$

故数列 $\{a_{n+1} - 2a_n\}$ 是首项为 2、公比为 2 的等比数列。

(c) 求数列 $\{a_n\}$ 的通项公式。

由

$$a_{n+1} - 2a_n = 2^n$$

得

$$a_n = (a_n - 2a_{n-1}) + 2(a_{n-1} - 2a_{n-2}) + \cdots + 2^{n-2}(a_2 - 2a_1) + 2^{n-1}a_1.$$

代入 $a_1 = 2, a_2 = 6$, 并利用 $a_{k+1} - 2a_k = 2^k$, 可得

$$a_n = 2^{n-1}(n+1)$$

37. 已知数列 $\{a_n\}$ 的首项 $a_1 = \frac{2}{3}$, 且

$$a_{n+1} = \frac{2a_n}{a_n + 1} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

(a) 证明数列 $\left\{\frac{1}{a_n} - 1\right\}$ 是等比数列;

由

$$a_{n+1} = \frac{2a_n}{a_n + 1}$$

得

$$\frac{1}{a_{n+1}} = \frac{a_n + 1}{2a_n} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{a_n}.$$

于是

$$\frac{1}{a_{n+1}} - 1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{a_n} - 1 \right).$$

又

$$a_1 = \frac{2}{3}, \quad \frac{1}{a_1} - 1 = \frac{1}{2}.$$

因此, 数列 $\left\{\frac{1}{a_n} - 1\right\}$ 是首项为 $\frac{1}{2}$ 、公比为 $\frac{1}{2}$ 的等比数列。

(b) 求数列 $\left\{\frac{n}{a_n}\right\}$ 的前 n 项和 S_n 。

由 (a) 可得

$$\frac{1}{a_n} - 1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^{n-1}} = \frac{1}{2^n} \Rightarrow \frac{n}{a_n} = \frac{n}{2^n} + n$$

设

$$T_n = \frac{1}{2} + \frac{2}{2^2} + \frac{3}{2^3} + \cdots + \frac{n}{2^n},$$

则

$$\frac{1}{2}T_n = \frac{1}{2^2} + \frac{2}{2^3} + \cdots + \frac{n-1}{2^n} + \frac{n}{2^{n+1}}$$

两式相减得

$$\frac{1}{2}T_n = \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \cdots + \frac{1}{2^n} - \frac{n}{2^{n+1}} = 1 - \frac{1}{2^n} - \frac{n}{2^{n+1}} \Rightarrow T_n = 2 - \frac{1}{2^{n-1}} - \frac{n}{2^n}$$

又因为

$$1 + 2 + 3 + \cdots + n = \frac{n(n+1)}{2},$$

所以数列 $\left\{\frac{n}{a_n}\right\}$ 的前 n 项和 S_n 为

$$S_n = 2 - \frac{n+2}{2^n} + \frac{n(n+1)}{2} = \frac{n^2 + n + 4}{2} - \frac{n+2}{2^n}$$

38. 等差数列 $\{a_n\}$ 的各项均为正数, $a_1 = 3$, 前 n 项和为 S_n , $\{b_n\}$ 为等比数列, $b_1 = 1$, 且

$$b_2 S_2 = 64, \quad b_3 S_3 = 960.$$

(a) 求 a_n 与 b_n ;

设等差数列 $\{a_n\}$ 的公差为 d , 等比数列 $\{b_n\}$ 的公比为 q 。则

$$a_n = 3 + (n-1)d, \quad b_n = q^{n-1}.$$

由

$$S_2 = 3 + (3+d) = 6+d, \quad S_3 = 3 + (3+d) + (3+2d) = 9+3d,$$

代入已知条件得

$$(6+d)q = 64, \quad (9+3d)q^2 = 960$$

解得

$$d = 2, q = 8 \quad \text{或} \quad d = -\frac{6}{5}, q = \frac{40}{3}$$

因 $\{a_n\}$ 各项均为正数, 舍去第二组解, 故

$$a_n = 3 + 2(n-1) = 2n+1, \quad b_n = 8^{n-1}.$$

(b) 求

$$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \cdots + \frac{1}{S_n}.$$

由 $a_n = 2n+1$ 得

$$S_n = 3 + 5 + \cdots + (2n+1) = n(n+2).$$

因此

$$\begin{aligned} \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \cdots + \frac{1}{S_n} &= \frac{1}{1 \cdot 3} + \frac{1}{2 \cdot 4} + \cdots + \frac{1}{n(n+2)} \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{2} - \frac{1}{4} + \cdots + \frac{1}{n} - \frac{1}{n+2} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+2} \right) \\ &= \frac{3}{4} - \frac{2n+3}{2(n+1)(n+2)} \end{aligned}$$

39. 设 S_n 是等差数列 $\{a_n\}$ 前 n 项的和, 已知 $\frac{1}{3}S_3$ 与 $\frac{1}{4}S_4$ 的等比中项为 $\frac{1}{5}S_5$, 等差中项为 1, 求等差数列的通项 a_n 。

由 $(S_3)(S_4) = (S_5)^2$ 及 $\frac{1}{3}S_3 + \frac{1}{4}S_4 = 2$ 得

$$\begin{cases} \frac{1}{3} \left(3a + \frac{3 \cdot 2}{2}d \right) \cdot \frac{1}{4} \left(4a + \frac{4 \cdot 3}{2}d \right) = \frac{1}{25} \left(5a + \frac{5 \cdot 4}{2}d \right)^2 \\ \frac{1}{3} \left(3a + \frac{3 \cdot 2}{2}d \right) + \frac{1}{4} \left(4a + \frac{4 \cdot 3}{2}d \right) = 2 \end{cases}$$

解得

$$d = 0, a = 1 \text{ 或 } d = -\frac{12}{5}, a = 4$$

经检验得通项解为 $a_n = 1$ 或

$$a_n = 4 - \frac{12}{5}(n-1) = \frac{32}{5} - \frac{12}{5}n$$

40. 已知数列 $\{a_n\}$ 中每一项均为正数, 且数列前 n 项之和为 S_n , 若

$$\sum_{k=1}^n \frac{4S_k}{a_k + 2} = S_n,$$

试求 a_n 及 S_n 。

由递推关系得

$$S_1 = a_1 = \frac{4a_1}{a_1 + 2} \Rightarrow a_1^2 - 2a_1 = 0$$

因 $a_1 \neq 0$, 解得 $a_1 = 2$, 于是

$$a_n = S_n - S_{n-1} = \sum_{k=1}^n \frac{4S_k}{a_k + 2} - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{4S_k}{a_k + 2} = \frac{4S_n}{a_n + 2} \Rightarrow S_n = \frac{1}{4}a_n(a_n + 2)$$

又

$$S_{n-1} = S_n - a_n = \frac{1}{4}a_n^2 - \frac{1}{2}a_n = \frac{1}{4}a_{n-1}(a_{n-1} + 2)$$

因此

$$a_n^2 - 2a_n = a_{n-1}^2 + 2a_{n-1} \Rightarrow (a_n - 1)^2 = (a_{n-1} + 1)^2 \Rightarrow a_n - 1 = a_{n-1} + 1$$

即

$$a_n = a_{n-1} + 2 = \cdots = a_1 + 2(n-1) = 2n, S_n = n^2 + n$$

41. 已知 $n^2 (n \geq 4)$ 个正数排成 n 行、 n 列, 如下:

$$\begin{array}{cccccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & \cdots & a_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & \cdots & a_{nn} \end{array}$$

且每一行的数成等差数列, 每一列的数成等比数列, 并且所有公比相等. 已知

$$a_{24} = 1, a_{42} = \frac{1}{8}, a_{43} = \frac{3}{16},$$

试求

$$a_{11} + a_{22} + \cdots + a_{nn}$$

的值。

设每一列的公比为 q , 第 i 行的等差数列公差为 d_i , 由每一列成等比数列且公比相等可知

$$a_{ij} = a_{1j} \cdot q^{i-1}$$

对于第四行, $a_{42} = \frac{1}{8}, a_{43} = \frac{3}{16}$, 则公差为 $d_4 = a_{43} - a_{42} = \frac{1}{16}$, 据此有

$$a_{44} = a_{43} + d_4 = \frac{1}{4},$$

又已知 $a_{24} = 1$, 且第四列成等比数列, 则

$$a_{44} = a_{24} \cdot q^2 \Rightarrow q = \frac{1}{2} > 0$$

由

$$a_{1j} = a_{4j} \cdot 2^3 = 8 \cdot \frac{j}{16} = \frac{j}{2}$$

因此

$$a_{ii} = a_{1i} \cdot q^{i-1} = \frac{i}{2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{i-1} = \frac{i}{2^i}$$

所求和为

$$S = \sum_{i=1}^n a_{ii} = \frac{1}{2^1} + \frac{2}{2^2} + \cdots + \frac{n}{2^n}$$

利用错位相减法,

$$\frac{1}{2}S = \frac{1}{2^2} + \frac{2}{2^3} + \cdots + \frac{n}{2^{n+1}}$$

$$\frac{1}{2}S = \frac{1}{2^1} + \frac{1}{2^2} + \cdots + \frac{1}{2^n} - \frac{n}{2^{n+1}}$$

$$\frac{1}{2}S = \left(1 - \frac{1}{2^n}\right) - \frac{n}{2^{n+1}}$$

得

$$S = 2 - \frac{n+2}{2^n}$$

42. 已知数列 $\{a_n\}$ 满足
$$\begin{cases} a_0 = 1 \\ a_{2k+1} = a_k \\ a_{2k+2} = a_k + a_{k+1} \end{cases}, k \in N \cup \{0\},$$
 求 $\sum_{k=0}^{63} a_k$ 。

记

$$S(n) = \sum_{k=0}^{2^n-1} a_k$$

则

$$S(n) = (a_0 + a_2 + a_4 + \cdots + a_{2^{n-2}}) + (a_1 + a_3 + \cdots + a_{2^{n-1}-1})$$

其中偶数项为

$$a_0 + (a_0 + a_1) + (a_1 + a_2) + (a_2 + a_3) + \cdots + (a_{2^{n-1}-2} + a_{2^{n-1}-1}) = 2(a_0 + a_1 + \cdots + a_{2^{n-1}-2}) + a_{2^{n-1}-1}$$

奇数项为

$$a_0 + a_1 + a_2 + \cdots + a_{2^{n-1}-1}$$

所以

$$S(n) = 3(a_0 + a_1 + \cdots + a_{2^{n-1}-2}) + 2a_{2^{n-1}-1} = 3(a_0 + a_1 + \cdots + a_{2^{n-1}-1}) - a_{2^{n-1}-1}$$

由 $a_{2^{n-1}-1} = 1$, 得

$$S(n) = 3S(n-1) - 1$$

于是

$$S(8) = 3S(7) - 1 = 3^2S(6) - 3 - 1 = \cdots = 3^5S(1) - (1 + 3 + \cdots + 3^4)$$

又 $S(1) = a_0 + a_1 = 2$, 所以

$$S(8) = 243 \cdot 2 - 121 = 365$$

43. 已知各项皆为正整数的数列 $\{a_n\}$ 的前 n 项和为 S_n , 且对任意正整数 n 有

$$\sqrt{S_n} = \lambda(a_n - 1) + 1,$$

其中 λ 为正实数。若 $2a_2 = a_1 + a_3$, 试求数列 $\{a_n\}$ 的一般项。

由 $2a_2 = a_1 + a_3$, 设

$$d = a_2 - a_1 = a_3 - a_2$$

则

$$\sqrt{S_2} - \sqrt{S_1} = \lambda(a_2 - a_1) = \lambda(a_3 - a_2) = \sqrt{S_3} - \sqrt{S_2} \Rightarrow 2\sqrt{S_2} = \sqrt{S_1} + \sqrt{S_3}$$

两边平方得

$$4S_2 = S_1 + S_3 + 2\sqrt{S_1 S_3} \Rightarrow 4(2a_1 + d) = 4a_1 + 3d + 2\sqrt{a_1(3a_1 + 3d)}$$

解得 $d = 2a_1$, 则

$$S_1 = a_1, S_2 = 4a_1, S_3 = 9a_1$$

解

$$\lambda = \sqrt{S_2} - \frac{1}{a_2 - 1} = \sqrt{S_3} - \frac{1}{a_3 - 1}$$

得 $a_1 = 1, \lambda = \frac{1}{2}$, 于是

$$\sqrt{S_n} = \frac{1}{2}(a_n - 1) + 1$$

$$a_n = S_n - S_{n-1} = 2\sqrt{S_n} - 1$$

$$(\sqrt{S_n} - 1)^2 = S_{n-1}$$

$$\sqrt{S_n} = \sqrt{S_{n-1}} + 1$$

$$\frac{a_n + 1}{2} = \frac{a_{n-1} + 1}{2} + 1$$

故

$$a_n = a_{n-1} + 2 = a_{n-2} + 4 = \cdots = a_1 + 2(n-1) = 2n - 1$$

44. 已知数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_1 = 1, a_{n+1} = \frac{a_n^2}{2a_n + 1}$, 求通项公式并证明

$$\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{1 + a_k} < \frac{7}{8}.$$

由递推式

$$a_{n+1} = \frac{a_n^2}{2a_n + 1},$$

可得

$$\frac{1}{a_{n+1}} = \frac{2a_n + 1}{a_n^2} = \frac{2}{a_n} + \frac{1}{a_n^2},$$

从而

$$1 + \frac{1}{a_{n+1}} = 1 + \frac{2}{a_n} + \frac{1}{a_n^2} = \left(1 + \frac{1}{a_n}\right)^2.$$

取对数, 得

$$\log\left(1 + \frac{1}{a_{n+1}}\right) = 2\log\left(1 + \frac{1}{a_n}\right).$$

因此数列 $\left\{\log\left(1 + \frac{1}{a_n}\right)\right\}$ 是首项为 $\log 2$ 、公比 2 的等比数列, 于是

$$\log\left(1 + \frac{1}{a_n}\right) = 2^{n-1} \log 2 = \log\left(2^{2^{n-1}}\right),$$

即

$$1 + \frac{1}{a_n} = 2^{2^{n-1}} \Rightarrow a_n = \frac{1}{2^{2^{n-1}} - 1}.$$

且有

$$\frac{a_n}{1 + a_n} = \frac{1}{2^{2^{n-1}}}.$$

所以

$$\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{1 + a_k} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^4} + \cdots + \frac{1}{2^{2^{n-1}}}.$$

注意当 $n \geqslant 4$ 时, 有

$$2^{n-1} > n + 1 \Rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^{2^{n-1}} < \left(\frac{1}{2}\right)^{n+1}.$$

因此

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{1 + a_k} &< \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \sum_{k=5}^{n+1} \left(\frac{1}{2}\right)^k \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^5 \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-3}\right)}{1 - \frac{1}{2}} \\ &= \frac{7}{8} - \left(\frac{1}{2}\right)^{n+1} < \frac{7}{8} \end{aligned}$$

当 $n = 1, 2, 3$ 时直接检验, 亦满足不等式, 故

$$\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{1+a_k} < \frac{7}{8}, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

45. 设各项均为正数的数列 $\{a_n\}$ 满足

$$a_1 = 2, a_n = a_{n+1}^{\frac{3}{2}} a_{n+2}$$

其中 $n \geq 2$ 。

(a) 若 $a_2 = \frac{1}{4}$, 求 a_3, a_4 , 并猜想 a_{2008} 的值 (不需证明);

因

$$a_1 = 2(-2)^0, a_2 = 2(-2)^{\frac{1}{4}}, a_3 = 2(-2)^{\frac{1}{2}}, a_4 = 2(-2)^{\frac{3}{4}}$$

从而猜想 a_n 的通项为

$$a_n = 2(-2)^{\frac{n-1}{4}}$$

据此有

$$a_{2008} = 2(-2)^{\frac{2007}{4}}$$

(b) 若

$$2\sqrt{2} \leq a_1 a_2 \cdots a_n < 4$$

对 $n \geq 2$ 恒成立, 求 a_2 的值.

令 $x_n = \log_2 a_n$, 则 $a_2 = 2^{x_2}$, 求 x_2 即可. 设 S_n 表示 x_n 的前 n 项和, 则

$$a_1 a_2 \cdots a_n = 2^{S_n}$$

由 $2\sqrt{2} \leq a_1 a_2 \cdots a_n < 4$ 得

$$\frac{3}{2} \leq S_n = x_1 + x_2 + \cdots + x_n < 2, \quad n \geq 2$$

由于上式对 $n = 2$ 成立, 可得

$$\frac{3}{2} \leq x_1 + x_2 < 2$$

由 $a_1 = 2$ 得 $x_1 = 1$, 故 $x_2 \geq \frac{1}{2}$, 又由 $a_1 = 2, a_1 = 2, a_n = a_{n+1}^{\frac{3}{2}} a_{n+2}$ 得

$$x_n = \frac{3}{2}x_{n+1} + x_{n+2}, \quad n \geq 2$$

即

$$x_{n+2} + 2x_{n+1} = x_{n+2} + \frac{3}{2}x_{n+1} + \frac{1}{2}x_{n+1} = \frac{1}{2}(x_{n+1} + 2x_n)$$

由此可知数列 $\{x_{n+1} + 2x_n\}$ 是首项为 $x_2 + 2$, 公比为 $\frac{1}{2}$ 的等比数列, 故

$$x_{n+1} + 2x_n = (x_2 + 2) \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}$$

对 n 求和得

$$S_{n+1} - x_1 + 2S_n = (x_2 + 2) \left(1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{2^{n-1}}\right) = (x_2 + 2) \left(2 - \frac{1}{2^{n-1}}\right)$$

因 $S_n < 2, S_{n+1} < 2$, 且 $x_1 = 1$, 故

$$(x_2 + 2) \left(2 - \frac{1}{2^{n-1}}\right) = S_{n+1} + 2S_n - 1 < 2 + 4 - 1 = 5$$

由此整理得:

$$2x_2 - 1 < \frac{x_2 + 2}{2^{n-1}}, \quad n \geq 2$$

下证 $x_2 \leq \frac{1}{2}$ 。假设 $x_2 > \frac{1}{2}$, 则由上式可知

$$2^{n-1} < \frac{x_2 + 2}{2x_2 - 1}$$

对 $n \geq 2$ 恒成立, 但这对于趋于无穷的 n 是不可能的, 因此必有

$$x_2 \leq \frac{1}{2}$$

又已知 $x_2 \geq \frac{1}{2}$, 故 $x_2 = \frac{1}{2}$, 所以

$$a_2 = 2^{x_2} = \sqrt{2}$$

46. 在数列 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 是各项均为正数的等比数列, 设

$$c_n = \frac{b_n}{a_n}, \quad n \in \mathbb{N}$$

(a) 数列 $\{c_n\}$ 是否为等比数列? 证明你的结论。

设 $\{a_n\}$ 的公比为 $q_1 > 0$, $\{b_n\}$ 的公比为 $q_2 > 0$, 则

$$\frac{c_{n+1}}{c_n} = \frac{b_{n+1}}{a_{n+1}} \cdot \frac{a_n}{b_n} = \frac{b_{n+1}}{b_n} \cdot \frac{a_n}{a_{n+1}} = \frac{q_2}{q_1} \neq 0,$$

故 $\{c_n\}$ 是公比为 $\frac{q_2}{q_1}$ 的等比数列。

(b) 设数列 $\{\ln a_n\}, \{\ln b_n\}$ 的前 n 项和分别为 S_n, T_n 。若 $a_1 = 2$,

$$\frac{S_n}{T_n} = \frac{n}{2n+1},$$

求数列 $\{c_n\}$ 的前 n 项和。

因 $\{a_n\}, \{b_n\}$ 为等比数列,

$$S_n = n \ln a_1 + \frac{n(n-1)}{2} \ln q_1, \quad T_n = n \ln b_1 + \frac{n(n-1)}{2} \ln q_2$$

由题意

$$\frac{n \ln a_1 + \frac{n(n-1)}{2} \ln q_1}{n \ln b_1 + \frac{n(n-1)}{2} \ln q_2} = \frac{n}{2n+1}$$

化简得对一切 n 成立的多项式恒等式:

$$(2 \ln q_1 - \ln q_2)n^2 + (4 \ln a_1 - \ln q_1 - 2 \ln b_1 + \ln q_2)n + (2 \ln a_1 - \ln q_1) = 0$$

于是由

$$\begin{cases} 2 \ln q_1 - \ln q_2 = 0 \\ 4 \ln a_1 - \ln q_1 - 2 \ln b_1 + \ln q_2 = 0 \\ 2 \ln a_1 - \ln q_1 = 0 \end{cases}$$

及 $a_1 = 2$ 解得

$$q_1 = 4, \quad q_2 = 16, \quad b_1 = 8$$

故

$$c_n = \frac{b_n}{a_n} = \frac{8 \cdot 16^{n-1}}{2 \cdot 4^{n-1}} = 4^n$$

所以数列 $\{c_n\}$ 的前 n 项和为

$$c_1 + c_2 + \cdots + c_n = 4 + 4^2 + \cdots + 4^n = \frac{4}{3}(4^n - 1)$$

47. 将数列 $\{a_n\}$ 中的所有项按每一行比上一行多一项的规则排成如下

$$\begin{array}{c} a_1 \\ a_2, a_3 \\ a_4, a_5, a_6 \\ a_7, a_8, a_9, a_{10} \end{array}$$

记表中的第一列数 $a_1, a_2, a_4, a_7, \dots$ 构成的数列为 $\{b_n\}$, 且 $b_1 = a_1 = 1$. S_n 为数列 $\{b_n\}$ 的前 n 项和, 且满足

$$\frac{2b_n}{b_n S_n - S_n^2} = 1, \quad n \geq 2$$

(a) 证明数列 $\left\{\frac{1}{S_n}\right\}$ 成等差数列, 并求数列 $\{b_n\}$ 的通项公式;

由 $b_n = S_n - S_{n-1}$, 当 $n \geq 2$,

$$\frac{2(S_n - S_{n-1})}{(S_n - S_{n-1})S_n - S_n^2} = 1$$

化简得

$$\frac{1}{S_n} - \frac{1}{S_{n-1}} = \frac{1}{2}.$$

又 $S_1 = b_1 = 1$, 故数列 $\left\{\frac{1}{S_n}\right\}$ 是首项为 1, 公差为 $\frac{1}{2}$ 的等差数列,

$$\frac{1}{S_n} = 1 + \frac{1}{2}(n-1) = \frac{n+1}{2} \Rightarrow S_n = \frac{2}{n+1}$$

则

$$b_n = S_n - S_{n-1} = \frac{2}{n+1} - \frac{2}{n} = -\frac{2}{n(n+1)}$$

因此

$$b_n = \begin{cases} 1 & , n = 1, \\ -\frac{2}{n(n+1)} & , n \geq 2 \end{cases}$$

(b) 若从第三行起, 每一行中的数按从左到右的顺序均构成等比数列, 且公比为同一个正数。当 $a_{81} = -\frac{4}{91}$ 时, 求上表中第 $k \geq 3$ 行所有项的和。

设从第三行起, 每一行的公比为 $q > 0$ 。因为

$$1 + 2 + \dots + 12 = \frac{12 \cdot 13}{2} = 78,$$

所以表中第 1 行至第 12 行共含有数列 $\{a_n\}$ 的前 78 项, 故 a_{81} 在表中第 13 行第 3 列, 于是

$$a_{81} = b_{13}q^2 = -\frac{4}{91}.$$

又

$$b_{13} = -\frac{2}{13 \cdot 14},$$

解得 $q = 2$, 记表中第 $k \geq 3$ 行所有项的和为 S , 则

$$S = -\frac{2}{k(k+1)} \cdot \frac{1-2^k}{1-2} = \frac{2}{k(k+1)}(1-2^k), \quad k \geq 3$$

48. 数列 $\{a_n\}$ 满足

$$a_1 = 0, a_2 = 2, a_{n+2} = \left(1 + \cos^2 \frac{n\pi}{2}\right) a_n + 4 \sin^2 \frac{n\pi}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(a) 求 a_3, a_4 , 并求数列 $\{a_n\}$ 的通项公式;

已知 $a_1 = 0, a_2 = 2$, 则

$$a_3 = \left(1 + \cos^2 \frac{\pi}{2}\right) a_1 + 4 \sin^2 \frac{\pi}{2} = 4, \quad a_4 = (1 + \cos^2 \pi) a_2 + 4 \sin^2 \pi = 4$$

一般地, 当 $n = 2k - 1, k \in \mathbb{N}$ 时,

$$a_{2k+1} = \left(1 + \cos^2 \frac{(2k-1)\pi}{2}\right) a_{2k-1} + 4 \sin^2 \frac{(2k-1)\pi}{2} = a_{2k-1} + 4$$

即

$$a_{2k+1} - a_{2k-1} = 4$$

因此 $\{a_{2k-1}\}$ 为首项为 0, 公差为 4 的等差数列,

$$a_{2k-1} = 4(k-1)$$

当 $n = 2k, k \in \mathbb{N}$ 时,

$$a_{2k+2} = \left(1 + \cos^2 \frac{2k\pi}{2}\right) a_{2k} + 4 \sin^2 \frac{2k\pi}{2} = 2a_{2k}$$

因此 $\{a_{2k}\}$ 为首项为 2, 公比为 2 的等比数列,

$$a_{2k} = 2^k$$

综上,

$$a_n = \begin{cases} 4(k-1), & n = 2k-1, k \in \mathbb{N} \\ 2^k, & n = 2k, k \in \mathbb{N} \end{cases}$$

(b) 设

$$S_k = a_1 + a_3 + \cdots + a_{2k-1}, \quad T_k = a_2 + a_4 + \cdots + a_{2k}, \quad W_k = \frac{2S_k}{2 + T_k}, \quad k \in \mathbb{N},$$

求使 $W_k > 1$ 的所有 k 的值。

由 (1) 得

$$S_k = 0 + 4 + \cdots + 4(k-1) = 2k(k-1), \quad T_k = 2 + 2^2 + \cdots + 2^k = 2^{k+1} - 2$$

于是

$$W_k = \frac{2S_k}{2 + T_k} = \frac{4k(k-1)}{2^{k+1}} = \frac{k(k-1)}{2^{k-1}}$$

计算得

$$W_1 = 0, \quad W_2 = 1, \quad W_3 = \frac{3}{2}, \quad W_4 = \frac{3}{2}, \quad W_5 = \frac{5}{4}, \quad W_6 = \frac{15}{16}$$

当 $k \geq 6$ 时,

$$W_{k+1} - W_k = \frac{(k+1)k}{2^k} - \frac{k(k-1)}{2^{k-1}} = \frac{k(3-k)}{2^k} < 0$$

故 $\{W_k\}$ 单调递减, 又 $W_6 < 1$, 因此当 $k \geq 6$ 时 $W_k < 1$ 。综上, 满足 $W_k > 1$ 的所有 k 为

$$k = 3, 4, 5$$

49. 证明由正实数组成的数列 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 是等比数列当且仅当

$$(a_0 a_1 + a_1 a_2 + a_2 a_3 + \cdots + a_{n-1} a_n)^2 = (a_0^2 + a_1^2 + \cdots + a_{n-1}^2) (a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_n^2).$$

充分条件: 已知 a_0, a_1, \dots, a_n 是等比数列, 设 $a_k = a_0 r^k$, $1 \leq k \leq n$, 于是

$$a_0 a_1 + a_1 a_2 + \cdots + a_{n-1} a_n = a_0^2 (r + r^3 + \cdots + r^{2n-1}) = a_0^2 r (1 + r^2 + \cdots + r^{2n-2})$$

且

$$\begin{aligned} (a_0^2 + a_1^2 + \cdots + a_{n-1}^2)(a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_n^2) &= a_0^4 (1 + r^2 + \cdots + r^{2n-2})(r^2 + r^4 + \cdots + r^{2n}) \\ &= a_0^4 r^2 (1 + r^2 + \cdots + r^{2n-2})^2 \end{aligned}$$

故得证

$$(a_0 a_1 + a_1 a_2 + \cdots + a_{n-1} a_n)^2 = (a_0^2 + a_1^2 + \cdots + a_{n-1}^2)(a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_n^2)$$

必要条件: 已知

$$(a_0a_1 + a_1a_2 + \dots + a_{n-1}a_n)^2 = (a_0^2 + a_1^2 + \dots + a_{n-1}^2)(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2)$$

考虑函数

$$f(r) = \sum_{k=1}^n (a_k - ra_{k-1})^2 = r^2 \sum_{k=1}^n a_{k-1}^2 - 2r \sum_{k=1}^n a_k a_{k-1} + \sum_{k=1}^n a_k^2$$

观察得 $f(r) \geq 0 \quad \forall r$, 又关于 r 方程式的判别式为

$$4[(a_0a_1 + a_1a_2 + \dots + a_{n-1}a_n)^2 - (a_0^2 + a_1^2 + \dots + a_{n-1}^2)(a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2)] = 0,$$

所以得知 $f(r) = 0$ 有重根 $r = r_0$, 且只有当

$$a_k = r_0 a_{k-1}, \quad 1 \leq k \leq n$$

才成立, 意味 a_0, a_1, \dots, a_n 是一个公比为 r_0 的等比数列。

50. 求和

$$\sum_{n=2}^{20} \frac{n^3 - n^2 + 1}{n^2 - n}$$

注意到

$$\frac{n^3 - n^2 + 1}{n^2 - n} = n + \frac{1}{n(n-1)} = n + \frac{1}{n-1} - \frac{1}{n}$$

于是由累加法,

$$\begin{aligned} \sum_{n=2}^{20} \frac{n^3 - n^2 + 1}{n^2 - n} &= \sum_{n=2}^{20} n + \sum_{n=2}^{20} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n} \right) \\ &= \frac{19}{2}(2+20) + 1 - \frac{1}{20} \\ &= \frac{4199}{20} \end{aligned}$$

51. 试求级数

$$\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{3^6 - 64} + \frac{3 \cdot 5 \cdot 7}{5^6 - 64} + \frac{5 \cdot 7 \cdot 9}{7^6 - 64} + \dots + \frac{19 \cdot 21 \cdot 23}{21^6 - 64}$$

之和。

注意到

$$\begin{aligned}
 & \frac{(2k-1)(2k+1)(2k+3)}{(2k+1)^6 - 64} \\
 &= \frac{(2k-1)(2k+1)(2k+3)}{((2k+1)^3 - 8)((2k+1)^3 + 8)} \\
 &= \frac{(2k+1)}{((2k+1)^2 + 2(2k+1) + 4)((2k+1)^2 - 2(2k+1) + 4)} \\
 &= \frac{2k+1}{(4k^2+3)(4k^2+8k+7)} \\
 &= \frac{2k+1}{(4k^2+3)(4(k+1)^2+3)} \\
 &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{4k^2+3} - \frac{1}{4(k+1)^2+3} \right)
 \end{aligned}$$

故

$$\sum_{k=1}^{10} \frac{(2k-1)(2k+1)(2k+3)}{(2k+1)^6 - 64} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{7} - \frac{1}{487} \right) = \frac{120}{3409}$$

52. 求和

$$\sum_{n=1}^{24} \frac{1}{\sqrt{n + \sqrt{n^2 - 1}}}$$

不难发现

$$\frac{1}{\sqrt{n + \sqrt{n^2 - 1}}} = \sqrt{n - \sqrt{n^2 - 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} - \sqrt{n-1}),$$

由累加法,

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=1}^{24} \frac{1}{\sqrt{n + \sqrt{n^2 - 1}}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{24} (\sqrt{n+1} - \sqrt{n-1}) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\sqrt{25} + \sqrt{24} - \sqrt{1} - \sqrt{0}) \\
 &= 2\sqrt{2} + 2\sqrt{3}
 \end{aligned}$$

53. 若 $f(n) = (n^2 - 2n + 1)^{\frac{1}{3}} + (n^2 - 1)^{\frac{1}{3}} + (n^2 + 2n + 1)^{\frac{1}{3}}$, 求

$$\sum_{k=1}^{500} \frac{1}{f(2k-1)}$$

首先有

$$\begin{aligned}\frac{1}{f(n)} &= \frac{1}{\sqrt[3]{(n-1)^2} + \sqrt[3]{(n+1)(n-1)} + \sqrt[3]{(n+1)^2}} \\ &= \frac{\sqrt[3]{(n+1)} - \sqrt[3]{(n-1)}}{(n+1) - (n-1)} \\ &= \frac{1}{2}(\sqrt[3]{(n+1)} - \sqrt[3]{(n-1)})\end{aligned}$$

故

$$\sum_{k=1}^{500} \frac{1}{f(2k-1)} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{500} \left(\sqrt[3]{2k} - \sqrt[3]{2k-2} \right) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{1000} = 5$$

54. 设数列 $\{a_n\}$ 的通项公式为

$$a_n = \frac{1}{(\sqrt{n} + \sqrt{n+1})(\sqrt{n+1} + \sqrt{n+2})(\sqrt{n} + \sqrt{n+2})},$$

求

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k$$

的值。

发现

$$\begin{aligned}a_n &= \frac{1}{\sqrt{n+2} - \sqrt{n}} \left(\frac{1}{(\sqrt{n} + \sqrt{n+1})(\sqrt{n} + \sqrt{n+2})} - \frac{1}{(\sqrt{n} + \sqrt{n+2})(\sqrt{n+1} + \sqrt{n+2})} \right) \\ &= \frac{1}{(\sqrt{n+2} - \sqrt{n})(\sqrt{n} + \sqrt{n+2})} \left(\frac{1}{\sqrt{n} + \sqrt{n+1}} - \frac{1}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n+2}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{n} + \sqrt{n+1}} - \frac{1}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n+2}} \right)\end{aligned}$$

由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{n} + \sqrt{n+1}} = 0$, 故

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1} + \sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2} + \sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{2} + \sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3} + \sqrt{4}} + \cdots \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} - 1}{2}$$

55. 求

$$\sqrt{1 + \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2}} + \sqrt{1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2}} + \cdots + \sqrt{1 + \frac{1}{2025^2} + \frac{1}{2026^2}}$$

的值。

注意到

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

因此原式为

$$\sum_{n=1}^{2025} \left(1 + \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\right) = 2025 + \left(1 - \frac{1}{2026}\right) = 2016 - \frac{1}{2026}$$

56. 求

$$\sum_{r=2}^{\infty} \left[\frac{4r-1}{r(r-1)} \left(-\frac{1}{3}\right)^r \right]$$

作部分分式分解, 有

$$\frac{4r-1}{r(r-1)} = \frac{1}{r} + \frac{3}{r-1}$$

因此

$$\begin{aligned} \frac{4r-1}{r(r-1)} \left(-\frac{1}{3}\right)^r &= \frac{1}{r} \left(-\frac{1}{3}\right)^r + \frac{3}{r-1} \left(-\frac{1}{3}\right)^r \\ &= \frac{1}{r} \left(-\frac{1}{3}\right)^r - \frac{1}{r-1} \left(-\frac{1}{3}\right)^{r-1} \end{aligned}$$

故由累加法,

$$\sum_{r=2}^n \left[\frac{4r-1}{r(r-1)} \left(-\frac{1}{3}\right)^r \right] = \frac{1}{n} \left(-\frac{1}{3}\right)^n + \frac{1}{3}$$

令 $n \rightarrow \infty$, 由于 $\frac{1}{n} \left(-\frac{1}{3}\right)^n \rightarrow 0$, 从而

$$\sum_{r=2}^{\infty} \left[\frac{4r-1}{r(r-1)} \left(-\frac{1}{3}\right)^r \right] = \frac{1}{3}$$

57. 求以下级数的和

$$\frac{1}{4 \cdot 2!} + \frac{1}{5 \cdot 3!} + \frac{1}{6 \cdot 4!} + \frac{1}{7 \cdot 5!} + \frac{1}{8 \cdot 6!} + \cdots$$

级数即

$$\sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{(r+3)(r+1)!}$$

发现

$$\frac{1}{(r+3)(r+1)!} = \frac{1}{(r+2)!} - \frac{1}{(r+3)!}$$

因此由累加法,

$$\sum_{r=1}^N \frac{1}{(r+3)(r+1)!} = \frac{1}{3!} - \frac{1}{(N+3)!}$$

令 $N \rightarrow \infty$, 由于 $\frac{1}{(N+3)!} \rightarrow 0$, 则无穷级数为

$$\sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{(r+3)(r+1)!} = \frac{1}{3!} = \frac{1}{6}$$

58. 证明

$$(2 \cdot 1!) + (5 \cdot 2!) + (10 \cdot 3!) + (17 \cdot 4!) + \cdots + (n^2 + 1)n! = n(n+1)!$$

先将数列写成求和形式

$$S_n = \sum_{r=1}^n (r^2 + 1)r!$$

尝试将 $(r^2 + 1)r!$ 表示成阶乘的差, 注意到

$$(r+2)! = (r+2)(r+1)r! = (r^2 + 3r + 2)r!,$$

因此

$$(r+2)! - r! = (r^2 + 3r + 1)r!$$

又因为 $(r+1)! - r! = r \cdot r!$, 于是

$$(r+2)! - r! = (r^2 + 1)r! + 3r \cdot r! = (r^2 + 1)r! + 3[(r+1)! - r!]$$

即

$$(r^2 + 1)r! = (r + 2)! - 3(r + 1)! + 2r!$$

故由累加法,

$$\begin{aligned}\sum_{r=1}^n (r^2 + 1)r! &= \sum_{r=1}^n [(r + 2)! - 3(r + 1)! + 2r!] \\ &= (n + 2)! - 2(n + 1)! \\ &= n(n + 1)!\end{aligned}$$

59. 求

$$\sum_{r=1}^n \left[\frac{r^2 + 9r + 19}{(r + 5)!} \right]$$

的化简表达式, 并据此求

$$\sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{r^2 + 7r + 11}{(r + 4)!} \right]$$

注意到

$$\frac{r^2 + 9r + 19}{(r + 5)!} = \frac{1}{(r + 3)!} - \frac{1}{(r + 5)!}$$

由累加法,

$$\begin{aligned}\sum_{r=1}^n \left[\frac{r^2 + 9r + 19}{(r + 5)!} \right] &= \left(\frac{1}{4!} + \frac{1}{5!} \right) - \left(\frac{1}{(n + 4)!} + \frac{1}{(n + 5)!} \right) \\ &= \frac{1}{20} - \left(\frac{1}{(n + 4)!} + \frac{1}{(n + 5)!} \right)\end{aligned}$$

改写变量, 令 $k = r - 1$, 则

$$\begin{aligned}\sum_{r=1}^n \left[\frac{r^2 + 7r + 11}{(r + 4)!} \right] &= \sum_{k=0}^{n-1} \left[\frac{(k + 1)^2 + 7(k + 1) + 11}{(k + 5)!} \right] \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \left[\frac{k^2 + 9k + 19}{(k + 5)!} \right] \\ &= \frac{19}{5!} + \frac{1}{20} - \left(\frac{1}{(n + 4)!} + \frac{1}{(n + 5)!} \right) \\ &= \frac{5}{24} - \frac{n + 6}{(n + 5)!}\end{aligned}$$

令 $n \rightarrow \infty$, 因 $\frac{n+6}{(n+5)!} \rightarrow 0$, 故

$$\sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{r^2 + 7r + 11}{(r+4)!} \right] = \frac{5}{24}$$

60. 求极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \left(\sin \frac{\pi}{2k} - \cos \frac{\pi}{2k} - \sin \frac{\pi}{2(k+2)} + \cos \frac{\pi}{2(k+2)} \right).$$

令

$$f(k) = \sin \left(\frac{\pi}{2k} \right) - \cos \left(\frac{\pi}{2k} \right)$$

由累加法, 部分和为

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{k=1}^n [f(k) - f(k+2)] \\ &= f(1) + f(2) - f(n+1) - f(n+2) \\ &= 1 - 0 - \left(\sin \frac{\pi}{2(n+1)} - \cos \frac{\pi}{2(n+1)} \right) - \left(\sin \frac{\pi}{2(n+2)} - \cos \frac{\pi}{2(n+2)} \right) \end{aligned}$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{\pi}{2(n+1)} \rightarrow 0$, $\frac{\pi}{2(n+2)} \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} S_n &= 1 - (\sin 0 - \cos 0) - (\sin 0 - \cos 0) \\ &= 1 - (0 - 1) - (0 - 1) \\ &= 3. \end{aligned}$$

故级数的极限值为 3。

61. 求级数

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2011^{2^n} - 2011^{-2^n}} = \frac{1}{2011^1 - 2011^{-1}} + \frac{1}{2011^2 - 2011^{-2}} + \frac{1}{2011^4 - 2011^{-4}} + \cdots$$

更一般地, 设

$$S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2^n}}{1 - x^{2^{n+1}}}, \quad S_N(x) = \sum_{n=0}^N \frac{x^{2^n}}{1 - x^{2^{n+1}}}$$

所求即 $S\left(\frac{1}{2011}\right)$ 。下面证明当 $0 < x < 1$ 时,

$$S(x) = \frac{x}{1-x}$$

注意到

$$\frac{x^{2^n}}{1 - x^{2^{n+1}}} = \frac{1}{1 - x^{2^n}} - \frac{1}{1 - x^{2^{n+1}}},$$

代入部分和 $S_N(x)$, 由累加法

$$S_N(x) = \frac{1}{1-x} - \frac{1}{1-x^{2^{N+1}}}$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, 由于 $0 < x < 1$, 有 $x^{2^{N+1}} \rightarrow 0$, 从而

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{1 - x^{2^{N+1}}} = 1$$

于是

$$S(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} S_N(x) = \frac{1}{1-x} - 1 = \frac{x}{1-x}$$

因此

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2011^{2^n} - 2011^{-2^n}} = S\left(\frac{1}{2011}\right) = \frac{\frac{1}{2011}}{1 - \frac{1}{2011}} = \frac{1}{2010}$$

62. 求下列无穷乘积的值

$$\left(\frac{7}{9}\right) \cdot \left(\frac{26}{28}\right) \cdot \left(\frac{63}{65}\right) \cdots = \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{k=2}^n \frac{k^3 - 1}{k^3 + 1}$$

首先注意到部分和为

$$\prod_{k=2}^n \frac{k^3 - 1}{k^3 + 1} = \prod_{k=2}^n \frac{k-1}{k+1} \prod_{k=2}^n \frac{k^2 + k + 1}{k^2 - k + 1}$$

其中

$$\prod_{k=2}^n \frac{k^2 + k + 1}{k^2 - k + 1} = \prod_{k=2}^n \frac{k^2 + k + 1}{(k-1)^2 + (k-1) + 1}$$

同时

$$\prod_{k=2}^n \frac{k-1}{k+1} = \frac{1 \cdot 2}{3 \cdot 4} \cdot \frac{2 \cdot 3}{4 \cdot 5} \cdots \frac{(n-1)n}{(n+1)n} = \frac{2}{n(n+1)}$$

由累乘法,

$$\prod_{k=2}^n \frac{k^3-1}{k^3+1} = \frac{2}{n(n+1)} \cdot \frac{n^2+n+1}{3} = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{n(n+1)} \right)$$

因此

$$\prod_{k=2}^{\infty} \frac{k^3-1}{k^3+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{n(n+1)} \right) = \frac{2}{3}$$

63. 计算无穷乘积

$$\prod_{n=3}^{\infty} \frac{(n^3+3n)^2}{n^6-64}$$

设

$$a_n = \frac{(n^3+3n)^2}{n^6-64}$$

注意到

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{(n^3+3n)^2}{(n^3-8)(n^3+8)} = \frac{n^2(n^2+3)^2}{(n-2)(n^2+2n+4)(n+2)(n^2-2n+4)} \\ &= \frac{n}{n-2} \cdot \frac{n}{n+2} \cdot \frac{n^2+3}{(n-1)^2+3} \cdot \frac{n^2+3}{(n+1)^2+3} \end{aligned}$$

因此当 $N \geq 3$ 时,

$$\begin{aligned} \prod_{n=3}^N a_n &= \left(\prod_{n=3}^N \frac{n}{n-2} \right) \left(\prod_{n=3}^N \frac{n}{n+2} \right) \left(\prod_{n=3}^N \frac{n^2+3}{(n-1)^2+3} \right) \left(\prod_{n=3}^N \frac{n^2+3}{(n+1)^2+3} \right) \\ &= \frac{N(N-1)}{1 \cdot 2} \cdot \frac{3 \cdot 4}{(N+1)(N+2)} \cdot \frac{N^2+3}{2^2+3} \cdot \frac{3^2+3}{(N+1)^2+3} \\ &= \frac{72}{7} \cdot \frac{N(N-1)(N^2+3)}{(N+1)(N+2)((N+1)^2+3)} \\ &= \frac{72}{7} \cdot \frac{(1-\frac{1}{N})(1+\frac{3}{N^2})}{(1+\frac{1}{N})(1+\frac{2}{N})((1+\frac{1}{N})^2+\frac{3}{N^2})} \end{aligned}$$

令 $N \rightarrow \infty$, 得到

$$\prod_{n=3}^{\infty} a_n = \lim_{N \rightarrow \infty} \prod_{n=3}^N a_n = \frac{72}{7}$$

64. 设

$$f(r) = \sum_{j=2}^{2013} \frac{1}{j^r} = \frac{1}{2^r} + \frac{1}{3^r} + \cdots + \frac{1}{2013^r},$$

求

$$\sum_{k=2}^{\infty} f(k).$$

交换求和次序, 并注意到内层和是收敛的等比级数, 有

$$\begin{aligned} \sum_{k=2}^{\infty} \sum_{j=2}^{2013} \frac{1}{j^k} &= \sum_{j=2}^{2013} \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{j^k} \\ &= \sum_{j=2}^{2013} \frac{1/j^2}{1 - 1/j} \\ &= \sum_{j=2}^{2013} \frac{1}{j(j-1)} \\ &= \sum_{j=2}^{2013} \left(\frac{1}{j-1} - \frac{1}{j} \right) \\ &= \frac{1}{1} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{2012} - \frac{1}{2013} \\ &= \frac{2012}{2013} \end{aligned}$$

65. 试证

$$8 + 88 + 888 + \cdots + \underbrace{888 \dots 88}_{88\text{'s}} = \frac{8}{81}(10^{89} - 802)$$

考虑到

$$\underbrace{99 \dots 99}_{n\text{'s}} = 10^n - 1$$

于是

$$\begin{aligned} 8 + 88 + 888 + \cdots + \underbrace{888 \dots 88}_{88\text{'s}} &= \frac{8}{9}(9 + 99 + 999 + \cdots + \underbrace{99 \dots 99}_{88\text{'s}}) \\ &= \frac{8}{9}(10 + 10^2 + 10^3 + \cdots + 10^{88} - 88) \\ &= \frac{8}{9} \left[\frac{10(10^{88} - 1)}{10 - 1} - 88 \right] \\ &= \frac{8}{81}(10^{89} - 802) \end{aligned}$$

故得证。

66. 求无穷级数

$$\frac{1^2}{11} + \frac{5^2}{11^2} + \frac{9^2}{11^3} + \frac{13^2}{11^4} + \cdots + \frac{(4n-3)^2}{11^n} + \cdots$$

设原式为

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(4n-3)^2}{11^n}$$

由 $(4n-3)^2 = 16n^2 - 24n + 9$, 有

$$S = 16 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{11^n} - 24 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{11^n} + 9 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{11^n}$$

当 $|x| < 1$ 时, 有

$$\sum_{n=1}^{\infty} x^n = \frac{x}{1-x}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} nx^n = \frac{x}{(1-x)^2}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} n^2 x^n = \frac{x(1+x)}{(1-x)^3}$$

令 $x = \frac{1}{11}$, 则

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{11^n} = \frac{1}{10}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{11^n} = \frac{11}{100}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{11^n} = \frac{33}{250}$$

于是

$$S = 16 \cdot \frac{33}{250} - 24 \cdot \frac{11}{100} + 9 \cdot \frac{1}{10} = \frac{93}{250}$$

设

$$S = \frac{1^2}{11} + \frac{5^2}{11^2} + \frac{9^2}{11^3} + \frac{13^2}{11^4} + \frac{17^2}{11^5} + \cdots \quad (1)$$

则

$$\frac{1}{11}S = \frac{1^2}{11^2} + \frac{5^2}{11^3} + \frac{9^2}{11^4} + \frac{13^2}{11^5} + \frac{17^2}{11^6} + \cdots \quad (2)$$

(1) - (2) 得

$$\frac{10}{11}S = \frac{1}{11} + \frac{5^2 - 1^2}{11^2} + \frac{9^2 - 5^2}{11^3} + \frac{13^2 - 9^2}{11^4} + \frac{17^2 - 13^2}{11^5} + \cdots \quad (3)$$

$$\frac{10}{121}S = \frac{1}{11^2} + \frac{5^2 - 1^2}{11^3} + \frac{9^2 - 5^2}{11^4} + \frac{13^2 - 9^2}{11^5} + \frac{17^2 - 13^2}{11^6} + \cdots \quad (4)$$

(3) - (4) 得

$$\frac{100}{121}S = \frac{1}{11} + \frac{23}{11^2} + \frac{32}{11^3} + \frac{32}{11^4} + \frac{32}{11^5} + \cdots = \frac{1}{11} + \frac{23}{11^2} + \frac{32}{11^3} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{11}}$$

故可得

$$S = \frac{93}{250}$$

67. 已知

$$1 + \frac{3}{x} + \frac{5}{x^2} + \frac{7}{x^3} + \frac{9}{x^4} + \cdots = 91,$$

求

$$S = 1 + \frac{4}{x} + \frac{9}{x^2} + \frac{16}{x^3} + \frac{25}{x^4} + \cdots$$

发现

$$91 = 1 + \frac{3}{x} + \frac{5}{x^2} + \frac{7}{x^3} + \cdots = \left(1 + \frac{1}{x} + \frac{1}{x^2} + \cdots\right) + 2\left(\frac{1}{x} + \frac{2}{x^2} + \frac{3}{x^3} + \cdots\right)$$

考虑

$$\sum_{n=1}^{\infty} ny^{n-1} = \left(\sum_{n=1}^{\infty} y^n\right)' = \left(\frac{y}{1-y}\right)' = \frac{1}{(1-y)^2} \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} ny^n = \frac{y}{(1-y)^2}$$

记 $y = \frac{1}{x}$, 则

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{x^n} = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{(1 - \frac{1}{x})^2} = \frac{x}{(x-1)^2}$$

所以

$$91 = \frac{x}{x-1} + \frac{2x}{(x-1)^2} = \frac{x^2 + x}{(x-1)^2} \Rightarrow 90x^2 - 183x + 91 = 0 \Rightarrow x = \frac{7}{6} \text{ 或 } \frac{13}{15}$$

级数收敛需满足 $|x| > 1$, 故取 $x = \frac{7}{6}$, 现考虑

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{x^{n-1}} = \sum_{n=1}^{\infty} n^2 y^{n-1}$$

由上,

$$\sum_{n=1}^{\infty} n y^n = \frac{y}{(1-y)^2} \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} n^2 y^{n-1} = \left(\frac{y}{(1-y)^2} \right)' = \frac{1+y}{(1-y)^3}$$

取 $y = \frac{6}{7}$ 即得 $S = 637$; 又解: 发现 $S = 91 + \frac{6}{7}S \Rightarrow S = 637$

68. 求

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{2k+1}$$

发现

$$\begin{aligned} 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \cdots &= \left[x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 - \frac{1}{7}x^7 + \frac{1}{9}x^9 - \cdots \right]_0^1 \\ &= \int_0^1 (1 - x^2 + x^4 - x^6 + x^8 - \cdots) dx \\ &= \int_0^1 \frac{1}{1+x^2} dx \\ &= [\tan^{-1} x]_0^1 = \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$

69. 求下列级数的值或证明其发散:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \arctan \left(-\frac{2}{k^2} \right)$$

由

$$\arctan \left(-\frac{2}{k^2} \right) = \arctan \left(\frac{(k-1) - (k+1)}{1 + (k-1)(k+1)} \right) = \arctan(k-1) - \arctan(k+1),$$

知原级数是一列项求和, 于是

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{\infty} [\arctan(k-1) - \arctan(k+1)] \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} (\arctan 0 + \arctan 1 - \arctan N - \arctan(N+1)) \\ &= 0 + \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} = -\frac{3\pi}{4} \end{aligned}$$

级数收敛, 其值为 $-\frac{3\pi}{4}$ 。

70. 求

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \cdot \frac{1}{1+2^{2^{-n}}}$$

注意到:

$$\frac{1}{1-x^2} = \frac{1}{(1-x)(1+x)} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1-x} + \frac{1}{1+x} \right)$$

令 $x = 2^{2^{-n}}$, 则

$$\frac{1}{1+2^{2^{-n}}} = \frac{2}{1-2^{1-n}} - \frac{1}{1-2^{2^{-n}}}$$

因此原式化为

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \cdot \left(\frac{2}{1-2^{1-n}} - \frac{1}{1-2^{2^{-n}}} \right) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2^{n-1}} \cdot \frac{1}{1-2^{-(n-1)}} - \frac{1}{2^n} \cdot \frac{1}{1-2^{2^{-n}}} \right) \\ &= -1 - \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2^N} \cdot \frac{1}{1-2^{2^{-N}}} \right) \end{aligned}$$

现设 $x = 2^{-N}$, 则当 $N \rightarrow \infty, x \rightarrow 0^+$, 且

$$\frac{1}{2^N} \cdot \frac{1}{1-2^{2^{-N}}} = \frac{x}{1-2^x} = -\frac{x}{2^x-1}$$

由洛必达法则,

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x}{2^x-1} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{\ln 2 \cdot 2^x} = \frac{1}{\ln 2}$$

故

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} \cdot \frac{1}{1+2^{2^{-n}}} = -1 + \frac{1}{\ln 2}$$

71. 设

$$f(x) = \frac{2016^x}{2016^x + \sqrt{2016}},$$

求

$$\sum_{k=0}^{2016} f\left(\frac{k}{2016}\right)$$

记 $a = 2016$, 观察到

$$f(x) + f(1-x) = \frac{a^x}{a^x + a^{\frac{1}{2}}} + \frac{a^{1-x}}{a^{1-x} + a^{\frac{1}{2}}} = \frac{a^x(a^{1-x} + a^{\frac{1}{2}}) + a^{1-x}(a^x + a^{\frac{1}{2}})}{(a^x + a^{\frac{1}{2}})(a^{1-x} + a^{\frac{1}{2}})} = 1$$

于是

$$\sum_{k=0}^{2016} f\left(\frac{k}{2016}\right) = \underbrace{\sum_{k=0}^{1007} \left[f\left(\frac{k}{2016}\right) + f\left(1 - \frac{k}{2016}\right) \right]}_{1008 \text{ 个 "1"}} + f\left(\frac{1008}{2016}\right) = 1008 + f\left(\frac{1}{2}\right)$$

而 $f\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{a^{\frac{1}{2}}}{a^{\frac{1}{2}} + a^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{2}$, 故

$$\sum_{k=0}^{2016} f\left(\frac{k}{2016}\right) = 1008 + \frac{1}{2} = \frac{2017}{2}$$

72. 求级数

$$\sum_{r=0}^{\infty} \frac{\sin^4(\pi 2^{r-2})}{4^r}$$

利用恒等式

$$\sin^4 \theta = \sin^2 \theta - \frac{1}{4} \sin^2 2\theta$$

考虑前 n 项和:

$$\sum_{r=0}^n \frac{\sin^4(\pi 2^{r-2})}{4^r} = \sum_{r=0}^n \left[\frac{1}{4^r} \sin^2(\pi 2^{r-2}) - \frac{1}{4^{r+1}} \sin^2(\pi 2^{r-1}) \right]$$

由累加法,

$$\sum_{r=0}^n \frac{\sin^4(\pi 2^{r-2})}{4^r} = \sin^2 \frac{\pi}{4} - \frac{1}{4^{n+1}} \sin^2(\pi 2^{n-1})$$

由于

$$0 \leq \frac{1}{4^{n+1}} \sin^2(\pi 2^{n-1}) \leq \frac{1}{4^{n+1}}$$

且 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{4^{n+1}} = 0$, 由夹挤定理,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{4^{n+1}} \sin^2(\pi 2^{n-1}) = 0$$

于是

$$\sum_{r=0}^{\infty} \frac{\sin^4(\pi 2^{r-2})}{4^r} = \sin^2 \frac{\pi}{4} = \frac{1}{2}$$

73. 求下列级数的和

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos^2 \frac{n\pi}{6}}{2^n}$$

先由三角恒等式降幂, 再由欧拉公式,

$$\begin{aligned} S &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos^2 \frac{n\pi}{6}}{2^n} = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1 + \cos \frac{n\pi}{3}}{2^n} \\ &= \frac{1}{2} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^n} + \sum_{n=0}^{\infty} \Re \left[\frac{e^{in\pi/3}}{2^n} \right] \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{2}} + \Re \left[\frac{1}{1 - \frac{e^{i\pi/3}}{2}} \right] \right) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{1}{1 - \frac{e^{i\pi/3}}{2}} &= \frac{2 - e^{-i\pi/3}}{4 - 2(e^{i\pi/3} + e^{-i\pi/3}) + 1} \\ &= \frac{2 - e^{-i\pi/3}}{5 - 4 \cos \frac{\pi}{3}} \\ &= \frac{2 - (\frac{1}{2} - i \frac{\sqrt{3}}{2})}{3} \\ &= \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{6} i \end{aligned}$$

故

$$S = \frac{1}{2} \left(2 + \frac{1}{2} \right) = \frac{3}{2}$$

74. 求

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2^n} \cos \frac{n\pi}{3}$$

设

$$z = \frac{1}{2}e^{i\pi/3} = \frac{1}{4}(1 + \sqrt{3}i)$$

且

$$f(z) = \sum_{n=1}^{\infty} z^n = \frac{z}{1-z}$$

考虑

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2^n} e^{n\pi i/3} = \sum_{n=1}^{\infty} n z^n = \frac{z}{(1-z)^2} = z f'(z)$$

由欧拉公式,

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2^n} \cos \frac{n\pi}{3} = \Re(z f'(z))$$

其中

$$z f'(z) = \frac{\frac{1}{4}(1 + \sqrt{3}i)}{\left(\frac{3}{4} - \frac{\sqrt{3}}{4}i\right)^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1 + \sqrt{3}i}{1 - \sqrt{3}i} = -\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{3}i$$

故得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2^n} \cos \frac{n\pi}{3} = -\frac{1}{3}$$

75. 证明不等式

$$\frac{1}{2} < \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \cdots + \frac{1}{2n} < \frac{3}{4}$$

由放缩法,

$$\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + \cdots + \frac{1}{2n} > \underbrace{\frac{1}{2n} + \frac{1}{2n} + \cdots + \frac{1}{2n}}_{n \text{ 个}} = \frac{1}{2}$$

故左侧不等式得证, 同由放缩法, 且注意到

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{n} + \frac{1}{n+1} + \cdots + \frac{1}{2n} &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{2n} \right) + \left(\frac{1}{n+1} + \frac{1}{2n-1} \right) + \cdots + \left(\frac{1}{2n} + \frac{1}{n} \right) \right] \\
 &= \frac{1}{2} \left[\frac{3n}{2n^2} + \frac{3n}{2n^2 + (n-1)} + \frac{3n}{2n^2 + 2(n-2)} + \cdots + \frac{3n}{2n^2} \right] \\
 &< \frac{1}{2} \underbrace{\left[\frac{3n}{2n^2} + \frac{3n}{2n^2} + \cdots + \frac{3n}{2n^2} \right]}_{(n+1) \text{ 个}} \\
 &= \frac{1}{2}(n+1) \frac{3}{2n} \\
 &= \frac{3}{4} + \frac{1}{4n} \\
 &< \frac{3}{4} + \frac{1}{n}
 \end{aligned}$$

于是右侧不等式得证。

76. 计算

$$1 + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{4}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{1,000,000}}$$

的整数部分。

由放缩法, 注意到

$$2\sqrt{n+1} - 2\sqrt{n} = \frac{2(n+1-1)}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n}} < \frac{2}{\sqrt{n} + \sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

同理,

$$\frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{2}{\sqrt{n} + \sqrt{n}} < \frac{2(n - (n-1))}{\sqrt{n} + \sqrt{n-1}} = 2\sqrt{n} - 2\sqrt{n-1} \quad (2)$$

对于下界, 由 (1) 得

$$\begin{aligned}
 &1 + \frac{1}{\sqrt{2}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{1,000,000}} \\
 &> 1 + 2 \left[(\sqrt{3} - \sqrt{2}) + (\sqrt{4} - \sqrt{3}) + \cdots + (\sqrt{1,000,001} - \sqrt{1,000,000}) \right] \\
 &= 1 + 2(\sqrt{1,000,001} - \sqrt{2}) \\
 &> 2 \cdot 1000 - \sqrt{8} + 1 \\
 &> 2000 - 3 + 1 = 1998
 \end{aligned}$$

对于上界, 由 (2) 得

$$\begin{aligned} & 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{1,000,000}} \\ & < 1 + 2 \left[(\sqrt{2} - 1) + (\sqrt{3} - \sqrt{2}) + \cdots + (\sqrt{1,000,000} - \sqrt{999,999}) \right] \\ & = 1 + 2(\sqrt{1,000,000} - 1) \\ & = 1 + 2 \cdot 999 = 1999 \end{aligned}$$

综上, 该数的整数部分为 1998。

77. 求

$$\frac{1}{\sqrt[3]{4}} + \frac{1}{\sqrt[3]{5}} + \frac{1}{\sqrt[3]{6}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt[3]{1,000,000}}$$

的整数部分。

需要前置作业, 观察到二项展开为

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^2 = 1 + \frac{2}{n} + \frac{1}{n^2}, \quad \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{n}\right)^3 = 1 + \frac{2}{n} + \frac{4}{3n^2} + \frac{8}{27n^3}$$

由上可知

$$\left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{n}\right)^3 > \left(1 + \frac{1}{n}\right)^2$$

两边开立方根并乘以 $n^{\frac{2}{3}}$, 得

$$n^{\frac{2}{3}} + \frac{2}{3}n^{-\frac{1}{3}} > (n+1)^{\frac{2}{3}}$$

即

$$\frac{1}{\sqrt[3]{n^2}} > \frac{3}{2} \left[\sqrt[3]{(n+1)^2} - \sqrt[3]{n^2} \right]$$

同理,

$$\left(1 - \frac{2}{3n}\right)^3 = 1 - \frac{2}{n} + \frac{4}{3n^2} - \frac{8}{27n^3} > 1 - 2\frac{1}{n} + \frac{1}{n^2} = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2$$

其中

$$\frac{1}{3n^2} - \frac{8}{27n^3} = \frac{1}{3n^2} - \frac{1}{3n^3} \geqslant 0,$$

于是

$$\begin{aligned} 1 - \frac{2}{3n} & > \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{\frac{2}{3}} \\ n^{\frac{2}{3}} - \frac{2}{3}n^{-1/3} & > (n-1)^{\frac{2}{3}} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\sqrt[3]{n^2}} < \frac{3}{2} \left[\sqrt[3]{n^2} - \sqrt[3]{(n-1)^2} \right]$$

由此对原和式进行估计。对于下界:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt[3]{4}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt[3]{1,000,000}} &> \frac{3}{2} \left[(\sqrt[3]{5^2} - \sqrt[3]{4^2}) + \cdots + (\sqrt[3]{1,000,001^2} - \sqrt[3]{1,000,000^2}) \right] \\ &= \frac{3}{2} (\sqrt[3]{1,000,002,000,001} - \sqrt[3]{16}) \\ &> \frac{3}{2} \cdot 10,000 - \sqrt[3]{54} \\ &> 15,000 - 4 = 14,996 \end{aligned}$$

对于上界:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt[3]{4}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt[3]{1,000,000}} &< \frac{3}{2} \left[(\sqrt[3]{4^2} - \sqrt[3]{3^2}) + \cdots + (\sqrt[3]{1,000,000^2} - \sqrt[3]{999,999^2}) \right] \\ &= \frac{3}{2} (\sqrt[3]{1,000,000,000,000} - \sqrt[3]{9}) \\ &< \frac{3}{2} (10,000 - 2) = 14,997 \end{aligned}$$

综上, 该数的整数部分等于 14,996。

78. 求

$$\sum_{m=1}^{19} \sum_{n=m}^{19} (2m+n).$$

将求和顺序交换, 得

$$\begin{aligned} S &= \sum_{m=1}^{19} \sum_{n=m}^{19} (2m+n) \\ &= \sum_{n=1}^{19} \sum_{m=1}^n (2m+n) \\ &= \sum_{n=1}^{19} \left[2 \sum_{m=1}^n m + \sum_{m=1}^n n \right] \\ &= \sum_{n=1}^{19} \left[2 \cdot \frac{n(n+1)}{2} + n^2 \right] \\ &= \sum_{n=1}^{19} (2n^2 + n) \\ &= 2 \cdot \frac{19 \cdot 20 \cdot 39}{6} + \frac{19 \cdot 20}{2} \\ &= 5130 \end{aligned}$$

79. 令

$$S(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k x^{k+1}}{3^k(k+1)},$$

(a) 试证

$$S'(x) = \frac{3}{3+x} - 1.$$

对各项微分, 有

$$S'(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k x^k}{3^k} = \sum_{k=1}^{\infty} \left(-\frac{x}{3} \right)^k = \frac{-\frac{x}{3}}{1 + \frac{x}{3}} = \frac{-x}{3+x} = \frac{3}{3+x} - 1$$

(b) 据此, 证

$$S(x) = 3 \ln(3+x) - 3 \ln 3 - x.$$

$$S(x) = \int \left(\frac{3}{3+x} - 1 \right) dx = 3 \ln(3+x) - x + C$$

由 $S(0) = 0$ 可得 $C = -3 \ln 3$, 故

$$S(x) = 3 \ln(3+x) - 3 \ln 3 - x$$

(c) 求

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k \cdot 3^k}$$

改写求和,

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k \cdot 3^k} &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(k+1)3^{k+1}} \\ &= -\frac{1}{3} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k+1)3^k} \\ &= -\frac{1}{3}(1 + S(1)) \\ &= -\frac{1}{3}(1 + 3 \ln 4 - 3 \ln 3 - 1) \\ &= \ln \frac{3}{4} \end{aligned}$$

80. (a) 定义

$$f(n) = \ln \left(\frac{n+1}{n} \right), \quad g(n) = \sum_{k=n}^{2n-1} [f(k)]^3, \quad n \geq 1,$$

证明对于任意正整数 n , 都有

$$g(n) - g(n+1) = 3f(n)f(2n)f(2n+1)$$

已知

$$f(n) = \ln \left(\frac{n+1}{n} \right), \quad n \geq 1$$

注意到

$$f(2n) + f(2n+1) = \ln \left(\frac{2n+1}{2n} \cdot \frac{2n+2}{2n+1} \right) = \ln \left(\frac{n+1}{n} \right) = f(n)$$

因此

$$\begin{aligned}
 g(n) - g(n+1) &= [f(n)]^3 - [f(2n)]^3 - [f(2n+1)]^3 \\
 &= [f(2n) + f(2n+1)]^3 - [f(2n)]^3 - [f(2n+1)]^3 \\
 &= 3(f(2n) + f(2n+1))f(2n)f(2n+1) \\
 &= 3f(n)f(2n)f(2n+1)
 \end{aligned}$$

(b) 据此, 求

$$\sum_{n=1}^{\infty} \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) \ln \left(1 + \frac{1}{2n}\right) \ln \left(1 + \frac{1}{2n+1}\right)$$

的值。

由累加法, 部分和即

$$\sum_{n=1}^N f(n)f(2n)f(2n+1) = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^N (g(n) - g(n+1)) = \frac{1}{3} (g(1) - g(N+1)).$$

由不等式 $\ln(1+x) \leq x$ 可得

$$f(n) = \ln \left(1 + \frac{1}{n}\right) \leq \frac{1}{n}$$

由放缩法, 知

$$g(n) < n[f(n)]^3 \leq \frac{1}{n^2}$$

因此当 $N \rightarrow \infty$ 时, $g(N+1) \rightarrow 0$, 于是

$$\sum_{n=1}^{\infty} f(n)f(2n)f(2n+1) = \frac{1}{3}g(1) = \frac{1}{3}(\ln 2)^3$$

这正是所求级数的值。

81. 考虑正整数 m, n , 且 $m \geq 2$ 。 (m, n) -锯齿数列是从 1 开始的连续整数序列, 有 n 个“齿”, 每个齿从 2 上升到 m 再下降到 1, 如 $(3, 4)$ -锯齿数列为

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 & & 3 & & & 3 & & & 3 & & & 3 \\
 & 2 & & 2 & & 2 & & 2 & & 2 & & 2 \\
 1 & & & & 1 & & & & 1 & & & 1
 \end{array}$$

该序列共有 17 项, 平均数为 $\frac{33}{17}$ 。

(a) 求 $(4, 2)$ -锯齿数列的项和。

$(4, 2)$ -锯齿数列的项为

$$1, 2, 3, 4, 3, 2, 1, 2, 3, 4, 3, 2, 1$$

其和为 31。

(b) 对任意正整数 $m \geq 2$, 求 $(m, 3)$ -锯齿数列中所有数字之和的通项。

$(m, 3)$ -锯齿数列由初始 1 和 3 个齿组成, 每个齿为 $2, 3, \dots, m-1, m, m-1, \dots, 2, 1$, 项和为

$$2 + 3 + \dots + m + (m-1) + \dots + 1 = 2(1 + 2 + \dots + m) - 1 - m = m^2 - 1.$$

因此序列和为 $1 + 3(m^2 - 1) = 3m^2 - 2$ 。

(c) 求所有使 (m, n) -锯齿数列的项和为 145 的 (m, n) 序对。

每个齿的和为 $m^2 - 1$, 整个序列和为

$$1 + n(m^2 - 1) = 145 \Rightarrow n(m^2 - 1) = 144.$$

考虑 144 的因数分解, 当 $m \geq 2$ 时, $m^2 - 1$ 可能值为

$$3, 8, 15, 24, 35, 48, 63, 80, 99, 120, 143,$$

其中 3, 8, 24, 48 能整除 144, 因此符合条件的序对为

$$(m, n) = (2, 48), (3, 18), (5, 6), (7, 3).$$

(d) 证明对于所有正整数对 (m, n) 且 $m \geq 2$, (m, n) -锯齿数列的平均数不是整数。

平均数为

$$\frac{1 + n(m^2 - 1)}{1 + n(2m - 2)}$$

假设平均数为整数 k , 可得一关于 m 的二次方程式

$$\frac{1 + n(m^2 - 1)}{1 + n(2m - 2)} = k \Rightarrow m^2 n - 2mnk + (2nk - n - k + 1) = 0$$

由于 m 为整数, 故判别式

$$\Delta = (-2nk)^2 - 4n(2nk - n - k + 1) = (2n(k - 1) + 1)^2 - 1.$$

必须为完全平方数, 且两完全平方数差为 1 的只有当 0 和 1, 因此

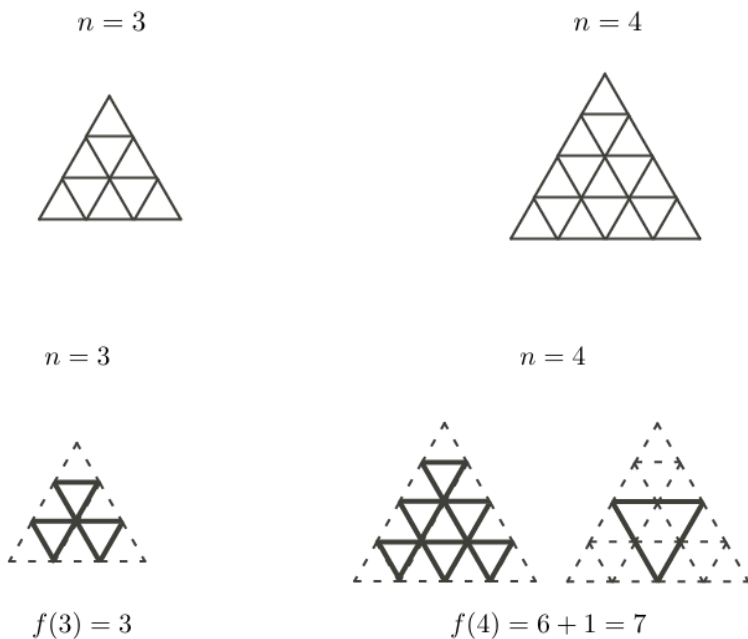
$$2n(k-1)+1=1 \Rightarrow k=1$$

但若平均数为 1, 则

$$n(m^2-1)+1=n(2m-2)+1 \Rightarrow n(m-1)^2=0,$$

得 $n > 0$ 且 $m \geq 2$, 矛盾, 因此 (m, n) -锯齿数列的平均数不可能为整数。

82. 已知正整数 n , 考虑一个边长为 n 、顶点朝上的等边三角形, 将其划分为单位等边三角形。对于每个 n , 记 $f(n)$ 为所有大小的顶点朝下等边三角形的总数, 例如 $f(3) = 3, f(4) = 7$ 。



- (a) 求 $f(5)$ 和 $f(6)$ 。

当 $n = 5$ 时, 有 $1 + 2 + 3 + 4 = 10$ 个边长为 1、 $1 + 2 = 3$ 个边长为 2 的三角形, 所以

$$f(5) = 10 + 3 = 13$$

当 $n = 6$ 时, 有 $1 + 2 + 3 + 4 + 5 = 15$ 个边长为 1、 $1 + 2 + 3 = 6$ 个边长为 2、1 个边长为 3 的三角形, 所以

$$f(6) = 15 + 6 + 1 = 22$$

(b) 证明对每个正整数 $k \geq 1$, 有 $f(2k) = f(2k-1) + k^2$ 。



设第 i 行有 $i+1$ 个单位点, 从左至右记为 $0, 1, \dots, i$, 考虑边长为 m 、顶点朝下的等边三角形, 且其底顶点位于行 i 时, 注意到每个这样的三角形都被其底顶点确定, 故可能的底点数为

$$(i-m) - m + 1 = i + 1 - 2m,$$

要求 $2m \leq i \leq n$ 才能形成三角形, 因此边长为 m 、顶点朝下的三角形总数为

$$\sum_{i=2m}^n (i+1-2m) = \frac{(n+1-2m)(n+2-2m)}{2}$$

若 $n = 2k$, 则 $m = 1, 2, \dots, k$, 所以

$$\begin{aligned} f(2k) &= \sum_{m=1}^k \frac{(2k+1-2m)(2k+2-2m)}{2} \\ &= \sum_{l=1}^k (2l-1)l \quad (\text{令 } l = k+1-m) \\ &= 2 \sum_{l=1}^k l^2 - \sum_{l=1}^k l \\ &= 2 \cdot \frac{k(k+1)(2k+1)}{6} - \frac{k(k+1)}{2} \\ &= \frac{k(k+1)(4k-1)}{6} \end{aligned}$$

若 $n = 2k - 1$, 则 $m = 1, 2, \dots, k - 1$, 所以

$$\begin{aligned} f(2k-1) &= \sum_{m=1}^{k-1} \frac{(2k-2m)(2k+1-2m)}{2} \\ &= \sum_{l=1}^{k-1} l(2l+1) \quad (\text{令 } l = k-m) \\ &= 2 \sum_{l=1}^{k-1} l^2 + \sum_{l=1}^{k-1} l \\ &= 2 \cdot \frac{(k-1)k(2k-1)}{6} + \frac{(k-1)k}{2} \\ &= \frac{k(k-1)(4k+1)}{6} \end{aligned}$$

因此,

$$f(2k) - f(2k-1) = \frac{k(k+1)(4k-1)}{6} - \frac{k(k-1)(4k+1)}{6} = k^2$$

证毕。

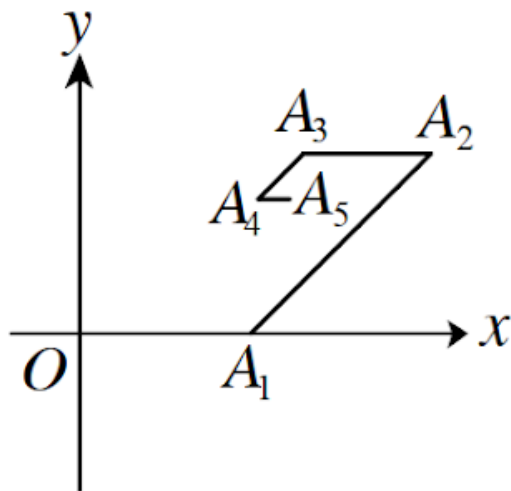
83. 如下图, $O(0,0)$, $A_1(8,0)$, A_1A_2 与 x 轴正向夹 45° 角, 又

$$A_1A_2 \parallel A_3A_4 \parallel A_5A_6 \parallel \dots, \quad OA_1 \parallel A_2A_3 \parallel A_4A_5 \parallel \dots$$

已知 $A_1A_2 = 8$, 且对所有 $k \in \mathbb{N}$, 有

$$A_kA_{k+1} = 2A_{k+1}A_{k+2}.$$

若点 A_n 的坐标为 (x_n, y_n) , 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n + y_n)$ 。



令 $a_n = A_n A_{n+1} = 2^{4-n}, n \in \mathbb{N}$, 有

$$\begin{aligned}
 x_\infty &= 8 + \frac{a_1}{\sqrt{2}} - a_2 - \frac{a_3}{\sqrt{2}} + a_4 + \frac{a_5}{\sqrt{2}} - a_6 - \frac{a_7}{\sqrt{2}} + a_8 + \cdots \\
 &= 8 + (a_4 + a_8 + a_{12} + \cdots) + \frac{1}{\sqrt{2}}(a_1 + a_5 + a_9 + \cdots) \\
 &\quad - \frac{1}{\sqrt{2}}(a_3 + a_7 + a_{11} + \cdots) - (a_2 + a_6 + a_{10} + \cdots) \\
 &= 8 + \frac{1}{1 - \frac{1}{16}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{8}{1 - \frac{1}{16}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{1 - \frac{1}{16}} - \frac{4}{1 - \frac{1}{16}} = 8 + \frac{16}{5}(\sqrt{2} - 1) \\
 y_\infty &= \frac{a_1}{\sqrt{2}} - \frac{a_3}{\sqrt{2}} + \frac{a_5}{\sqrt{2}} - \frac{a_7}{\sqrt{2}} + \cdots \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(a_1 + a_5 + a_9 + \cdots) - \frac{1}{\sqrt{2}}(a_3 + a_7 + a_{11} + \cdots) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{8}{1 - \frac{1}{16}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{1 - \frac{1}{16}} = \frac{16\sqrt{2}}{5}
 \end{aligned}$$

所以

$$x_\infty + y_\infty = \frac{24 + 32\sqrt{2}}{5}$$

二项展开式

1. 求 $(x^2 + x + y)^5$ 展开式中 x^5y^2 的系数。

系数为

$${}^5C_2 {}^3C_1 {}^2C_2 = 30$$

2. 求 $(x\sqrt{y} - y\sqrt{x})^4$ 的展开式中 xy 的系数。

观察发现

$$(x\sqrt{y} - y\sqrt{x})^4 = x^2y^2(\sqrt{x} - \sqrt{y})^4,$$

即 $(\sqrt{x} - \sqrt{y})^4$ 展开式中含 xy 项的系数 ${}^4C_2 = 6$ 。

3. 求在 $\left(x + \frac{4}{x} + 4\right)^6$ 的展开式中 x^4 的系数。

原式可化为

$$\left(x + \frac{4}{x} + 4\right)^6 = \left(\frac{x^2 + 4x + 4}{x}\right)^6 = \frac{(x+2)^{12}}{x^6}$$

即求 $(x+2)^{12}$ 展开式中 x^{10} 的系数

$${}^{12}C_2 \cdot 2^2 = 264$$

4. 求 $(1+x^2) + (1+x^2)^2 + \cdots + (1+x^2)^{10}$ 展开式中 x^6 的系数。

原式为

$$\frac{(1+x^2)[(1+x^2)^{10} - 1]}{(1+x^2) - 1} = \frac{(1+x^2)^{11} - (1+x^2)}{x^2}$$

而展开式 $(1+x^2)^{11}$ 中 x^8 系数为

$${}^{10}C_4 = \frac{11 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 8}{4 \cdot 3 \cdot 2} = 330$$

故原式中 x^6 系数为 330。

5. 求 $(1+x)^{1000} + x(1+x)^{999} + x^2(1+x)^{998} + \cdots + x^{1000}$ 展开式中 x^{50} 的系数。

由等比数列求和公式, 原式可化为

$$\begin{aligned} & (1+x)^{1000} + x(1+x)^{999} + \cdots + x^{1000} \\ &= \frac{(1+x)^{1001} - x^{1001}}{(1+x) - x} \\ &= (1+x)^{1001} - x^{1001} \\ &= 1 + {}^{1001}C_1x + {}^{1001}C_2x^2 + \cdots + {}^{1001}C_{1001}x^{1001} - x^{1001} \end{aligned}$$

所求的系数为

$${}^{1001}C_{50} = \frac{1001!}{50!951!}$$

6. 求 $(1+x) + 2(1+x)^2 + 3(1+x)^3 + \cdots + 1000(1+x)^{1000}$ 展开式中 x^{50} 的系数。

设已知多项式为 $P(x)$, 可以写出

$$\begin{aligned} xP(x) &= (1+x)P(x) - P(x) \\ &= [(1+x)^2 + 2(1+x)^3 + \cdots + 999(1+x)^{1000} + 1000(1+x)^{1001}] \\ &\quad - [(1+x) + 2(1+x)^2 + 3(1+x)^3 + \cdots + 1000(1+x)^{1000}] \\ &= 1000(1+x)^{1001} - [(1+x) + (1+x)^2 + (1+x)^3 + \cdots + (1+x)^{1000}] \\ &= 1000(1+x)^{1001} - \frac{(1+x)[(1+x)^{1000} - 1]}{(1+x) - 1} \\ &= 1000(1+x)^{1001} - \frac{(1+x)^{1001} - (1+x)}{x} \end{aligned}$$

从而得出

$$P(x) = \frac{1000(1+x)^{1001}}{x} - \frac{(1+x)^{1001} - (1+x)}{x^2}$$

$P(x)$ 中 x^{50} 的系数即为 $\frac{1000(1+x)^{1001}}{x}$ 中 x^{50} 的系数减去 $\frac{(1+x)^{1001}}{x^2}$ 中 x^{50} 的系数, 即 $(1+x)^{1001}$ 中 x^{51} 的系数减去 $(1+x)^{1001}$ 中 x^{52} 的系数:

$$1000 {}^{1001}C_{51} - {}^{1001}C_{52} = \frac{1000 \cdot 1001!}{51!950!} - \frac{1001!}{52!950!} = \frac{51050 \cdot 1001!}{52!950!}$$

7. 求 $[a + (b+c)^2]^8$ 展开式中 $a^5b^4c^2$ 的系数。

令 $(b+c)^2 = x$, 展开式为

$$(a+x)^8 = \sum_{k=0}^8 \frac{8!}{k!(8-k)!} a^k x^{8-k}$$

欲求 $a^5 b^4 c^2$ 系数, 于是 $k=5$, 有

$$\frac{8!}{5!3!} a^5 [(b+c)^2]^3 = 56a^5 (b+c)^6$$

观察

$$(b+c)^6 = \sum_{t=0}^6 \frac{6!}{t!(6-t)!} b^t c^{6-t}$$

欲求 $b^4 c^2$ 系数, 于是 $t=4$, 有

$$\frac{6!}{4!2!} b^4 c^2 = 15b^4 c^2$$

$\therefore a^5 b^4 c^2$ 系数为 $56 \cdot 15 = 840$

8. 求 $(-xy + 2x + 3y - 6)^6$ 的展开式中 $x^3 y^3$ 的系数。

考虑

$$\frac{6!}{n_1!n_2!n_3!n_4!} (-xy)^{n_1} (2x)^{n_2} (3y)^{n_3} (-6)^{n_4} = Ax^3 y^3,$$

其中 $n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = 6$

- 若 $n_1 = 0$, 则 $n_2 = 3, n_3 = 3, n_4 = 0$,

$$\frac{6!}{0!3!3!0!} (-xy)^0 (2x)^3 (3y)^3 (-6)^0 = 4320x^3 y^3$$

- 若 $n_1 = 1$, 则 $n_2 = 2, n_3 = 2, n_4 = 1$,

$$\frac{6!}{1!2!2!1!} (-xy)^1 (2x)^2 (3y)^2 (-6)^1 = 38880x^3 y^3$$

- 若 $n_1 = 2$, 则 $n_2 = 1, n_3 = 1, n_4 = 2$,

$$\frac{6!}{2!1!1!2!} (-xy)^2 (2x)^1 (3y)^1 (-6)^2 = 38880x^3 y^3$$

- 若 $n_1 = 3$, 则 $n_2 = 0, n_3 = 0, n_4 = 3$,

$$\frac{6!}{3!0!0!3!} (-xy)^3 (2x)^0 (3y)^0 (-6)^3 = 4320x^3 y^3$$

因此 $x^3 y^3$ 的系数为 $4320 + 38880 + 38880 + 4320 = 86400$

9. $\left(x + \frac{a}{x}\right) \left(2x - \frac{1}{x}\right)^5$ 的展开式中各项系数的和为 2, 则该展开式中的常数项为

解法一

令 $x = 1$ 得 $a = 1$. 故原式为

$$\left(x + \frac{1}{x}\right) \left(2x - \frac{1}{x}\right)^5$$

通项

$$T_{r+1} = {}^5C_r (2x)^{5-r} (-x^{-1})^r = {}^5C_r (-1)^r 2^{5-r} x^{5-2r}$$

由 $5 - 2r = 1$ 得 $r = 2$, 对应的常数项 = 80, 由 $5 - 2r = -1$ 得 $r = 3$, 对应的常数项 = -40, 故所求的常数项为 40

解法二

用组合提取法, 把原式看做 6 个因式相乘, 若第 1 个括号提出 x , 从余下的 5 个括号中选 2 个提出 x , 选 3 个提出 $\frac{1}{x}$,

若第 1 个括号提出 $\frac{1}{x}$, 从余下的 5 个括号中选 2 个提出 $\frac{1}{x}$, 选 3 个提出 x .

故常数项

$$x \cdot {}^5C_2 (2x)^2 \cdot {}^3C_3 \left(-\frac{1}{x}\right)^3 + \frac{1}{x} \cdot {}^5C_2 \left(-\frac{1}{x}\right)^2 \cdot {}^3C_3 (2x)^3 = -40 + 80 = 40$$

10. 试求

$$\left({}^2C_2 + {}^3C_2 x + {}^4C_2 x^2 + {}^5C_2 x^3 + {}^6C_2 x^4 + {}^7C_2 x^5\right)^4$$

展开式中 x^5 的系数。

考虑

$$f(x) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} {}^{n+2}C_2 x^n\right)^4$$

设

$$g(x) = \frac{x^2}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^{n+2}$$

则

$$g'(x) = \frac{x(2-x)}{(x-1)^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)x^{n+1}$$

$$g''(x) = -\frac{2}{(x-1)^3} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)x^n = 2 \sum_{n=0}^{\infty} {}^{n+2}C_2 x^n$$

于是

$$f(x) = \left(\sum_{n=0}^{\infty} {}^{n+2}C_2 x^n \right)^4 = \left(-\frac{1}{(1-x)^3} \right)^4 = \frac{1}{(1-x)^{12}}$$

故 $({}^2C_2 + {}^3C_2x + {}^4C_2x^2 + {}^5C_2x^3 + {}^6C_2x^4 + {}^7C_2x^5)^4$ 展开式中 x^5 的系数为

$${}^{12+5-1}C_5 = 4368$$

11. 若

$$(1+x+x^2)^6 = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_{12}x^{12},$$

求 $a_2 + a_4 + \cdots + a_{12}$ 的值。

设 $f(x) = (1+x+x^2)^6 = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_{12}x^{12}$, 则

$$a_2 + a_4 + \cdots + a_{12} = \frac{f(1) + f(-1)}{2} - a_0 = \frac{3^6 + 1}{2} - 1 = 364$$

12. 已知非零数列 $\{a_n\}$ 满足 $a_1 = 1, a_2 = 3, a_n(a_{n+2} - 1) = a_{n+1}(a_{n+1} - 1), n \in N$, 求

$${}^{2023}C_0a_1 + {}^{2023}C_1a_2 + {}^{2023}C_2a_3 + \cdots + {}^{2023}C_{2023}a_{2024}$$

的值。

由递推关系得

$$\frac{a_{n+2} - 1}{a_{n+1}} = \frac{a_{n+1} - 1}{a_n} = \frac{a_2 - 1}{a_1} = \frac{3 - 1}{1} = 2$$

即

$$a_{n+1} - 1 = 2a_n \Rightarrow a_{n+1} + 1 = 2(a_n + 1)$$

数列 $\{a_n + 1\}$ 是首项为 2, 公比为 2 的等比数列, 故 $a_n = 2^n - 1$, 则

$$\begin{aligned} & {}^{2023}C_0a_1 + {}^{2023}C_1a_2 + {}^{2023}C_2a_3 + {}^{2023}C_3a_4 + \cdots + {}^{2023}C_{2023}a_{2024} \\ &= {}^{2023}C_0(2^1 - 1) + {}^{2023}C_1(2^2 - 1) + {}^{2023}C_2(2^3 - 1) + \cdots + {}^{2023}C_{2023}(2^{2024} - 1) \\ &= 2({}^{2023}C_02^0 + {}^{2023}C_12^1 + {}^{2023}C_22^2 + \cdots + {}^{2023}C_{2023}2^{2023}) \\ &\quad - ({}^{2023}C_0 + {}^{2023}C_1 + {}^{2023}C_2 + \cdots + {}^{2023}C_{2023}) \\ &= 2(1+2)^{2023} - 2^{2023} \\ &= 2 \cdot 3^{2023} - 2^{2023} \end{aligned}$$

13. 求级数

$$1 + \frac{2}{4} + \frac{2 \cdot 3}{4 \cdot 8} + \frac{2 \cdot 3 \cdot 4}{4 \cdot 8 \cdot 12} + \frac{2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5}{4 \cdot 8 \cdot 12 \cdot 16} + \dots$$

的和。

通过提取公因数, 整理得

$$\begin{aligned} S &= 1 + \frac{2}{4} + \frac{2 \cdot 3}{4 \cdot 8} + \frac{2 \cdot 3 \cdot 4}{4 \cdot 8 \cdot 12} + \frac{2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5}{4 \cdot 8 \cdot 12 \cdot 16} + \dots \\ &= 1 + \frac{2}{1!} \left(\frac{1}{4}\right) + \frac{2 \cdot 3}{2!} \left(\frac{1}{4}\right)^2 + \frac{2 \cdot 3 \cdot 4}{3!} \left(\frac{1}{4}\right)^3 + \frac{2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5}{4!} \left(\frac{1}{4}\right)^4 + \dots \\ &= 1 + \frac{-2}{1!} \left(-\frac{1}{4}\right)^1 + \frac{(-2)(-3)}{2!} \left(-\frac{1}{4}\right)^2 + \frac{(-2)(-3)(-4)}{3!} \left(-\frac{1}{4}\right)^3 \\ &\quad + \frac{(-2)(-3)(-4)(-5)}{4!} \left(-\frac{1}{4}\right)^4 + \dots \end{aligned}$$

发现这是广义二项式 $(1-x)^{-2}$ 在 $x = \frac{1}{4}$ 时的展开式, 因此

$$S = \left(1 - \frac{1}{4}\right)^{-2} = \frac{16}{9}$$

14. 求

$$1 + \frac{1}{24} + \frac{1 \cdot 4}{24 \cdot 48} + \frac{1 \cdot 4 \cdot 7}{24 \cdot 48 \cdot 72} + \dots$$

整理得

$$\begin{aligned} S &= 1 + \frac{1}{24} + \frac{1 \cdot 4}{24 \cdot 48} + \frac{1 \cdot 4 \cdot 7}{24 \cdot 48 \cdot 72} + \dots \\ &= 1 + \frac{3 \cdot \frac{1}{3}}{24(1)} + \frac{3^2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{4}{3}}{24^2 \cdot 1 \cdot 2} + \frac{3^3 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{7}{3}}{24^3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3} + \dots \\ &= 1 + \frac{\left(-\frac{1}{3}\right)}{1} \left(-\frac{1}{8}\right) + \frac{\left(-\frac{1}{3}\right)\left(-\frac{4}{3}\right)}{1 \cdot 2} \left(-\frac{1}{8}\right)^2 + \frac{\left(-\frac{1}{3}\right)\left(-\frac{4}{3}\right)\left(-\frac{7}{3}\right)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(-\frac{1}{8}\right)^3 + \dots \end{aligned}$$

发现这是广义二项式 $(1-x)^{-\frac{1}{3}}$ 在 $x = \frac{1}{8}$ 时的展开式, 因此

$$S = \left(1 - \frac{1}{8}\right)^{-\frac{1}{3}} = \frac{2}{\sqrt[3]{7}}$$

15. 求

$$S = 1 - \frac{1}{4} + \frac{1 \cdot 3}{4 \cdot 8} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{4 \cdot 8 \cdot 12} + \dots$$

首先有

$$\begin{aligned} S &= 1 - \frac{1}{4} + \frac{1 \cdot 3}{4 \cdot 8} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{4 \cdot 8 \cdot 12} + \dots \\ &= 1 - \frac{2^1 \left(\frac{1}{2}\right)}{4^1 \cdot 1} + \frac{2^2 \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{3}{2}\right)}{4^2 (1 \cdot 2)} - \frac{2^3 \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{5}{2}\right)}{4^3 (1 \cdot 2 \cdot 3)} + \dots \\ &= 1 + \frac{-\frac{1}{2}}{1} \left(\frac{1}{2}\right)^1 + \frac{-\frac{1}{2} \left(-\frac{3}{2}\right)}{1 \cdot 2} \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{-\frac{1}{2} \left(-\frac{3}{2}\right) \left(-\frac{5}{2}\right)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{1}{2}\right)^3 + \dots \end{aligned}$$

这是广义二项式 $(1+x)^{-\frac{1}{2}}$ 在 $x = \frac{1}{2}$ 时的展开式, 因此

$$S = \left(1 + \frac{1}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

16. 求下列无穷级数的和

$$\frac{3}{8} + \frac{3 \cdot 9}{8 \cdot 16} + \frac{3 \cdot 9 \cdot 15}{8 \cdot 16 \cdot 24} + \frac{3 \cdot 9 \cdot 15 \cdot 21}{8 \cdot 16 \cdot 24 \cdot 32} + \dots$$

将一般项改写为

$$\begin{aligned} S &= \frac{3}{8} + \frac{3 \cdot 9}{8 \cdot 16} + \frac{3 \cdot 9 \cdot 15}{8 \cdot 16 \cdot 24} + \frac{3 \cdot 9 \cdot 15 \cdot 21}{8 \cdot 16 \cdot 24 \cdot 32} + \dots \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{3^k (1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2k-1))}{8^{k+1} (1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots k)} \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{3}{2}\right) \cdots \left(\frac{2k-1}{2}\right)}{k!} \left(\frac{3}{4}\right)^k \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(-\frac{1}{2}\right) \left(-\frac{3}{2}\right) \cdots \left(-\frac{2k-1}{2}\right)}{k!} \left(-\frac{3}{4}\right)^k \end{aligned}$$

考虑广义二项式展开,

$$1 + S = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{1}{2}\right) \left(-\frac{3}{2}\right) \cdots \left(-\frac{2k-1}{2}\right)}{k!} \left(-\frac{3}{4}\right)^k = \left(1 - \frac{3}{4}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

给出

$$S = 1$$

17. 求下列无穷和

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left[\prod_{r=1}^k \left(\frac{8r-7}{40r} \right) \right].$$

观察到

$$\begin{aligned} S &= \sum_{k=1}^{\infty} \left[\prod_{r=1}^k \left(\frac{8r-7}{40r} \right) \right] \\ &= \frac{1}{40} + \frac{1}{40} \cdot \frac{9}{80} + \frac{1}{40} \cdot \frac{9}{80} \cdot \frac{17}{120} + \frac{1}{40} \cdot \frac{9}{80} \cdot \frac{17}{120} \cdot \frac{25}{160} + \cdots \\ &= \frac{1}{(-8)(-5)1!} + \frac{1 \cdot 9}{(-8)^2(-5)^2 2!} + \frac{1 \cdot 9 \cdot 17}{(-8)^3(-5)^3 3!} + \frac{1 \cdot 9 \cdot 17 \cdot 25}{(-8)^4(-5)^4 4!} + \cdots \\ &= \frac{-\frac{1}{8}}{1!} \left(-\frac{1}{5} \right) + \frac{\left(-\frac{1}{8} \right) \left(-\frac{9}{8} \right)}{2!} \left(-\frac{1}{5} \right)^2 + \frac{\left(-\frac{1}{8} \right) \left(-\frac{9}{8} \right) \left(-\frac{17}{8} \right)}{3!} \left(-\frac{1}{5} \right)^3 + \cdots \end{aligned}$$

这是二项式级数展开式

$$(1+x)^{\alpha} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-k+1)}{k!} x^k$$

在 $\alpha = -\frac{1}{8}, x = -\frac{1}{5}$ 下去掉首项后的结果, 因此

$$S = \left(1 - \frac{1}{5} \right)^{-\frac{1}{8}} - 1 = \sqrt[8]{\frac{5}{4}} - 1$$

18. 已知级数

$$S = \frac{5}{18} - \frac{5 \cdot 8}{18 \cdot 24} + \frac{5 \cdot 8 \cdot 11}{18 \cdot 24 \cdot 30} - \frac{5 \cdot 8 \cdot 11 \cdot 14}{18 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 36} + \cdots$$

收敛, 求其和。

将原式写成

$$\begin{aligned} S &= \frac{5}{18} - \frac{5 \cdot 8}{18 \cdot 24} + \frac{5 \cdot 8 \cdot 11}{18 \cdot 24 \cdot 30} - \frac{5 \cdot 8 \cdot 11 \cdot 14}{18 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 36} + \cdots \\ &= \frac{5}{6 \cdot 3} - \frac{5 \cdot 8}{6^2(3 \cdot 4)} + \frac{5 \cdot 8 \cdot 11}{6^3(3 \cdot 4 \cdot 5)} - \frac{5 \cdot 8 \cdot 11 \cdot 14}{6^4(3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6)} + \cdots \\ &= \frac{\frac{5}{3}}{3} \left(\frac{1}{2}\right) - \frac{\frac{5}{3} \left(\frac{8}{3}\right)}{4 \cdot 3} \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{\frac{5}{3} \left(\frac{8}{3}\right) \left(\frac{11}{3}\right)}{5 \cdot 4 \cdot 3} \left(\frac{1}{2}\right)^3 - \frac{\frac{5}{3} \left(\frac{8}{3}\right) \left(\frac{11}{3}\right) \left(\frac{14}{3}\right)}{6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3} \left(\frac{1}{2}\right)^4 + \cdots \end{aligned}$$

为了构建二项式展开的形式, 写成

$$\begin{aligned} S &\cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} \\ &= \frac{\frac{1}{3} \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{5}{3}\right)}{3!} \left(\frac{1}{2}\right)^3 - \frac{\frac{1}{3} \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{5}{3}\right) \left(\frac{8}{3}\right)}{4!} \left(\frac{1}{2}\right)^4 + \cdots \\ &= \frac{\frac{1}{3} \left(-\frac{2}{3}\right) \left(-\frac{5}{3}\right)}{3!} \left(\frac{1}{2}\right)^3 + \frac{\frac{1}{3} \left(-\frac{2}{3}\right) \left(-\frac{5}{3}\right) \left(-\frac{8}{3}\right)}{4!} \left(\frac{1}{2}\right)^4 + \cdots \\ &= \left[1 + \frac{\frac{1}{3}}{1!} \left(\frac{1}{2}\right)^1 + \frac{\frac{1}{3} \left(-\frac{2}{3}\right)}{2!} \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \cdots \right] - \left[1 + \frac{\frac{1}{3}}{1!} \left(\frac{1}{2}\right)^1 + \frac{\frac{1}{3} \left(-\frac{2}{3}\right)}{2!} \left(\frac{1}{2}\right)^2 \right] \end{aligned}$$

第一部分即为 $\left(1 + \frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{3}}$ 的二项式展开:

$$\frac{1}{36}S = \left(1 + \frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(1 + \frac{1}{6} - \frac{1}{36}\right)$$

故

$$S = 9\sqrt[3]{96} - 41$$

19. 根据组合数的定义, 证明下列恒等式:

(a)

$${}^nC_r = {}^nC_{n-r}$$

有

$${}^nC_{n-r} = \frac{n!}{(n-r)!(n-(n-r))!} = \frac{n!}{(n-r)!r!} = {}^nC_r$$

(b)

$$k \cdot {}^nC_k = n \cdot {}^{n-1}C_{k-1}$$

有

$$\begin{aligned}
 k \cdot {}^nC_k &= k \cdot \frac{n!}{k!(n-k)!} \\
 &= \frac{n!}{(k-1)!(n-k)!} \\
 &= n \cdot \frac{(n-1)!}{(k-1)![(n-1)-(k-1)]!} \\
 &= n \cdot {}^{n-1}C_{k-1}
 \end{aligned}$$

(c) 帕斯卡公式:

$${}^nC_{r-1} + {}^nC_r = {}^{n+1}C_r$$

有

$$\begin{aligned}
 {}^nC_{r-1} + {}^nC_r &= \frac{n!}{(r-1)!(n-(r-1))!} + \frac{n!}{r!(n-r)!} \\
 &= \frac{n!}{(r-1)!(n-r+1)!} + \frac{n!}{r!(n-r)!} \\
 &= \frac{n! \cdot r}{r!(n-r+1)!} + \frac{n! \cdot (n-r+1)}{r!(n-r+1)!} \\
 &= \frac{n![r + (n-r+1)]}{r!(n-r+1)!} \\
 &= \frac{n!(n+1)}{r!(n-r+1)!} \\
 &= \frac{(n+1)!}{r!(n+1-r)!} \\
 &= {}^{n+1}C_r
 \end{aligned}$$

(d)

$${}^nC_m \cdot {}^mC_k = {}^nC_k \cdot {}^{n-k}C_{m-k}$$

有

$$\begin{aligned}
 {}^nC_m \cdot {}^mC_k &= \frac{n!}{m!(n-m)!} \cdot \frac{m!}{k!(m-k)!} \\
 &= \frac{n!}{k!(m-k)!(n-m)!} \\
 &= \frac{n!}{k!(n-k)!} \cdot \frac{(n-k)!}{(m-k)!(n-m)!} \\
 &= {}^nC_k \cdot {}^{n-k}C_{m-k}
 \end{aligned}$$

20. 设 $n, k \in \mathbb{N}$, 根据帕斯卡公式, 试证明

(a)

$${}^nC_0 + {}^{n+1}C_1 + \cdots + {}^{n+k}C_k = {}^{n+k+1}C_k$$

反复对最后一个二项式系数运用帕斯卡公式, 得

$$\begin{aligned}
 {}^nC_k &= {}^{n-1}C_k + {}^{n-1}C_{k-1} \\
 &= {}^{n-1}C_k + {}^{n-2}C_{k-1} + {}^{n-2}C_{k-2} \\
 &\vdots \\
 &= {}^{n-1}C_k + {}^{n-2}C_{k-1} + \cdots + {}^{n-k-2}C_0 \\
 &= {}^{n-1}C_k + {}^{n-2}C_{k-1} + \cdots + {}^{n-k-1}C_0
 \end{aligned}$$

以 $n+k+1$ 取代 n , 即得证。

(b)

$${}^kC_k + {}^{k+1}C_k + \cdots + {}^nC_k = {}^{n+1}C_{k+1}$$

反复对第一个二项式系数运用帕斯卡公式, 得

$$\begin{aligned}
 {}^nC_k &= {}^{n-1}C_k + {}^{n-1}C_{k-1} \\
 &= {}^{n-2}C_k + {}^{n-2}C_{k-1} + {}^{n-1}C_{k-1} \\
 &\vdots \\
 &= {}^0C_k + {}^0C_{k-1} + {}^1C_{k-1} + \cdots + {}^{n-2}C_{k-1} + {}^{n-1}C_{k-1}
 \end{aligned}$$

而 ${}^0C_k = 0$, 以 $n+1$ 取代 n , 且以 $k+1$ 取代 k , 即得证。

21. 证明恒等式

$$\sum_{r=0}^n ({}^nC_r)^2 = {}^{2n}C_n, \quad n \geq 0$$

设 S 是一个有 $2n$ 个元素的集合, ${}^{2n}C_n$ 为计数 S 的 n 子集的数目。又把 S 划分成 A 和 B 两个子集, 每一个子集都有 n 个元素。利用 S 的这个划分去划分 S 的 n 子集。 S 的每一个 n 子集包含 k 个 A 的元素和 $n-k$ 个 B 的元素, k 是介于 0 和 n 之间的任意整数。我们把 S 的 n 子集划分成 $n+1$ 个部分:

$$C_0, C_1, \dots, C_n$$

其中 C_k 是由包含 k 个 A 的元素和 $n-k$ 个 B 的元素组成的 n 子集。根据加法原理, 有

$${}^{2n}C_n = |C_0| + |C_1| + \dots + |C_n|$$

C_k 中的 n 子集可以通过从 A 中选择 k 个元素, 再从 B 中选择 $n-k$ 个元素而得到。根据乘法原理,

$$|C_k| = {}^nC_k {}^nC_{n-k} = {}^nC_k^2, \quad k \geq 0.$$

把上式代入得

$$\sum_{k=0}^n ({}^nC_k)^2 = ({}^nC_0)^2 + ({}^nC_1)^2 + \dots + ({}^nC_n)^2 = {}^{2n}C_n$$

22. 根据二项式定理, 证明下列恒等式:

(a)

$${}^nC_0 + {}^nC_2 + \dots = {}^nC_1 + {}^nC_3 + \dots = 2^{n-1}$$

由二项式定理,

$$(1-1)^n = 1^n + {}^nC_1 1^{n-1}(-1) + {}^nC_2 1^{n-2}(-1)^2 + \dots + (-1)^n$$

即

$${}^nC_0 - {}^nC_1 + {}^nC_2 - \dots + (-1)^n \cdot {}^nC_n = 0$$

由此可得

$${}^nC_0 + {}^nC_2 + \dots = {}^nC_1 + {}^nC_3 + \dots$$

由二项式定理,

$$(1+1)^n = 1^n + {}^nC_1 1^{n-1} 1 + {}^nC_2 1^{n-2} 1^2 + \cdots + 1^n$$

给出

$${}^nC_0 + {}^nC_1 + {}^nC_2 + \cdots + {}^nC_n = 2^n$$

因此

$${}^nC_0 + {}^nC_2 + \cdots = {}^nC_1 + {}^nC_3 + \cdots = \frac{1}{2}(2^n) = 2^{n-1}$$

(b)

$$1 \cdot {}^nC_1 + 2 \cdot {}^nC_2 + \cdots + n \cdot {}^nC_n = n2^{n-1}$$

考虑二项式展开,

$$\sum_{k=0}^n {}^nC_k x^k = (1+x)^n$$

两边对 x 求导,

$$\sum_{k=1}^n k \cdot {}^nC_k x^{k-1} = n(1+x)^{n-1}$$

令 $x = 1$,

$$\sum_{k=1}^n k \cdot {}^nC_k = n2^{n-1}$$

由恒等式

$$k \cdot {}^nC_k = n \cdot {}^{n-1}C_{k-1}, \quad \sum_{k=0}^n {}^nC_k = 2^n$$

有

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n k \cdot {}^nC_k &= 1^n C_1 + 2^n C_2 + \cdots + n^n C_n \\ &= n [{}^{n-1}C_0 + {}^{n-1}C_1 + \cdots + {}^{n-1}C_{n-1}] \\ &= n2^{n-1} \end{aligned}$$

(c)

$$\sum_{k=1}^n k^2 \cdot {}^nC_k = n(n+1)2^{n-2}$$

考虑二项式展开,

$$\sum_{k=0}^n {}^nC_k x^k = (1+x)^n$$

两边求导, 并乘以 x 得

$$\sum_{k=1}^n k {}^nC_k x^k = x \frac{d}{dx} (1+x)^n = xn(1+x)^{n-1}$$

再次对两边求导,

$$\sum_{k=1}^n k^2 {}^nC_k x^{k-1} = n(1+x)^{n-1} + xn(n-1)(1+x)^{n-2}$$

代入 $x=1$, 化简得

$$\sum_{k=1}^n k^2 {}^nC_k = n \cdot 2^{n-1} + n(n-1) \cdot 2^{n-2} = n(n+1)2^{n-2}$$

(d)

$${}^nC_0 + \frac{1}{2} {}^nC_1 + \frac{1}{3} {}^nC_2 + \cdots + \frac{1}{n+1} {}^nC_n = \frac{1}{n+1} (2^{n+1} - 1)$$

考虑二项式展开,

$$(1+x)^n = \sum_{k=0}^n {}^nC_k x^k = {}^nC_0 + {}^nC_1 x + {}^nC_2 x^2 + \cdots + {}^nC_n x^n$$

对等式两边在区间 $[0, 1]$ 上关于 x 进行定积分:

$$\int_0^1 (1+x)^n dx = \int_0^1 ({}^nC_0 + {}^nC_1 x + {}^nC_2 x^2 + \cdots + {}^nC_n x^n) dx$$

左式为

$$\int_0^1 (1+x)^n dx = \left[\frac{(1+x)^{n+1}}{n+1} \right]_0^1 = \frac{2^{n+1} - 1}{n+1}$$

右式为

$$\begin{aligned}\int_0^1 \sum_{k=0}^n {}^nC_k x^k dx &= \sum_{k=0}^n {}^nC_k \int_0^1 x^k dx \\ &= \sum_{k=0}^n {}^nC_k \left[\frac{x^{k+1}}{k+1} \right]_0^1 \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{1}{k+1} {}^nC_k\end{aligned}$$

于是得证

$${}^nC_0 + \frac{1}{2} {}^nC_1 + \frac{1}{3} {}^nC_2 + \cdots + \frac{1}{n+1} {}^nC_n = \frac{1}{n+1} (2^{n+1} - 1)$$

$$\begin{aligned}\sum_{k=0}^n \frac{{}^nC_k}{k+1} &= \sum_{k=0}^n \frac{1}{k+1} \cdot \frac{n!}{k!(n-k)!} \\ &= \sum_{k=0}^n \frac{n!}{(k+1)!(n-k)!} \\ &= \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n \frac{(n+1)!}{(k+1)!(n-k)!} \\ &= \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n {}^{n+1}C_{k+1} \\ &= \frac{1}{n+1} ({}^{n+1}C_1 + {}^{n+1}C_2 + \cdots + {}^{n+1}C_{n+1}) \\ &= \frac{1}{n+1} (2^{n+1} - 1)\end{aligned}$$

于是得证。

(e)

$$\sum_{k \text{ even}} k^n C_k = n2^{n-2}$$

由二项式定理,

$$(1+x)^n = {}^nC_0 + {}^nC_1 x + {}^nC_2 x^2 + \cdots + {}^nC_n x^n$$

两边求导得

$$n(1+x)^{n-1} = {}^nC_1 + 2 {}^nC_2 x + 3 {}^nC_3 x^2 + \cdots + n {}^nC_n x^{n-1}$$

将 x 替换为 $-x$, 得

$$n(1-x)^{n-1} = {}^nC_1 - 2^n {}^nC_2 x + 3^n {}^nC_3 x^2 - \cdots + (-1)^{n-1} n^n {}^nC_n x^{n-1}$$

两式相加

$$n(1+x)^{n-1} + n(1-x)^{n-1} = 2 \sum_{k \text{ even}} k^n {}^nC_k x^{k-1}$$

代入 $x = 1$, 得到

$$\sum_{k \text{ even}} k^n {}^nC_k = n2^{n-2}$$

23. 证明范德蒙恒等式

$${}^{n+m}C_k = \sum_{i=0}^k {}^nC_i {}^mC_{k-i}$$

注意到

$$(1+x)^n (1+x)^m = (1+x)^{n+m}$$

左式根据二项展开得

$$(1+x)^n (1+x)^m = \left(\sum_{i=0}^n {}^nC_i x^i \right) \left(\sum_{j=0}^m {}^mC_j x^j \right) = \sum_{k=0}^{m+n} \left(\sum_{i=0}^k {}^nC_i {}^mC_{k-i} \right) x^k$$

而右式为

$$(1+x)^{n+m} = \sum_{k=0}^{n+m} {}^{n+m}C_k x^k$$

比较 x^k 系数, 得到

$${}^{n+m}C_k = \sum_{i=0}^k {}^nC_i {}^mC_{k-i}$$

24. 证明

$$({}^nC_0 - {}^nC_2 + {}^nC_4 - \cdots)^2 + ({}^nC_1 - {}^nC_3 + {}^nC_5 - \cdots)^2 = 2^n$$

设 $f(x) = (x+1)^n = {}^nC_0 + {}^nC_1x + {}^nC_2x^2 + \cdots + {}^nC_nx^n$, 取 $x = i$ 得

$$f(i) = (i+1)^n = (\sqrt{2}e^{\frac{\pi i}{4}})^n = 2^{\frac{n}{2}}e^{\frac{\pi i}{4}}$$

且有

$$f(i) = ({}^nC_0 - {}^nC_2 + {}^nC_4 - \cdots) + i({}^nC_1 - {}^nC_3 + {}^nC_5 - \cdots)$$

比较实部与虚部得

$${}^nC_0 - {}^nC_2 + {}^nC_4 - \cdots = 2^{\frac{n}{2}} \cos \frac{\pi i}{4}, \quad {}^nC_1 - {}^nC_3 + {}^nC_5 - \cdots = 2^{\frac{n}{2}} \sin \frac{\pi i}{4}$$

因此得证

$$({}^nC_0 - {}^nC_2 + \cdots)^2 + ({}^nC_1 - {}^nC_3 + \cdots)^2 = 2^n \cos^2 \left(\frac{\pi i}{4} \right) + \sin^2 \frac{\pi i}{4} = 2^n$$

25. 若将 $(x+1)^{2000}$ 展开, 问有多少个系数是奇数?

一般地, 若 $(x+1)^n$ 展开式中奇数系数的个数为 2^a , 其中 a 是 n 的二进制表示中 1 的个数, 将 2000 转换为二进制:

$$2000 = 11111010000_2$$

其中有 6 个 1, 因此 $(x+1)^{2000}$ 中奇数系数的个数为

$$2^6 = 64.$$

又解: 对 2 取模, 有

$$\begin{aligned} (x+1)^{2000} &= (x+1)^{1024}(x+1)^{512}(x+1)^{256}(x+1)^{128}(x+1)^{64}(x+1)^{16} \\ &\equiv (x^{1024}+1)(x^{512}+1)\cdots(x^{16}+1) \pmod{2}, \end{aligned}$$

展开后共有 $2^6 = 64$ 项系数为奇数。

26. 设 n 为大于或等于 1 的正整数, 考虑数列 $a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$, 试用二项式定理证明对所有 n 皆满足

$$a_n < e$$

设 $a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$, 考虑对 a_n 进行二项式展开

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \cdot \left(\frac{1}{n}\right)^k = \sum_{k=0}^n \frac{n(n-1)\cdots(n-k+1)}{k! \cdot n^k}$$

注意到

$$\binom{n}{k} \cdot \left(\frac{1}{n}\right)^k \leq \frac{1}{k!} \Rightarrow a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} < \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} = e$$

27. 定义 a_n 为 $(3 - \sqrt{x})^n$ 展开式中 x 项的系数, 其中 n 是正整数。求极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{3^2}{a_2} + \frac{3^3}{a_3} + \cdots + \frac{3^n}{a_n} \right)$$

观察到 $(3 - \sqrt{x})^n$ 的二项展开式为:

$$(3 - \sqrt{x})^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} 3^{n-k} (-\sqrt{x})^k$$

x 项的系数对应 $k = 2$:

$$a_n = \binom{n}{2} 3^{n-2}$$

所以

$$\frac{3^n}{a_n} = \frac{3^n}{\binom{n}{2} 3^{n-2}} = \frac{3^2}{\binom{n}{2}} = \frac{9}{\binom{n}{2}}$$

原式变为

$$9 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{\binom{n}{2}} = 18 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2}{n(n-1)} = 18 \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n} \right)$$

由累加法,

$$\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n} \right) = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{3} + \cdots = 1$$

因此原极限为 18。

28. 用 $|S|$ 表示集合 S 中元素的个数。已知集合

$$S = \left\{ \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{113} \right\}, \quad T = \{A \subseteq S \mid |A| = 2n, n \in \mathbb{N}\},$$

试回答下列问题:

(a) 求 $|T|$ 。

集合 S 中的元素个数为 $|S| = 112$, 所以:

$$|T| = {}^{112}C_2 + {}^{112}C_4 + \cdots + {}^{112}C_{112}$$

由二项式定理,

$$(1+1)^{112} = {}^{112}C_0 + {}^{112}C_1 + \cdots + {}^{112}C_{112} = 2^{112}$$

$$(1-1)^{112} = {}^{112}C_0 - {}^{112}C_1 + {}^{112}C_2 - \cdots + (-1)^{112} \cdot {}^{112}C_{112} = 0$$

两式相加得

$$2^{112} = 2 \left({}^{112}C_0 + {}^{112}C_2 + {}^{112}C_4 + \cdots + {}^{112}C_{112} \right) \Rightarrow \sum_{k=0}^{56} {}^{112}C_{2k} = 2^{111}$$

于是

$$|T| = 2^{111} - 1$$

(b) 对任意 $A_i \in T$, 将 A_i 中所有元素相乘的乘积记为 m_i , 再将所有的 m_i 相加, 其和为 M , 求 M 的值。

设

$$f(x) = \left(x + \frac{1}{2}\right) \left(x + \frac{1}{3}\right) \cdots \left(x + \frac{1}{113}\right)$$

展开 $f(x)$ 得

- x^{110} 的系数为所有 $|A_i| = 2$ 的子集乘积之和;
- x^{108} 的系数为所有 $|A_i| = 4$ 的子集乘积之和;
- \cdots ;
- 常数项为所有 $|A_i| = 112$ 的子集乘积之和。

故所有偶数个元素子集的乘积之和为

$$M = \frac{1}{2} (f(1) + f(-1)) - 1$$

而

$$f(1) = \left(1 + \frac{1}{2}\right) \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdots \left(1 + \frac{1}{113}\right) = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{5}{4} \cdots \frac{114}{113} = 57$$

$$f(-1) = \left(-1 + \frac{1}{2}\right) \left(-1 + \frac{1}{3}\right) \cdots \left(-1 + \frac{1}{113}\right) = \left(-\frac{1}{2}\right) \left(-\frac{2}{3}\right) \cdots \left(-\frac{112}{113}\right) = \frac{1}{113}$$

因此

$$M = \frac{1}{2} \left(57 + \frac{1}{113}\right) - 1 = \frac{3108}{113}$$

29. 函数 f 由实数 a, b, c 定义为

$$f(x) = (a + bx + cx^2)(1 - x)^{-3}, \quad x \in \mathbb{R}, |x| < 1.$$

(a) 证明

$$f(x) = a + (3a + b)x + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} [a(n+1)(n+2) + bn(n+1) + cn(n-1)] x^n.$$

考虑二项展开式

$$\begin{aligned} (1-x)^{-3} &= 1 + \frac{-3}{1!}(-x) + \frac{-3(-3-1)}{2!}(-x)^2 + \frac{-3(-3-1)(-3-2)}{3!}(-x)^3 + \cdots \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2} \cdot \frac{(n+2)!}{n!} x^n \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2} (n+1)(n+2) x^n \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned} f(x) &= (a + bx + cx^2)(1-x)^{-3} \\ &= (a + bx + cx^2) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2} (n+1)(n+2) x^n \\ &= \frac{1}{2} a \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2) x^n + \frac{1}{2} b \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2) x^{n+1} \\ &\quad + \frac{1}{2} c \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2) x^{n+2}. \end{aligned}$$

将求和指标统一从 $n=2$ 开始, 可得

$$f(x) = a + (3a + b)x + \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} [a(n+1)(n+2) + bn(n+1) + cn(n-1)] x^n$$

(b) 据此, 求

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n}.$$

强迫展开式中 x^n 的系数

$$\frac{1}{2} [(a+b+c)n^2 + (3a+b-c)n + 2a]$$

等于 n^2 , 比较系数得

$$\frac{1}{2}(a+b+c) = 1, \quad \frac{1}{2}(3a+b-c) = 0, \quad a = 0.$$

解得

$$a = 0, \quad b = 1, \quad c = 1$$

于是

$$f(x) = (x+x^2)(1-x)^{-3} = x + \sum_{n=2}^{\infty} n^2 x^n$$

令 $x = \frac{1}{2}$, 有

$$f\left(\frac{1}{2}\right) = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4}\right) \left(1 - \frac{1}{2}\right)^{-3} = \frac{1}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n^2}{2^n}$$

因此

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{n^2}{2^n} = 6 - \frac{1}{2} = \frac{11}{2}.$$

再加上 $n=1$ 的项 $\frac{1}{2}$, 得到

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n} = 6$$

30. 设函数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x}}, \quad -1 < x < 1$$

(a) 证明

$$f(x) = \sum_{r=0}^{\infty} {}^{2r}C_r \left(\frac{1}{4}x\right)^r$$

由广义二项式定理,

$$\begin{aligned}(1-x)^{-\frac{1}{2}} &= 1 + \frac{-\frac{1}{2}}{1!}(-x) + \frac{-\frac{1}{2}\left(-\frac{3}{2}\right)}{2!}(-x)^2 + \cdots \\ &= 1 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{\left(-\frac{1}{2}\right)\left(-\frac{3}{2}\right)\cdots\left(-\frac{2r-1}{2}\right)}{r!}(-x)^r \\ &= 1 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2r-1)}{r!2^r}x^r\end{aligned}$$

利用

$$1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2r-1) = \frac{(2r)!}{2^r r!}$$

可得

$$(1-x)^{-\frac{1}{2}} = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(2r)!}{r!r!} \left(\frac{x}{4}\right)^r = \sum_{r=0}^{\infty} {}^{2r}C_r \left(\frac{x}{4}\right)^r$$

(b) 求

$$\frac{1}{\sqrt{16-x^2}}$$

的展开式, 并进一步证明

$$\frac{x}{(16-x^2)^{\frac{3}{2}}} = \sum_{r=1}^{\infty} {}^{2r}C_r \left(\frac{1}{16}\right)^r \left(\frac{1}{8}x\right)^{2r-1}$$

由 (a), 二项展开得,

$$\begin{aligned}(16-x^2)^{-\frac{1}{2}} &= 16^{-\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{x^2}{16}\right)^{-\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{4} \sum_{r=0}^{\infty} {}^{2r}C_r \left(\frac{x^2}{64}\right)^r \\ &= \frac{1}{4} \sum_{r=0}^{\infty} {}^{2r}C_r \left(\frac{x}{8}\right)^{2r}\end{aligned}$$

对两边求导, 化简得

$$\frac{x}{(16-x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{4} \sum_{r=1}^{\infty} {}^{2r}C_r (2r) \left(\frac{x}{8}\right)^{2r-1} \cdot \frac{1}{8}$$

(c) 求下列级数的值

$$\sum_{r=1}^{\infty} {}^{2r}C_r \left(\frac{5}{32}\right)^r \left(\frac{4}{25}\right)^r$$

原级数化简为

$$\sum_{r=1}^{\infty} {}^{2r}C_r \left(\frac{1}{16}\right)^r \left(\frac{2}{5}\right)^{2r-1}$$

由 (b), 令

$$\frac{x}{8} = \frac{2}{5} \Rightarrow x = \frac{16}{5}$$

则

$$\sum_{r=1}^{\infty} {}^{2r}C_r \left(\frac{1}{16}\right)^r \left(\frac{2}{5}\right)^{2r-1} = \frac{\frac{16}{5}}{\left(16 - \left(\frac{16}{5}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{25}{108}$$

泰勒展开式

1. 设

$$y = e^{\tan x}, \quad x \in \mathbb{R}$$

(a) 证明

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = (1 + \tan^2 x + 2 \tan x) \frac{dy}{dx}.$$

首先对 y 求导

$$\frac{dy}{dx} = e^{\tan x} \sec^2 x = y \sec^2 x.$$

再次求导得

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} &= \frac{dy}{dx} \sec^2 x + y \cdot 2 \sec^2 x \tan x \\ &= \frac{dy}{dx} \sec^2 x + 2 \frac{dy}{dx} \tan x \\ &= \frac{dy}{dx} (\sec^2 x + 2 \tan x) \\ &= \frac{dy}{dx} (1 + \tan^2 x + 2 \tan x) \end{aligned}$$

(b) 求 $e^{\tan x}$ 展开至 x^3 项的麦克劳林展开式。

在 $x = 0$ 处的泰勒展开式为

$$y = y_0 + y'_0 x + \frac{y''_0}{2!} x^2 + \frac{y'''_0}{3!} x^3 + O(x^4),$$

其中 $y_0 = 1, y'_0 = 1, y''_0 = 1$, 计算三阶导数:

$$\frac{d^3 y}{dx^3} = 2(1 + \tan x) \sec^2 x \frac{dy}{dx} + (1 + \tan x)^2 \frac{d^2 y}{dx^2},$$

代入 $x = 0$ 得 $y'''_0 = 3$, 于是

$$e^{\tan x} = 1 + x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{2} x^3 + O(x^4)$$

2. 设

$$f(x) = \sin[\ln(1+x)], \quad x \in \mathbb{R}, \quad x > -1$$

(a) 求关于 $f(x)$ 的微分方程。

首先求导得

$$f'(x) = \cos[\ln(1+x)] \frac{1}{1+x} \Rightarrow (1+x)f'(x) = \cos[\ln(1+x)]$$

再次求导

$$(1+x)f''(x) + f'(x) = -\sin[\ln(1+x)] \frac{1}{1+x}$$

移项得微分方程

$$(1+x)^2 f''(x) + (1+x)f'(x) + f(x) = 0 \quad (1)$$

(b) 求 $f(x)$ 的麦克劳林展开前 3 个非零项。

利用微分方程可求各阶导数在 $x=0$ 的值, 首先有

$$f(0) = \sin(\ln 1) = 0, \quad f'(0) = \cos(\ln 1) = 1.$$

由 (1) 得,

$$f''(0) + f'(0) + f(0) = 0 \Rightarrow f''(0) = -1.$$

对 (1) 再求导得

$$(1+x)^2 f''' + 3(1+x)f'' + 2f' = 0$$

于是

$$f'''(0) + 3f''(0) + 2f'(0) = 0 \Rightarrow f'''(0) = 1.$$

因此麦克劳林展开为

$$f(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \frac{f'''(0)}{3!}x^3 + \cdots = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 + \cdots$$

(c) 据此, 求 $\cos[\ln(1+x)]$ 的麦克劳林展开前 2 个非零项。

由 (b),

$$\sin[\ln(1+x)] = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 + \cdots$$

两边关于 x 求导,

$$\cos[\ln(1+x)] \cdot \frac{1}{1+x} = 1 - x + \frac{1}{2}x^2 + \cdots$$

于是

$$\begin{aligned}\cos[\ln(1+x)] &= (1+x)\left(1-x+\frac{1}{2}x^2+\dots\right) \\ &= 1-x+\frac{1}{2}x^2+x-x^2+\dots \\ &= 1-\frac{1}{2}x^2+\dots\end{aligned}$$

3. 设

$$y = \tan x, \quad 0 \leq x < \frac{\pi}{2}$$

(a) 证明下列公式:

i.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = 2y \frac{dy}{dx}$$

对 x 求导得,

$$\frac{dy}{dx} = \sec^2 x = 1 + \tan^2 x = 1 + y^2$$

再求导得

$$y'' = 2yy'$$

ii.

$$\frac{d^5y}{dx^5} = 6 \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 + 8 \frac{dy}{dx} \frac{d^3y}{dx^3} + 2y \frac{d^4y}{dx^4}$$

再次求导得,

$$y''' = 2(y')^2 + 2yy''$$

$$y^{(4)} = 4y'y'' + 2y'y'' + 2yy''' = 6y'y'' + 2yy'''$$

$$y^{(5)} = 6(y'')^2 + 6y'y''' + 2y'y''' + 2yy^{(4)} = 6(y'')^2 + 8y'y''' + 2yy^{(4)}$$

(b) 求 $y = \tan x$ 的麦克劳林展开前 3 个非零项。

在 $x = 0$ 处求各阶导数为

$$y_0 = \tan(0) = 0, \quad y'_0 = 1, \quad y''_0 = 0, \quad y'''_0 = 2, \quad y^{(4)}_0 = 0, \quad y^{(5)}_0 = 16.$$

故麦克劳林展开式为

$$\tan x = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 + O(x^6)$$

4. 设

$$y = \ln(2 - e^x), \quad x < \ln 2$$

(a) 证明下列公式:

$$e^y \left[\frac{d^3 y}{dx^3} + 3 \frac{dy}{dx} \frac{d^2 y}{dx^2} + \left(\frac{dy}{dx} \right)^3 \right] + e^x = 0$$

由 $y = \ln(2 - e^x)$ 得

$$e^y = 2 - e^x$$

两边对 x 求导,

$$e^y y' = -e^x \Rightarrow e^y y' + e^x = 0$$

再次求导,

$$e^y [(y')^2 + y''] + e^x = 0$$

再求一次导数,

$$e^y [y''' + 3y'y'' + (y')^3] + e^x = 0$$

(b) 求麦克劳林展开式的前三个非零项。

在 $x = 0$ 处求各阶导数:

$$y_0 = \ln(2 - e^0) = 0$$

$$y'_0 + 1 = 0 \Rightarrow y'_0 = -1$$

$$(-1)^2 + y''_0 + 1 = 0 \Rightarrow y''_0 = -2$$

$$(-1)^3 + 3(-1)(-2) + y'''_0 + 1 = 0 \Rightarrow y'''_0 = -6$$

故麦克劳林展开式为

$$\ln(2 - e^x) = -x - x^2 - x^3 + O(x^4)$$

5. 函数 f, g 定义如下

$$f(x) = \arctan\left(\frac{2}{3}x\right), \quad x \in \mathbb{R},$$

$$g(y) = \frac{1}{1+y}, \quad y \in \mathbb{R}, \quad -1 < y < 1.$$

(a) 将 $g(y)$ 展开为二项级数, 并保留 y^3 项。

二项展开得,

$$\begin{aligned} g(y) &= (1+y)^{-1} = 1 + (-1)y + \frac{(-1)(-2)}{2!}y^2 + \frac{(-1)(-2)(-3)}{3!}y^3 + O(y^4) \\ &= 1 - y + y^2 - y^3 + O(y^4) \end{aligned}$$

(b) 利用 (a) 的结果, 证明

$$\arctan\left(\frac{2}{3}x\right) \approx \frac{2}{3}x - \frac{8}{81}x^3 + \frac{32}{1215}x^5 - \frac{128}{15309}x^7$$

对 x 求导,

$$f'(x) = \frac{\frac{2}{3}}{1 + (\frac{2}{3}x)^2} = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{4}{9}x^2\right)^{-1}$$

令 $y = \frac{4}{9}x^2$,

$$\begin{aligned} f'(x) &= \frac{2}{3} \left[1 - \frac{4}{9}x^2 + \left(\frac{4}{9}x^2\right)^2 - \left(\frac{4}{9}x^2\right)^3 + O(x^8) \right] \\ &= \frac{2}{3} - \frac{8}{27}x^2 + \frac{32}{243}x^4 - \frac{128}{2187}x^6 + O(x^8) \end{aligned}$$

两边积分得

$$\begin{aligned} \arctan\left(\frac{2}{3}x\right) &= \int \left[\frac{2}{3} - \frac{8}{27}x^2 + \frac{32}{243}x^4 - \frac{128}{2187}x^6 + O(x^8) \right] dx \\ &= \frac{2}{3}x - \frac{8}{81}x^3 + \frac{32}{1215}x^5 - \frac{128}{15309}x^7 + O(x^9) + C \end{aligned}$$

由 $x=0$ 可得 $C=0$, 因此

$$\arctan\left(\frac{2}{3}x\right) \approx \frac{2}{3}x - \frac{8}{81}x^3 + \frac{32}{1215}x^5 - \frac{128}{15309}x^7$$

6. 已知

$$y = \tan x$$

(a) 证明

$$\frac{d^3y}{dx^3} = 2y \frac{d^2y}{dx^2} + 2 \left(\frac{dy}{dx} \right)^2$$

求导,

$$\frac{dy}{dx} = \sec^2 x = 1 + \tan^2 x = 1 + y^2$$

再求两次导数得

$$\frac{d^2y}{dx^2} = 2y \frac{dy}{dx}, \quad \frac{d^3y}{dx^3} = 2y \frac{d^2y}{dx^2} + 2 \left(\frac{dy}{dx} \right)^2$$

(b) 求 $\tan x$ 关于 $\left(x - \frac{\pi}{4}\right)$ 的泰勒级数展开式的前四项。

计算 $f(x)$ 及其各阶导数在 $x = \frac{\pi}{4}$ 的值:

$$f\left(\frac{\pi}{4}\right) = \tan \frac{\pi}{4} = 1$$

$$f'(x) = \sec^2 x, \quad f'\left(\frac{\pi}{4}\right) = \sec^2 \frac{\pi}{4} = (\sqrt{2})^2 = 2$$

$$f''(x) = 2 \sec x \cdot (\sec x \tan x) = 2 \sec^2 x \tan x, \quad f''\left(\frac{\pi}{4}\right) = 2(2)(1) = 4$$

$$f'''(x) = 4 \sec x (\sec x \tan x) \tan x + 2 \sec^2 x (\sec^2 x) = 4 \sec^2 x \tan^2 x + 2 \sec^4 x$$

$$f'''\left(\frac{\pi}{4}\right) = 4(2)(1)^2 + 2(2)^2 = 16$$

将上述数值代入泰勒公式:

$$\begin{aligned} \tan x &= 1 + 2 \left(x - \frac{\pi}{4}\right) + \frac{4}{2!} \left(x - \frac{\pi}{4}\right)^2 + \frac{16}{3!} \left(x - \frac{\pi}{4}\right)^3 + \dots \\ &= 1 + 2 \left(x - \frac{\pi}{4}\right) + 2 \left(x - \frac{\pi}{4}\right)^2 + \frac{8}{3} \left(x - \frac{\pi}{4}\right)^3 + \dots \end{aligned}$$

(c) 据此, 求证

$$\tan \frac{5\pi}{18} \approx 1 + \frac{\pi}{18} + \frac{\pi^2}{648} + \frac{\pi^3}{17496}$$

令 $x = \frac{5\pi}{18}$, 则

$$x - \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{36}$$

代入泰勒展开得

$$\tan \frac{5\pi}{18} \approx 1 + 2 \cdot \frac{\pi}{36} + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{36}\right)^2 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{\pi}{36}\right)^3$$

即

$$\tan \frac{5\pi}{18} \approx 1 + \frac{\pi}{18} + \frac{\pi^2}{648} + \frac{\pi^3}{17496}$$

7. 求 $\arctan x$ 的麦克劳林展开式, 并利用该展开证明

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} f(n)$$

其中 $f(n)$ 为某函数。

考虑

$$\frac{d}{dx}(\arctan x) = \frac{1}{1+x^2}$$

当 $|x| < 1$ 时, 有几何级数展开

$$\frac{1}{1+x^2} = 1 - x^2 + x^4 - x^6 + x^8 - \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{2n}$$

对上式逐项积分, 有

$$\arctan x = \sum_{n=0}^{\infty} \int (-1)^n x^{2n} dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{2n+1} + C$$

令 $x = 0$, 则 $C = 0$, 于是

$$\arctan x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{2n+1}$$

代入 $x = 1$ 得

$$\arctan 1 = \frac{\pi}{4} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1}$$

即

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{2n+1}$$

其中

$$f(n) = \frac{4(-1)^n}{2n+1}$$

8. 选择适当的二项展开式, 证明

$$\arcsin x = \sum_{r=0}^{\infty} \left[\binom{2r}{r} \frac{2}{2r+1} \left(\frac{x}{2}\right)^{2r+1} \right]$$

从二项式展开 $(1-x^2)^{-\frac{1}{2}}$ 出发,

$$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} = (1-x^2)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{-\frac{1}{2}}{1}(-x^2) + \frac{-\frac{1}{2}(-\frac{3}{2})}{1 \cdot 2}(-x^2)^2 + \frac{-\frac{1}{2}(-\frac{3}{2})(-\frac{5}{2})}{1 \cdot 2 \cdot 3}(-x^2)^3 + O(x^8)$$

整理得

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} &= 1 + \frac{2!}{(1!)^2} \frac{x^2}{2^2} + \frac{4!}{(2!)^2} \frac{x^4}{2^4} + \frac{6!}{(3!)^2} \frac{x^6}{2^6} + O(x^8) \\ &= \sum_{r=0}^{\infty} \left[\frac{(2r)!}{(r!)^2} \left(\frac{x}{2}\right)^{2r} \right] \\ &= \sum_{r=0}^{\infty} \left[\binom{2r}{r} \left(\frac{x}{2}\right)^{2r} \right]\end{aligned}$$

在收敛半径内, 对等式两边积分:

$$\int \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \int \sum_{r=0}^{\infty} \left[\binom{2r}{r} \frac{x^{2r}}{2^{2r}} \right] dx$$

得到

$$\arcsin x = \sum_{r=0}^{\infty} \left[\binom{2r}{r} \frac{x^{2r+1}}{2r+1} \cdot \frac{1}{2^{2r}} \right] + C = \sum_{r=0}^{\infty} \left[\binom{2r}{r} \frac{2}{2r+1} \left(\frac{x}{2}\right)^{2r+1} \right] + C$$

当 $x=0$ 时, 故 $C=0$, 因此

$$\arcsin x = \sum_{r=0}^{\infty} \left[\binom{2r}{r} \frac{2}{2r+1} \left(\frac{x}{2}\right)^{2r+1} \right]$$

9. 求下列无穷级数的和

$$1 + \frac{1}{3 \cdot 4} + \frac{1}{5 \cdot 4^2} + \frac{1}{7 \cdot 4^3} + \frac{1}{9 \cdot 4^4} + \cdots$$

考虑 $\ln(1+x)$ 及 $\ln(1-x)$ 的幂展开:

$$\ln(1+x) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{4}x^4 + \cdots$$

$$\ln(1-x) = -x - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{4}x^4 + \cdots$$

两式相减得

$$\ln(1+x) - \ln(1-x) = 2 \left(x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \frac{x^7}{7} + \dots \right)$$

即

$$\ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) = 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{2k+1}}{2k+1}$$

在收敛半径内令 $x = \frac{1}{2}$, 则

$$\ln 3 = 2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)2^{2k+1}} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)4^k}$$

即所求级数的和为 $\ln 3$ 。

10. 求下列交错级数的和

$$\frac{1}{1} - \frac{1}{1+4} + \frac{1}{1+4+9} - \frac{1}{1+4+9+16} + \frac{1}{1+4+9+16+25} - \dots$$

写成

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{1^2 + 2^2 + \dots + n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6(-1)^{n+1}}{n(n+1)(2n+1)}$$

部分分式分解得

$$\frac{1}{n(n+1)(2n+1)} = \frac{1}{n} + \frac{1}{n+1} - \frac{4}{2n+1}$$

因此级数可写为

$$6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} + 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n+1} - 24 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n+1}$$

分别处理各个级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} = \ln 2, \quad 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n+1} = 6 - 6 \ln 2$$

而由 $\arctan x$ 的展开,

$$\arctan x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{2n+1}$$

令 $x = 1$, 易知

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} = \frac{\pi}{4}$$

因此原级数的和为

$$\frac{1}{1} - \frac{1}{1+4} + \frac{1}{1+4+9} - \cdots = 6 \ln 2 + (6 - 6 \ln 2) - 24 \left(\frac{\pi}{4} - 1 \right) = 6(\pi - 3)$$

11. 证明

$$\sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{2r+3}{(r+1)3^r} \right] = 3 \ln \frac{3}{2}$$

首先注意到

$$\frac{2r+3}{(r+1)3^r} = 2 \left(\frac{1}{3} \right)^r + \frac{1}{r+1} \left(\frac{1}{3} \right)^r$$

因此

$$\sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{2r+3}{(r+1)3^r} \right] = \sum_{r=1}^{\infty} 2 \left(\frac{1}{3} \right)^r + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r+1} \left(\frac{1}{3} \right)^r$$

第一项是首项为 $\frac{2}{3}$, 公比为 $\frac{1}{3}$ 的等比级数, 故

$$\sum_{r=1}^{\infty} 2 \left(\frac{1}{3} \right)^r = \frac{\frac{2}{3}}{1 - \frac{1}{3}} = 1$$

对第二项, 考虑

$$\ln(1-x) = -x - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{4}x^4 - \cdots$$

两边除以 $-x$, 得

$$-\frac{1}{x} \ln(1-x) = 1 + \frac{1}{2}x + \frac{1}{3}x^2 + \frac{1}{4}x^3 + \cdots = 1 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r+1} x^r$$

取 $x = \frac{1}{3}$, 由于 $|x| < 1$, 级数收敛, 于是

$$\sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r+1} \left(\frac{1}{3} \right)^r = -3 \ln \frac{2}{3} - 1$$

故

$$\sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{2r+3}{(r+1)3^r} \right] = 1 - 3 \ln \frac{2}{3} - 1 = 3 \ln \frac{3}{2}$$

12. 求下列级数的值:

$$\sum_{r=1}^{\infty} \left[\left(\frac{1}{2r} + \frac{1}{2r+1} \right) \left(\frac{1}{4} \right)^r \right]$$

由

$$\ln(1+x) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 - \cdots, \quad |x| < 1$$

$$\ln(1-x) = -x - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3}x^3 - \cdots, \quad |x| < 1$$

两式相加得

$$\ln(1-x^2) = -x^2 - \frac{1}{2}x^4 - \frac{1}{3}x^6 - \cdots$$

即

$$-\frac{1}{2} \ln(1-x^2) = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{6}x^6 + \cdots$$

令 $x = \frac{1}{2}$, 得

$$\sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{2r} \cdot \left(\frac{1}{4} \right)^r = -\frac{1}{2} \ln \frac{3}{4}$$

同理, 两式相减得

$$\ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) = 2 \left(x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \cdots \right)$$

从而

$$\frac{1}{2x} \ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) = 1 + \frac{x^2}{3} + \frac{x^4}{5} + \cdots$$

令 $x = \frac{1}{2}$, 得

$$\sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{2r+1} \cdot \left(\frac{1}{4} \right)^r = \ln 3 - 1$$

将两部分相加,

$$\sum_{r=1}^{\infty} \left[\left(\frac{1}{2r} + \frac{1}{2r+1} \right) \left(\frac{1}{4} \right)^r \right] = -\frac{1}{2} \ln \frac{3}{4} + \ln 3 - 1 = \frac{1}{2} \ln 12 - 1$$

13. (a) 以适当的积分方法计算

$$\int_0^1 x^3 \arctan x \, dx$$

先用分部积分法,

$$\int_0^1 x^3 \arctan x \, dx = \left[\frac{x^4}{4} \arctan x \right]_0^1 - \frac{1}{4} \int_0^1 \frac{x^4}{1+x^2} \, dx$$

其中

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{x^4}{1+x^2} \, dx &= \int_0^1 \left(x^2 - 1 + \frac{1}{1+x^2} \right) \, dx \\ &= \left[\frac{x^3}{3} - x + \arctan x \right]_0^1 \\ &= \frac{1}{3} - 1 + \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$

代回得

$$\int_0^1 x^3 \arctan x \, dx = \frac{\pi}{16} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{3} - 1 + \frac{\pi}{4} \right) = \frac{1}{6}$$

(b) 求 $\arctan x$ 的无穷级数展开, 并利用该展开验证 (a) 的结果

由

$$\frac{1}{1+x^2} = 1 - x^2 + x^4 - x^6 + \cdots$$

两边积分得

$$\arctan x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{2n+1}$$

根据富比尼定理 (在满足一致收敛或绝对收敛的条件下), 可以将积分号与求和号交换。代入积分式得

$$\begin{aligned} \int_0^1 x^3 \arctan x \, dx &= \int_0^1 x^3 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{2n+1} \, dx \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \int_0^1 x^{2n+4} \, dx \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)(2n+5)} \end{aligned}$$

部分分式分解,

$$\frac{1}{(2n+1)(2n+5)} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2n+1} - \frac{1}{2n+5} \right)$$

于是由累加法,

$$\int_0^1 x^3 \arctan x \, dx = \frac{1}{4} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\frac{1}{2n+1} - \frac{1}{2n+5} \right) = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{1}{3} \right) = \frac{1}{6}$$

与 (a) 的结果一致。

14. 已知

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} = \frac{\pi}{4}, \quad \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} = \ln 2, \quad \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)^2} = \frac{\pi^2}{12}.$$

求

$$\int_0^1 (\ln x)(\arctan x) dx$$

的值。

考虑 $\arctan x$ 的幂级数展开, 由

$$\frac{d}{dx}(\arctan x) = \frac{1}{1+x^2} = 1 - x^2 + x^4 - x^6 + \cdots$$

逐项积分得

$$\arctan x = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 - \frac{1}{7}x^7 + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n+1}}{2n+1}, \quad 0 \leq x \leq 1.$$

将其代入积分, 并交换求和与积分次序:

$$\int_0^1 (\arctan x)(\ln x) dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \int_0^1 x^{2n+1} \ln x dx.$$

作分部积分, 取 $u = \ln x, dv = x^{2n+1} dx$, 则

$$\int_0^1 x^{2n+1} \ln x dx = \left[\frac{x^{2n+2} \ln x}{2n+2} \right]_0^1 - \frac{1}{2n+2} \int_0^1 x^{2n+1} dx.$$

化简得

$$\int_0^1 x^{2n+1} \ln x dx = -\frac{1}{(2n+2)^2}.$$

于是

$$\int_0^1 (\arctan x)(\ln x) dx = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)(2n+2)^2}.$$

作部分分式分解

$$\frac{1}{(2n+1)(2n+2)^2} = \frac{1}{2n+1} - \frac{1}{2n+2} - \frac{1}{(2n+2)^2}.$$

代回得

$$\int_0^1 (\arctan x)(\ln x) dx = -\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\frac{1}{2n+1} - \frac{1}{2n+2} - \frac{1}{(2n+2)^2} \right]$$

将其拆分为三个已知级数:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} = \frac{\pi}{4}, \quad \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} = \ln 2, \quad \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)^2} = \frac{\pi^2}{12}.$$

因此

$$\int_0^1 (\arctan x)(\ln x) dx = - \left[\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \ln 2 - \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi^2}{12} \right] = \frac{\pi^2 - 12\pi + 24 \ln 2}{48}$$

使用莱布尼兹积分法则。设

$$I(a) = \int_0^1 (\ln x) \arctan(ax) dx, \quad a \geqslant 0.$$

所求积分为 $I(1)$, 对参数 a 求导, 有

$$I'(a) = \int_0^1 (\ln x) \frac{x}{1+a^2x^2} dx.$$

交换积分顺序, 令 $u = ax$, 得

$$I'(a) = \int_0^1 x \ln x \int_0^a \frac{du}{1+u^2x^2} dx.$$

改为先对 x 积分。注意到

$$\int_0^1 \frac{x \ln x}{1+u^2x^2} dx = -\frac{1}{2u^2} \ln(1+u^2),$$

因此

$$I'(a) = -\frac{1}{2} \int_0^a \frac{\ln(1+u^2)}{u^2} du.$$

对该积分作分部积分, 取 $U = \ln(1+u^2)$, $dV = \frac{du}{u^2}$, 则

$$I'(a) = -\frac{1}{2} \left[-\frac{\ln(1+u^2)}{u} + \int_0^a \frac{2u}{1+u^2} \cdot \frac{1}{u} du \right].$$

化简得

$$I'(a) = \frac{1}{2} \frac{\ln(1+a^2)}{a} - \int_0^a \frac{du}{1+u^2}.$$

于是

$$I'(a) = \frac{1}{2} \frac{\ln(1+a^2)}{a} - \arctan a.$$

再对 a 从 0 积分到 1, 注意 $I(0) = 0$, 得到

$$I(1) = \int_0^1 \left(\frac{1}{2} \frac{\ln(1+a^2)}{a} - \arctan a \right) da.$$

分项计算。首先

$$\int_0^1 \arctan a \, da = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \ln 2.$$

其次

$$\int_0^1 \frac{\ln(1+a^2)}{a} da = \int_0^1 \int_0^{a^2} \frac{1}{a(1+t)} dt da = \int_0^1 \frac{1-a^2}{a(1+a^2)} da = \frac{\pi^2}{12}$$

综上

$$I(1) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi^2}{12} - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \ln 2 \right)$$

因此

$$\int_0^1 (\ln x)(\arctan x) dx = \frac{\pi^2}{48} + \frac{1}{2} \ln 2 - \frac{\pi}{4} = \frac{\pi^2 - 12\pi + 24 \ln 2}{48}$$

(待验证)

矩阵

1. 已知

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 3 & 0 \\ 0 & -4 & 5 \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = (I + A)^{-1}(I - A),$$

求矩阵 $(I + B)^{-1}$ 。

由 $B = (I + A)^{-1}(I - A)$ 可得

$$(I + A)B = I - A$$

两边加上 $I + A$ 得

$$I + A + B + AB = (I + A)(I + B) = 2I$$

因此

$$(I + B)^{-1} = \frac{1}{2}(I + A) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ -2 & 4 & 0 \\ 0 & -4 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 \\ 0 & -2 & 3 \end{bmatrix}$$

2. 已知

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 3 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}$$

且联立方程

$$\begin{cases} ax + by = 5 \\ cx + dy = -3 \end{cases}$$

恰有一组解 $(x, y) = (1, 2)$, 求联立方程

$$\begin{cases} pu + qv = 1 \\ ru + sv = 2 \end{cases}$$

的解 (u, v) 。

已知

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ -3 \end{bmatrix}$$

且

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 3 \\ 3 & 2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & -3 \\ -3 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$$

因此

$$\begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -3 \\ -3 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ -3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19 \\ -30 \end{bmatrix}$$

即

$$\begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 19 \\ -30 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

故联立方程的解为

$$(u, v) = (19, -30)$$

3. 设三阶方阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a & b \\ 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A^{10} = \begin{bmatrix} 1 & ka & pa^2 + qb \\ 0 & 1 & ka \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

其中 k, p, q 为常数, 试求 $k + p + q$ 。

将 A 分解为 $A = I + B$, 其中

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & a & b \\ 0 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

注意到 $B^3 = 0$, 且

$$B^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a^2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

由二项式定理,

$$A^{10} = (I + B)^{10} = \sum_{k=0}^{10} {}^{10}C_k B^k I^{10-k} = I + 10B + 45B^2 = \begin{bmatrix} 1 & 10a & 45a^2 + 10b \\ 0 & 1 & 10a \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

所以

$$k = 10, \quad p = 45, \quad q = 10 \quad \Rightarrow \quad k + p + q = 65.$$

4. 设实数 $a > b$, 且有二阶方阵 X, Y 满足

$$X + Y = I, \quad XY = O,$$

其中

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad O = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

且

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 4 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = aX + bY,$$

求 a, b 的值。据此, 求 $X^{2025} - Y^{2025}$ 。

首先有

$$A = aX + bY = aX + b(I - X) = bI + (a - b)X,$$

故

$$X = \frac{A - bI}{a - b}, \quad Y = \frac{aI - A}{a - b}.$$

所以

$$XY = \frac{1}{(a - b)^2} (A - bI)(aI - A) = O,$$

即

$$\begin{bmatrix} 2 - b & 4 \\ 1 & -1 - b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a - 2 & -4 \\ -1 & a + 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

得到方程组

$$\begin{cases} (2 - b)(a - 2) + 4(-1) = 0, \\ (2 - b)(-4) + 4(a + 1) = 0, \\ 1 \cdot (a - 2) + (-1 - b)(-1) = 0, \\ 1 \cdot (-4) + (-1 - b)(a + 1) = 0. \end{cases}$$

由 $a > b$, 解得

$$a = 3, b = -2$$

因此

$$X = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = I - X = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 1 & -4 \\ -1 & 4 \end{bmatrix}$$

且发现 $X^2 = X$, $Y^2 = Y$, 即 X, Y 是幂等矩阵, 故对任意正整数 n ,

$$X^n = X, \quad Y^n = Y$$

因此

$$X^{2025} - Y^{2025} = X - Y = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 3 & 8 \\ 2 & -3 \end{bmatrix}$$

5. 设

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

满足

$$A + A^2 + \cdots + A^n = \begin{bmatrix} 2(3^n - 1) & a \\ b & c \end{bmatrix},$$

求 $b + c$ 。

发现

$$A^2 = \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}^2 = \begin{bmatrix} 12 & 12 \\ -3 & -3 \end{bmatrix} = 3A,$$

于是对任意 $k \geq 1$ 有 $A^k = 3^{k-1}A$, 因此

$$A + \cdots + A^n = A \sum_{k=0}^{n-1} 3^k = \frac{3^n - 1}{2} A = \begin{bmatrix} 2(3^n - 1) & 2(3^n - 1) \\ \frac{1}{2}(1 - 3^n) & \frac{1}{2}(1 - 3^n) \end{bmatrix}$$

故

$$b + c = \frac{1}{2}(1 - 3^n) + \frac{1}{2}(1 - 3^n) = 1 - 3^n$$

又解: 对角化 A 可得

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -4 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{4}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \equiv PDP^{-1}$$

由 $A^n = PD^nP^{-1}$,

$$A + A^2 + \cdots + A^n = P(D + D^2 + \cdots + D^n)P^{-1}$$

$$= P \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3 + 3^2 + \cdots + 3^n \end{bmatrix} P^{-1} = P \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{3^{n+1} - 3}{2} \end{bmatrix} P^{-1} = \begin{bmatrix} 2(3^n - 1) & 2(3^n - 1) \\ \frac{1}{2}(1 - 3^n) & \frac{1}{2}(1 - 3^n) \end{bmatrix}$$

同上。

6. 设矩阵

$$A = \begin{pmatrix} 7 & -8 \\ -7 & 8 \end{pmatrix}$$

满足

$$(I + A)^n = I + a_n A,$$

其中 n 为自然数,

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

且 $\{a_n\}$ 为一个数列, 求 a_n 的通项公式。

求 A 的特征值:

$$\det(A - \lambda I) = \begin{vmatrix} 7 - \lambda & -8 \\ -7 & 8 - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 - 15\lambda = 0 \Rightarrow \lambda = 0, 15$$

设

$$f(\lambda) = (1 + \lambda)^n = (\lambda^2 - 15\lambda)p(\lambda) + a\lambda + b,$$

令 $\lambda = 0, 15$, 解得

$$a = \frac{16^n - 1}{15}, \quad b = 1$$

由凯莱-哈密顿定理,

$$(I + A)^n = aA + bI = \frac{16^n - 1}{15}A + I \Rightarrow a_n = \frac{1}{15}(16^n - 1)$$

7. 设矩阵

$$A = \begin{bmatrix} -5 & -4 \\ 9 & 7 \end{bmatrix},$$

求

$$A^{51} - A^{50} + A^3 - 3A^2 - 2A + 4I_2,$$

其中 $I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

发现

$$(A - I)^2 = \begin{bmatrix} -6 & -4 \\ 9 & 6 \end{bmatrix}^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow A^2 = 2A - I$$

且考虑方程

$$\lambda^{50} = q(\lambda)(\lambda - 1)^2 + c_1\lambda + c_0 \quad (1)$$

对 λ 求导, 可得

$$50\lambda^{49} = q'(\lambda)(\lambda - 1)^2 + 2q(\lambda)(\lambda - 1) + c_1 \quad (2)$$

由 (1), (2), 代入 $\lambda = 1$ 得

$$c_0 = -49, \quad c_1 = 50$$

由凯莱-哈密顿定理,

$$A^{50} = 50A - 49I$$

因此

$$A^{51} - A^{50} = (50A^2 - 49A) - (50A - 49I) = 100A - 50I - 99A - 49I = A - I$$

又

$$A^3 - 3A^2 - 2A + 4I = (A - I)^3 - 5(A - I) = -5(A - I)$$

故

$$A^{51} - A^{50} + A^3 - 3A^2 - 2A + 4I = -4(A - I) = \begin{bmatrix} 24 & 16 \\ -36 & -24 \end{bmatrix}$$

8. 已知

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix}^{101} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -2 \\ 1 & 2 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

求 $a + b + c + d + e + f + g + h + i$ 。

设

$$A = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -2 \\ 1 & 2 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

解 $\det(A - \lambda I) = 0$, 即

$$\begin{vmatrix} -1-\lambda & -2 & -2 \\ 1 & 2-\lambda & 1 \\ -1 & -1 & -\lambda \end{vmatrix} = -(\lambda-1)^2(\lambda+1) = 0 \Rightarrow \lambda = 1 \ (m=2), \ \lambda = -1$$

对于 $\lambda = 1$, 解 $(A - I)\mathbf{x} = \mathbf{0}$:

$$A - I = \begin{bmatrix} -2 & -2 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow x_1 = -x_2 - x_3, \ x_2, \ x_3 \in \mathbb{R}$$

取两个线性无关解:

$$\vec{v}_1 = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{v}_2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

对于 $\lambda = -1$, 解 $(A + I)\mathbf{x} = \mathbf{0}$:

$$A + I = \begin{bmatrix} 0 & -2 & -2 \\ 1 & 3 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow x_1 = x_3, \ x_2 = -x_3$$

取

$$\vec{v}_3 = \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

于是

$$P = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

现计算逆矩阵 P^{-1} , 由 $|P| = 2$ 得

$$P^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \\ -\begin{vmatrix} -1 & 2 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} -1 & 2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} -1 & 2 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} & -\begin{vmatrix} -1 & 2 \\ 1 & -1 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

于是

$$A = PDP^{-1} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

所以

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1^{\frac{1}{101}} & 0 & 0 \\ 0 & 1^{\frac{1}{101}} & 0 \\ 0 & 0 & (-1)^{\frac{1}{101}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -2 \\ 1 & 2 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

恰好也是原矩阵, 因此

$$a + b + c + d + e + f + g + h + i = -3$$

9. 设 A, B 为 $n \times n$ 实矩阵, 且满足

$$AB + A + B = 0,$$

证明 $AB = BA$ 。

注意到

$$(A + I)(B + I) = AB + A + B + I = I$$

其中 I 为单位矩阵, 因此 $A + I$ 及 $B + I$ 互为逆矩阵, 据此有

$$(A + I)(B + I) = (B + I)(A + I) = I$$

展开等式得到

$$AB + A + B + I = BA + B + A + I \Rightarrow AB = BA$$

10. 若 n 阶方阵 $A, B, A + B$ 皆可逆, 证明 $A^{-1} + B^{-1}$ 也是可逆矩阵。

需证明存在一个矩阵 C , 使得

$$(A^{-1} + B^{-1})C = I$$

设

$$C = B(A + B)^{-1}A$$

下面验证该选择可行, 观察

$$\begin{aligned}
 (A^{-1} + B^{-1})C &= (A^{-1} + B^{-1})B(A + B)^{-1}A \\
 &= A^{-1}B(A + B)^{-1}A + (A + B)^{-1}A \\
 &= A^{-1}[(A + B) - A](A + B)^{-1}A + (A + B)^{-1}A \\
 &= [A^{-1}(A + B) - I](A + B)^{-1}A + (A + B)^{-1}A \\
 &= A^{-1}A - (A + B)^{-1}A + (A + B)^{-1}A \\
 &= I
 \end{aligned}$$

因此存在矩阵 $C = B(A + B)^{-1}A$ 使得 $(A^{-1} + B^{-1})C = I$, 从而 $A^{-1} + B^{-1}$ 可逆, 其逆矩阵为

$$(A^{-1} + B^{-1})^{-1} = B(A + B)^{-1}A.$$

11. 设 A, B 均为 n 阶方阵, 且 $I + AB$ 可逆, 证明矩阵 $I + BA$ 也可逆。

首先发现到

$$(I + BA)B = B + BAB = B(I + AB)$$

由此观察

$$\begin{aligned}
 &(I + BA)[I - B(I + AB)^{-1}A] \\
 &= I + BA - (I + BA)B(I + AB)^{-1}A \\
 &= I + BA - B(I + AB)(I + AB)^{-1}A \\
 &= I + BA - BA \\
 &= I
 \end{aligned}$$

故得证 $I + BA$ 也可逆。

12. 设 A, B, C 为同阶实方阵, 且 A 可逆, 证明若

$$(A - B)C = BA^{-1},$$

则有

$$C(A - B) = A^{-1}B.$$

由假设

$$(A - B)C = BA^{-1}$$

在两边加上 $(A - B)A^{-1}$, 得到

$$(A - B)C + (A - B)A^{-1} = BA^{-1} + (A - B)A^{-1} = I$$

于是由

$$(A - B)(C + A^{-1}) = I$$

知 $A + B$ 可逆, 有

$$(C + A^{-1})(A - B) = I$$

展开即得到

$$C(A - B) = A^{-1}B$$

13. 对任意整数 $n \geq 2$, 设 A, B 为两个 $n \times n$ 实矩阵, 且满足

$$A^{-1} + B^{-1} = (A + B)^{-1}.$$

证明

$$\det A = \det B.$$

若 A, B 为复矩阵, 结论是否仍成立?

由条件

$$A^{-1} + B^{-1} = (A + B)^{-1}$$

有

$$I = (A + B)(A + B)^{-1} = (A + B)(A^{-1} + B^{-1}) = I + AB^{-1} + BA^{-1} + I$$

于是

$$AB^{-1} + BA^{-1} + I = 0$$

令 $X = AB^{-1}$, 则 $A = XB$, 且 $BA^{-1} = X^{-1}$, 因此

$$X + X^{-1} + I = 0$$

于是

$$X^3 - I = (X - I)X(X + X^{-1} + I) = 0 \Rightarrow X^3 = I$$

取行列式可得

$$(\det X)^3 = \det(X^3) = \det I = 1$$

由于 X 为实矩阵, 故 $\det X = 1$, 于是

$$\det A = \det(XB) = \det X \det B = \det B,$$

故得证。下面说明在复矩阵情形下结论不成立。设

$$\omega = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i \notin \mathbb{R}$$

其中 $\omega^3 = 1$, 且有

$$1 + \omega + \omega^2 = 0.$$

取 $A = I$, 且 B 为对角矩阵, 其对角元均取为 ω 或 ω^2 使得 $\det B \neq 1$ (若 n 不是 3 的倍数可直接取 $B = \omega I$), 此时

$$A^{-1} = I, \quad B^{-1} = \bar{B}$$

且

$$I + B + \bar{B} = 0$$

因此

$$(A + B)^{-1} = (-\bar{B})^{-1} = -B = I + \bar{B} = A^{-1} + B^{-1}$$

但由构造可知

$$\det A = 1 \neq \det B$$

14. 设 A, B 为 $n \times n$ 实矩阵, 满足

$$A^2 + B^2 = AB.$$

证明若 $BA - AB$ 为可逆矩阵, 则 n 能被 3 整除。

设 $S = A + \omega B$, 其中 $\omega = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$, 则

$$S\bar{S} = (A + \omega B)(A + \bar{\omega}B) = A^2 + \omega BA + \bar{\omega}AB + B^2 = AB + \omega BA + \bar{\omega}AB$$

注意到 $\bar{\omega} + 1 = -\omega$, 于是

$$S\bar{S} = \omega(BA - AB)$$

两边取行列式, 有

$$\det S \cdot \det \bar{S} = \det(\omega(BA - AB)) = \omega^n \det(BA - AB)$$

由于 $\det S \cdot \det \bar{S} \in \mathbb{R}$, 且 $BA - AB$ 可逆, 故 $\det(BA - AB) \neq 0$, 从而 ω^n 必须为实数, 因此 n 必须是 3 的倍数。

15. 求所有复数 λ , 使得存在正整数 n 及实 $n \times n$ 矩阵 A , 满足

$$A^2 = A^T$$

且 λ 是 A 的一个特征值。

有

$$A^4 = (A^2)^2 = (A^T)^2 = (A^2)^T = (A^T)^T = A$$

所以

$$A^4 - A = 0$$

由此可知 A 的所有特征值都是多项式 $X^4 - X$ 的根, 而 $X^4 - X = X(X^3 - 1)$ 的根是

$$0, 1, \frac{-1 \pm \sqrt{3}i}{2}$$

考虑以下矩阵

$$A_0 = (0), \quad A_1 = (1), \quad A_2 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix}, \quad A_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

0 和 1 分别是 1×1 矩阵 A_0 和 A_1 的特征值, $\frac{-1 \pm \sqrt{3}i}{2}$ 是 A_2 的特征值, 不难看出

$$A_2^2 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} = A_2^T$$

故矩阵 A_4 包含了所有四个可能特征值。

16. 已知 A 是 4×2 实矩阵, B 是 2×4 实矩阵, 且

$$AB = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

求 BA 。

将矩阵分块成

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_1 & B_2 \end{pmatrix},$$

其中 A_1, A_2, B_1, B_2 为 2×2 矩阵, 于是

$$AB = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 & B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 B_1 & A_1 B_2 \\ A_2 B_1 & A_2 B_2 \end{pmatrix}$$

比较得

$$A_1 B_1 = A_2 B_2 = I_2, \quad A_1 B_2 = A_2 B_1 = -I_2$$

即

$$B_1 = A_1^{-1}, \quad B_2 = -A_1^{-1}, \quad A_2 = -A_1$$

于是

$$BA = \begin{pmatrix} B_1 & B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = B_1 A_1 + B_2 A_2 = A_1^{-1} A_1 + (-A_1^{-1})(-A_1) = 2I_2$$

17. 已知

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 4 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \end{bmatrix},$$

求 A^n 。

将 A 分块为

$$A = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 2 & 4 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 2 & 4 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

注意到 $B = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix}$, 所以可递推得

$$B^n = 4^{n-1} B$$

且由于 $\begin{bmatrix} 0 & 4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^2 = 0$, 则

$$C^n = \left(2I + \begin{bmatrix} 0 & 4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right)^n = 2^n I + n 2^{n-1} \begin{bmatrix} 0 & 4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2^n & 4n 2^{n-1} \\ 0 & 2^n \end{bmatrix}$$

因此

$$A^n = \begin{bmatrix} B^n & 0 \\ 0 & C^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cdot 4^{n-1} & 4 \cdot 4^{n-1} & 0 & 0 \\ 1 \cdot 4^{n-1} & 2 \cdot 4^{n-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2^n & n2^{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 2^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2^{2n-1} & 2^{2n+1} & 0 & 0 \\ 2^{2n-2} & 2^{2n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2^n & n2^{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 2^n \end{bmatrix}$$

18. 设 A 和 B 是 $n \times n$ 实矩阵, 且满足

$$\text{rank}(AB - BA + I) = 1,$$

其中 I 是 $n \times n$ 单位矩阵。证明

$$\text{tr}(ABAB) - \text{tr}(A^2B^2) = \frac{1}{2}n(n-1).$$

令 $X = AB - BA$, 注意到

$$\begin{aligned} \text{tr}(X^2) &= \text{tr}(ABAB - ABBA - BAAB + BABA) \\ &= 2\text{tr}(ABAB) - 2\text{tr}(A^2B^2), \end{aligned}$$

因为迹具有循环性。因此只需证明 $\text{tr}(X^2) = n(n-1)$ 。由假设, $X + I$ 的秩为 1, 所以

$$X + I = v^t w$$

其中 v, w 为向量, 于是

$$X^2 = (v^t w - I)^2 = I - 2v^t w + v^t w v^t w = I + (w v^t - 2)v^t w.$$

且有 $\text{tr}(X) = 0$, 因此

$$w v^t = \text{tr}(w v^t) = \text{tr}(v^t w) = n$$

于是

$$\text{tr}(X^2) = n + (n-2)n = n(n-1)$$

即得证。

由于 $X + I$ 的秩为 1, 它有特征值 0, 重数为 $n - 1$ 。因此 X 有特征值 -1 , 重数也为 $n - 1$ 。由于 $\text{tr}(X) = 0$, 剩余的特征值只能为 $n - 1$, 于是

$$\text{tr}(X^2) = (n - 1)^2 + (n - 1) \cdot 1^2 = n(n - 1)$$

同样得证。

19. 确定是否存在奇正整数 n 和具有整数元素的 $n \times n$ 矩阵 A, B , 满足以下条件:

- $\det(B) = 1$;
- $AB = BA$;
- $A^4 + 4A^2B^2 + 16B^4 = 2019I$

我们证明不存在这样的矩阵。注意到 $A^4 + 4A^2B^2 + 16B^4$ 可以因式分解为

$$A^4 + 4A^2B^2 + 16B^4 = (A^2 + 2AB + 4B^2)(A^2 - 2AB + 4B^2)$$

令 $C = A^2 + 2AB + 4B^2, D = A^2 - 2AB + 4B^2$, 则

$$\det C \cdot \det D = \det(CD) = \det(2019I) = 2019^n$$

矩阵 C, D 的元素皆为整数, 因此它们的行列式也为整数, 此外由 $C \equiv D \pmod{4}$ 可知

$$\det C \equiv \det D \pmod{4}$$

这意味 $\det C \cdot \det D \equiv (\det C)^2 \pmod{4}$, 但 $2019^n \equiv 3$ 是模 4 的二次非剩余, 矛盾。

注意

$$A^4 \equiv A^4 + 4A^2B^2 + 16B^4 = 2019I \pmod{4}$$

所以

$$(\det A)^4 = \det A^4 \equiv \det(2019I) = 2019^n \pmod{4}.$$

但是 $2019^n \equiv 3$ 是模 4 的二次非剩余, 矛盾。

20. 设 A 是 $n \times n$ 实矩阵, 且

$$A^3 = 0$$

证明存在唯一的 $n \times n$ 实矩阵 X 满足

$$X + AX + XA^2 = A,$$

且以 A 表示 X 。

首先假设某个矩阵 X 满足该方程。如果我们在给定方程的左侧乘以 A 的某个幂, 右侧乘以 A 的另一个幂, 就可以得到新的方程。例如,

$$A^2(X + AX + XA^2)A^2 = A^2XA^2 + A^3 \cdot XA^2 + A^2XA \cdot A^3 = A^2XA^2.$$

所以

$$A^2XA^2 = A^2(X + AX + XA^2)A^2 = A^5 = 0$$

$$A^2X = A^2(X + AX + XA^2) = A^3 = 0$$

$$AXA = A(X + AX + XA^2)A = A^3 = 0$$

$$XA^2 = (X + AX + XA^2)A^2 = A^3 = 0$$

$$AX = A(X + AX + XA^2)A = A^2$$

$$X = A - AX - XA^2 = A - A^2$$

因此, 除 $A - A^2$ 以外, 没有其他矩阵能满足该方程。注意上述论证并未证明矩阵 $X = A - A^2$ 满足方程, 因为这些步骤不能逆推。事实上,

$$X + AX + XA^2 = (A - A^2) + A(A - A^2) + (A - A^2)A^2 = A - A^4 = A$$

因此, $X = A - A^2$ 是方程的唯一解。

我们使用另一种不同的方法来用 A 表示 X 。如果存在某个矩阵 X 满足方程, 那么

$$X = A - AX - XA^2.$$

让我们在右侧反复代入此恒等式, 直到 X 在各处都被消去。注意到根据条件 $A^3 = 0$, 我们

有 $A^3 = A^4 = A^5 = A^3X = XA^4 = AXA^4 = A^3XA^2 = 0$, 所以

$$\begin{aligned}
 X &= A - AX - XA^2 \\
 &= A - A(A - AX - XA^2) - (A - AX - XA^2)A^2 \\
 &= A - (A^2 - A^2X - AXA^2) - (A^3 - AXA^2 - XA^4) \\
 &= A - A^2 + A^2X + 2AXA^2 \\
 &= A - A^2 + A^2(A - AX - XA^2) + 2A(A - AX - XA^2)A^2 \\
 &= A - A^2 + (A^3 - A^3X - A^2XA^2) + 2(A^4 - A^2XA^2 - AXA^4) \\
 &= A - A^2 - 3A^2XA^2 \\
 &= A - A^2 - 3A^2(A - AX - XA^2)A^2 \\
 &= A - A^2 - 3(A^5 - A^3XA^2 - A^2XA^4) \\
 &= A - A^2.
 \end{aligned}$$

同上, 仍需验证 $X = A - A^2$ 确实是一个解, 这一步与解 1 相同。

设 $B = I - A + A^2$, 使得 B 是 $I + A$ 的逆矩阵。在左侧乘以 B , 方程等价于

$$X + BXA^2 = BA. \quad (1)$$

现在假设 X 满足方程。在右侧乘以 A^2 并利用 $A^3 = 0$, 我们得到 $XA^2 = 0$ 。因此方程简化为

$$X = BA = A - A^2$$

另一方面, $X = BA$ 显然满足 (1)。

21. 设 A, B, C 为 $n \times n$ 复矩阵, 满足

$$A^2 = B^2 = C^2, \quad B^3 = ABC + 2I.$$

证明 $A^6 = I$ 。

发现到 $B^3 = A^2B$ 可得

$$B^3 - ABC = A^2B - ABC = 2I \Rightarrow A(AB - BC) = 2I$$

同理由 $B^3 = BC^2$ 可得

$$BC^2 - ABC = 2I \implies (BC - AB)C = 2I$$

这说明 A 是 $\frac{AB - BC}{2}$ 的左逆矩阵, 而 $-C$ 是右逆矩阵, 所以 $A = -C$ 。因此

$$ABA = 2I - B^3$$

于是 ABA 与 B 交换, 由此得

$$(AB)^2 = (BA)^2$$

而

$$\begin{aligned}(AB - BA)(AB + BA) &= (AB)^2 + AB^2A - BA^2B - (BA)^2 \\ &= (AB)^2 + A^4 - B^4 - (AB)^2 = 0\end{aligned}$$

又因为 $AB - BC = AB + BA$ 可逆, 故 $AB = BA$, 于是 $ABA = A^2B = B^3$, 由此得

$$B^3 = I \Rightarrow A^6 = B^6 = (B^3)^2 = I^2 = I$$

22. 设 $a = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$, $b = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{pmatrix}$, $c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 8 \end{pmatrix}$, 且 $A = ab^T$, $B = ba^T$, 解矩阵方程

$$2B^2A^2X = A^4X + B^4X + c$$

(题目有误, 不符合矩阵乘法定义)

行列式

1. 若 $a + b + c = x + y + z = 0$, 求行列式

$$\begin{vmatrix} xa & yb & zc \\ yc & za & xb \\ zb & xc & ya \end{vmatrix}$$

展开行列式得

$$\begin{vmatrix} xa & yb & zc \\ yc & za & xb \\ zb & xc & ya \end{vmatrix} = xyz(a^3 + b^3 + c^3) + abc(x^3 + y^3 + z^3)$$

由于

$$a^3 + b^3 + c^3 - 3abc = (a + b + c)(a^2 + b^2 + c^2 - ab - bc - ca) = 0$$

$$x^3 + y^3 + z^3 - 3xyz = (x + y + z)(x^2 + y^2 + z^2 - xy - yz - zx) = 0$$

故

$$\begin{vmatrix} xa & yb & zc \\ yc & za & xb \\ zb & xc & ya \end{vmatrix} = xyz(3abc) - abc(3xyz) = 0$$

2. 计算行列式

$$\begin{vmatrix} \log a & \log b & \log \frac{1}{ab} \\ \log b & \log c & \log \frac{1}{bc} \\ \log c & \log a & \log \frac{1}{ca} \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} \log a & \log b & \log \frac{1}{ab} \\ \log b & \log c & \log \frac{1}{bc} \\ \log c & \log a & \log \frac{1}{ca} \end{vmatrix}$$

化为

$$D = \begin{vmatrix} \log a & \log b & -\log a - \log b \\ \log b & \log c & -\log b - \log c \\ \log c & \log a & -\log c - \log a \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_3 \leftarrow C_3 - C_1 - C_2$, 得到

$$D = \begin{vmatrix} \log a & \log b & 0 \\ \log b & \log c & 0 \\ \log c & \log a & 0 \end{vmatrix} = 0$$

3. 若 m 为正整数, 求行列式

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ {}^m C_1 & {}^{m+1} C_1 & {}^{m+2} C_1 \\ {}^m C_2 & {}^{m+1} C_2 & {}^{m+2} C_2 \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ {}^m C_1 & {}^{m+1} C_1 & {}^{m+2} C_1 \\ {}^m C_2 & {}^{m+1} C_2 & {}^{m+2} C_2 \end{vmatrix}$$

由性质 ${}^{n-1} C_{k-1} + {}^{n-1} C_k = {}^n C_k$, 有

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ {}^m C_1 & {}^{m+1} C_1 & {}^{m+1} C_0 + {}^{m+1} C_1 \\ {}^m C_2 & {}^{m+1} C_2 & {}^{m+1} C_1 + {}^{m+1} C_2 \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_3 \rightarrow C_3 - C_2$,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ {}^m C_1 & {}^{m+1} C_1 & {}^{m+1} C_0 \\ {}^m C_2 & {}^{m+1} C_2 & {}^{m+1} C_1 \end{vmatrix}$$

再由性质 ${}^{n-1} C_{k-1} + {}^{n-1} C_k = {}^n C_k$,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ {}^m C_1 & {}^m C_0 + {}^m C_1 & {}^{m+1} C_0 \\ {}^m C_2 & {}^m C_1 + {}^m C_2 & {}^{m+1} C_1 \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_2 \rightarrow C_2 - C_1$,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ {}^m C_1 & {}^m C_0 & {}^{m+1} C_0 \\ {}^m C_2 & {}^m C_1 & {}^{m+1} C_1 \end{vmatrix}$$

按第一行展开得

$$D = {}^m C_0 {}^{m+1} C_1 - {}^m C_1 {}^{m+1} C_0 = 1 \cdot (m+1) - m \cdot 1 = 1$$

4. 已知 A, B, C 为 $\triangle ABC$ 的内角, 求

$$\begin{vmatrix} \tan A & 1 & 1 \\ 1 & \tan B & 1 \\ 1 & 1 & \tan C \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} \tan A & 1 & 1 \\ 1 & \tan B & 1 \\ 1 & 1 & \tan C \end{vmatrix}$$

展开行列式:

$$D = \tan A \tan B \tan C - (\tan A + \tan B + \tan C) + 2$$

由于 $A + B + C = \pi$, 有

$$\tan(A + B) = \tan(\pi - C) = -\tan C$$

又

$$\tan(A + B) = \frac{\tan A + \tan B}{1 - \tan A \tan B}$$

因此可得

$$\frac{\tan A + \tan B}{1 - \tan A \tan B} \Rightarrow \tan A + \tan B + \tan C = \tan A \tan B \tan C$$

故得到

$$D = 2$$

5. 计算行列式

$$\begin{vmatrix} \tan 40^\circ & \tan 10^\circ & \tan 50^\circ \\ \tan 20^\circ & \tan 50^\circ & \tan 70^\circ \\ \tan 10^\circ & \tan 70^\circ & \tan 80^\circ \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} \tan 40^\circ & \tan 10^\circ & \tan 50^\circ \\ \tan 20^\circ & \tan 50^\circ & \tan 70^\circ \\ \tan 10^\circ & \tan 70^\circ & \tan 80^\circ \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_3 \rightarrow -C_1 - C_2 + C_3$,

$$D = \begin{vmatrix} \tan 40^\circ & \tan 10^\circ & -\tan 10^\circ - \tan 40^\circ + \tan 50^\circ \\ \tan 20^\circ & \tan 50^\circ & -\tan 20^\circ - \tan 50^\circ + \tan 70^\circ \\ \tan 10^\circ & \tan 70^\circ & -\tan 10^\circ - \tan 70^\circ + \tan 80^\circ \end{vmatrix}$$

由

$$\tan(A+B) = \frac{\tan A + \tan B}{1 - \tan A \tan B}$$

可得

$$\tan A \tan B \tan(A+B) = \tan(A+B) - \tan A - \tan B$$

且若 $A+B=90^\circ$, 则

$$\tan A \tan B = 1$$

因此

$$D = \begin{vmatrix} \tan 40^\circ & \tan 10^\circ & \tan 10^\circ \cdot \tan 40^\circ \cdot \tan 50^\circ \\ \tan 20^\circ & \tan 50^\circ & \tan 20^\circ \cdot \tan 50^\circ \cdot \tan 70^\circ \\ \tan 10^\circ & \tan 70^\circ & \tan 10^\circ \cdot \tan 70^\circ \cdot \tan 80^\circ \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \tan 40^\circ & \tan 10^\circ & \tan 10^\circ \\ \tan 20^\circ & \tan 50^\circ & \tan 50^\circ \\ \tan 10^\circ & \tan 70^\circ & \tan 70^\circ \end{vmatrix} = 0$$

6. 已知 A, B, C 为 $\triangle ABC$ 的内角, 计算行列式

$$\begin{vmatrix} a & a^2 & \cos A \\ b & b^2 & \cos B \\ c & c^2 & \cos C \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} a & a^2 & \cos A \\ b & b^2 & \cos B \\ c & c^2 & \cos C \end{vmatrix}$$

由余弦定理,

$$D = \frac{1}{2abc} \begin{vmatrix} a & a^2 & a(b^2 + c^2 - a^2) \\ b & b^2 & b(a^2 + c^2 - b^2) \\ c & c^2 & c(a^2 + b^2 - c^2) \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & a & b^2 + c^2 - a^2 \\ 1 & b & a^2 + c^2 - b^2 \\ 1 & c & a^2 + b^2 - c^2 \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_2 \rightarrow R_2 - R_1, R_3 \rightarrow R_3 - R_1$

$$D = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & a & b^2 + c^2 - a^2 \\ 0 & b - a & 2a^2 - 2b^2 \\ 0 & c - a & 2a^2 - 2c^2 \end{vmatrix}$$

按 C_1 展开,

$$D = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} b - a & 2a^2 - 2b^2 \\ c - a & 2a^2 - 2c^2 \end{vmatrix} = -(b - a)(c - a) \begin{vmatrix} 1 & a + b \\ 1 & a + c \end{vmatrix} = (a - b)(a - c)(b - c)$$

7. 在坐标平面上, 设 $\triangle ABC$ 经二阶方阵 $M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ 作线性变换后成 $\triangle A'B'C'$ 。若 $\triangle ABC$ 的面积为 Δ , $\triangle A'B'C'$ 的面积为 Δ' , 试证

$$\Delta' = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \cdot \Delta$$

设 $A(x_a, y_a), B(x_b, y_b), C(x_c, y_c)$ 经变换后为

$$A'(ax_a + by_a, cx_a + dy_a), B'(ax_b + by_b, cx_b + dy_b), C'(ax_c + by_c, cx_c + dy_c)$$

则

$$\Delta' = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} ax_a + by_a & cx_a + dy_a & 1 \\ ax_b + by_b & cx_b + dy_b & 1 \\ ax_c + by_c & cx_c + dy_c & 1 \end{vmatrix}$$

变为

$$\Delta' = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} ax_a & dy_a & 1 \\ ax_b & dy_b & 1 \\ ax_c & dy_c & 1 \end{vmatrix} + \frac{1}{2} \begin{vmatrix} by_a & cx_a & 1 \\ by_b & cx_b & 1 \\ by_c & cx_c & 1 \end{vmatrix} + 0 + 0 = \frac{1}{2}(ad - bc) \begin{vmatrix} x_a & y_a & 1 \\ x_b & y_b & 1 \\ x_c & y_c & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \cdot \Delta$$

8. 求下列行列式的立方根:

$$\begin{vmatrix} -\frac{2019^2}{\sqrt[5]{80}} & \frac{2020^2}{\sqrt[5]{80^2}} & -\frac{2021^2}{\sqrt[5]{80^3}} \\ \frac{2022^2}{\sqrt[5]{80^4}} & -\frac{2023^2}{\sqrt[5]{80^5}} & \frac{2024^2}{\sqrt[5]{80^6}} \\ -\frac{2025^2}{\sqrt[5]{80^7}} & \frac{2026^2}{\sqrt[5]{80^8}} & -\frac{2027^2}{\sqrt[5]{80^9}} \end{vmatrix}$$

设 $a = 2019, r = -\frac{1}{\sqrt[5]{80}}$, 原行列式为

$$D = \begin{vmatrix} a^2r & (a+1)^2r^2 & (a+2)^2r^3 \\ (a+3)^2r^4 & (a+4)^2r^5 & (a+5)^2r^6 \\ (a+6)^2r^7 & (a+7)^2r^8 & (a+8)^2r^9 \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_2 \rightarrow C_2 - C_1, C_3 \rightarrow C_3 - C_2$,

$$D = \begin{vmatrix} a^2r & (2a+1)r^2 & (2a+3)r^3 \\ (a+3)^2r^4 & (2a+7)r^5 & (2a+9)r^6 \\ (a+6)^2r^7 & (2a+13)r^8 & (2a+15)r^9 \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_3 \rightarrow C_3 - C_2$,

$$D = \begin{vmatrix} a^2r & (2a+1)r^2 & 2r^3 \\ (a+3)^2r^4 & (2a+7)r^5 & 2r^6 \\ (a+6)^2r^7 & (2a+13)r^8 & 2r^9 \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_3 \rightarrow R_3 - r^3R_2, R_2 \rightarrow R_2 - r^3R_1$

$$D = \begin{vmatrix} a^2r & (2a+1)r^2 & 2r^3 \\ (6a+9)r^4 & 6r^5 & 0 \\ (6a+27)r^7 & 6r^8 & 0 \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_3 \rightarrow R_3 - r^3R_2$,

$$D = \begin{vmatrix} a^2r & (2a+1)r^2 & 2r^3 \\ (6a+9)r^4 & 6r^5 & 0 \\ 18r^7 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_1 \leftrightarrow C_3$,

$$D = - \begin{vmatrix} 2r^3 & (2a+1)r^2 & a^2r \\ 0 & 6r^5 & (6a+9)r^4 \\ 0 & 0 & 18r^7 \end{vmatrix} = -(2r^3)(6r^5)(18r^7) = -216r^{15} = \frac{216}{80^3}$$

故原行列式的立方根为 $\frac{3}{40}$

9. 若 $a^2 + b^2 + c^2 = 47$, 求

$$\begin{vmatrix} a^2 - 1 & ab & ca \\ ab & b^2 - 1 & bc \\ ca & bc & c^2 - 1 \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} a^2 - 1 & ab & ca \\ ab & b^2 - 1 & bc \\ ca & bc & c^2 - 1 \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_1 \rightarrow aR_1, R_2 \rightarrow bR_2, R_3 \rightarrow cR_3$,

$$D = \frac{1}{abc} \begin{vmatrix} a(a^2 - 1) & a^2b & ca^2 \\ ab^2 & b(b^2 - 1) & b^2c \\ c^2a & bc^2 & c(c^2 - 1) \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_1 \rightarrow \frac{C_1}{a}, C_2 \rightarrow \frac{C_2}{b}, C_3 \rightarrow \frac{C_3}{c}$,

$$D = \begin{vmatrix} a^2 - 1 & a^2 & a^2 \\ b^2 & b^2 - 1 & b^2 \\ c^2 & c^2 & c^2 - 1 \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_1 \rightarrow R_1 + R_2 + R_3$,

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} a^2 + b^2 + c^2 - 1 & a^2 + b^2 + c^2 - 1 & a^2 + b^2 + c^2 - 1 \\ b^2 & b^2 - 1 & b^2 \\ c^2 & c^2 & c^2 - 1 \end{vmatrix} \\ &= (a^2 + b^2 + c^2 - 1) \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ b^2 & b^2 - 1 & b^2 \\ c^2 & c^2 & c^2 - 1 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

进行列变换 $C_2 \rightarrow -C_1 + C_2, C_3 \rightarrow -C_1 + C_3$,

$$D = (a^2 + b^2 + c^2 - 1) \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ b^2 & -1 & 0 \\ c^2 & 0 & -1 \end{vmatrix} = (47 - 1) \cdot 1 = 46$$

10. 证明

$$\begin{vmatrix} b+c & c+a & a+b \\ q+r & r+p & p+q \\ y+z & z+x & x+y \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} a & b & c \\ p & q & r \\ x & y & z \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} b+c & c+a & a+b \\ q+r & r+p & p+q \\ y+z & z+x & x+y \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_3 \rightarrow C_3 - C_2$,

$$D = \begin{vmatrix} b+c & c+a & b-c \\ q+r & r+p & q-r \\ y+z & z+x & y-z \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_1 \rightarrow C_1 - C_3$,

$$D = 2 \begin{vmatrix} b & c+a & b-c \\ q & r+p & q-r \\ y & z+x & y-z \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_3 \rightarrow C_3 - C_1$,

$$D = 2 \begin{vmatrix} b & c+a & -c \\ q & r+p & -r \\ y & z+x & -z \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_2 \rightarrow C_2 + C_3$,

$$D = 2 \begin{vmatrix} b & a & -c \\ q & p & -r \\ y & x & -z \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} a & b & c \\ p & q & r \\ x & y & z \end{vmatrix}$$

故得证。

11. 证明

$$\begin{vmatrix} b+c & a & a \\ b & c+a & b \\ c & c & a+b \end{vmatrix} = 4abc$$

令

$$D = \begin{vmatrix} b+c & a & a \\ b & c+a & b \\ c & c & a+b \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_1 \rightarrow R_1 - R_2 - R_3$,

$$D = \begin{vmatrix} 0 & -2c & -2b \\ b & c+a & b \\ c & c & a+b \end{vmatrix} = -2 \begin{vmatrix} 0 & c & b \\ b & c+a & b \\ c & c & a+b \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_2 \rightarrow R_2 - R_1, R_3 \rightarrow R_3 - R_1$,

$$D = -2 \begin{vmatrix} 0 & c & b \\ b & a & 0 \\ c & 0 & a \end{vmatrix} = -2(-2abc) = 4abc$$

12. 证明

$$\begin{vmatrix} a^2 & b^2 + c^2 & bc \\ b^2 & c^2 + a^2 & ca \\ c^2 & a^2 + b^2 & ab \end{vmatrix} = -(a-b)(b-c)(c-a)(a+b+c)(a^2 + b^2 + c^2)$$

令

$$D = \begin{vmatrix} a^2 & b^2 + c^2 & bc \\ b^2 & c^2 + a^2 & ca \\ c^2 & a^2 + b^2 & ab \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_2 \rightarrow R_2 - R_1, R_3 \rightarrow R_3 - R_1$,

$$D = \begin{vmatrix} a^2 & b^2 + c^2 & bc \\ b^2 - a^2 & a^2 - b^2 & ca - bc \\ c^2 - a^2 & a^2 - c^2 & ab - bc \end{vmatrix}$$

化简得

$$\begin{aligned}
 D &= \begin{vmatrix} a^2 & b^2 + c^2 & bc \\ (b+a)(b-a) & (a+b)(a-b) & c(a-b) \\ (c+a)(c-a) & (a+c)(a-c) & b(a-c) \end{vmatrix} \\
 &= (a-b)(a-c) \begin{vmatrix} a^2 & b^2 + c^2 & bc \\ -a-b & a+b & c \\ -a-c & a+c & b \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

进行列变换 $C_1 \rightarrow C_1 + C_2$,

$$D = (a-b)(a-c) \begin{vmatrix} a^2 + b^2 + c^2 & b^2 + c^2 & bc \\ 0 & a+b & c \\ 0 & a+c & b \end{vmatrix}$$

按第一列展开得

$$\begin{aligned}
 D &= (a-b)(a-c)(a^2 + b^2 + c^2)(ab + b^2 - ac - c^2) \\
 &= (a-b)(a-c)(a^2 + b^2 + c^2)(a(b-c) + (b+c)(b-c)) \\
 &= -(a-b)(b-c)(c-a)(a+b+c)(a^2 + b^2 + c^2)
 \end{aligned}$$

13. 证明

$$\begin{vmatrix} (b+c)^2 & a^2 & a^2 \\ b^2 & (c+a)^2 & b^2 \\ c^2 & c^2 & (a+b)^2 \end{vmatrix} = 2abc(a+b+c)^3$$

令

$$D = \begin{vmatrix} (b+c)^2 & a^2 & a^2 \\ b^2 & (c+a)^2 & b^2 \\ c^2 & c^2 & (a+b)^2 \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_2 \rightarrow C_2 - C_1$, $C_3 \rightarrow C_3 - C_1$, 得

$$D = \begin{vmatrix} (b+c)^2 & a^2 - (b+c)^2 & a^2 - (b+c)^2 \\ b^2 & (c+a)^2 - b^2 & 0 \\ c^2 & 0 & (a+b)^2 - c^2 \end{vmatrix}$$

化简得

$$D = \begin{vmatrix} (b+c)^2 & (a+b+c)(a-b-c) & (a+b+c)(a-b-c) \\ b^2 & (a+b+c)(a-b+c) & 0 \\ c^2 & 0 & (a+b+c)(a+b-c) \end{vmatrix}$$

$$= (a+b+c)^2 \begin{vmatrix} (b+c)^2 & a-b-c & a-b-c \\ b^2 & a-b+c & 0 \\ c^2 & 0 & a+b-c \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_1 \rightarrow R_1 - R_2 - R_3$, 得

$$D = (a+b+c)^2 \begin{vmatrix} 2bc & -2c & -2b \\ b^2 & a-b+c & 0 \\ c^2 & 0 & a+b-c \end{vmatrix}$$

再进行列变换 $C_2 \rightarrow C_2 + \frac{1}{b}C_1$, $C_3 \rightarrow C_3 + \frac{1}{c}C_1$, 得

$$D = (a+b+c)^2 \begin{vmatrix} 2bc & 0 & 0 \\ b^2 & a+c & \frac{b^2}{c} \\ c^2 & \frac{c^2}{b} & a+b \end{vmatrix}$$

按第一行展开行列式得

$$D = (a+b+c)^2 \cdot 2bc \left[(a+c)(a+b) - \frac{b^2}{c} \cdot \frac{c^2}{b} \right]$$

$$= 2bc(a+b+c)^2 (a^2 + ab + ac + bc - bc)$$

$$= 2abc(a+b+c)^3$$

14. 证明

$$\begin{vmatrix} ax+by & ay+bz & az+bx \\ ay+bz & az+bx & ax+by \\ az+bx & ax+by & ay+bz \end{vmatrix} = (a^3 + b^3) \begin{vmatrix} x & y & z \\ y & z & x \\ z & x & y \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} ax+by & ay+bz & az+bx \\ ay+bz & az+bx & ax+by \\ az+bx & ax+by & ay+bz \end{vmatrix}$$

按 C_1 拆分

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} ax & ay+bz & az+bx \\ ay & az+bx & ax+by \\ az & ax+by & ay+bz \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} by & ay+bz & az+bx \\ bz & az+bx & ax+by \\ bx & ax+by & ay+bz \end{vmatrix} \\ &= a \begin{vmatrix} x & ay+bz & az+bx \\ y & az+bx & ax+by \\ z & ax+by & ay+bz \end{vmatrix} + b \begin{vmatrix} y & ay+bz & az+bx \\ z & az+bx & ax+by \\ x & ax+by & ay+bz \end{vmatrix} \end{aligned}$$

第一个行列式进行 $C_3 \rightarrow C_3 - bC_1$, 第二个行列式进行 $C_2 \rightarrow C_2 - aC_1$ 得

$$\begin{aligned} D &= a \begin{vmatrix} x & ay+bz & az \\ y & az+bx & ax \\ z & ax+by & ay \end{vmatrix} + b \begin{vmatrix} y & bz & az+bx \\ z & bx & ax+by \\ x & by & ay+bz \end{vmatrix} \\ &= a^2 \begin{vmatrix} x & ay+bz & z \\ y & az+bx & x \\ z & ax+by & y \end{vmatrix} + b^2 \begin{vmatrix} y & z & az+bx \\ z & x & ax+by \\ x & y & ay+bz \end{vmatrix} \end{aligned}$$

第一个行列式进行 $C_2 \rightarrow C_2 - bC_3$, 第二个行列式进行 $C_3 \rightarrow C_3 - aC_2$ 得

$$\begin{aligned} D &= a^2 \begin{vmatrix} x & ay & z \\ y & az & x \\ z & ax & y \end{vmatrix} + b^2 \begin{vmatrix} y & z & bx \\ z & x & by \\ x & y & bz \end{vmatrix} \\ &= (a^3 + b^3) \begin{vmatrix} x & y & z \\ y & z & x \\ z & x & y \end{vmatrix} \end{aligned}$$

15. 证明

$$\begin{vmatrix} a+bx & c+dx & p+qx \\ ax+b & cx+d & px+q \\ u & v & w \end{vmatrix} = (1-x^2) \begin{vmatrix} a & c & p \\ b & d & q \\ u & v & w \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} a+bx & c+dx & p+qx \\ ax+b & cx+d & px+q \\ u & v & w \end{vmatrix}$$

进行列行变换 $R_1 \rightarrow R_1 - R_2$, 得

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} a+bx-x(ax+b) & c+dx-x(cx+d) & p+qx-x(px+q) \\ ax+b & cx+d & px+q \\ u & v & w \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} a-ax^2 & c-cx^2 & p-px^2 \\ ax+b & cx+d & px+q \\ u & v & w \end{vmatrix} \\ &= (1-x^2) \begin{vmatrix} a & c & p \\ ax+b & cx+d & px+q \\ u & v & w \end{vmatrix} \end{aligned}$$

按 R_2 拆分, 得

$$D = 0 + (1-x^2) \begin{vmatrix} a & c & p \\ b & d & q \\ u & v & w \end{vmatrix} = (1-x^2) \begin{vmatrix} a & c & p \\ b & d & q \\ u & v & w \end{vmatrix}$$

16. 证明

$$\begin{vmatrix} a & a^2 & bc \\ b & b^2 & ca \\ c & c^2 & ab \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & a^2 & a^3 \\ 1 & b^2 & b^3 \\ 1 & c^2 & c^3 \end{vmatrix}$$

令

$$D = \begin{vmatrix} a & a^2 & bc \\ b & b^2 & ca \\ c & c^2 & ab \end{vmatrix}$$

将 a, b, c 分别乘入 R_1, R_2, R_3

$$D = \frac{1}{abc} \begin{vmatrix} a^2 & a^3 & abc \\ b^2 & b^3 & abc \\ c^2 & c^3 & abc \end{vmatrix} = \frac{abc}{abc} \begin{vmatrix} a^2 & a^3 & 1 \\ b^2 & b^3 & 1 \\ c^2 & c^3 & 1 \end{vmatrix}$$

进行 $C_2 \leftrightarrow C_3$, 再 $C_1 \leftrightarrow C_2$ 得

$$D = - \begin{vmatrix} a^2 & 1 & a^3 \\ b^2 & 1 & b^3 \\ c^2 & 1 & c^3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & a^2 & a^3 \\ 1 & b^2 & b^3 \\ 1 & c^2 & c^3 \end{vmatrix}$$

17. 证明

$$\begin{vmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha & \cos(\alpha + \delta) \\ \sin \beta & \cos \beta & \cos(\beta + \delta) \\ \sin \gamma & \cos \gamma & \cos(\gamma + \delta) \end{vmatrix} = 0$$

令

$$D = \begin{vmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha & \cos(\alpha + \delta) \\ \sin \beta & \cos \beta & \cos(\beta + \delta) \\ \sin \gamma & \cos \gamma & \cos(\gamma + \delta) \end{vmatrix}$$

由三角公式 $\cos(\theta + \delta) = \cos \theta \cos \delta - \sin \theta \sin \delta$, 将 C_3 展开得

$$D = \begin{vmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha & \cos(\alpha + \delta) \\ \sin \beta & \cos \beta & \cos(\beta + \delta) \\ \sin \gamma & \cos \gamma & \cos(\gamma + \delta) \end{vmatrix} = \cos \delta \begin{vmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & \cos \beta \\ \sin \gamma & \cos \gamma & \cos \gamma \end{vmatrix} - \sin \delta \begin{vmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \gamma & \cos \gamma & \sin \gamma \end{vmatrix}$$

其中两个行列式都有两列成比例, 因此

$$D = 0$$

18. 证明

$$\begin{vmatrix} \cos^2 a & \sin a & \sin^2 a \\ -\cos 2a & \cos a - \sin a & \cos 2a \\ -\sin 2a - \cos 2a & 2 \cos a & 1 + \sin 2a + \cos 2a \end{vmatrix} = \sin a \cos a (\cos a - \sin a)$$

令

$$D = \begin{vmatrix} \cos^2 a & \sin a & \sin^2 a \\ -\cos 2a & \cos a - \sin a & \cos 2a \\ -\sin 2a - \cos 2a & 2\cos a & 1 + \sin 2a + \cos 2a \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_1 \rightarrow C_1 - C_3$,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & \sin a & \sin^2 a \\ 0 & \cos a - \sin a & \cos 2a \\ 1 & 2\cos a & 1 + \sin 2a + \cos 2a \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_3 \rightarrow R_3 - R_2$,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & \sin a & \sin^2 a \\ 0 & \cos a - \sin a & \cos 2a \\ 1 & \cos a + \sin a & 1 + \sin 2a \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_2 \rightarrow R_2 + R_1$, 化为一范德蒙行列式,

$$D = \begin{vmatrix} 1 & \sin a & \sin^2 a \\ 1 & \cos a & \cos^2 a \\ 1 & \cos a + \sin a & (\cos a + \sin a)^2 \end{vmatrix} = \sin a \cos a (\cos a - \sin a)$$

19. 证明

$$\begin{vmatrix} x-1 & x-2 & x-3 & x-4 \\ x^2-1 & x^2-2^2 & x^2-3^2 & x^2-4^2 \\ x^3-1 & x^3-2^3 & x^3-3^3 & x^3-4^3 \\ x^4-1 & x^4-2^4 & x^4-3^4 & x^4-4^4 \end{vmatrix} = 12(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)$$

令

$$D = \begin{vmatrix} x-1 & x-2 & x-3 & x-4 \\ x^2-1 & x^2-2^2 & x^2-3^2 & x^2-4^2 \\ x^3-1 & x^3-2^3 & x^3-3^3 & x^3-4^3 \\ x^4-1 & x^4-2^4 & x^4-3^4 & x^4-4^4 \end{vmatrix}$$

提取公因式得 $D = (x-1)(x-2)(x-3)(x-4)M$, 其中

$$M = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ x+1 & x+2 & x+3 & x+4 \\ x^2+x+1 & x^2+2x+2^2 & x^2+3x+3^2 & x^2+4x+4^2 \\ x^3+x^2+x+1 & x^3+2x^2+2^2x+2^3 & x^3+3x^2+3^2x+3^3 & x^3+4x^2+4^2x+4^3 \end{vmatrix}$$

依次进行行变换 $R_4 \rightarrow R_4 - xR_3, R_3 \rightarrow R_3 - xR_2, R_2 \rightarrow R_2 - xR_1$,

$$M = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1^2 & 2^2 & 3^2 & 4^2 \\ 1^3 & 2^3 & 3^3 & 4^3 \\ 1^4 & 2^4 & 3^4 & 4^4 \end{vmatrix}$$

是一范德蒙行列式,

$$M = \prod_{1 \leq i < j \leq 4} (j-i) = (2-1)(3-1)(3-2)(4-1)(4-2)(4-3) = 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 12$$

于是得证

$$D = 12(x-1)(x-2)(x-3)(x-4)$$

20. 设 V_n 为 n 阶范德蒙行列式, 定义如下:

$$V_n = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^{n-1} \end{vmatrix}$$

证明

$$V_n = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_j - x_i).$$

设

$$V_n = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^{n-1} \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \dots & x_3^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n-1} & x_{n-1}^2 & \dots & x_{n-1}^{n-1} \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^{n-1} \end{vmatrix}$$

进行行变换 $R_2 \rightarrow R_2 - R_1, R_3 \rightarrow R_3 - R_1, \dots, R_n \rightarrow R_n - R_1$, 得

$$V_n = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^{n-2} & x_1^{n-1} \\ 0 & x_2 - x_1 & x_2^2 - x_1^2 & \dots & x_2^{n-2} - x_1^{n-2} & x_2^{n-1} - x_1^{n-1} \\ 0 & x_3 - x_1 & x_3^2 - x_1^2 & \dots & x_3^{n-2} - x_1^{n-2} & x_3^{n-1} - x_1^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & x_{n-1} - x_1 & x_{n-1}^2 - x_1^2 & \dots & x_{n-1}^{n-2} - x_1^{n-2} & x_{n-1}^{n-1} - x_1^{n-1} \\ 0 & x_n - x_1 & x_n^2 - x_1^2 & \dots & x_n^{n-2} - x_1^{n-2} & x_n^{n-1} - x_1^{n-1} \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_2 \rightarrow C_2 - C_1, C_3 \rightarrow C_3 - C_2, \dots, C_n \rightarrow C_n - C_{n-1}$, 得

$$V_n = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & x_2 - x_1 & (x_2 - x_1)x_2 & \dots & (x_2 - x_1)x_2^{n-3} & (x_2 - x_1)x_2^{n-2} \\ 0 & x_3 - x_1 & (x_3 - x_1)x_3 & \dots & (x_3 - x_1)x_3^{n-3} & (x_3 - x_1)x_3^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & x_{n-1} - x_1 & (x_{n-1} - x_1)x_{n-1} & \dots & (x_{n-1} - x_1)x_{n-1}^{n-3} & (x_{n-1} - x_1)x_{n-1}^{n-2} \\ 0 & x_n - x_1 & (x_n - x_1)x_n & \dots & (x_n - x_1)x_n^{n-3} & (x_n - x_1)x_n^{n-2} \end{vmatrix}$$

提取公因式,

$$V_n = \prod_{k=2}^n (x_k - x_1) \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & x_2 & \dots & x_2^{n-3} & x_2^{n-2} \\ 0 & 1 & x_3 & \dots & x_3^{n-3} & x_3^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & x_{n-1} & \dots & x_{n-1}^{n-3} & x_{n-1}^{n-2} \\ 0 & 1 & x_n & \dots & x_n^{n-3} & x_n^{n-2} \end{vmatrix}$$

按 R_1 展开得

$$V_n = \prod_{k=2}^n (x_k - x_1) \begin{vmatrix} 1 & x_2 & \dots & x_2^{n-3} & x_2^{n-2} \\ 1 & x_3 & \dots & x_3^{n-3} & x_3^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n-1} & \dots & x_{n-1}^{n-3} & x_{n-1}^{n-2} \\ 1 & x_n & \dots & x_n^{n-3} & x_n^{n-2} \end{vmatrix} = \prod_{k=2}^n (x_k - x_1) V_{n-1}$$

依次递推得证

$$V_n = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_j - x_i)$$

其中

$$V_2 = \begin{vmatrix} 1 & x_{n-1} \\ 1 & x_n \end{vmatrix} = x_n - x_{n-1}$$

21. 设

$$\begin{cases} kx_1 + x_2 + x_3 = 5, \\ 3x_1 + 2x_2 + kx_3 = 18 - 5k, \\ x_2 + 2x_3 = 2, \end{cases}$$

问 k 取何值时, 方程组无解、有唯一解、有无穷解? 在有无穷解时, 求全部解。

原方程组为 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, 其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} k & 1 & 1 \\ 3 & 2 & k \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 5 \\ 18 - 5k \\ 2 \end{bmatrix}.$$

解

$$\det(\mathbf{A}) = 4k - 3 - k^2 - 6 = -k^2 + 4k - 3 = 0$$

得 $k = 1, 3$, 因此:

- 当 $k \neq 1, 3$ 时, $\det(\mathbf{A}) \neq 0$, 方程组有唯一解;
- 当 $k = 1$ 时, 代入方程组得:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 5, \\ 3x_1 + 2x_2 + x_3 = 13, \\ x_2 + 2x_3 = 2. \end{cases}$$

用第三式解出 $x_2 = 2 - 2x_3$, 代入前两式得

$$x_1 + (2 - 2x_3) + x_3 = 5 \Rightarrow x_1 = 3 + x_3,$$

$$3x_1 + 2x_2 + x_3 = 13 \Rightarrow 3(3 + x_3) + 2(2 - 2x_3) + x_3 = 13.$$

检验等式成立:

$$9 + 3x_3 + 4 - 4x_3 + x_3 = 13 \Rightarrow 13 = 13.$$

成立, 说明方程组有无穷多解, 设 $x_3 = \lambda$, 则

$$x_1 = 3 + \lambda, \quad x_2 = 2 - 2\lambda, \quad x_3 = \lambda \quad (\lambda \in \mathbb{R}).$$

• 当 $k = 3$ 时, 代入原方程组得

$$\begin{cases} 3x_1 + x_2 + x_3 = 5, \\ 3x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 3, \\ x_2 + 2x_3 = 2. \end{cases}$$

由前两式相减得:

$$(3x_1 + 2x_2 + 3x_3) - (3x_1 + x_2 + x_3) = -2 \Rightarrow x_2 + 2x_3 = -2,$$

与第三式 $x_2 + 2x_3 = 2$ 矛盾, 因此方程组无解。

22. 将帕斯卡三角形 (Pascal's Triangle) 写成如下无穷矩阵的形式:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & \dots \\ 1 & 3 & 6 & 10 & 15 & \dots \\ 1 & 4 & 10 & 20 & 35 & \dots \\ 1 & 5 & 15 & 35 & 70 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

其中第一行和第一列全部由 1 组成, 其他每个元素由其左侧元素与上方元素之和构成。对于每个正整数 n , 令 D_n 表示由该阵列的前 n 行和前 n 列组成的 $n \times n$ 矩阵。求 D_n 的行列式并证明你的结论。

对较小 n 值的直接计算表明, 对于所有 n , 恒有 $\det(D_n) = 1$ 。

证明大纲:

对 D_n 按顺序执行以下初等行变换, 依次处理第 n 行至第 2 行:

1. 从第 n 行减去第 $n-1$ 行;

2. 从第 $n-1$ 行减去第 $n-2$ 行;

...

$(n-1)$. 从第 2 行减去第 1 行。

由于该阵列的构造满足 $a_{i,j} = a_{i-1,j} + a_{i,j-1}$, 上述操作后, D_n 的第 i 行第 j 列元素变为:

$$a'_{i,j} = a_{i,j} - a_{i-1,j} = a_{i,j-1}$$

这会将每一列向右“平移”一个位置, 并使第一列变为 $[1, 0, 0, \dots, 0]^T$ 。

对剩余的子矩阵重复此过程(即对第 n 行至第 3 行执行减法, 以此类推), 最终会将 D_n 转化为一个对角线元素均为 1 的上三角矩阵。由于上三角矩阵的行列式等于主对角线元素的乘积, 因此 $\det(D_n) = 1^n = 1$ 。

另一种方法(递推法): 在进行第一组行变换后, 按第一列进行余子式展开, 可以直接得到递推关系:

$$\det(D_n) = 1 \cdot \det(D_{n-1})$$

由于 $D_1 = [1]$ 且 $\det(D_1) = 1$, 通过数学归纳法可知 $\det(D_n) = 1$ 。

23. 证明

$$\begin{vmatrix} a & b & c & d \\ -b & a & -d & c \\ -c & d & a & -b \\ -d & -c & b & a \end{vmatrix} = (a^2 + b^2 + c^2 + d^2)^2$$

(待验证)

$$24. \text{ 求行列式 } D_n = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & -n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & -n & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & -n & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -n & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

这是一个 $n \times n$ 的行列式, 每一行有 $n-1$ 个 1 和一个 $-n$, 且 $-n$ 分别出现在每行的不同列。设该行列式为 D_n , 我们将其简化。

第一步: 行变换。

令第 i 行减去第 n 行, $i = 1, 2, \dots, n-1$, 则得到一个新行列式 D'_n , 变换后前 $n-1$ 行只有两个非零元素 ($1-1=0, -n-1=-(n+1), 1-(-n)=n+1$ 等等), 便于处理。

经此变换, 前 $n-1$ 行在对角线上为 $n+1$, 其余为 0。

第二步：观察结构。

经过上述行变换, D'_n 为一个上三角矩阵, 其前 $n-1$ 个对角元为 $n+1$, 最后一行为原来的第 n 行, 未变动。

于是可得:

$$D_n = \begin{vmatrix} n+1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_1 \\ 0 & n+1 & 0 & \cdots & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & n+1 & \cdots & 0 & a_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & n+1 & a_{n-1} \\ -n & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

将该行列式按最后一列展开, 只需考虑对角线乘积 (因为其余部分为 0), 于是有:

$$D_n = (n+1)^{n-1} \cdot \text{余子式项}.$$

由于我们做了 $(n-1)$ 次行变换, 每次减去第 n 行, 所以符号为 $(-1)^{\frac{n(n+1)}{2}}$ (由置换中逆序数判断)。

最终结果为:

$$D_n = (-1)^{\frac{n(n+1)}{2}} (n+1)^{n-1}.$$

(待验证)

25. 设 M 为一个任意 3×3 矩阵, 其每个项 m_{ij} 均选自集合 $\{-1, 1\}$, 记 $\det M$ 为其行列式。证明 $|\det M| \leq 4$ 。

一个项为 ± 1 的 2×2 矩阵, 其行列式必然为 0 或 ± 2 。对 3×3 的 $\det M$ 按第一行进行余子式展开:

$$\det M = m_{11} \begin{vmatrix} m_{22} & m_{23} \\ m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} - m_{12} \begin{vmatrix} m_{21} & m_{23} \\ m_{31} & m_{33} \end{vmatrix} + m_{13} \begin{vmatrix} m_{21} & m_{22} \\ m_{31} & m_{32} \end{vmatrix}$$

由于每个余子式都是偶数, 左侧的结果必然也是偶数。同时由上式可知 $|\det M|$ 不可能超过 6。只有当所有余子式都不为 0 时才可能达到 6。但在由 1 和 -1 组成的 2×3 矩阵中, 总能找到一个 2×2 的子矩阵其行列式为 0。因此, 上述展开式中至少有一项为 0, 从而得出 $|\det M| \leq 4$ 。

26. 计算 $n \times n$ 矩阵 $A = [a_{ij}]$ 的行列式, 其中

$$a_{ij} = \begin{cases} (-1)^{|i-j|}, & i \neq j, \\ 2, & i = j. \end{cases}$$

进行行变换 $R_1 \rightarrow R_1 + R_2, R_2 \rightarrow R_2 + R_3, \dots, R_{n-1} \rightarrow R_{n-1} + R_n$, 有

$$\det(A) = \begin{vmatrix} 2 & -1 & +1 & \cdots & \pm 1 & \mp 1 \\ -1 & 2 & -1 & \cdots & \pm 1 & \mp 1 \\ +1 & -1 & 2 & \cdots & \pm 1 & \mp 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mp 1 & \pm 1 & \mp 1 & \cdots & 2 & -1 \\ \pm 1 & \mp 1 & \pm 1 & \cdots & -1 & 2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 \\ \pm 1 & \mp 1 & \pm 1 & \cdots & -1 & 2 \end{vmatrix}$$

进行列变换 $C_2 \rightarrow C_2 - C_1, C_3 \rightarrow C_3 - C_2, \dots, C_n \rightarrow C_n - C_{n-1}$, 得到

$$\det(A) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & n+1 \end{vmatrix} = n+1$$

27. 设对所有 $j = 0, \dots, n$ 皆有

$$a_j = a_0 + jd,$$

其中 a_0, d 为实数, 令

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ a_1 & a_0 & a_1 & \cdots & a_{n-1} \\ a_2 & a_1 & a_0 & \cdots & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \cdots & a_0 \end{pmatrix}$$

计算 $\det(A)$, 其中 $\det(A)$ 表示 A 的行列式。

进行列变换 $C_{n+1} \rightarrow C_{n+1} + C_1$, 得到

$$\det(A) = (a_0 + a_n) \det \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \cdots & 1 \\ a_1 & a_0 & a_1 & \cdots & 1 \\ a_2 & a_1 & a_0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

进行行变换 $R_{n+1} \rightarrow R_{n+1} - R_n, R_n \rightarrow R_n - R_{n-1}, \cdots R_2 \rightarrow R_2 - R_1$, 得到

$$\det(A) = (a_0 + a_n) \det \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \cdots & 1 \\ d & -d & -d & \cdots & 0 \\ d & d & -d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d & d & d & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

按 C_{n+1} 展开得

$$\det(A) = (-1)^n (a_0 + a_n) \det \begin{pmatrix} d & -d & -d & \cdots & -d \\ d & d & -d & \cdots & -d \\ d & d & d & \cdots & -d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d & d & d & \cdots & d \end{pmatrix}.$$

将上述矩阵的最后一行加至其他各行, 有

$$\det(A) = (-1)^n (a_0 + a_n) \det \begin{pmatrix} 2d & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 2d & 2d & 0 & \cdots & 0 \\ 2d & 2d & 2d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d & d & d & \cdots & d \end{pmatrix} = (-1)^n (a_0 + a_n) 2^{n-1} d^n$$

28. 已知 $n > 1$ 是一个奇正整数, 设 $A = (a_{ij})_{i,j=1 \dots n}$ 是一个 $n \times n$ 矩阵, 其元素定义为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 2 & , i = j \\ 1 & , i - j \equiv \pm 2 \pmod{n} \\ 0 & , \text{反之} \end{cases}$$

求 $\det A$ 。

注意到 $A = B^2$, 其中矩阵 B 的元素定义为:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & i - j \equiv \pm 1 \pmod{n} \\ 0, & \text{反之} \end{cases}$$

计算 $\det B$, 先按 R_1 展开行列式, 然后对得到的两项分别按 C_1 展开。

$$\begin{aligned} \det B &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & & & & 1 \\ 1 & 0 & 1 & & & \\ & 1 & 0 & 1 & & \\ & & 1 & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & 0 & 1 \\ & & & & 1 & 0 & 1 \\ 1 & & & & & 1 & 0 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 1 & 1 & & & & \\ & 0 & 1 & & & \\ & 1 & \ddots & \ddots & & \\ & & \ddots & 0 & 1 & \\ & & & 1 & 0 & 1 \\ 1 & & & & 1 & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & & & \\ & 1 & 0 & 1 & & \\ & & 1 & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & 0 & 1 \\ & & & & 1 & 0 \\ 1 & & & & & 1 \end{vmatrix} \\ &= - \left(\begin{vmatrix} 0 & 1 & & & \\ 1 & \ddots & \ddots & & \\ & \ddots & 0 & 1 & \\ & & 1 & 0 & 1 \\ & & & 1 & 0 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & & & & \\ 0 & 1 & & & \\ 1 & \ddots & \ddots & & \\ & \ddots & 0 & 1 & \\ & & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \right) + \left(\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & & \\ & 1 & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & 0 & 1 \\ & & & 1 & 0 \\ & & & & 1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 & & & \\ 1 & 0 & 1 & & \\ & 1 & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & 0 & 1 \\ & & & 1 & 0 \end{vmatrix} \right) \\ &= -(0-1) + (1-0) = 2 \end{aligned}$$

其中第二和第三个矩阵是下/上三角矩阵, 而第一个和第四个矩阵满足

$$R_1 - R_3 + R_5 - \cdots \pm R_{n-2} = (0)_{1 \times (n-2)},$$

故 $\det B = 2$, 从而

$$\det A = (\det B)^2 = 4$$

复数

1. 已知 $i = \sqrt{-1}$, 若

$$\frac{1}{i^{2025}} - \frac{2}{i^{2024}} + \frac{3}{i^{2023}} - \frac{4}{i^{2022}} + \cdots - \frac{2024}{i^2} + \frac{2025}{i} = a + bi$$

其中 a, b 为实数, 求 $a - b$ 。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{i^{2025}} - \frac{2}{i^{2024}} + \frac{3}{i^{2023}} - \frac{4}{i^{2022}} + \cdots - \frac{2024}{i^2} + \frac{2025}{i} \\ &= \frac{1}{i} - 2 - \frac{3}{i} + 4 + \frac{5}{i} - 6 - \frac{7}{i} + 8 + \cdots + 2024 + \frac{2025}{i} \\ &= \frac{1}{i} (1 + 5 + \cdots + 2025) - (2 + 6 + \cdots + 2022) - \frac{1}{i} (3 + 7 + \cdots + 2023) + (4 + 8 + \cdots + 2024) \\ &= \frac{1}{i} \cdot \frac{2026 \cdot 507}{2} - \frac{2024 \cdot 506}{2} - \frac{1}{i} \cdot \frac{2026 \cdot 506}{2} + \frac{2028 \cdot 506}{2} \\ &= \frac{1013}{i} + 1012 \\ &= 1012 - 1013i \quad \Rightarrow \quad a - b = 2025 \end{aligned}$$

2. 设 z 是 1 的七次方根, 且 $z \neq 1$, 试求 $z + z^2 + z^4$ 的值。

发现

$$z^7 = 1 \Rightarrow 1 + z + \cdots + z^6 = 0 \Rightarrow z + z^2 + \cdots + z^6 = -1$$

设 $\alpha = z + z^2 + z^4, \beta = z^3 + z^5 + z^6$, 则

$$\alpha + \beta = z + z^2 + \cdots + z^6 = -1$$

又

$$\alpha\beta = (z + z^2 + z^4)(z^3 + z^5 + z^6) = z^4(1 + z + z^2 + \cdots + z^6 + 2z^3) = z^4(0 + 2z^3) = 2z^7 = 2$$

因此 α, β 是方程 $x^2 + x + 2 = 0$ 的两根, 解得

$$\alpha = z + z^2 + z^4 = \frac{-1 \pm \sqrt{7}i}{2}$$

3. 若 $z \in \mathbb{C}$ 满足 $z + \frac{1}{z} = \sqrt{3}$, 求 $z^{2025} + \frac{1}{z^{2025}}$ 的值。

先求 z ,

$$z + \frac{1}{z} = \sqrt{3} \Rightarrow z^2 - \sqrt{3}z + 1 = 0 \Rightarrow z = \frac{\sqrt{3} + i}{2} = e^{\frac{\pi i}{6}}$$

于是

$$z^{2025} = e^{\frac{2025\pi i}{6}} = e^{\frac{3\pi i}{2}} = -i \Rightarrow z^{2025} + \frac{1}{z^{2025}} = -i + \frac{1}{-i} = 0$$

4. 求

$$\left(\frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}} + \frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}}i \right)^6$$

观察

$$\left(\frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}} + \frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}}i \right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i = \cos 30^\circ + i \sin 30^\circ.$$

由棣莫弗定理, 原式为

$$(\cos 30^\circ + i \sin 30^\circ)^3 = \cos 90^\circ + i \sin 90^\circ = i.$$

5. 已知 $a, b, c \in \mathbb{C}$, 且 $a + b + c = a^2 + b^2 + c^2 = 3, a^3 + b^3 + c^3 = 6$, 试求

$$(a-1)^{2023} + (b-1)^{2023} + (c-1)^{2023}$$

的值。

由

$$3 = 3^2 - 2(ab + bc + ca), \quad 6 - 3abc = 3(3 - 3)$$

解得

$$ab + bc + ca = 3, abc = 2$$

因此 a, b, c 是方程

$$x^3 - 3x^2 + 3x - 2 = 0$$

即

$$(x-1)^3 = 1$$

的根, 因此

$$a-1, b-1, c-1 \in \{1, \omega, \omega^2\}, \omega = e^{i\frac{2\pi}{3}}$$

不失一般性,

$$(a-1)^{2023} + (b-1)^{2023} + (c-1)^{2023} = 1^{2023} + \omega^{2023} + (\omega^2)^{2023} = 1 + \omega + \omega^2 = 0$$

6. 证明

$$1 + 2i + 3i^2 + 4i^3 + \cdots + (4n+1)i^{4n} = (2n+1) - 2ni, \quad n \in \mathbb{N}.$$

设

$$S = 1 + 2i + 3i^2 + 4i^3 + \cdots + (4n+1)i^{4n}$$

则

$$iS = i + 2i^2 + 3i^3 + 4i^4 + \cdots + (4n)i^{4n} + (4n+1)i^{4n+1}$$

两式相减得

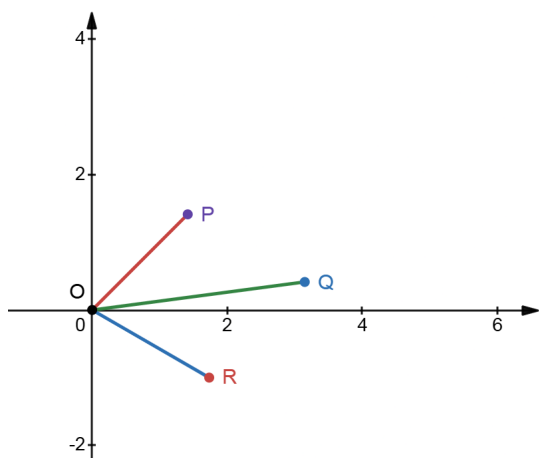
$$\begin{aligned} (1-i)S &= 1 + i + i^2 + i^3 + \cdots + i^{4n} - (4n+1)i^{4n+1} \\ &= \frac{i^{4n+1} - 1}{i - 1} - (4n+1)i = 1 - (4n+1)i \end{aligned}$$

故

$$S = \frac{(1 - (4n+1)i)(1+i)}{(1-i)(1+i)} = (2n+1) - 2ni$$

7. 考虑复平面作图 $z = \sqrt{2}(1+i)$, $w = \sqrt{3}-i$, 证

$$\tan \frac{\pi}{24} = \sqrt{6} - \sqrt{3} + \sqrt{2} - 2$$



如图作 $z = \sqrt{2}(1 + i)$, $w = \sqrt{3} - i$, 则

$$\arg(z) = \arctan \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{4}, \arg(w) = \arctan \frac{\sqrt{3}}{-1} = -\frac{\pi}{6}$$

于是

$$\begin{aligned} \arg(z + w) &= \angle QOR - |\arg w| \\ &= \frac{1}{2} \angle POR - |\arg w| \\ &= \frac{1}{2} (\angle POQ + |\arg w|) - |\arg w| \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{6} \right) - \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{24} \end{aligned}$$

又 $z + w = \sqrt{2} + \sqrt{3} + (\sqrt{2} - 1)i$, 所以有

$$\tan \frac{\pi}{24} = \frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2} + \sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2} + \sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} - \sqrt{2}}{\sqrt{3} - \sqrt{2}} = \sqrt{6} - \sqrt{3} + \sqrt{2} - 2$$

8. 复平面上有三点 P, Q, R 对应三个复数 z_1, z_2, z_3 , 且 $|z_1| = \sqrt{2}, |z_2| = \sqrt{5}, |z_3| = 3$. 若原点 O 为 $\triangle PQR$ 的重心, 求 $\Re(\overline{z_1}z_2)$ 。

设

$$z_1 = a_1 + b_1i, \quad z_2 = a_2 + b_2i, \quad z_3 = a_3 + b_3i$$

由于点 P, Q, R 的重心在原点, 故有

$$a_1 + a_2 + a_3 = 0, \quad b_1 + b_2 + b_3 = 0$$

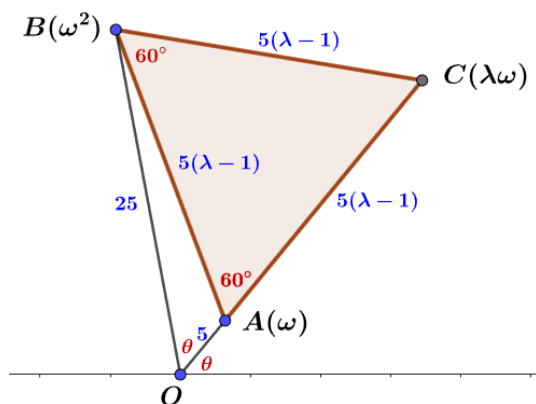
且 $a_1^2 + b_1^2 = 2, a_2^2 + b_2^2 = 5, a_3^2 + b_3^2 = 9$, 又因为 $a_3 = -a_1 - a_2, b_3 = -b_1 - b_2$,

$$\begin{aligned} a_3^2 + b_3^2 &= (a_1 + a_2)^2 + (b_1 + b_2)^2 \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 + b_1^2 + b_2^2 + 2b_1b_2 \\ &= 7 + 2(a_1a_2 + b_1b_2) = 9 \end{aligned}$$

故

$$\Re(\overline{z_1}z_2) = a_1a_2 + b_1b_2 = 1$$

9. 设 ω 为复数, 且 $|\omega| = 5$ 。存在一正实数 $\lambda > 1$, 使得 $\omega, \omega^2, \lambda\omega$ 这三个复数在复平面上构成一个正三角形, 试求 λ 的值。



设 $O(0, 0), A(\omega), B(\omega^2), C(\lambda\omega)$, 则

$$OA = |\omega| = 5$$

$$OB = |\omega^2| = |\omega|^2 = 25$$

$$AB = AC = |\lambda\omega - \omega| = 5(\lambda - 1)$$

又由于 $\triangle ABC$ 是正三角形, 因此

$$\angle OAB = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$$

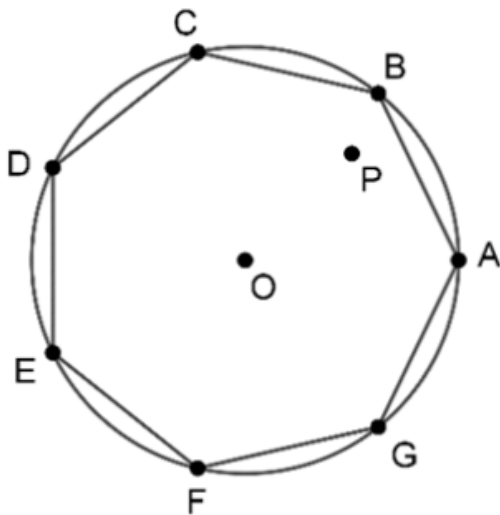
在 $\triangle OAB$ 中, 由余弦定理,

$$\cos \angle OAB = \frac{OA^2 + AB^2 - OB^2}{2 \cdot OA \cdot AB} = \frac{5^2 + (5(\lambda - 1))^2 - 25^2}{2 \cdot 5 \cdot 5(\lambda - 1)} = -\frac{1}{2}$$

解得

$$\lambda = \frac{1 + \sqrt{97}}{2} > 1$$

10. 如图, 在坐标平面上有一个半径为 2 的圆, 其圆心 O 为原点, 且正七边形 $ABCDEFG$ 内接于此圆。若 $A(2, 0), P(1, 1)$, 求 $\overline{PA} \cdot \overline{PB} \cdot \overline{PC} \cdot \overline{PD} \cdot \overline{PE} \cdot \overline{PF} \cdot \overline{PG}$ 。



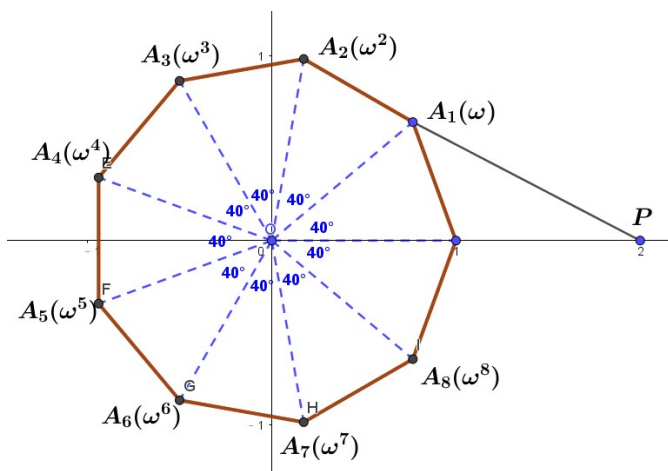
设 $x^7 = 2^7$ 的七根分别为 $2, \omega, \omega^2, \dots, \omega^6$, 其中 $\omega = 2e^{\frac{2\pi i}{7}}$, 则

$$f(x) = x^7 - 2^7 = (x - 2)(x - \omega)(x - \omega^2) \cdots (x - \omega^6)$$

令 $x = 1 + i$, 可得

$$\overline{PA} \cdot \overline{PB} \cdot \overline{PC} \cdot \overline{PD} \cdot \overline{PE} \cdot \overline{PF} \cdot \overline{PG} = |f(1 + i)| = |(1 + i)^7 - 2^7| = |2i(1 + i) - 128| = 8\sqrt{226}$$

11. 已知 $\omega = \cos \frac{2\pi}{9} + i \sin \frac{2\pi}{9}$, 求 $|2 - \omega|^2 + |2 - \omega^2|^2 + \cdots + |2 - \omega^8|^2$ 。



即求点 $P(2, 0)$ 至单位圆上正九边形各顶点距离的平方和:

$$|2 - \omega|^2 + |2 - \omega^2|^2 + \cdots + |2 - \omega^8|^2 = \sum_{n=1}^8 A_n P^2$$

在 $\triangle OA_n P$ 中, 由余弦定理,

$$A_n P^2 = 1^2 + 2^2 - 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \cos \angle A_n O P = 5 - 4 \cos(40^\circ \cdot n)$$

于是

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^8 A_n P^2 &= \sum_{n=1}^8 (5 - 4 \cos(40^\circ \cdot n)) \\ &= 40 - 4(\cos 40^\circ + \cos 80^\circ + \cdots + \cos 320^\circ) \\ &= 40 - 8(\cos 40^\circ + \cos 80^\circ + \cos 120^\circ + \cos 160^\circ) \\ &= 40 - 8 \left(2 \cos 60^\circ \cos 20^\circ - \frac{1}{2} + \cos 160^\circ \right) \\ &= 40 - 8 \left(\cos 20^\circ + \cos 160^\circ - \frac{1}{2} \right) \\ &= 40 - 8 \left(2 \cos 90^\circ \cos 70^\circ - \frac{1}{2} \right) \\ &= 40 - 8 \left(-\frac{1}{2} \right) = 44 \end{aligned}$$

12. $\omega^{503} = 1$, $\omega \neq 1$, 求

$$\frac{\omega^2}{\omega - 1} + \frac{\omega^4}{\omega^2 - 1} + \frac{\omega^6}{\omega^3 - 1} + \cdots + \frac{\omega^{1004}}{\omega^{502} - 1}$$

由 $\omega^{503} = 1$ 得

$$(1 - \omega)(1 + \omega + \omega^2 + \cdots + \omega^{502}) = 0$$

所以

$$\sum_{k=0}^{502} \omega^k = 0$$

又

$$\frac{1}{\omega^k - 1} + \frac{1}{\omega^{503-k} - 1} = \frac{1}{\omega^k - 1} + \frac{1}{\omega^{-k} - 1} = \frac{1}{\omega^k - 1} + \frac{\omega^k}{1 - \omega^k} = -1$$

原式

$$= \sum_{k=1}^{502} \frac{\omega^{2k}}{\omega^k - 1} = \sum_{k=1}^{502} \left(\frac{\omega^{2k} - 1}{\omega^k - 1} + \frac{1}{\omega^k - 1} \right) = \sum_{k=1}^{502} \left(\omega^k + 1 + \frac{1}{\omega^k - 1} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= -1 + 502 + \sum_{k=1}^{502} \frac{1}{\omega^k - 1} \\
&= 501 + \left(\frac{1}{\omega - 1} + \frac{1}{\omega^{502} - 1} \right) + \left(\frac{1}{\omega^2 - 1} + \frac{1}{\omega^{501} - 1} \right) + \cdots + \left(\frac{1}{\omega^{251} - 1} + \frac{1}{\omega^{252} - 1} \right) \\
&= 501 + (-1) \times 251 = 250
\end{aligned}$$

13. 证明

$$|z + w|^2 - |z + \bar{w}|^2 = 4\Re(z)\Re(w)$$

设 $z = x + iy$, $w = u + iv$, 其中 $x, y, u, v \in \mathbb{R}$, 则

$$\begin{aligned}
|z + w|^2 - |z - \bar{w}|^2 &= |(x + iy) + (u + iv)|^2 - |(x + iy) - (u - iv)|^2 \\
&= |(x + u) + i(y + v)|^2 - |(x - u) + i(y + v)|^2 \\
&= (x + u)^2 + (y + v)^2 - (x - u)^2 - (y + v)^2 \\
&= 4xu \\
&= 4\Re(z)\Re(w)
\end{aligned}$$

又解:

$$\begin{aligned}
|z + w|^2 - |z - w|^2 &= (z + w)(\overline{z + w}) - (z - w)(\overline{z - w}) \\
&= (z + w)(\bar{z} + \bar{w}) - (z - w)(\bar{z} - \bar{w}) \\
&= z\bar{z} + z\bar{w} + w\bar{z} + w\bar{w} - (z\bar{z} - z\bar{w} - \bar{w}\bar{z} + w\bar{w}) \\
&= zw + z\bar{w} + w\bar{z} + \bar{w}\bar{z} \\
&= (z + \bar{z})(w + \bar{w}) \\
&= 2\Re(z) \cdot 2\Re(w) \\
&= 4\Re(z)\Re(w)
\end{aligned}$$

14. 已知 $z = \cos \theta + i \sin \theta$, $0 \leq \theta < 2\pi$, 证明:

$$\frac{2}{1 + z} = 1 - i \tan \frac{\theta}{2}$$

运用各位三角恒等式化简

$$\begin{aligned}
 \frac{2}{1+z} &= \frac{2}{1+\cos\theta+i\sin\theta} \\
 &= \frac{2(1+\cos\theta-i\sin\theta)}{(1+\cos\theta)^2+\sin^2\theta} \\
 &= \frac{2(1+\cos\theta-i\sin\theta)}{1+2\cos\theta+\cos^2\theta+\sin^2\theta} \\
 &= \frac{2(1+\cos\theta-i\sin\theta)}{2+2\cos\theta} \\
 &= \frac{1+\cos\theta}{1+\cos\theta} - i \cdot \frac{\sin\theta}{1+\cos\theta} \\
 &= 1 - i \cdot \frac{2\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}}{2\cos^2\frac{\theta}{2}} \\
 &= 1 - i \tan\frac{\theta}{2}
 \end{aligned}$$

15. 设复数 z 满足 $|z|=1$ 且 $z=e^{i\theta}$, 求证

$$\Re\left[\frac{z(1-\bar{z})}{\bar{z}(1+z)}\right] = -2\sin^2\frac{\theta}{2}$$

先将表达式化简,

$$\begin{aligned}
 \frac{z(1-\bar{z})}{\bar{z}(1+z)} &= \frac{z-|z|^2}{\bar{z}+|z|^2} \\
 &= \frac{e^{i\theta}-1}{e^{-i\theta}+1} \\
 &= \frac{(e^{i\theta}-1)(e^{i\theta}+1)}{(e^{-i\theta}+1)(e^{i\theta}+1)} \\
 &= \frac{e^{i2\theta}-1}{2+e^{i\theta}+e^{-i\theta}} \\
 &= \frac{e^{i\theta}(e^{i\theta}-e^{-i\theta})}{2+2\cos\theta} \\
 &= \frac{e^{i\theta} \cdot 2i\sin\theta}{2(1+\cos\theta)} \\
 &= \frac{e^{i\theta} \cdot i\sin\theta}{1+\cos\theta}
 \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned}\Re \left[\frac{z(1-\bar{z})}{\bar{z}(1+z)} \right] &= \Re \left[\frac{e^{i\theta} \cdot i \sin \theta}{1 + \cos \theta} \right] = \frac{1}{1 + \cos \theta} \Re [i \sin \theta (\cos \theta + i \sin \theta)] \\&= \frac{1}{1 + \cos \theta} \Re [i \sin \theta \cos \theta - \sin^2 \theta] \\&= -\frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos \theta} \\&= -\frac{(2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2})^2}{2 \cos^2 \frac{\theta}{2}} \\&= -2 \sin^2 \frac{\theta}{2}\end{aligned}$$

16. 已知两个相异复数 z_1, z_2 , 且 $|z_1| = |z_2| \neq 0$, 证明

$$\frac{z_1 + z_2}{z_1 - z_2}$$

是纯虚数。

设 $w = \frac{z_1 + z_2}{z_1 - z_2}$, 欲证 $\bar{w} = -w$, 因为 $|z_1| = |z_2| = r$, 且 $z_1, z_2 \neq 0$, 根据性质

$$\bar{z} = \frac{r^2}{z} \Rightarrow \bar{z}_1 = \frac{r^2}{z_1}, \quad \bar{z}_2 = \frac{r^2}{z_2}$$

因此

$$\bar{w} = \overline{\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1 - z_2} \right)} = \frac{\bar{z}_1 + \bar{z}_2}{\bar{z}_1 - \bar{z}_2} = \frac{\frac{r^2}{z_1} + \frac{r^2}{z_2}}{\frac{r^2}{z_1} - \frac{r^2}{z_2}} = \frac{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}}{\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2}} = \frac{z_2 + z_1}{z_2 - z_1} = -\frac{z_1 + z_2}{z_1 - z_2} = -w$$

17. 设复数 z_1, z_2 满足 $|z_1| = 2, |z_2| = 3, |z_1 + z_2| = 4$, 求 $\frac{z_1}{z_2}$ 。

设 $w = \frac{z_1}{z_2}$, 则 $z_1 = wz_2$ 。由

$$|z_1 + z_2|^2 = (z_1 + z_2)(\bar{z}_1 + \bar{z}_2) = |z_1|^2 + |z_2|^2 + z_1 \bar{z}_2 + z_2 \bar{z}_1$$

代入已知得

$$z_1 \bar{z}_2 + z_2 \bar{z}_1 = 3$$

将 $z_1 = wz_2$ 代入得

$$wz_2 \cdot \overline{z_2} + z_2 \cdot \overline{wz_2} = w|z_2|^2 + \overline{w}|z_2|^2 = (w + \overline{w}) \cdot 9 = 3 \Rightarrow w + \overline{w} = \frac{1}{3}$$

设 $w = x + iy, x, y \in \mathbb{R}$, 则 $w + \overline{w} = 2x = \frac{1}{3} \Rightarrow x = \frac{1}{6}$; 又因 $|w| = \frac{|z_1|}{|z_2|} = \frac{2}{3}$, 所以

$$|w|^2 = \frac{1}{36} + y^2 = \frac{4}{9} \Rightarrow y = \pm \frac{\sqrt{15}}{6} \Rightarrow \frac{z_1}{z_2} = \frac{1}{6} \pm i \frac{\sqrt{15}}{6}$$

18. 若复数 z 使得 $\frac{z-3i}{z+i}$ 为负实数, $\frac{z-3}{z+1}$ 为纯虚数, 求 z 。

设 $z = a + bi, a, b \in \mathbb{R}$, 由于

$$\frac{z-3i}{z+i} = \frac{a+(b-3)i}{a+(b+1)i}$$

为负实数, 则

$$(a+(b-3)i)(a-(b+1)i) < 0$$

所以 $a^2 + (b-3)(b+1) < 0$ 且 $-4a = 0$, 即 $a = 0$ 且 $b-3, b+1$ 异号; 又此时

$$\frac{z-3}{z+1} = \frac{-3+bi}{1+bi}$$

为纯虚数, 故

$$\Re((-3+bi)(1-bi)) = b^2 - 3 = 0$$

又 $b-3, b+1$ 异号知 $b = \sqrt{3}$, 所以 $z = \sqrt{3}i$ 。

19. 已知虚数 z 使得 $z_1 = \frac{z}{1+z^2}$ 和 $z_2 = \frac{z^2}{1+z}$ 都是实数, 求 z 。

由已知 $(z^2+1)z_1 = z, (1+z)z_2 = z^2$, 联立两式

$$z = (z^2+1)z_1 = ((1+z)z_2+1)z_1$$

整理得

$$z_1 + z_1 z_2 = z(1 - z_1 z_2)$$

由于 z 为虚数, $z_1 + z_1 z_2$ 与 $1 - z_1 z_2$ 为实数, 故

$$1 - z_1 z_2 = 0 \Rightarrow z_1 z_2 = 1$$

代入 $z_1 = \frac{z}{1+z^2}, z_2 = \frac{z^2}{1+z}$ 得

$$z_1 z_2 = \frac{z}{1+z^2} \cdot \frac{z^2}{1+z} = \frac{z^3}{(1+z)(1+z^2)} = 1$$

给出

$$z^3 = (1+z)(1+z^2) \Rightarrow z^2 + z + 1 = 0$$

即

$$z = -\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{2}i$$

20. 已知复数 $z \neq 0$, 满足方程 $z^2 = z + i|z|$, 求 $|z|$ 的值。

设 $z = x + iy, x, y \in \mathbb{R}$, 则

$$z^2 = z + i|z| \Rightarrow x^2 - y^2 + 2ixy = x + i(y + \sqrt{x^2 + y^2})$$

比较实部与虚部得

$$x^2 - y^2 = x \tag{1}$$

$$2xy = y + \sqrt{x^2 + y^2} \tag{2}$$

将 (2) 移项并平方

$$y^2(2x-1)^2 = x^2 + y^2$$

由 (1) 得

$$(x^2 - x)(2x - 1)^2 = 2x^2 - x \Rightarrow x^2(2x - 3)(2x - 1) = 0$$

解得 $x = 0, \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$, 其中 $x = 0$ 不合理 ($z \neq 0$), 且 $x = \frac{1}{2}$ 不合理 ($y^2 = -\frac{1}{4} < 0$), 故

$$x = \frac{3}{2}, y^2 = \frac{3}{4} \Rightarrow |z| = \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{3}{4}} = \sqrt{3}$$

21. 确定所有满足 $|a| = |b| = 1$ 且 $a + b + a\bar{b} \in \mathbb{R}$ 的复数对 (a, b) 。

设 $a = e^{ix}, b = e^{iy}$, 其中 $x, y \in [0, 2\pi)$, 由欧拉公式,

$$\begin{aligned}\Im(a + b + \bar{a}\bar{b}) &= (\sin x + \sin y) + \sin(x - y) \\ &= 2 \sin \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2} + 2 \sin \frac{x-y}{2} \cos \frac{x-y}{2} \\ &= 2 \left(\sin \frac{x+y}{2} + \sin \frac{x-y}{2} \right) \cos \frac{x-y}{2} \\ &= 4 \sin \frac{x}{2} \cos \frac{y}{2} \cos \frac{x-y}{2}.\end{aligned}$$

因此 $a + b + \bar{a}\bar{b}$ 为实数当且仅当

$$\sin \frac{x}{2} = 0, \quad \cos \frac{y}{2} = 0, \quad \text{或} \quad \cos \frac{x-y}{2} = 0,$$

分别对应

$$x = 2k\pi, \quad y = (2k+1)\pi, \quad x = y + (2k+1)\pi, \quad k \in \mathbb{Z}.$$

所以解集为

$$(a, b) = (1, b), \quad (a, -1), \quad (a, -a),$$

其中 $|a| = |b| = 1$ 。

注意到

$$a + b + \bar{a}\bar{b} \in \mathbb{R} \iff 1 + a + b + \bar{a}\bar{b} \in \mathbb{R}.$$

设 $c \in \mathbb{C}$ 且 $a = c^2$, 则

$$\bar{c}(1 + a + b + \bar{a}\bar{b}) = \bar{c} + \bar{c}c^2 + \bar{c}b + \bar{c}c^2\bar{b} = \bar{c} + c + \bar{c}b + c\bar{b} \in \mathbb{R},$$

因此 $c \in \mathbb{R}$ 或 $1 + a + b + \bar{a}\bar{b} = 0$ 。第一种情况 $c = \pm 1$, 于是 $a = 1$ 。第二种情况将等式因式分解为

$$(a + b)(1 + \bar{b}) = 1 + a + b + \bar{a}\bar{b} = 0,$$

得到 $a = -b$ 或 $b = -1$, 所以得到解为

$$(a, b) = (1, b), \quad (a, -1), \quad (a, -a), \quad |a| = |b| = 1.$$

22. 已知两复数 z_1, z_2 满足 $|z_1 - (3 + 3i)| = 2, |iz_2 - 1| = 1$, 求 $|z_1 - z_2|$ 的最小值。

由 $|z_1 - (3 + 3i)| = 2$, $P(z_1)$ 在圆

$$C_1: (x - 3)^2 + (y - 3)^2 = 2^2$$

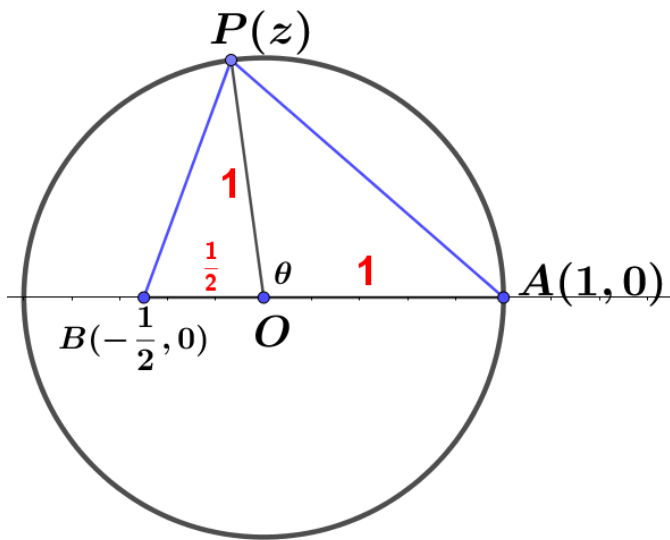
上, 设 $z_2 = a + bi$, 则 $iz_2 - 1 = (-1 - b) + ai$, 故 $|iz_2 - 1| = 1$ 意味 $Q(z_2)$ 在圆

$$C_2: x^2 + (y + 1)^2 = 1$$

上, 故 $|z_1 - z_2| = PQ$ 的最小值为

$$\text{两圆心距离} - \text{两圆半径和} = \sqrt{3^2 + 4^2} - (2 + 1) = 2$$

23. 设 α 为 $\left| (z - 1) \left(z + \frac{1}{2} \right) \right|$ 在圆盘上 $\{z \in \mathbb{C} : |z| \leq 1\}$ 的最大值, 则 $\alpha^2 = ?$



如图, P 在圆周上, $A(1, 0)$, $B\left(-\frac{1}{2}, 0\right)$, 则

$$PA \cdot PB = \left| (z - 1) \left(z + \frac{1}{2} \right) \right|$$

设 $\theta = \angle POA$, 在 $\triangle POA$ 及 $\triangle POB$ 中, 由余弦定理,

$$PA^2 = 1^2 + 1^2 - 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \cos \theta = 2 - 2 \cos \theta$$

$$PB^2 = 1^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 - 2 \cdot 1 \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \cos(\pi - \theta) = \cos \theta + \frac{5}{4}$$

因此

$$f(\theta) = (2 - 2\cos\theta) \left(\cos\theta + \frac{5}{4} \right) = -2\cos^2\theta - \frac{1}{2}\cos\theta + \frac{5}{2}$$

且

$$\alpha^2 = f\left(-\frac{1}{8}\right) = \frac{81}{32}$$

24. 设有一虚部不为零的复数 z , 其长度为 2, 且在复数平面上与 -2 及 z^2 刚好在同一直线上, 与 1 及 z^3 也同在另一直线上, 试求以 z, z^2, z^3 所围成的三角形面积。

由 $1, z, z^3$ 共线可得

$$\frac{z^3 - z}{z - 1} = k \in \mathbb{R} \Rightarrow z^2 + z - k = 0 \Rightarrow z = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4k}}{2}$$

其中 z 实部为 $-\frac{1}{2}$, 由 $-2, z, z^2$ 共线可得

$$\frac{z^2 - z}{z + 2} = t \in \mathbb{R} \Rightarrow z^2 - (t + 1)z - 2t = 0 \Rightarrow z = \frac{t + 1 \pm \sqrt{(t + 1)^2 + 8t}}{2}$$

因此

$$\frac{t + 1}{2} = -\frac{1}{2} \Rightarrow t = -2$$

代入得

$$z = \frac{-1 \pm \sqrt{15}i}{2}.$$

取 $z = \frac{-1 + \sqrt{15}i}{2}$, 则

$$z^2 = \frac{-7 - \sqrt{15}i}{2}, \quad z^3 = \frac{11 - 3\sqrt{15}i}{2}.$$

z, z^2, z^3 在复平面上的坐标为

$$A(z) = \left(-\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{15}}{2}\right), \quad B(z^2) = \left(-\frac{7}{2}, -\frac{\sqrt{15}}{2}\right), \quad C(z^3) = \left(\frac{11}{2}, -\frac{3\sqrt{15}}{2}\right).$$

故所求面积为

$$\frac{1}{2} \begin{vmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{15}}{2} & 1 \\ -\frac{7}{2} & -\frac{\sqrt{15}}{2} & 1 \\ \frac{11}{2} & -\frac{3\sqrt{15}}{2} & 1 \end{vmatrix} = 6\sqrt{15}$$

25. 若实数 m, n 使得关于 x 的方程 $x^3 + mx + n = 0$ 有模为 3 的虚根, 求 $m + n$ 的取值范围。

由于系数皆为实数, 设三根为 $a + bi, a - bi, -2a$, 其中 $a, b \in \mathbb{R}, a^2 + b^2 = 9, b \neq 0$ 。

由韦达定理,

$$m = (a + bi)(a - bi) + (-2a)(a + bi + a - bi) = 9 - 4a^2$$

$$n = (a + bi)(a - bi)(-2a) = -18a$$

所以

$$m + n = 9 - 4a^2 + 18a = -4 \left(a - \frac{9}{4} \right)^2 + \frac{117}{4}$$

又 $a^2 < 9, -3 < a < 3$, 则

$$m + n \in \left(-81, \frac{117}{4} \right]$$

26. 关于 z 的方程 $z^{n+1} - \sqrt{3}z^n - 1 = 0$ 存在一个模为 1 的虚根, 求正整数 n 的最小值。

设该虚根为 $z_0 = e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$, 有

$$z_0^n(z_0 - \sqrt{3}) = 1$$

两边取模得

$$|z_0^n| |z_0 - \sqrt{3}| = 1$$

由于 $|z_0^n| = 1$, 从而

$$|z_0 - \sqrt{3}| = 1$$

将 $z_0 = e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ 代入得

$$|(\cos \theta - \sqrt{3}) + i \sin \theta| = 1$$

于是

$$(\cos \theta - \sqrt{3})^2 + \sin^2 \theta = 1 \Rightarrow \cos \theta = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

得 $\theta = \frac{\pi}{6}$, 即 $z_0 = e^{i\frac{\pi}{6}}$, 代入 $z_0^n(z_0 - \sqrt{3}) = 1$ 得:

$$(e^{i\frac{\pi}{6}})^n \left(e^{i\frac{\pi}{6}} - \sqrt{3} \right) = e^{i\frac{n\pi}{6}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i - \sqrt{3} \right) = e^{i\frac{n\pi}{6}} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i \right) = 1$$

注意到 $-\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i = e^{i\frac{5\pi}{6}}$, 变为

$$e^{i\frac{n\pi}{6}} \cdot e^{i\frac{5\pi}{6}} = e^{i\frac{(n+5)\pi}{6}} = 1 \Rightarrow \frac{(n+5)\pi}{6} = 2k\pi \Rightarrow n = 12k - 5$$

令 $k = 1$ 得最小正整数解为 $n = 7$.

27. 已知复数 z_1, z_2, z_3 满足

$$\begin{cases} |z_1| = |z_2| = |z_3| = 1 \\ \frac{z_1}{z_2} + \frac{z_2}{z_3} + \frac{z_3}{z_1} = 1 \end{cases}$$

求 $|z_1 + 2z_2 + 3z_3|$ 最大可能值。

设存在一三次多项式, 根为 $\frac{z_1}{z_2}, \frac{z_2}{z_3}, \frac{z_3}{z_1}$, 则

$$\frac{z_1}{z_2} + \frac{z_2}{z_3} + \frac{z_3}{z_1} = 1$$

$$\frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_2}{z_3} \cdot \frac{z_3}{z_1} = 1$$

$$\begin{aligned} \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_2}{z_3} + \frac{z_2}{z_3} \cdot \frac{z_3}{z_1} + \frac{z_3}{z_1} \cdot \frac{z_1}{z_2} &= \frac{z_1}{z_3} + \frac{z_2}{z_1} + \frac{z_3}{z_2} \\ &= \overline{\left(\frac{z_3}{z_1}\right)} + \overline{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)} + \overline{\left(\frac{z_2}{z_3}\right)} = \overline{\left(\frac{z_1}{z_2} + \frac{z_2}{z_3} + \frac{z_3}{z_1}\right)} = 1 \end{aligned}$$

因此该多项式为

$$f(x) = x^3 - x^2 + x - 1 = (x^2 + 1)(x - 1),$$

根为 $x = 1, \pm i$; 为使 $|z_1 + 2z_2 + 3z_3|$ 最大, 取

$$\frac{z_2}{z_3} = 1, \quad \frac{z_3}{z_1} = i, \quad \frac{z_1}{z_2} = -i,$$

则

$$z_2 = z_3 = 1, \quad z_1 = -i,$$

所以

$$|z_1 + 2z_2 + 3z_3| = |-i + 5| = \sqrt{26}$$

28. 设 z 为复数, 且满足 $|z + 1| > 2$ 。证明

$$|z^3 + 1| > 1.$$

注意到

$$z^3 + 1 = (z + 1)(z^2 - z + 1),$$

因此只需证明

$$|z^2 - z + 1| > \frac{1}{2}.$$

设 $z + 1 = re^{i\varphi}$, 其中 $r = |z + 1| > 2, \varphi$ 为某个实数。于是

$$z^2 - z + 1 = (re^{i\varphi} - 1)^2 - (re^{i\varphi} - 1) + 1 = r^2 e^{2i\varphi} - 3re^{i\varphi} + 3$$

于是

$$\begin{aligned} |z^2 - z + 1|^2 &= (r^2 e^{2i\varphi} - 3re^{i\varphi} + 3)(r^2 e^{-2i\varphi} - 3re^{-i\varphi} + 3) \\ &= r^4 + 9r^2 + 9 - (6r^3 + 18r) \cos \varphi + 6r^2 \cos 2\varphi \\ &= r^4 + 9r^2 + 9 - (6r^3 + 18r) \cos \varphi + 6r^2 (2 \cos^2 \varphi - 1) \\ &= 12 \left(r \cos \varphi - \frac{r^2 + 3}{4} \right)^2 + \frac{1}{4} (r^2 - 3)^2. \end{aligned}$$

由于 $r > 2$, 可得

$$|z^2 - z + 1|^2 > \frac{1}{4} \Rightarrow |z^2 - z + 1| > \frac{1}{2}$$

因此

$$|z^3 + 1| = |z + 1| |z^2 - z + 1| > 2 \cdot \frac{1}{2} = 1$$

证毕。

29. 复数 z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 满足

$$\begin{cases} |z_1| \leq 1 \\ |z_2| \leq 1 \\ |2z_3 - (z_1 + z_2)| \leq |z_1 - z_2| \\ |2z_4 - (z_1 + z_2)| \leq |z_1 - z_2| \\ |2z_5 - (z_3 + z_4)| \leq |z_3 - z_4| \end{cases}$$

求 $|z_5|$ 的最大值。

由

$$|z_1 - z_2| \geq |2z_3 - (z_1 + z_2)| \geq |2|z_3| - |z_1 + z_2||$$

我们有

$$|z_1 + z_2| - |z_1 - z_2| \leq 2|z_3| \leq |z_1 + z_2| + |z_1 - z_2|$$

由 AM-QM 不等式,

$$|z_3| \leq \frac{|z_1 + z_2| + |z_1 - z_2|}{2} \leq \sqrt{\frac{|z_1 + z_2|^2 + |z_1 - z_2|^2}{2}} = \sqrt{\frac{2|z_1|^2 + 2|z_2|^2}{2}} \leq \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}$$

同理可得 $|z_4| \leq \sqrt{2}$, 故

$$|z_5| \leq \frac{|z_3 + z_4|}{2} \leq \frac{|z_3| + |z_4|}{2} \leq \frac{\sqrt{2} + \sqrt{2}}{2} = \sqrt{2}$$

考虑等号何时成立: 当 $z_1 = 1, z_2 = i$ 时, $z_3 = 1 + i$; 当 $z_1 = -1, z_2 = i$ 时, $z_4 = -1 + i$; 当 $z_3 = 1 + i, z_4 = -1 + i$ 时, $z_5 = 2i$, 这时 $|z_5| = 2$. 故 $|z_5|_{\max} = 2$.

30. 设复数 z 满足 $|z| = 1$, 则 $|z^7 + \bar{z}^5 - 3z^3 - 3\bar{z}|$ 的最大值为

试 $z = \frac{1+i}{\sqrt{2}}$, 算得值为:

$$|z^7 + \bar{z}^5 - 3z^3 - 3\bar{z}| = |2i + 2 - 6i - 6| = |-4i - 4| = \sqrt{16 + 16} = \boxed{4\sqrt{2}}$$

(待解)(设 $z = \cos \theta + i \sin \theta, \dots$ 感觉是尝试因式分解再 AM-GM)

31. (a) 已知 $z = \cos \theta + i \sin \theta$, 证明

$$z^n + z^{-n} = 2 \cos n\theta, \quad z^n - z^{-n} = 2i \sin n\theta.$$

由棣莫弗定理,

$$z^n = \cos n\theta + i \sin n\theta, \quad z^{-n} = \cos n\theta - i \sin n\theta$$

相加得到

$$z^n + z^{-n} = (\cos n\theta + i \sin n\theta) + (\cos n\theta - i \sin n\theta) = 2 \cos n\theta$$

而相减得到

$$z^n - z^{-n} = (\cos n\theta + i \sin n\theta) - (\cos n\theta - i \sin n\theta) = 2i \sin n\theta$$

(b) 证明

$$16 \sin^5 \theta = \sin 5\theta - 5 \sin 3\theta + 10 \sin \theta,$$

且

$$32 \cos^6 \theta = \cos 6\theta + 6 \cos 4\theta + 15 \cos 2\theta + 10.$$

令 $n = 1$, 则

$$2i \sin \theta = z - z^{-1}, \quad 2 \cos \theta = z + z^{-1}$$

由第一式, 二项式展开得

$$(2i \sin \theta)^5 = (z - z^{-1})^5$$

$$32i^5 \sin^5 \theta = z^5 - 5z^3 z^{-2} + 10z z^{-4} - 10z^2 z^{-3} + 5z z^{-4} - z^{-5}$$

$$32i \sin^5 \theta = (z^5 - z^{-5}) - 5(z^3 - z^{-3}) + 10(z - z^{-1})$$

$$32i \sin^5 \theta = 2i \sin 5\theta - 10i \sin 3\theta + 20i \sin \theta$$

$$16 \sin^5 \theta = \sin 5\theta - 5 \sin 3\theta + 10 \sin \theta$$

由第二式,

$$(2 \cos \theta)^6 = (z + z^{-1})^6$$

$$64 \cos^6 \theta = (z^6 + z^{-6}) + 6(z^4 + z^{-4}) + 15(z^2 + z^{-2}) + 20$$

$$64 \cos^6 \theta = 2 \cos 6\theta + 12 \cos 4\theta + 30 \cos 2\theta + 20$$

$$32 \cos^6 \theta = \cos 6\theta + 6 \cos 4\theta + 15 \cos 2\theta + 10$$

故得证。

32. 证明

$$\cos^5 \theta \sin^3 \theta = \frac{1}{128} (6 \sin 2\theta + 2 \sin 4\theta - 2 \sin 6\theta - \sin 8\theta)$$

设 $z = \cos \theta + i \sin \theta$, 由棣莫弗定理,

$$z^n = \cos n\theta + i \sin n\theta, \quad z^{-n} = \cos n\theta - i \sin n\theta,$$

且

$$z^n + z^{-n} = 2 \cos n\theta, \quad z^n - z^{-n} = 2i \sin n\theta.$$

由 $2 \cos \theta = z + z^{-1}$ 得

$$\begin{aligned}(2 \cos \theta)^5 &= (z + z^{-1})^5 \\ 32 \cos^5 \theta &= z^5 + 5z^4 z^{-1} + 10z^3 z^{-2} + 10z^2 z^{-3} + 5z z^{-4} + z^{-5} \\ 32 \cos^5 \theta &= (z^5 + z^{-5}) + 5(z^3 + z^{-3}) + 10(z + z^{-1}) \\ 16 \cos^5 \theta &= \cos 5\theta + 5 \cos 3\theta + 10 \cos \theta\end{aligned}$$

由 $4 \sin^3 \theta = 3 \sin \theta - \sin 3\theta$, 得到

$$16 \cos^5 \theta \cdot 4 \sin^3 \theta = (\cos 5\theta + 5 \cos 3\theta + 10 \cos \theta)(3 \sin \theta - \sin 3\theta).$$

展开并和差化积,

$$\begin{aligned}64 \cos^5 \theta \sin^3 \theta &= 3 \cos 5\theta \sin \theta - \cos 5\theta \sin 3\theta + 15 \cos 3\theta \sin \theta - 5 \cos 3\theta \sin 3\theta \\ &\quad + 30 \cos \theta \sin \theta - 10 \cos \theta \sin 3\theta \\ &= \frac{3}{2}(\sin 6\theta - \sin 4\theta) - \frac{1}{2}(\sin 8\theta - \sin 2\theta) + \frac{15}{2}(\sin 4\theta - \sin 2\theta) \\ &\quad - \frac{5}{2} \sin 6\theta + \frac{30}{2} \sin 2\theta - \frac{10}{2} \sin 4\theta \\ 128 \cos^5 \theta \sin^3 \theta &= 6 \sin 2\theta + 2 \sin 4\theta - 2 \sin 6\theta - \sin 8\theta\end{aligned}$$

因此得证

$$\cos^5 \theta \sin^3 \theta = \frac{1}{128} (6 \sin 2\theta + 2 \sin 4\theta - 2 \sin 6\theta - \sin 8\theta)$$

33. 定义无穷级数

$$\begin{aligned}C &= \cos \theta + \frac{1}{2} \cos 5\theta + \frac{1}{4} \cos 9\theta + \cdots \\ S &= \sin \theta + \frac{1}{2} \sin 5\theta + \frac{1}{4} \sin 9\theta + \cdots\end{aligned}$$

证明

$$C + iS = \frac{2e^{i\theta}}{2 - e^{4i\theta}}, \quad S = \frac{4 \sin \theta + 2 \sin 3\theta}{5 - 4 \cos 4\theta}$$

记

$$\begin{aligned} C + iS &= \cos \theta + i \sin \theta + \frac{1}{2}(\cos 5\theta + i \sin 5\theta) + \frac{1}{4}(\cos 9\theta + i \sin 9\theta) + \cdots \\ &= e^{i\theta} + \frac{1}{2}e^{i5\theta} + \frac{1}{4}e^{i9\theta} + \cdots = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2^k} e^{i(4k+1)\theta} = e^{i\theta} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{e^{4i\theta}}{2}\right)^k \end{aligned}$$

这是一个公比为 $\frac{e^{4i\theta}}{2}$ 的等比级数, 其模为 $\frac{1}{2} < 1$, 因此级数收敛:

$$C + iS = \frac{e^{i\theta}}{1 - \frac{1}{2}e^{4i\theta}} = \frac{2e^{i\theta}}{2 - e^{4i\theta}}$$

又

$$C + iS = \frac{2e^{i\theta}}{2 - e^{4i\theta}} \cdot \frac{2 - e^{-4i\theta}}{2 - e^{-4i\theta}} = \frac{4e^{i\theta} - 2e^{-3i\theta}}{|2 - e^{4i\theta}|^2} = \frac{(4\cos\theta - 2\cos 3\theta) + i(4\sin\theta + 2\sin 3\theta)}{(2 - \cos 4\theta)^2 + \sin^2 4\theta}$$

因此

$$S = \Im(C + iS) = \frac{4\sin\theta + 2\sin 3\theta}{5 - 4\cos 4\theta}$$

34. 证明

$$\begin{aligned} \cos \alpha + {}^nC_1 \cos 2\alpha + {}^nC_2 \cos 3\alpha + \cdots + \cos(n+1)\alpha &= 2^n \cos^n \frac{\alpha}{2} \cos \frac{n+2}{2}\alpha \\ \sin \alpha + {}^nC_1 \sin 2\alpha + {}^nC_2 \sin 3\alpha + \cdots + \sin(n+1)\alpha &= 2^n \cos^n \frac{\alpha}{2} \sin \frac{n+2}{2}\alpha \end{aligned}$$

考虑下列复数和的实部与虚部系数

$$(\cos \alpha + i \sin \alpha) + {}^nC_1(\cos 2\alpha + i \sin 2\alpha) + \cdots + [\cos(n+1)\alpha + i \sin(n+1)\alpha]$$

令

$$x = \cos \alpha + i \sin \alpha$$

由棣莫弗定理及二项式定理,

$$\begin{aligned}
 x + {}^nC_1x^2 + {}^nC_2x^3 + \cdots + x^{n+1} &= x(1+x)^n \\
 &= (\cos \alpha + i \sin \alpha)(1 + \cos \alpha + i \sin \alpha)^n \\
 &= (\cos \alpha + i \sin \alpha) \left(2 \cos^2 \frac{\alpha}{2} + 2i \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right)^n \\
 &= (\cos \alpha + i \sin \alpha) \left[2 \cos \frac{\alpha}{2} \left(\cos \frac{\alpha}{2} + i \sin \frac{\alpha}{2} \right) \right]^n \\
 &= 2^n \cos^n \frac{\alpha}{2} (\cos \alpha + i \sin \alpha) \left(\cos \frac{n\alpha}{2} + i \sin \frac{n\alpha}{2} \right) \\
 &= 2^n \cos^n \frac{\alpha}{2} \left(\cos \frac{n+2}{2} \alpha + i \sin \frac{n+2}{2} \alpha \right)
 \end{aligned}$$

比较实部与虚部, 可得

$$\begin{aligned}
 \cos \alpha + {}^nC_1 \cos 2\alpha + {}^nC_2 \cos 3\alpha + \cdots + \cos(n+1)\alpha &= 2^n \cos^n \frac{\alpha}{2} \cos \frac{n+2}{2} \alpha \\
 \sin \alpha + {}^nC_1 \sin 2\alpha + {}^nC_2 \sin 3\alpha + \cdots + \sin(n+1)\alpha &= 2^n \cos^n \frac{\alpha}{2} \sin \frac{n+2}{2} \alpha
 \end{aligned}$$

35. (a) 证明对于任意正整数 n 有

$$\begin{aligned}
 \sin n\theta &= \binom{n}{1} \sin \theta \cos^{n-1} \theta - \binom{n}{3} \sin^3 \theta \cos^{n-3} \theta + \binom{n}{5} \sin^5 \theta \cos^{n-5} \theta - \cdots, \\
 \cos n\theta &= \cos^n \theta - \binom{n}{2} \sin^2 \theta \cos^{n-2} \theta + \binom{n}{4} \sin^4 \theta \cos^{n-4} \theta - \cdots
 \end{aligned}$$

根据棣莫弗定理, 我们有

$$\cos n\theta + i \sin n\theta = (\cos \theta + i \sin \theta)^n \quad (1)$$

利用二项式定理展开等式右边

$$(\cos \theta + i \sin \theta)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (i \sin \theta)^k (\cos \theta)^{n-k}$$

展开各项并提取 i 的幂次:

$$\begin{aligned}
 (\cos \theta + i \sin \theta)^n &= \binom{n}{0} \cos^n \theta + i \binom{n}{1} \cos^{n-1} \theta \sin \theta + i^2 \binom{n}{2} \cos^{n-2} \theta \sin^2 \theta \\
 &\quad + i^3 \binom{n}{3} \cos^{n-3} \theta \sin^3 \theta + i^4 \binom{n}{4} \cos^{n-4} \theta \sin^4 \theta + \cdots
 \end{aligned}$$

由于 $i^2 = -1, i^3 = -i, i^4 = 1, i^5 = i, \dots$, 可将展开式整理为

$$\begin{aligned} & (\cos \theta + i \sin \theta)^n \\ &= \left(\cos^n \theta - \binom{n}{2} \cos^{n-2} \theta \sin^2 \theta + \binom{n}{4} \cos^{n-4} \theta \sin^4 \theta - \dots \right) \\ &+ i \left(\binom{n}{1} \cos^{n-1} \theta \sin \theta - \binom{n}{3} \cos^{n-3} \theta \sin^3 \theta + \binom{n}{5} \cos^{n-5} \theta \sin^5 \theta - \dots \right) \end{aligned}$$

由 (1), 比较实部和虚部即得

$$\begin{aligned} \cos n\theta &= \cos^n \theta - \binom{n}{2} \sin^2 \theta \cos^{n-2} \theta + \binom{n}{4} \sin^4 \theta \cos^{n-4} \theta - \dots \\ \sin n\theta &= \binom{n}{1} \sin \theta \cos^{n-1} \theta - \binom{n}{3} \sin^3 \theta \cos^{n-3} \theta + \binom{n}{5} \sin^5 \theta \cos^{n-5} \theta - \dots \end{aligned}$$

于是得证。

(b) 证明对于区间 $[-1, 1]$ 上的所有 x 和任意正整数 n , 函数

$$T_n(x) = \cos(n \cos^{-1} x)$$

是 x 的次数为 n 的多项式, 且首项系数为 2^{n-1} 。

取 $\theta = \cos^{-1} x$, 则 $\cos \theta = x, \sin \theta = \sqrt{1-x^2}$, 应用 (a) 可得

$$\cos(n \cos^{-1} x) = x^n - \binom{n}{2} (1-x^2)x^{n-2} + \binom{n}{4} (1-x^2)^2 x^{n-4} - \dots$$

显然 $T_n(x)$ 是 x 的次数为 n 的多项式。其首项系数为

$$1 + \binom{n}{2} + \binom{n}{4} + \dots + \binom{n}{2k}$$

由于

$$\begin{aligned} 2^n &= (1+1)^n = 1 + \binom{n}{1} + \binom{n}{2} + \dots + \binom{n}{n}, \\ 0 &= (1-1)^n = 1 - \binom{n}{1} + \binom{n}{2} - \dots + (-1)^n \binom{n}{n}, \end{aligned}$$

两式相加, 得到

$$1 + \binom{n}{2} + \binom{n}{4} + \dots + \binom{n}{2k} = 2^{n-1}.$$

因此首项系数为 2^{n-1} 。

36. 证明下列无穷级数的和:

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sin(n\theta)}{n!} = e^{-\cos\theta} \sin(\sin\theta)$$

定义

$$C = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\cos(n\theta)}{n!}, \quad S = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sin(n\theta)}{n!}$$

则

$$C + iS = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\cos(n\theta) + i \sin(n\theta)}{n!} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{(e^{i\theta})^n}{n!}$$

观察到指数函数的展开式为

$$e^{-z} = 1 - z + \frac{z^2}{2!} - \frac{z^3}{3!} + \cdots$$

于是

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} z^n}{n!} = 1 - e^{-z}$$

取 $z = e^{i\theta}$, 得

$$\begin{aligned} C + iS &= 1 - e^{-e^{i\theta}} = 1 - e^{-(\cos\theta + i\sin\theta)} = 1 - e^{-\cos\theta} e^{-i\sin\theta} \\ &= 1 - e^{-\cos\theta} [\cos(\sin\theta) - i \sin(\sin\theta)] \\ &= [1 - e^{-\cos\theta} \cos(\sin\theta)] + i [e^{-\cos\theta} \sin(\sin\theta)] \end{aligned}$$

取虚部得到

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sin(n\theta)}{n!} = \Im(C + iS) = e^{-\cos\theta} \sin(\sin\theta)$$

37. 求下列多项式方程的所有实数解:

$$x^7 - 7x^6 - 21x^5 + 35x^4 + 35x^3 - 21x^2 - 7x + 1 = 0.$$

设 $\cos \theta = c, \sin \theta = s$, 由棣莫弗定理,

$$(c + is)^7 = (\cos \theta + i \sin \theta)^7 = \cos 7\theta + i \sin 7\theta$$

且由二项展开得

$$(c + is)^7 = c^7 + 7ic^6s - 21c^5s^2 - 35ic^4s^3 + 35c^3s^4 + 21ic^2s^5 - 7cs^6 - is^7$$

比较实部与虚部, 得到

$$\cos 7\theta = c^7 - 21c^5s^2 + 35c^3s^4 - 7cs^6,$$

$$\sin 7\theta = 7c^6s - 35c^4s^3 + 21c^2s^5 - s^7.$$

设 $t = \tan \theta = \frac{s}{c}$, 则

$$\tan 7\theta = \frac{\sin 7\theta}{\cos 7\theta} = \frac{7t - 35t^3 + 21t^5 - t^7}{1 - 21t^2 + 35t^4 - 7t^6}.$$

令 $\tan 7\theta = 1$, 得到

$$\frac{7t - 35t^3 + 21t^5 - t^7}{1 - 21t^2 + 35t^4 - 7t^6} = 1,$$

整理得

$$t^7 - 7t^6 - 21t^5 + 35t^4 + 35t^3 - 21t^2 - 7t + 1 = 0.$$

这正是题目所给的多项式方程, 其中 $t = x$ 。由 $\tan 7\theta = 1$,

$$7\theta = \frac{\pi}{4} + n\pi,$$

从而

$$\theta = \frac{(4n+1)\pi}{28}, \quad n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6.$$

因此方程的所有实数解为

$$\tan \frac{\pi}{28}, \tan \frac{5\pi}{28}, \tan \frac{9\pi}{28}, \tan \frac{13\pi}{28}, \tan \frac{17\pi}{28}, \tan \frac{21\pi}{28}, \tan \frac{25\pi}{28}.$$

38. (a) 证明:

$$\sin 7\theta = 7 \sin \theta - 56 \sin^3 \theta + 112 \sin^5 \theta - 64 \sin^7 \theta$$

从棣莫弗定理出发,

$$(\cos \theta + i \sin \theta)^7 = \cos 7\theta + i \sin 7\theta$$

由二项式定理展开左式,

$$(\cos \theta + i \sin \theta)^7 = \sum_{k=0}^7 {}^7C_k \cos^{7-k} \theta (i \sin \theta)^k$$

比较虚部项系数得

$$\sin 7\theta = {}^7C_1 \cos^6 \theta \sin \theta - {}^7C_3 \cos^4 \theta \sin^3 \theta + {}^7C_5 \cos^2 \theta \sin^5 \theta - {}^7C_7 \sin^7 \theta$$

由恒等式 $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$, 令 $s = \sin \theta$, 则有

$$\sin 7\theta = 7(1 - s^2)^3 s - 35(1 - s^2)^2 s^3 + 21(1 - s^2) s^5 - s^7 = 7s - 56s^3 + 112s^5 - 64s^7$$

故得证。

(b) 据此, 解方程

$$1 + 7x - 56x^3 + 112x^5 - 64x^7 = 0$$

原方程

$$1 + 7x - 56x^3 + 112x^5 - 64x^7 = 0$$

可写为

$$1 + \sin 7\theta = 0 \Rightarrow \sin 7\theta = -1$$

解得

$$7\theta = \dots, -\frac{5\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{2}, \dots \Rightarrow \theta = \dots, -\frac{5\pi}{14}, -\frac{\pi}{14}, \frac{3\pi}{14}, \frac{7\pi}{14}, \dots$$

所以

$$x = \sin \theta = \sin \left(-\frac{5\pi}{14} \right), \sin \left(-\frac{\pi}{14} \right), \sin \frac{3\pi}{14}, \sin \frac{7\pi}{14} = -0.901, -0.223, 0.623, 1$$

(c) 通过构造合适的多项式方程, 证明

$$\csc^2 \frac{\pi}{7} + \csc^2 \frac{2\pi}{7} + \csc^2 \frac{3\pi}{7} = 8$$

考虑解为

$$\theta = \cdots, 0, \frac{\pi}{7}, \frac{2\pi}{7}, \frac{3\pi}{7}, \cdots 2$$

的方程

$$\sin 7\theta = 0,$$

由三角恒等式

$$\sin 7\theta = 7 \sin \theta - 56 \sin^3 \theta + 112 \sin^5 \theta - 64 \sin^7 \theta,$$

方程变为

$$-\sin \theta (64 \sin^6 \theta - 112 \sin^4 \theta + 56 \sin^2 \theta - 7) = 0.$$

注意到

$$\sin \frac{\pi}{7} = \sin \frac{6\pi}{7}, \quad \sin \frac{2\pi}{7} = \sin \frac{5\pi}{7}, \quad \sin \frac{3\pi}{7} = \sin \frac{4\pi}{7},$$

则对非零解 $\sin \theta \neq 0$, 令 $z = \sin^2 \theta$, 则方程

$$64z^3 - 112z^2 + 56z - 7 = 0$$

的三根为

$$\alpha = \sin^2 \frac{\pi}{7}, \quad \beta = \sin^2 \frac{2\pi}{7}, \quad \gamma = \sin^2 \frac{3\pi}{7}.$$

由韦达定理,

$$\alpha + \beta + \gamma = \frac{112}{64} = \frac{7}{4}, \quad \alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha = \frac{56}{64} = \frac{7}{8}, \quad \alpha\beta\gamma = \frac{7}{64}$$

于是

$$\csc^2 \frac{\pi}{7} + \csc^2 \frac{2\pi}{7} + \csc^2 \frac{3\pi}{7} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\gamma} = \frac{\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha}{\alpha\beta\gamma} = 8$$

证毕。

39. (a) 证明

$$(1 + i \tan \theta)^4 + (1 - i \tan \theta)^4 = \frac{2 \cos 4\theta}{\cos^4 \theta}.$$

由

$$\begin{aligned}(1 + i \tan \theta)^4 + (1 - i \tan \theta)^4 &= \left(1 + \frac{i \sin \theta}{\cos \theta}\right)^4 + \left(1 - \frac{i \sin \theta}{\cos \theta}\right)^4 \\&= \left(\frac{\cos \theta + i \sin \theta}{\cos \theta}\right)^4 + \left(\frac{\cos \theta - i \sin \theta}{\cos \theta}\right)^4 \\&= \frac{\cos 4\theta + i \sin 4\theta}{\cos^4 \theta} + \frac{\cos 4\theta - i \sin 4\theta}{\cos^4 \theta} \\&= \frac{2 \cos 4\theta}{\cos^4 \theta}\end{aligned}$$

故左式 = 右式, 等式得证。

(b) 通过构造合适的多项式方程, 证明

$$\tan^2 \frac{\pi}{8} \tan^2 \frac{3\pi}{8} = 1, \quad \tan^2 \frac{\pi}{8} + \tan^2 \frac{3\pi}{8} = 6$$

考虑 $\cos 4\theta = 0$ 的解

$$4\theta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \frac{7\pi}{2}, \dots \Rightarrow \theta = \frac{\pi}{8}, \frac{3\pi}{8}, \frac{5\pi}{8}, \frac{7\pi}{8}, \dots$$

则

$$z = i \tan \frac{\pi}{8}, i \tan \frac{3\pi}{8}, i \tan \frac{5\pi}{8}, i \tan \frac{7\pi}{8}$$

为方程

$$(1 + z)^4 + (1 - z)^4 = 0 \Rightarrow z^4 + 6z^2 + 1 = 0$$

的解, 由韦达定理,

$$i \tan \frac{\pi}{8} \cdot i \tan \frac{3\pi}{8} \cdot i \tan \frac{5\pi}{8} \cdot i \tan \frac{7\pi}{8} = 1$$

又因为

$$\tan \frac{7\pi}{8} = -\tan \frac{\pi}{8}, \quad \tan \frac{5\pi}{8} = -\tan \frac{3\pi}{8}$$

故得证

$$\tan^2 \frac{\pi}{8} \tan^2 \frac{3\pi}{8} = 1$$

又由韦达定理,

$$i \tan \frac{\pi}{8} + i \tan \frac{3\pi}{8} + i \tan \frac{5\pi}{8} + i \tan \frac{7\pi}{8} = 0$$

两边平方得

$$\left(i \tan \frac{\pi}{8}\right)^2 + \left(i \tan \frac{3\pi}{8}\right)^2 + \left(i \tan \frac{5\pi}{8}\right)^2 + \left(i \tan \frac{7\pi}{8}\right)^2 + 2 \cdot 6 = 0$$

给出

$$\tan^2 \frac{\pi}{8} + \tan^2 \frac{3\pi}{8} = 6$$

40. 设

$$w = \cos \frac{2\pi}{5} + i \sin \frac{2\pi}{5},$$

(a) 证明

$$1 + w + w^2 + w^3 + w^4 = 0.$$

由棣莫弗定理,

$$w^5 = \left(\cos \frac{2\pi}{5} + i \sin \frac{2\pi}{5}\right)^5 = \cos 2\pi + i \sin 2\pi = 1,$$

由于 $w \neq 1$, 所以由 $w^5 - 1 = 0$ 得

$$(w - 1)(1 + w + w^2 + w^3 + w^4) = 0 \Rightarrow 1 + w + w^2 + w^3 + w^4 = 0.$$

(b) 求

$$(1 - w)(1 - w^2)(1 - w^3)(1 - w^4)$$

的值。

有

$$\begin{aligned} & (1 - w)(1 - w^2)(1 - w^3)(1 - w^4) \\ &= (1 - w)(1 - w^4)(1 - w^2)(1 - w^3) \\ &= [2 - (w + w^4)][2 - (w^2 + w^3)] \\ &= 4 - 2(w + w^4 + w^2 + w^3) + (w + w^4)(w^2 + w^3) \\ &= 4 - 2(-1) + w^3 + w^4 + w^6 + w^7 \\ &= 6 + w^3 + w^4 + w + w^2 \\ &= 6 - 1 \\ &= 5 \end{aligned}$$

(c) 证明

$$(1 - w)(1 - w^4) = 4 \sin^2 \frac{\pi}{5}.$$

由于 w 与 w^4 共轭, 有

$$\begin{aligned}(1-w)(1-w^4) &= 1-w-w^4+w^5 \\ &= 2-(w+w^4) \\ &= 2-2\cos\frac{2\pi}{5} \\ &= 4\sin^2\frac{\pi}{5}\end{aligned}$$

(d) 证明

$$(1-w^2)(1-w^3) = 4\sin^2\frac{2\pi}{5}.$$

同理由于 w^2 与 w^3 共轭, 有

$$\begin{aligned}(1-w^2)(1-w^3) &= 1-w^2-w^3+w^5 \\ &= 2-(w^2+w^3) \\ &= 2-2\cos\frac{4\pi}{5} \\ &= 4\sin^2\frac{2\pi}{5}\end{aligned}$$

(e) 证明

$$\sin\frac{\pi}{5}\sin\frac{2\pi}{5} = \frac{\sqrt{5}}{4}.$$

由 (b),(c),(d) 得

$$16\sin^2\frac{\pi}{5}\sin^2\frac{2\pi}{5} = (1-w)(1-w^2)(1-w^3)(1-w^4) = 5,$$

即

$$\sin^2\frac{\pi}{5}\sin^2\frac{2\pi}{5} = \frac{5}{16},$$

由于 $\frac{\pi}{5}, \frac{2\pi}{5}$ 为锐角, 所以 $\sin\frac{\pi}{5}, \sin\frac{2\pi}{5} > 0$, 故取正值

$$\sin\frac{\pi}{5}\sin\frac{2\pi}{5} = \frac{\sqrt{5}}{4}$$

41. 设 $S_n = a^n + b^n$, 其中 a, b 是方程 $x^2 + x + 1 = 0$ 的根, 求

$$\sum_{n=0}^{1729} (-1)^n S_n$$

方程根为 $a = \omega$, $b = \omega^2$, 其中 $\omega = e^{2\pi i/3}$, 满足 $\omega^3 = 1$ 。设

$$S_n = \omega^n + \omega^{2n},$$

发现 S_n 是周期为 3 的数列:

$$S_0 = 2, \quad S_1 = -1, \quad S_2 = -1$$

将原式写成

$$\sum_{k=0}^{576} [(-1)^{3k} S_{3k} + (-1)^{3k+1} S_{3k+1} + (-1)^{3k+2} S_{3k+2}] + (-1)^{1728} S_{1728} + (-1)^{1729} S_{1729}$$

前面 576 组和为 0, 剩余

$$(-1)^{1728} S_{1728} + (-1)^{1729} S_{1729} = 1 \cdot 2 + (-1) \cdot (-1) = 3$$

42. 设 $\omega \in \mathbb{C}, \omega \neq 1$, 且 $\omega^7 = 1$, 计算

$$\prod_{k=0}^6 (\omega^{2k} + 2\omega^k + 4)$$

设方程 $x^7 - 1 = 0$ 的根为 $1, \omega, \omega^2, \dots, \omega^6$, 则

$$\prod_{k=0}^6 ((\omega^k)^2 + 2\omega^k + 4) = \prod_{k=0}^6 \frac{(\omega^k)^3 - 8}{\omega^k - 2}$$

由于 $(\omega^0, \omega^3, \omega^6, \omega^9, \omega^{12}, \omega^{15}, \omega^{18}) = (\omega^0, \omega^3, \omega^6, \omega^2, \omega^5, \omega^1, \omega^4)$, 因此:

$$\prod_{k=0}^6 ((\omega^k)^3 - 8) = \prod_{j=0}^6 (\omega^j - 8)$$

又因为 $x^7 - 1 = \prod_{j=0}^6 (x - \omega^j)$, 令 $x = 8$, 得

$$\prod_{j=0}^6 (\omega^j - 8) = -(8^7 - 1) = 1 - 8^7$$

同理, 令 $x = 2$ 得

$$\prod_{j=0}^6 (\omega^j - 2) = -(2^7 - 1) = 1 - 2^7$$

因此原式为:

$$\frac{1 - 8^7}{1 - 2^7} = 16513$$

43. 令 $\omega = \cos \frac{2\pi}{111} + i \sin \frac{2\pi}{111}$, 其中 $i = \sqrt{-1}$, 求

$$\sum_{k=1}^{110} \frac{\omega^{2k}}{\omega^k - 1}$$

由 $\omega = \cos \frac{2\pi}{111} + i \sin \frac{2\pi}{111}$ 可知

$$\omega^{111} - 1 = 0 \Rightarrow \sum_{k=0}^{110} \omega^k = 0$$

因此

$$\sum_{k=1}^{110} \frac{\omega^{2k}}{\omega^k - 1} = \sum_{k=1}^{110} \left(\omega^k + 1 + \frac{1}{\omega^k - 1} \right) = -1 + 110 + \sum_{k=1}^{110} \frac{1}{\omega^k - 1} \quad (1)$$

设

$$f(x) = \sum_{k=0}^{110} x^k = \prod_{k=1}^{110} (x - \omega^k)$$

则

$$f'(x) = \sum_{k=1}^{110} kx^{k-1} = \sum_{m=1}^{110} \prod_{k=1, k \neq m}^{110} (x - \omega^k)$$

于是

$$g(x) = \frac{f'(x)}{f(x)} = \sum_{k=1}^{110} \frac{1}{x - \omega^k}$$

令 $x = 1$,

$$g(1) = \frac{111 \cdot \frac{110}{2}}{111} = \sum_{k=1}^{110} \frac{1}{1 - \omega^k} \Rightarrow \sum_{k=1}^{110} \frac{1}{\omega^k - 1} = -55$$

代入 (1) 得

$$\sum_{k=1}^{110} \frac{\omega^{2k}}{\omega^k - 1} = -1 + 110 - 55 = 54$$

44. 设 $z = \cos \frac{\pi}{6} + i \sin \frac{\pi}{6}$, 求

$$|1 + 2z + 3z^2 + \cdots + 2016z^{2015}|$$

记

$$S = 1 + 2z + 3z^2 + \cdots + 2016z^{2015}$$

考虑函数

$$f(x) = x + x^2 + \cdots + x^{2016} = \frac{x(x^{2016} - 1)}{x - 1},$$

则有

$$S = f'(z)$$

求导:

$$f'(x) = \frac{[(x^{2016} - 1) + 2016x^{2016}](x - 1) - x(x^{2016} - 1)}{(x - 1)^2}$$

设 $z = \cos \frac{\pi}{6} + i \sin \frac{\pi}{6} = e^{i\frac{\pi}{6}}$, 由棣莫弗定理得

$$z^{2016} = (e^{i\pi/6})^{2016} = e^{i \cdot 336\pi} = 1$$

于是

$$f'(z) = \frac{2016(z - 1)}{(z - 1)^2} = \frac{2016}{z - 1} \Rightarrow |S| = \frac{2016}{|z - 1|}$$

而

$$z - 1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - 1\right) + \frac{1}{2}i$$

$$|z - 1| = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - 1\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} = \sqrt{2 - \sqrt{3}} = \frac{\sqrt{6} + \sqrt{2}}{2}$$

所以

$$|S| = \frac{2016 \cdot 2}{\sqrt{6} + \sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{6} - \sqrt{2}}{\sqrt{6} - \sqrt{2}} = 1008\sqrt{2} + 1008\sqrt{6}$$

45. 设 $\omega = e^{\frac{2\pi i}{n}}$, 求

$$-\sum_{k=1}^{n-1} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n-1} (\omega^k - \omega^j).$$

设

$$P(x) = \prod_{k=1}^{n-1} (x - \omega^k) = \frac{x^n - 1}{x - 1} = x^{n-1} + x^{n-2} + \cdots + x + 1$$

则

$$P'(x) = (n-1)x^{n-2} + (n-2)x^{n-3} + \cdots + 1$$

于是

$$\sum_{k=1}^{n-1} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n-1} (\omega^k - \omega^j) = - \sum_{k=1}^{n-1} P'(\omega^k)$$

观察到由于 $\omega^n = 1$,

$$\sum_{k=0}^{n-1} \omega^{(n-1)k} = \begin{cases} n, & k=0 \\ \frac{1 - \omega^{nk}}{1 - \omega^k} = 0, & k \neq 0 \end{cases}$$

因此

$$\sum_{k=0}^{n-1} P'(\omega^k) = 0 + \cdots + 0 + n = n$$

故

$$\sum_{k=1}^{n-1} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n-1} (\omega^k - \omega^j) = - \sum_{k=1}^{n-1} P'(\omega^k) = -(n - P'(1)) = \frac{n(n-1)}{2} - n = \frac{n(n-3)}{2}$$

46. 设复数平面上三点 $A(\alpha)$, $B(\beta)$, $C(\gamma)$ 可连成正三角形 ABC , 已知 α, β, γ 满足

$$\alpha^4 - 2\alpha^3\beta + (\beta^2 - 4)\alpha^2 + 8\alpha\gamma - 4\gamma^2 = 0$$

且 α 的实部和虚部均为正数, 当 $\triangle ABC$ 的重心 G 为 $\frac{\alpha}{2^{110}}$ 时, 求 β 及 γ 各为何?

求解 α 的值由原式因式分解得:

$$(\alpha^2 - \alpha\beta)^2 - 4(\alpha - \gamma)^2 = 0 \implies \alpha(\alpha - \beta) = \pm 2(\alpha - \gamma)$$

由于 $\triangle ABC$ 为正三角形, 满足 $\alpha - \beta = (\alpha - \gamma)e^{\pm i\frac{\pi}{3}}$, 代入上式:

$$\alpha(\alpha - \gamma)e^{\pm i\frac{\pi}{3}} = \pm 2(\alpha - \gamma) \implies \alpha = \pm 2e^{\mp i\frac{\pi}{3}}$$

已知 α 的实部与虚部均为正, 故:

$$\alpha = 2e^{i\frac{\pi}{3}} = 1 + \sqrt{3}i$$

利用重心与旋转性质求解 β, γ

已知重心 $G = \frac{\alpha}{2^{1110}}$ 。根据正三角形的几何性质, 顶点 β 和 γ 是由顶点 α 绕重心 G 分别旋转 120° 和 -120° 得到的:

$$\begin{aligned}\beta &= G + (\alpha - G)e^{i\frac{2\pi}{3}} = \frac{\alpha}{2^{1110}} + \alpha \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) e^{i\frac{2\pi}{3}} \\ \gamma &= G + (\alpha - G)e^{-i\frac{2\pi}{3}} = \frac{\alpha}{2^{1110}} + \alpha \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) e^{-i\frac{2\pi}{3}}\end{aligned}$$

具体数值计算将 $\alpha = 2e^{i\frac{\pi}{3}}$ 代入 β :

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{2e^{i\frac{\pi}{3}}}{2^{1110}} + 2e^{i\frac{\pi}{3}} \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) e^{i\frac{2\pi}{3}} \\ &= \frac{1 + \sqrt{3}i}{2^{1110}} + 2 \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) e^{i\pi} \\ &= \frac{1 + \sqrt{3}i}{2^{1110}} - 2 + \frac{2}{2^{1110}} \\ &= \left(\frac{3}{2^{1110}} - 2\right) + \frac{\sqrt{3}}{2^{1110}}i\end{aligned}$$

将 $\alpha = 2e^{i\frac{\pi}{3}}$ 代入 γ :

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{2e^{i\frac{\pi}{3}}}{2^{1110}} + 2e^{i\frac{\pi}{3}} \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) e^{-i\frac{2\pi}{3}} \\ &= \frac{1 + \sqrt{3}i}{2^{1110}} + 2 \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) e^{-i\frac{\pi}{3}} \\ &= \frac{1 + \sqrt{3}i}{2^{1110}} + 2 \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) \\ &= \frac{1 + \sqrt{3}i}{2^{1110}} + \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) - \sqrt{3} \left(1 - \frac{1}{2^{1110}}\right) i \\ &= 1 + \sqrt{3} \left(\frac{2}{2^{1110}} - 1\right) i\end{aligned}$$

综上所述:

$$\begin{aligned}\beta &= \left(\frac{3}{2^{1110}} - 2\right) + \frac{\sqrt{3}}{2^{1110}}i \\ \gamma &= 1 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2^{1109}} - \sqrt{3}\right)i\end{aligned}$$

(待验证)

47. 设 $P(z)$ 是一个 n 次复系数多项式, 其所有零点都位于复平面的单位圆上。证明多项式

$$\tilde{P}(z) = 2zP'(z) - nP(z)$$

的所有零点也都位于同一单位圆上。

不失一般性, 考虑首项系数为 1 的多项式。设

$$P(z) = (z - \alpha_1)(z - \alpha_2) \cdots (z - \alpha_n),$$

其中 $|\alpha_j| = 1, j = 1, 2, \dots, n$, 并允许这些复数 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 相同, 则

$$\begin{aligned} \tilde{P}(z) &= 2zP'(z) - nP(z) \\ &= (z + \alpha_1)(z - \alpha_2) \cdots (z - \alpha_n) + \cdots + (z - \alpha_1)(z - \alpha_2) \cdots (z + \alpha_n) \end{aligned}$$

因此

$$\frac{\tilde{P}(z)}{P(z)} = \sum_{k=1}^n \frac{z + \alpha_k}{z - \alpha_k}$$

注意到, 对任意复数 z, α 且 $z \neq \alpha$, 皆有

$$\Re \left[\frac{z + \alpha}{z - \alpha} \right] = \frac{|z|^2 - |\alpha|^2}{|z - \alpha|^2}$$

于是

$$\Re \left[\frac{\tilde{P}(z)}{P(z)} \right] = \sum_{k=1}^n \frac{|z|^2 - |\alpha_k|^2}{|z - \alpha_k|^2}$$

由于 $|\alpha_k| = 1$, 可知当 $|z| \neq 1$ 时, 上式不为零, 因此若 $\tilde{P}(z) = 0$, 则必有

$$\Re \left[\frac{\tilde{P}(z)}{P(z)} \right] = 0,$$

从而推出 $|z| = 1$, 这说明 $\tilde{P}(z)$ 的所有零点也都位于单位圆上。

48. 复数平面上以原点为中心的单位圆中, 有一内接四边形, 其顶点为 z_1, z_2, z_3, z_4 , 设

$$S_n = z_1^n + z_2^n + z_3^n + z_4^n$$

且 $S_1 = 0$ 且 $S_2 = 1$,

(a) 证明: 若

$$|z_1| = |z_2| = |z_3| = |z_4| = 1, \quad z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = 0$$

则 z_1, z_2, z_3, z_4 为一个矩形的顶点。

设

$$f(z) = (z - z_1)(z - z_2)(z - z_3)(z - z_4) = z^4 + az^3 + bz^2 + cz + d$$

由 $S_1 = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = 0$ 得 $a = 0$, 又由于 $|z_k| = 1$, 有 $\bar{z}_k = \frac{1}{z_k}$, 于是

$$\bar{z}_1 + \bar{z}_2 + \bar{z}_3 + \bar{z}_4 = 0 \Rightarrow \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \frac{1}{z_3} + \frac{1}{z_4} = 0$$

即

$$z_2 z_3 z_4 + z_1 z_3 z_4 + z_1 z_2 z_4 + z_1 z_2 z_3 = 0$$

所以 $c = 0$, 因此

$$f(z) = z^4 + bz^2 + d$$

为偶函数, 四根关于原点成对对称, 于是可设

$$z_1 + z_3 = 0, z_2 + z_4 = 0$$

此时两对顶点互为相反数, 对角线过原点, 且 $|z_1| = |z_2| = 1$, 故为内接矩形。

(b) 计算该矩形的面积。

设

$$z_1 = a + bi, \quad z_2 = -a + bi, \quad z_3 = -a - bi, \quad z_4 = a - bi$$

由 $S_2 = z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_4^2 = 4(a^2 - b^2) = 1$ 得

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

又因 $|z_1| = 1$, 有 $a^2 + b^2 = 1$, 解得

$$a = \frac{\sqrt{5}}{2\sqrt{2}}, \quad b = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$$

故矩形面积为

$$2a \cdot 2b = \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{\sqrt{15}}{2}$$

数学归纳法

1. 证明对任意正整数 n ,

$$(n+1)(n+2)(n+3)\cdots(2n-1)(2n) = 2^n \cdot 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n-1)$$

定义命题

$$P_n : \prod_{i=1}^n (n+i) = 2^n \cdot \prod_{i=1}^n (2i-1), \quad n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 观察当 $n=1$ 时, 左式为

$$(1+1) = 2$$

而右式为

$$2^1 \cdot 1 = 2$$

此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{Z}^+$, 假设归纳假设 P_k 成立, 有

$$(k+1)(k+2)\cdots(2k) = 2^k \cdot 1 \cdot 3 \cdots (2k-1)$$

欲证 P_{k+1} 成立, 即证

$$(k+2)(k+3)\cdots(2k)(2k+1)(2k+2) = 2^{k+1} \cdot 1 \cdot 3 \cdots (2k-1)(2k+1)$$

由归纳假设, 观察 P_{k+1} 的左式:

$$\begin{aligned} (k+2)(k+3)\cdots(2k)(2k+1)(2k+2) &= \frac{(k+1)(k+2)\cdots(2k) \cdot (2k+1) \cdot (2k+2)}{k+1} \\ &= \frac{[2^k \cdot 1 \cdot 3 \cdots (2k-1)] \cdot (2k+1) \cdot 2(k+1)}{k+1} \\ &= \frac{2^k \cdot 1 \cdot 3 \cdots (2k-1) \cdot (2k+1) \cdot 2 \cdot (k+1)}{k+1} \\ &= 2^k \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdots (2k-1)(2k+1) \\ &= 2^{k+1} \cdot 1 \cdot 3 \cdots (2k+1) \end{aligned}$$

此时左式等于 P_{k+1} 的右式, 即命题 P_{k+1} 成立, 由此蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 皆成立。

2. 证明对任意正整数 $n \geq p$,

$$\sum_{i=1}^{n-p+1} \frac{1}{i(i+1) \cdots (i+p-1)} = \frac{1}{p-1} \left[\frac{1}{(p-1)!} - \frac{1}{(n-p+2)(n-p+3) \cdots n} \right]$$

定义命题

$$P_n: \sum_{i=1}^{n-p+1} \frac{1}{i(i+1) \cdots (i+p-1)} = \frac{1}{p-1} \left[\frac{1}{(p-1)!} - \frac{1}{(n-p+2)(n-p+3) \cdots n} \right],$$

其中 $n \geq p > 1, n, p \in \mathbb{N}$ 。

基础步骤: 当 $n = p$ 时, 左式为

$$\sum_{i=1}^1 \frac{1}{i(i+1) \cdots (i+p-1)} = \frac{1}{1 \cdot 2 \cdots p} = \frac{1}{p!}$$

右式为

$$\frac{1}{p-1} \left[\frac{1}{(p-1)!} - \frac{1}{2 \cdot 3 \cdots p} \right] = \frac{1}{p-1} \left[\frac{p}{p!} - \frac{1}{p!} \right] = \frac{1}{p-1} \cdot \frac{p-1}{p!} = \frac{1}{p!}$$

此时左式等于右式, 即 P_p 成立。

归纳步骤: 设 $k \geq p$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即

$$\sum_{i=1}^{k-p+1} \frac{1}{i(i+1) \cdots (i+p-1)} = \frac{1}{p-1} \left[\frac{1}{(p-1)!} - \frac{1}{(k-p+2) \cdots k} \right]$$

观察当 $n = k+1$ 时, P_{k+1} 的左式为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{k-p+2} \frac{1}{i \cdots (i+p-1)} &= \sum_{i=1}^{k-p+1} \frac{1}{i \cdots (i+p-1)} + \frac{1}{(k-p+2)(k-p+3) \cdots (k+1)} \\ &= \frac{1}{p-1} \left[\frac{1}{(p-1)!} - \frac{1}{(k-p+2) \cdots k} \right] + \frac{1}{(k-p+2) \cdots (k+1)} \\ &= \frac{1}{p-1} \left[\frac{1}{(p-1)!} - \left(\frac{1}{(k-p+2) \cdots k} - \frac{p-1}{(k-p+2) \cdots (k+1)} \right) \right] \end{aligned}$$

对括号内各项进行通分, 分母取 $(k-p+2)(k-p+3) \cdots (k+1)$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(k-p+2) \cdots k} - \frac{p-1}{(k-p+2) \cdots (k+1)} &= \frac{(k+1) - (p-1)}{(k-p+2)(k-p+3) \cdots (k+1)} \\ &= \frac{k-p+2}{(k-p+2)(k-p+3) \cdots (k+1)} \\ &= \frac{1}{(k-p+3) \cdots (k+1)} \end{aligned}$$

代入原式得 P_{k+1} 左式为

$$\frac{1}{p-1} \left[\frac{1}{(p-1)!} - \frac{1}{(k-p+3) \cdots (k+1)} \right]$$

此时左式等于 P_{k+1} 的右式, 即命题 P_{k+1} 成立, 此时蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有整数 $n \geq p$ 皆成立。

3. 证明: 对于任意整数 $n > 1$, 有

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdots \frac{2n-1}{2n} < \frac{1}{\sqrt{3n+1}}$$

据此, 试证

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdots \frac{99}{100} < \frac{1}{12}$$

定义命题

$$P_n: \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdots \frac{2n-1}{2n} < \frac{1}{\sqrt{3n+1}}, \quad n > 1, n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 当 $n = 2$ 时, 左式为 $\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} = 0.375$, 右式为 $\frac{1}{\sqrt{7}} \approx 0.37796$ 。显然 $0.375 < 0.378$, 故 P_2 成立。

归纳步骤: 假设当 $n = k$ 时, 命题 P_k 成立, 即:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdots \frac{2k-1}{2k} \leq \frac{1}{\sqrt{3k+1}}$$

欲证 P_{k+1} 成立, 观察其左式:

$$\left(\frac{1}{2} \cdots \frac{2k-1}{2k} \right) \cdot \frac{2k+1}{2k+2} \leq \frac{1}{\sqrt{3k+1}} \cdot \frac{2k+1}{2k+2}$$

只需证

$$\frac{2k+1}{(2k+2)\sqrt{3k+1}} < \frac{1}{\sqrt{3k+4}}$$

将上式两边平方, 即证

$$\frac{(2k+1)^2}{(2k+2)^2(3k+1)} < \frac{1}{3k+4} \iff (2k+1)^2(3k+4) < (2k+2)^2(3k+1)$$

展开左式得 $12k^3 + 28k^2 + 19k + 4$, 展开右式得 $12k^3 + 28k^2 + 20k + 4$ 。由于左式 $>$ 右式对 $k > 1$ 显然成立, 故 P_{k+1} 成立, 由此蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法可知, 原不等式对所有 $n > 1$ 均成立。

现令 $n = 50$, 代入上述不等式得

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdots \frac{99}{100} < \frac{1}{\sqrt{3(50)+1}} = \frac{1}{\sqrt{151}}$$

由于 $12^2 = 144 < 151$, 因此 $\sqrt{151} > 12$, 由此可得:

$$\frac{1}{\sqrt{151}} < \frac{1}{12}$$

故原不等式

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdots \frac{99}{100} < \frac{1}{12}$$

成立。

4. 已知

$$f(n) = 3^{2n+4} - 2^{2n}, \quad n \in \mathbb{N},$$

用数学归纳法证明 $f(n)$ 能被 5 整除。

定义命题 P_n 为 $5 \mid f(n)$, 即 $f(n)$ 能被 5 整除。

基础步骤: 当 $n = 1$ 时,

$$\begin{aligned} f(1) &= 3^{2(1)+4} - 2^{2(1)} \\ &= 3^6 - 2^2 \\ &= 729 - 4 = 725 \end{aligned}$$

由于 $725 = 5 \times 145$, 显然 P_1 成立。

归纳步骤: 假设当 $n = k$ ($k \in \mathbb{N}$) 时结论成立, 即存在 $m \in \mathbb{Z}$, 使得

$$f(k) = 3^{2k+4} - 2^{2k} = 5m$$

欲证 P_{k+1} 成立, 观察 $f(k+1)$ 的表达式:

$$\begin{aligned} f(k+1) &= 3^{2(k+1)+4} - 2^{2(k+1)} \\ &= 3^{2k+6} - 2^{2k+2} \\ &= 3^2 \cdot 3^{2k+4} - 2^2 \cdot 2^{2k} \\ &= 9 \cdot 3^{2k+4} - 4 \cdot 2^{2k} \end{aligned}$$

利用归纳假设 $2^{2k} = 3^{2k+4} - 5m$, 代入上式得:

$$\begin{aligned}f(k+1) &= 9 \cdot 3^{2k+4} - 4(3^{2k+4} - 5m) \\&= 9 \cdot 3^{2k+4} - 4 \cdot 3^{2k+4} + 20m \\&= 5 \cdot 3^{2k+4} + 20m \\&= 5(3^{2k+4} + 4m)\end{aligned}$$

由于 $3^{2k+4} + 4m$ 为整数, 故 $5 \mid f(k+1)$, 即命题 P_{k+1} 成立。由此蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法可知, 对所有 $n \in \mathbb{N}$, $f(n) = 3^{2n+4} - 2^{2n}$ 均能被 5 整除。

5. 证明对所有正整数 n , 都有

$$\frac{1}{\sqrt{1}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{n}} \geq \sqrt{n}.$$

定义命题 $P_n: \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{i}} \geq \sqrt{n}$, $n \in \mathbb{Z}^+$ 。

基础步骤: 当 $n=1$ 时, 左式为 $\frac{1}{\sqrt{1}}=1$, 右式为 $\sqrt{1}=1$ 。此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{Z}^+$, 假设归纳假设 P_k 成立, 有

$$\frac{1}{\sqrt{1}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{k}} \geq \sqrt{k}$$

欲证 P_{k+1} 成立, 即

$$\frac{1}{\sqrt{1}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{k}} + \frac{1}{\sqrt{k+1}} \geq \sqrt{k+1}$$

由归纳假设, P_k 的左式满足

$$\text{左式} \geq \sqrt{k} + \frac{1}{\sqrt{k+1}}$$

只需证

$$\begin{aligned}\iff \sqrt{k} + \frac{1}{\sqrt{k+1}} &\geq \sqrt{k+1} \\ \iff \sqrt{k(k+1)} + 1 &\geq k+1 \\ \iff \sqrt{k^2+k} + 1 &\geq k+1 \\ \iff \sqrt{k^2+k} &\geq k \\ \iff k^2+k &\geq k^2\end{aligned}$$

由于 $k^2+k \geq k^2$ 对所有 $k \in \mathbb{Z}^+$ 显然成立, 故得 P_{k+1} 成立, 此时蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 均成立。

6. 用数学归纳法证明: 若 $n \in \mathbb{N}, n \geq 3$, 则

$$n^{n+1} > (n+1)^n,$$

并由此推导出若 $n \in \mathbb{N}, n \geq 3$, 则

$$\sqrt[n]{n} > \sqrt[n+1]{n+1}.$$

定义命题

$$P_n : n^{n+1} > (n+1)^n, \quad n \geq 3, n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 当 $n = 3$ 时, 左式为 $3^{3+1} = 3^4 = 81$, 右式为 $(3+1)^3 = 4^3 = 64$ 。由于 $81 > 64$, 故 P_3 成立。

归纳步骤: 设 $k \geq 3$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即 $k^{k+1} > (k+1)^k$ 。欲证 P_{k+1} 成立, 即证:

$$(k+1)^{k+2} > (k+2)^{k+1} \iff \frac{(k+1)^{k+2}}{(k+2)^{k+1}} > 1$$

由归纳假设可知 $k+1 > \frac{(k+1)^{k+1}}{k^{k+1}}$, 考虑目标不等式的左端:

$$\begin{aligned} \frac{(k+1)^{k+2}}{(k+2)^{k+1}} &= \frac{(k+1)^{k+1} \cdot (k+1)}{(k+2)^{k+1}} \\ &> \frac{(k+1)^{k+1} \cdot \frac{(k+1)^{k+1}}{k^{k+1}}}{(k+2)^{k+1}} \quad (\text{利用 } P_k) \\ &= \frac{(k+1)^{2k+2}}{k^{k+1}(k+2)^{k+1}} \\ &= \left[\frac{(k+1)^2}{k(k+2)} \right]^{k+1} \\ &= \left[\frac{k^2 + 2k + 1}{k^2 + 2k} \right]^{k+1} \end{aligned}$$

由于

$$\frac{k^2 + 2k + 1}{k^2 + 2k} = 1 + \frac{1}{k^2 + 2k} > 1,$$

则其任意正整数次幂均大于 1。因此 $(k+1)^{k+2} > (k+2)^{k+1}$ 成立, 即 P_{k+1} 成立, 蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 。

由数学归纳法, 原不等式对所有 $n \geq 3$ 均成立。

由上述已证不等式可知, 当 $n \geq 3$ 时:

$$n^{n+1} > (n+1)^n$$

对不等式两边同时开 $n(n+1) > 0$ 次方, 则

$$(n^{n+1})^{\frac{1}{n(n+1)}} > ((n+1)^n)^{\frac{1}{n(n+1)}}$$

即

$$\sqrt[n]{n} > \sqrt[n+1]{n+1}$$

得证。

7. 设 $x_0 = 5$, 且 $x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n}$ 。证明对一切自然数 $n \geq 1$ 都有

$$2n < x_n^2 - 25 < \frac{47n}{23}.$$

定义命题

$$P_n : 2n < x_n^2 - 25 < \frac{47n}{23}, \quad n \geq 1, n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, $x_1 = 5.2$, $x_1^2 - 25 = 2.04$ 。观察不等式:

$$2(1) = 2 < 2.04 < \frac{47(1)}{23} \approx 2.04348$$

此时左式与右式均成立, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \geq 1$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即

$$2k < x_k^2 - 25 < \frac{47k}{23}$$

递推关系平方可得

$$x_{k+1}^2 = \left(x_k + \frac{1}{x_k}\right)^2 = x_k^2 + 2 + \frac{1}{x_k^2}$$

即

$$x_{k+1}^2 - 25 = (x_k^2 - 25) + 2 + \frac{1}{x_k^2}$$

证明下界: 由归纳假设

$$x_k^2 - 25 > 2k,$$

且由于 $x_k^2 > 0$, 必有 $\frac{1}{x_k^2} > 0$, 则

$$x_{k+1}^2 - 25 > 2k + 2 + 0 = 2(k+1)$$

证明上界: 由归纳假设

$$x_k^2 - 25 < \frac{47k}{23}$$

注意到数列 $\{x_n\}$ 单调递增, 故对于 $k \geq 1$, 有 $x_k \geq x_1 = 5.2$ 。由此可得 $x_k^2 \geq 27.04 > 23$, 故 $\frac{1}{x_k^2} < \frac{1}{23}$ 。代入表达式:

$$x_{k+1}^2 - 25 < \frac{47k}{23} + 2 + \frac{1}{23} = \frac{47(k+1)}{23}$$

由此可见 P_{k+1} 成立, 即蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 均成立。

8. 设数列 $\{a_n\}$ 定义为 $a_1 = 1, 2 = 1$, 且

$$a_{m+1} = a_m + a_{m-1} \quad \forall m \geq 2, m \in \mathbb{N}$$

证明

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

对所有正整数 n 皆成立。

定义命题

$$P_n : a_n = \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^n - \psi^n),$$

其中

$$\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}, \quad \psi = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$$

注意到 ϕ 和 ψ 是特征方程 $x^2 - x - 1 = 0$ 的两个根, 满足

$$\phi^2 = \phi + 1, \quad \psi^2 = \psi + 1$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 右式为

$$\frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} - \frac{1-\sqrt{5}}{2} \right) = \frac{\sqrt{5}}{\sqrt{5}} = 1 = a_1,$$

当 $n = 2$ 时, 右式为

$$\frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^2 - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^2 \right] = \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{6+2\sqrt{5}}{4} - \frac{6-2\sqrt{5}}{4} \right) = \frac{\sqrt{5}}{\sqrt{5}} = 1 = a_2,$$

故 P_1, P_2 成立。

归纳步骤: 假设 P_{k-1} 与 P_k 成立, 即

$$a_{k-1} = \frac{1}{\sqrt{5}}(\phi^{k-1} - \psi^{k-1}), \quad a_k = \frac{1}{\sqrt{5}}(\phi^k - \psi^k)$$

欲证 P_{k+1} 成立, 根据递推关系 $a_{k+1} = a_k + a_{k-1}$:

$$\begin{aligned} a_{k+1} &= \frac{1}{\sqrt{5}}(\phi^k - \psi^k) + \frac{1}{\sqrt{5}}(\phi^{k-1} - \psi^{k-1}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}}[(\phi^k + \phi^{k-1}) - (\psi^k + \psi^{k-1})] \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}}[\phi^{k-1}(\phi + 1) - \psi^{k-1}(\psi + 1)] \end{aligned}$$

利用特征根的性质 $\phi + 1 = \phi^2$ 及 $\psi + 1 = \psi^2$, 代入上式得:

$$a_{k+1} = \frac{1}{\sqrt{5}}[\phi^{k-1}(\phi^2) - \psi^{k-1}(\psi^2)] = \frac{1}{\sqrt{5}}(\phi^{k+1} - \psi^{k+1})$$

此时命题 P_{k+1} 成立, 由此蕴含 $(P_{k-1} \wedge P_k) \implies P_{k+1}$ 。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 均成立。

9. 已知数列由递推关系

$$a_{n+1} = \frac{a_n - 5}{3a_n - 7}, \quad a_1 = -1, \quad n \in \mathbb{N}$$

定义, 用数学归纳法证明

$$a_n = \frac{2^{n+1} - 5}{2^{n+1} - 3}.$$

定义命题

$$P_n : a_n = \frac{2^{n+1} - 5}{2^{n+1} - 3}, \quad n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 右式为

$$\frac{2^{1+1} - 5}{2^{1+1} - 3} = \frac{4 - 5}{4 - 3} = -1 = a_1$$

此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N}$, 假设 P_k 成立, 有

$$a_k = \frac{2^{k+1} - 5}{2^{k+1} - 3}$$

欲证 P_{k+1} 成立, 即证 $a_{k+1} = \frac{2^{k+2} - 5}{2^{k+2} - 3}$, 由递推关系及归纳假设:

$$\begin{aligned}
 a_{k+1} &= \frac{a_k - 5}{3a_k - 7} \\
 &= \frac{\frac{2^{k+1}-5}{2^{k+1}-3} - 5}{3\left(\frac{2^{k+1}-5}{2^{k+1}-3}\right) - 7} \\
 &= \frac{(2^{k+1} - 5) - 5(2^{k+1} - 3)}{3(2^{k+1} - 5) - 7(2^{k+1} - 3)} \\
 &= \frac{2^{k+1} - 5 - 5 \cdot 2^{k+1} + 15}{3 \cdot 2^{k+1} - 15 - 7 \cdot 2^{k+1} + 21} \\
 &= \frac{-4 \cdot 2^{k+1} + 10}{-4 \cdot 2^{k+1} + 6} \\
 &= \frac{2^{k+2} - 5}{2^{k+2} - 3}
 \end{aligned}$$

此时命题 P_{k+1} 成立, 蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 均成立。

10. 证明对所有整数 $n \geq 1$, 有

$$(a+b)^n = {}^nC_0 a^n + {}^nC_1 a^{n-1}b + {}^nC_2 a^{n-2}b^2 + \cdots + {}^nC_n b^n.$$

定义命题

$$P_n : (a+b)^n = \sum_{r=0}^n {}^nC_r a^{n-r} b^r, \quad n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 当 $n=1$ 时, 左式为 $(a+b)^1 = a+b$. 右式为 ${}^1C_0 a^1 + {}^1C_1 b^1 = a+b$. 此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即

$$(a+b)^k = \sum_{r=0}^k {}^kC_r a^{k-r} b^r$$

欲证 P_{k+1} 成立, 考虑其左式:

$$\begin{aligned}
 (a+b)^{k+1} &= (a+b)(a+b)^k \\
 &= (a+b) \sum_{r=0}^k {}^k C_r a^{k-r} b^r \\
 &= a \sum_{r=0}^k {}^k C_r a^{k-r} b^r + b \sum_{r=0}^k {}^k C_r a^{k-r} b^r \\
 &= \sum_{r=0}^k {}^k C_r a^{k-r+1} b^r + \sum_{r=0}^k {}^k C_r a^{k-r} b^{r+1}
 \end{aligned}$$

在第一个求和中提取 $r=0$ 的项, 在第二个求和中提取 $r=k$ 的项, 并对剩余部分合并:

$$\begin{aligned}
 (a+b)^{k+1} &= {}^k C_0 a^{k+1} + \sum_{r=1}^k {}^k C_r a^{k-r+1} b^r + \sum_{r=0}^{k-1} {}^k C_r a^{k-r} b^{r+1} + {}^k C_k b^{k+1} \\
 &= {}^k C_0 a^{k+1} + \sum_{r=1}^k {}^k C_r a^{k-r+1} b^r + \sum_{r=1}^k {}^k C_{r-1} a^{k-r+1} b^r + {}^k C_k b^{k+1} \\
 &= {}^k C_0 a^{k+1} + \sum_{r=1}^k ({}^k C_r + {}^k C_{r-1}) a^{k-r+1} b^r + {}^k C_k b^{k+1}
 \end{aligned}$$

利用帕斯卡恒等式

$${}^k C_r + {}^k C_{r-1} = {}^{k+1} C_r,$$

且注意到 ${}^k C_0 = {}^{k+1} C_0 = 1$, ${}^k C_k = {}^{k+1} C_{k+1} = 1$, 得:

$$(a+b)^{k+1} = {}^{k+1} C_0 a^{k+1} + \sum_{r=1}^k {}^{k+1} C_r a^{k+1-r} b^r + {}^{k+1} C_{k+1} b^{k+1} = \sum_{r=0}^{k+1} {}^{k+1} C_r a^{k+1-r} b^r$$

此时命题 P_{k+1} 成立, 蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 均成立。

11. 设数列 $(a_n)_{n=0}^{\infty}$ 满足对所有 $n \geq 0$ 都有 $\frac{1}{2} < a_n < 1$ 。定义数列 (x_n) 为

$$x_0 = a_0, \quad x_{n+1} = \frac{a_{n+1} + x_n}{1 + a_{n+1} x_n} \quad (n \geq 0).$$

求 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 的所有可能取值, 并判断该数列是否可能发散。

定义命题

$$P_n: 0 < 1 - x_n < \frac{1}{2^{n+1}}, n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$$

基础步骤: 当 $n = 0$ 时, 由题设 $\frac{1}{2} < a_0 < 1$ 且 $x_0 = a_0$, 有

$$1 - x_0 = 1 - a_0 < 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}.$$

又因 $a_0 < 1$, 故 $1 - x_0 > 0$ 。此时 $0 < 1 - x_0 < \frac{1}{2^{0+1}}$ 成立, 故 P_0 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即

$$0 < 1 - x_k < \frac{1}{2^{k+1}}$$

欲证 P_{k+1} 成立, 考虑其表达式:

$$\begin{aligned} 1 - x_{k+1} &= 1 - \frac{a_{k+1} + x_k}{1 + a_{k+1}x_k} \\ &= \frac{1 + a_{k+1}x_k - a_{k+1} - x_k}{1 + a_{k+1}x_k} \\ &= \frac{(1 - a_{k+1}) - x_k(1 - a_{k+1})}{1 + a_{k+1}x_k} \\ &= \frac{1 - a_{k+1}}{1 + a_{k+1}x_k}(1 - x_k) \end{aligned}$$

由于 $\frac{1}{2} < a_{k+1} < 1$ 且由 P_k 知 $0 < x_k < 1$, 观察系数项:

$$0 < \frac{1 - a_{k+1}}{1 + a_{k+1}x_k} < \frac{1 - \frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{2} \cdot 0} = \frac{1}{2}$$

由归纳假设, 得

$$0 < 1 - x_{k+1} < \frac{1}{2} \cdot (1 - x_k) < \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^{k+1}} = \frac{1}{2^{k+2}}$$

此时命题 P_{k+1} 成立, 蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。由数学归纳法, 命题 P_n 对所有非负整数 n 均成立。

由于对所有 n , $0 < 1 - x_n < \frac{1}{2^{n+1}}$, 且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2^{n+1}} = 0,$$

由夹挤定理,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (1 - x_n) = 0 \implies \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 1.$$

因此, 极限的所有可能取值仅为 1, 且该数列在给定条件下必然收敛, 不可能发散。

12. 对于实数 $a > 0$, 定义数列 $\{x_n\}$ 为

$$x_{n+1} = a(x_n^2 + 4), \quad x_0 = 0.$$

求 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 存在且有限的充要条件。

首先分析极限存在的必要条件。若 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$ 存在, 对递推式两边取极限得

$$x = a(x^2 + 4) \implies ax^2 - x + 4a = 0$$

根据判别式

$$\Delta = (-1)^2 - 4(a)(4a) = 1 - 16a^2 \geqslant 0,$$

且 $a > 0$, 得到 $0 < a \leqslant \frac{1}{4}$ 。在此条件下, 方程的根为

$$x = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 16a^2}}{2a}$$

下面证明当 $0 < a \leqslant \frac{1}{4}$ 时, 数列收敛。令

$$L = \frac{1 - \sqrt{1 - 16a^2}}{2a}$$

为较小的根, 注意到 $L = a(L^2 + 4)$ 且 $L \leqslant 2$ (当 $a = \frac{1}{4}$ 时 $L = 2$)。

定义命题

$$P_n : x_n \leqslant x_{n+1} < L, \quad n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$$

基础步骤: 当 $n = 0$ 时, $x_0 = 0, x_1 = a(0^2 + 4) = 4a$ 。由于 $0 < a \leqslant \frac{1}{4}$, 则

$$x_0 = 0 \leqslant x_1 = 4a \leqslant 1 < L$$

故 P_0 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即

$$x_k \leqslant x_{k+1} < L$$

欲证 P_{k+1} 成立, 考虑

$$\begin{aligned} x_{k+2} - x_{k+1} &= a(x_{k+1}^2 + 4) - a(x_k^2 + 4) \\ &= a(x_{k+1}^2 - x_k^2) \\ &= a(x_{k+1} + x_k)(x_{k+1} - x_k) \end{aligned}$$

由 $a > 0$ 及 P_k 知 $x_{k+1} - x_k \geq 0$ 且 $x_k, x_{k+1} \geq 0$, 故 $x_{k+2} - x_{k+1} \geq 0$ 。再考虑上界: 由于 $f(t) = a(t^2 + 4)$ 在 $t \geq 0$ 时单调递增, 且由 P_k 知 $x_{k+1} < L$, 则:

$$x_{k+2} = a(x_{k+1}^2 + 4) < a(L^2 + 4) = L$$

此时命题 P_{k+1} 成立, 蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有非负整数 n 均成立。

因此, 数列 $\{x_n\}$ 单调递增且有上界 L , 根据单调有界原理, 极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n$ 必然存在且有限。

综上所述, 所求的充要条件为

$$0 < a \leq \frac{1}{4}$$

13. 设 n 为正整数, 且 a_k, b_k 满足

$$a_k = \frac{1}{\binom{n}{k}}, \quad b_k = 2^{k-n}, \quad k = 1, 2, \dots, n.$$

试证:

$$\frac{a_1 - b_1}{1} + \frac{a_2 - b_2}{2} + \dots + \frac{a_n - b_n}{n} = 0$$

欲证

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k \binom{n}{k}} = \sum_{k=1}^n \frac{2^{k-n}}{k}$$

由于对所有 $k \geq 1$ 均有恒等式

$$k \binom{n}{k} = n \binom{n-1}{k-1},$$

得等价命题:

$$P_n: \frac{2^n}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{\binom{n-1}{k}} = \sum_{k=1}^n \frac{2^k}{k}$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 左式为 $\frac{2^1}{1} \cdot \frac{1}{\binom{0}{0}} = 2$, 右式为 $\frac{2^1}{1} = 2$ 。左式等于右式, P_1 成立。

归纳步骤: 假设归纳假设 P_n 成立, 则对于 $n+1$:

$$\begin{aligned}
 \frac{2^{n+1}}{n+1} \sum_{k=0}^n \frac{1}{\binom{n}{k}} &= \frac{2^n}{n+1} \left(1 + \sum_{k=0}^{n-1} \left(\frac{1}{\binom{n}{k}} + \frac{1}{\binom{n}{k+1}} \right) + 1 \right) \\
 &= \frac{2^n}{n+1} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\frac{n-k}{n} + \frac{k+1}{n}}{\binom{n-1}{k}} + \frac{2^{n+1}}{n+1} \\
 &= \frac{2^n}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{\binom{n-1}{k}} + \frac{2^{n+1}}{n+1} \\
 &= \frac{2^n}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{\binom{n-1}{k}} + \frac{2^{n+1}}{n+1} \\
 &= \sum_{k=1}^{n+1} \frac{2^k}{k}
 \end{aligned}$$

即命题 P_{n+1} 成立, 蕴含 $P_n \implies P_{n+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 均成立。

14. 定义数列 $\{x_n\}$ 递推关系为 $x_1 = \sqrt{5}$ 且 $x_{n+1} = x_n^2 - 2$ 对自然数 $n \geq 1$. 求

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n}{x_{n+1}}.$$

令 $y_n = x_n^2$. 根据递推关系 $x_{n+1} = x_n^2 - 2$, 平方得 $y_{n+1} = (y_n - 2)^2$. 由此可得关键恒等式:

$$y_{n+1} - 4 = (y_n - 2)^2 - 4 = y_n^2 - 4y_n = y_n(y_n - 4).$$

即有

$$\frac{y_n}{y_{n+1} - 4} = \frac{1}{y_n - 4}$$

首先, 我们用归纳法证明对所有 $n \geq 1$, 有 $y_n \geq 5$ 且 $y_n \rightarrow \infty$. 定义命题 $P_n: y_n \geq 5$. 基础步骤: 当 $n = 1$ 时, $y_1 = (\sqrt{5})^2 = 5 \geq 5$, 故 P_1 成立. 归纳步骤: 假设 $y_k \geq 5$ 成立, 则 $y_{k+1} = (y_k - 2)^2 \geq (5 - 2)^2 = 9 > 5$. 故由数学归纳法知 $y_n \geq 5$ 对所有 $n \geq 1$ 成立. 进一步地,

$$y_{n+1} - y_n = y_n^2 - 5y_n + 4 = (y_n - 1)(y_n - 4)$$

由于 $y_n \geq 5$, 则 $y_{n+1} - y_n \geq (5 - 1)(5 - 4) = 4$, 故数列 $\{y_n\}$ 趋于无穷大。

接下来, 我们用归纳法证明命题

$$Q_n: \prod_{i=1}^n y_i = \frac{y_{n+1} - 4}{y_1 - 4} \cdot y_1, \quad n \in \mathbb{N} \quad (1)$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 左式 $= y_1$; 右式 $= \frac{y_2 - 4}{y_1 - 4} \cdot y_1 = \frac{y_1(y_1 - 4)}{y_1 - 4} \cdot y_1 = y_1$ 。 Q_1 成立。归纳步骤: 假设 Q_k 成立, 则对于 $n = k + 1$:

$$\begin{aligned} \prod_{i=1}^{k+1} y_i &= \left(\prod_{i=1}^k y_i \right) \cdot y_{k+1} \\ &= \frac{y_{k+1} - 4}{y_1 - 4} \cdot y_1 \cdot y_{k+1} \\ &= \frac{y_1}{y_1 - 4} \cdot [y_{k+1}(y_{k+1} - 4)] \\ &= \frac{y_1}{y_1 - 4} (y_{k+2} - 4) \end{aligned}$$

此时 Q_{k+1} 成立。由数学归纳法知 (1) 对所有 $n \in \mathbb{N}$ 成立。

现在计算目标极限的平方

$$\left(\frac{x_1 x_2 \cdots x_n}{x_{n+1}} \right)^2 = \frac{\prod_{i=1}^n y_i}{y_{n+1}} = \frac{y_1}{y_1 - 4} \cdot \frac{y_{n+1} - 4}{y_{n+1}} = 5 \left(1 - \frac{4}{y_{n+1}} \right)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $y_{n+1} \rightarrow \infty$, 故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{x_1 x_2 \cdots x_n}{x_{n+1}} \right)^2 = 5(1 - 0) = 5$$

由于 x_n 显然为正, 故

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n}{x_{n+1}} = \sqrt{5}$$

15. 设数列 $\{a_n\}_{n=1}^\infty$ 定义为 $a_1 = 1, a_2 = 1, a_3 = 2$, 并且当 $n \geq 3$ 时, 满足递推式:

$$a_{n+1} = \frac{n a_n a_{n-2}}{a_{n-1}}.$$

(a) 证明对所有 $n \geq 1$, a_n 都是正整数。

首先推导数列的一个更简便的递推关系。由题设, 当 $n \geq 3$ 时, 有 $a_{n+1} a_{n-1} = n a_n a_{n-2}$ 。则对于 $n + 1$ 项, 有:

$$a_{n+2} a_n = (n + 1) a_{n+1} a_{n-1} = (n + 1) \cdot n a_n a_{n-2} \implies a_{n+2} = n(n + 1) a_{n-2}.$$

将下标平移, 得到对所有 $n \geq 1$:

$$a_{n+4} = (n+3)(n+2)a_n. \quad (1)$$

下面用数学归纳法证明 a_n 均为正整数。定义命题 $P_n: a_{4n-3}, a_{4n-2}, a_{4n-1}, a_{4n}$ 均为正整数。

基础步骤: 当 $n=1$ 时, $a_1=1, a_2=1, a_3=2$ 为已知正整数。由递推式 $a_4 = \frac{3a_3a_1}{a_2} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{1} = 6$, 亦为正整数。故 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即 $a_{4k-3}, a_{4k-2}, a_{4k-1}, a_{4k}$ 均为正整数。考虑 $n=k+1$ 时的项, 根据公式 (1):

$$a_{4(k+1)-3} = a_{4k+1} = (4k)(4k-1)a_{4k-3}$$

$$a_{4(k+1)-2} = a_{4k+2} = (4k+1)(4k)a_{4k-2}$$

$$a_{4(k+1)-1} = a_{4k+3} = (4k+2)(4k+1)a_{4k-1}$$

$$a_{4(k+1)} = a_{4k+4} = (4k+3)(4k+2)a_{4k}$$

由于 a_{4k-3}, \dots, a_{4k} 为正整数, 且系数 $(4k+i)$ 均为正整数, 故它们的积也必为正整数。即命题 P_{k+1} 成立, 蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有 $n \in \mathbb{N}$ 成立, 故对所有 $n \geq 1$, a_n 均为正整数。

(b) 定义数列 $\{b_n\}_{n=1}^{\infty}$ 为

$$b_n = \frac{a_n}{\sqrt{(n+1)!}}.$$

证明 $\{b_n\}$ 有界。

由 (3) 式, 有

$$\begin{aligned} b_{n+4} &= \frac{a_{n+4}}{\sqrt{(n+5)!}} \\ &= \frac{(n+3)(n+2)a_n}{\sqrt{(n+1)!(n+2)(n+3)(n+4)(n+5)}} \\ &= \frac{a_n}{\sqrt{(n+1)!}} \sqrt{\frac{(n+3)(n+2)}{(n+4)(n+5)}} \\ &\leq \frac{a_n}{\sqrt{(n+1)!}} \\ &= b_n \end{aligned}$$

即归纳步骤成立。注意到基础步骤也成立 $b_1, b_2, b_3, b_4 \leq 1$, 由数学归纳法, 可得对所有

$$n \geq 1,$$

$$b_n \leq 1$$

因此数列 $\{b_n\}$ 有界。

16. 设 $x_1 = 1$, 且对 $n \geq 1$,

$$x_{n+1} = \frac{1}{x_n} \left(\sqrt{1 + x_n^2} - 1 \right).$$

证明数列 $\{2^n x_n\}$ 收敛, 并求其极限。

定义命题

$$P_n : x_n = \tan \left(\frac{\pi}{2^{n+1}} \right), n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 左式为 $x_1 = 1$ 。右式为 $\tan \left(\frac{\pi}{2^{1+1}} \right) = \tan \left(\frac{\pi}{4} \right) = 1$ 。此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即

$$x_k = \tan \left(\frac{\pi}{2^{k+1}} \right)$$

欲证 P_{k+1} 成立, 考虑其递推表达式:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \frac{1}{x_k} \left(\sqrt{1 + x_k^2} - 1 \right) \\ &= \frac{1}{\tan \left(\frac{\pi}{2^{k+1}} \right)} \left(\sqrt{1 + \tan^2 \left(\frac{\pi}{2^{k+1}} \right)} - 1 \right) \\ &= \frac{\sec \left(\frac{\pi}{2^{k+1}} \right) - 1}{\tan \left(\frac{\pi}{2^{k+1}} \right)} \\ &= \frac{1 - \cos \left(\frac{\pi}{2^{k+1}} \right)}{\sin \left(\frac{\pi}{2^{k+1}} \right)} \end{aligned}$$

由半角公式

$$\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) = \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta},$$

可得

$$x_{k+1} = \tan \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{2^{k+1}} \right) = \tan \left(\frac{\pi}{2^{k+2}} \right)$$

此时命题 P_{k+1} 成立, 蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 均成立。

接下来求数列 $\{2^n x_n\}$ 的极限:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} 2^n \tan \left(\frac{\pi}{2^{n+1}} \right)$$

利用等价无穷小 $\tan \theta \sim \theta$ (当 $\theta \rightarrow 0$ 时): 由于当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{\pi}{2^{n+1}} \rightarrow 0$, 则

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} 2^n \tan \left(\frac{\pi}{2^{n+1}} \right) &= \lim_{n \rightarrow \infty} 2^n \cdot \frac{\pi}{2^{n+1}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi}{2} \\ &= \frac{\pi}{2}\end{aligned}$$

因此数列 $\{2^n x_n\}$ 收敛, 其极限为 $\frac{\pi}{2}$ 。

17. 设无穷数列 $\{a_n\}$ 符合 $a_0 = 0$ 且当 $n \geq 1$ 时,

$$a_n - a_{n-1} = \begin{cases} \left(\frac{1}{5}\right)^n, & n \text{ 为偶数} \\ \left(\frac{1}{5}\right)^n - \left(\frac{1}{3}\right)^n, & n \text{ 为奇数} \end{cases}$$

(a) 求 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_{2n}$ 的值。

由于

$$\begin{aligned}a_{2n} - a_0 &= a_{2n} - a_{2n-1} + a_{2n-1} - a_{2n-2} + \cdots + a_2 - a_1 + a_1 - a_0 \\ &= \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5^2} + \cdots + \frac{1}{5^{2n}} \right) - \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3^3} + \cdots + \frac{1}{3^{2n-1}} \right)\end{aligned}$$

所以

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_{2n} = \frac{\frac{1}{5}}{1 - \frac{1}{5}} - \frac{\frac{1}{3}}{1 - \frac{1}{9}} = -\frac{1}{8}$$

(b) 证明当 $n \geq 0$, $a_{2n+2} - a_{2n} < 0$, 并依此证明对于所有正整数 n , 不等式

$$-\frac{1}{8} \leq a_{2n} < 0$$

恒成立。

首先有

$$\begin{aligned}a_{2n+2} - a_{2n} &= a_{2n+2} - a_{2n+1} + a_{2n+1} - a_{2n} \\ &= \left(\frac{1}{5}\right)^{2n+2} + \left(\frac{1}{5}\right)^{2n+1} - \left(\frac{1}{3}\right)^{2n+1} \\ &= \frac{\frac{6}{5} \cdot 3^{2n+1} - 5^{2n+1}}{15^{2n+1}}\end{aligned}$$

当 $n = 0$ 时, $a_2 - a_0 = \frac{18/5-5}{15} < 0$, 成立; 假设 $n = k$ 时成立, 即

$$\frac{6}{5} \cdot 3^{2k+1} < 5^{2k+1}$$

观察当 $n = k + 1$ 时,

$$a_{2k+4} - a_{2k+2} = \frac{\frac{6}{5} \cdot 3^{2k+3} - 5^{2k+3}}{15^{2k+3}}$$

由归纳假设,

$$\frac{6}{5} \cdot 3^{2k+3} < 3^2 \cdot 5^{2k+1} < 5^2 \cdot 5^{2k+1} = 5^{2k+3}$$

因此 $a_{2k+4} - a_{2k+2} < 0$, 即当 $n = k + 1$ 时也成立; 由数学归纳法, $a_{2n+2} - a_{2n} < 0$; 又

$$a_{2n} < a_{2n-2} < \cdots < a_2 < a_0 = 0,$$

故 $a_{2n} < 0$, 结合 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_{2n} = -\frac{1}{8}$ 得

$$-\frac{1}{8} \leq a_{2n} < 0, \quad n \in \mathbb{N}$$

18. 设正实数 a_0, a_1, \dots, a_n 满足 $a_{k+1} - a_k \geq 1$ 对所有 $k = 0, 1, \dots, n-1$ 成立。证明

$$1 + \frac{1}{a_0} \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{1}{a_k - a_0}\right) \leq \prod_{k=0}^n \left(1 + \frac{1}{a_k}\right).$$

定义命题

$$P_n : 1 + \frac{1}{a_0} \prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{1}{a_i - a_0}\right) \leq \prod_{i=0}^n \left(1 + \frac{1}{a_i}\right), \quad n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$$

其中 a_k 是正实数且满足 $a_{k+1} - a_k \geq 1$ 。

基础步骤: 当 $n = 0$ 时, 左式为 $1 + \frac{1}{a_0} \cdot (1) = 1 + \frac{1}{a_0}$ (此处空乘积定义为 1)。右式为 $1 + \frac{1}{a_0}$ 。此时左式等于右式, 即 P_0 成立。

归纳步骤: 设 $n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, 假设归纳假设 P_n 成立。欲证 P_{n+1} 成立, 即证明:

$$1 + \frac{1}{a_0} \prod_{i=1}^{n+1} \left(1 + \frac{1}{a_i - a_0}\right) \leq \prod_{i=0}^{n+1} \left(1 + \frac{1}{a_i}\right)$$

注意到上式左边可以拆分为 P_n 的左项与增量项。根据 P_n 已成立, 只需证明增量部分的差异满足:

$$\frac{1}{a_0} \prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{1}{a_i - a_0}\right) \cdot \frac{1}{a_{n+1} - a_0} \leq \prod_{i=0}^n \left(1 + \frac{1}{a_i}\right) \cdot \frac{1}{a_{n+1}} \quad \cdots (1)$$

针对不等式 (1), 定义子命题 Q_n 并利用第二数学归纳法证明:

基础步骤: 当 $n = 0$ 时, (1) 式变为:

$$\begin{aligned}\frac{1}{a_0} \cdot \frac{1}{a_1 - a_0} &\leq \left(1 + \frac{1}{a_0}\right) \frac{1}{a_1} \\ a_1 &\leq (a_0 + 1)(a_1 - a_0) \\ a_0 &\leq a_0 a_1 - a_0^2 \\ 1 &\leq a_1 - a_0\end{aligned}$$

由已知条件 $a_1 - a_0 \geq 1$ 知其成立。

归纳步骤: 假设 Q_n 成立, 欲证 Q_{n+1} 成立, 需证明:

$$\left(1 + \frac{1}{a_{n+1} - a_0}\right) \frac{a_{n+1} - a_0}{a_{n+2} - a_0} \leq \left(1 + \frac{1}{a_{n+1}}\right) \frac{a_{n+1}}{a_{n+2}}$$

展开整理得:

$$\begin{aligned}(a_{n+1} - a_0 + 1)a_{n+2} &\leq (a_{n+1} + 1)(a_{n+2} - a_0) \\ a_0 &\leq a_0 a_{n+2} - a_0 a_{n+1} \\ 1 &\leq a_{n+2} - a_{n+1}\end{aligned}$$

由于已知 $a_{n+2} - a_{n+1} \geq 1$, 故 Q_{n+1} 成立。

由此可知 (1) 式恒成立, 进而蕴含 $P_n \implies P_{n+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有非负整数 n 均成立。 (待验证)

19. 用数学归纳法证明: 对所有正整数 n , 有

$$\sum_{r=1}^n r(r+1) \left(\frac{1}{2}\right)^{r-1} = 16 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1} (n^2 + 5n + 8).$$

定义命题

$$P_n: \sum_{r=1}^n r(r+1) \left(\frac{1}{2}\right)^{r-1} = 16 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1} (n^2 + 5n + 8), \quad n \in \mathbb{N}.$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 左式为

$$\sum_{r=1}^1 r(r+1) \left(\frac{1}{2}\right)^{r-1} = 1 \cdot 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^0 = 2.$$

而右式为

$$16 - \left(\frac{1}{2}\right)^{1-1} (1^2 + 5 \cdot 1 + 8) = 16 - 1 \cdot 14 = 2.$$

此时左式等于右式, 即命题 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 有

$$\sum_{r=1}^k r(r+1) \left(\frac{1}{2}\right)^{r-1} = 16 - \left(\frac{1}{2}\right)^{k-1} (k^2 + 5k + 8).$$

观察当 $n = k + 1$ 时,

$$\begin{aligned} \sum_{r=1}^{k+1} r(r+1) \left(\frac{1}{2}\right)^{r-1} &= \sum_{r=1}^k r(r+1) \left(\frac{1}{2}\right)^{r-1} + (k+1)(k+2) \left(\frac{1}{2}\right)^k \\ &= 16 - \left(\frac{1}{2}\right)^{k-1} (k^2 + 5k + 8) + (k+1)(k+2) \left(\frac{1}{2}\right)^k \\ &= 16 + \left(\frac{1}{2}\right)^k [(k+1)(k+2) - 2(k^2 + 5k + 8)] \\ &= 16 - \left(\frac{1}{2}\right)^k (k^2 + 7k + 14) \\ &= 16 - \left(\frac{1}{2}\right)^{(k+1)-1} [(k+1)^2 + 5(k+1) + 8] \end{aligned}$$

发现命题 P_{k+1} 成立, 此时蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 皆成立。

20. 对每个 $n \geq 1$, 令

$$a_n = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k^n}{k!}, \quad b_n = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k k^n}{k!}.$$

证明 $a_n \cdot b_n$ 是整数。

定义命题 P_n 为: 对给定的 $n \geq 0$, 存在整数 A_n, B_n 使得 $a_n = A_n e$ 且 $b_n = B_n e^{-1}$ (约定 $0^0 = 1$)。

基础步骤: 当 $n = 0$ 时, 由指数函数的幂级数展开 $e^x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$ 可知

$$a_0 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} = e, \quad b_0 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} = e^{-1}.$$

此时 $A_0 = 1, B_0 = 1$ 均为整数, 即命题 P_0 成立。

归纳步骤: 假设归纳假设对所有 $m \leq n$ 均成立, 即 $a_m = A_m e, b_m = B_m e^{-1}$ 且 $A_m, B_m \in \mathbb{Z}$ 。对于 a_{n+1} , 利用指标变换 $j = k - 1$:

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^{n+1}}{k!} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^n}{(k-1)!} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(j+1)^n}{j!} \\ &= \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} j^m = \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \left(\sum_{j=0}^{\infty} \frac{j^m}{j!} \right) \\ &= \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} a_m. \end{aligned}$$

根据归纳假设 $a_m = A_m e$, 则 $a_{n+1} = (\sum_{m=0}^n \binom{n}{m} A_m) e$ 。由于 A_m 与组合数均为整数, 故其和 A_{n+1} 亦为整数。同理, 对于 b_{n+1} :

$$\begin{aligned} b_{n+1} &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k k^{n+1}}{k!} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k k^n}{(k-1)!} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^{j+1} (j+1)^n}{j!} \\ &= - \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!} \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} j^m = - \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} b_m. \end{aligned}$$

根据归纳假设 $b_m = B_m e^{-1}$, 则 $b_{n+1} = (-\sum_{m=0}^n \binom{n}{m} B_m) e^{-1}$ 。显然 B_{n+1} 亦为整数。由此命题 P_{n+1} 成立, 此时蕴含 $P_0, \dots, P_n \implies P_{n+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有自然数 n 皆成立。此时有

$$a_n b_n = (A_n e)(B_n e^{-1}) = A_n B_n.$$

由于 A_n, B_n 均为整数, 故其积 $a_n b_n$ 是整数。

21. 试证对任意正整数 n ,

$$\lfloor \sqrt{n} \rfloor + \sum_{k=1}^n \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor$$

必为偶数, 其中 $\lfloor x \rfloor$ 为向下取整函数。

定义命题

$$P_n : a_n = \lfloor \sqrt{n} \rfloor + \sum_{k=1}^n \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor \text{ 为偶数, } n \in \mathbb{Z}^+.$$

基础步骤: 观察当 $n = 1$ 时,

$$a_1 = \lfloor \sqrt{1} \rfloor + \left\lfloor \frac{1}{1} \right\rfloor = 1 + 1 = 2$$

为偶数, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 假设 P_ℓ 成立, 即当 $n = \ell$ 时,

$$a_\ell = \lfloor \sqrt{\ell} \rfloor + \sum_{k=1}^{\ell} \left\lfloor \frac{\ell}{k} \right\rfloor$$

为偶数。观察当 $n = \ell + 1$ 时, $\sum_{k=1}^n \left\lfloor \frac{n}{k} \right\rfloor$ 在数值上等于从 1 到 n 所有正整数的正因数个数之和。因此:

$$\sum_{k=1}^{\ell+1} \left\lfloor \frac{\ell+1}{k} \right\rfloor = \sum_{k=1}^{\ell} \left\lfloor \frac{\ell}{k} \right\rfloor + d(\ell+1)$$

其中 $d(\ell+1)$ 表示 $\ell+1$ 的正因数个数。分以下两种情况讨论:

- 若 $\ell+1$ 为完全平方数, 则存在正整数 m 使得 $\ell+1 = m^2$ 。此时有

$$\lfloor \sqrt{\ell+1} \rfloor = m = \lfloor \sqrt{\ell} \rfloor + 1.$$

由于完全平方数的正因数个数必为奇数, 即 $d(\ell+1)$ 为奇数。于是

$$a_{\ell+1} = (\lfloor \sqrt{\ell} \rfloor + 1) + \left(\sum_{k=1}^{\ell} \left\lfloor \frac{\ell}{k} \right\rfloor + d(\ell+1) \right) = a_\ell + 1 + d(\ell+1).$$

因为 a_ℓ 为偶数且 $1 + d(\ell+1)$ 为偶数, 故 $a_{\ell+1}$ 为偶数。

- 若 $\ell+1$ 不是完全平方数, 则有

$$\lfloor \sqrt{\ell+1} \rfloor = \lfloor \sqrt{\ell} \rfloor.$$

且非完全平方数的正因数个数必为偶数, 即 $d(\ell+1)$ 为偶数。于是

$$a_{\ell+1} = \lfloor \sqrt{\ell} \rfloor + \left(\sum_{k=1}^{\ell} \left\lfloor \frac{\ell}{k} \right\rfloor + d(\ell+1) \right) = a_\ell + d(\ell+1).$$

因为 a_ℓ 为偶数且 $d(\ell+1)$ 为偶数, 故 $a_{\ell+1}$ 为偶数。

综上所述, 无论何种情况均有 $a_{\ell+1}$ 为偶数, 即命题 $P_{\ell+1}$ 成立, 此时蕴含 $P_\ell \implies P_{\ell+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对任意正整数 n 都成立。

22. 票箱中有甲、乙两人的选票分别为 m 张和 n 张且 $m > n$ 。令 $P_{m,n}$ 表示开票的过程中甲的选票会一路领先乙的选票的概率,

(a) 计算 $P_{m,1}$ 和 $P_{m,2}$ 。

视甲得 1 票为向上走一步, 乙得 1 票为向右走一步, 则 $P_{m,n}$ 表示从原点 $O(0,0)$ 走格点至 $P(n,m)$ 但不经过 (a,a) 的概率。

m 个上、1 个右的排列数为 $\frac{(m+1)!}{m!} = m+1$, 其中

$$\begin{cases} \text{开头为右的数列有 1 个} \\ \text{开头为上右的数列也只有 1 个} \end{cases}$$

因此符合条件的数列有 $m+1-2 = m-1$ 个, 故

$$P_{m,1} = \frac{m-1}{m+1}$$

m 个上、2 个右的排列数为 $\frac{(m+2)!}{m!2!} = \frac{(m+2)(m+1)}{2}$, 其中

$$\begin{cases} \text{开头为右的数列有 } m+1 \text{ 个} \\ \text{开头为上右的数列有 } m \text{ 个} \\ \text{开头为上上右右的数列有 1 个} \end{cases}$$

因此符合条件的数列有

$$\frac{(m+2)(m+1)}{2} - (m+1) - m - 1 = \frac{(m+1)(m-2)}{2}$$

所以

$$P_{m,2} = \frac{m-2}{m+2}$$

(b) 证明 $P_{m,n} = \frac{m}{m+n}P_{m-1,n} + \frac{n}{m+n}P_{m,n-1}$ 。

从 $(0,0)$ 至 (n,m) 的方法数等于从 $(0,0)$ 至 $(n-1,m)$ 的方法数加上从 $(0,0)$ 至 $(n,m-1)$ 的方法数, 因此

$$P_{m,n} = \frac{\frac{(m+n-1)!}{(m-1)!n!}P_{m-1,n} + \frac{(m+n-1)!}{m!(n-1)!}P_{m,n-1}}{\frac{(m+n)!}{m!n!}} = \frac{m}{m+n}P_{m-1,n} + \frac{n}{m+n}P_{m,n-1}$$

(c) 先猜测 $P_{m,n}$ 的答案, 再利用 (b) 用归纳法证明你的猜测。

由 (a) 可猜

$$P_{m,n} = \frac{m-n}{m+n}, \quad m \geq n$$

令 $k = m + n$, 观察当 $k = 2$ 时,

$$\begin{cases} m = 2, n = 0 \Rightarrow P_{2,0} = \frac{2-0}{2+0} = 1 \\ m = n = 1 \Rightarrow P_{1,1} = \frac{1-1}{1+1} = 0 \end{cases}$$

显然猜测成立。现假设 $k = N$ 时猜测成立, 观察当 $k = N + 1$ 时,

$$\begin{aligned} P_{m,n} &= \frac{m}{m+n} P_{m-1,n} + \frac{n}{m+n} P_{m,n-1} \\ &= \frac{m}{m+n} \cdot \frac{m-n-1}{m+n-1} + \frac{n}{m+n} \cdot \frac{m-n+1}{m+n-1} \\ &= \frac{(m-n)(m+n-1)}{(m+n)(m+n-1)} = \frac{m-n}{m+n} \end{aligned}$$

猜测亦成立, 故猜测对所有 $m, n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ 且 $m \geq n$ 皆成立。

23. 用数学归纳法证明: 对所有正整数 n , 有

$$\cos x + \cos 3x + \cos 5x + \cdots + \cos[(2n-1)x] = \frac{\sin(2nx)}{2 \sin x}.$$

定义命题 P_n 为等式

$$P_n : \sum_{r=1}^n \cos[(2r-1)x] = \frac{\sin(2nx)}{2 \sin x}, \quad n \in \mathbb{N}.$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 左式为

$$\sum_{r=1}^1 \cos[(2r-1)x] = \cos(2 \cdot 1 - 1)x = \cos x.$$

而右式为

$$\frac{\sin(2 \cdot 1 \cdot x)}{2 \sin x} = \frac{\sin 2x}{2 \sin x} = \frac{2 \sin x \cos x}{2 \sin x} = \cos x.$$

此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即有

$$\sum_{r=1}^k \cos[(2r-1)x] = \frac{\sin(2kx)}{2 \sin x}.$$

由归纳假设, 观察当 $n = k + 1$ 时,

$$\begin{aligned}
 \sum_{r=1}^{k+1} \cos[(2r-1)x] &= \sum_{r=1}^k \cos[(2r-1)x] + \cos[(2k+1)x] \\
 &= \frac{\sin(2kx)}{2\sin x} + \cos[(2k+1)x] \\
 &= \frac{\sin(2kx) + 2\sin x \cos[(2k+1)x]}{2\sin x} \\
 &= \frac{\sin(2kx) + \sin(2kx+2x) - \sin(2kx)}{2\sin x} \\
 &= \frac{\sin[2(k+1)x]}{2\sin x}.
 \end{aligned}$$

即命题 P_{k+1} 成立, 此时蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 皆成立。

24. 用数学归纳法证明: 对所有正整数 n , 有

$$\frac{d^n}{dx^n}[e^x \cos x] = 2^{\frac{n}{2}} e^x \cos\left(x + \frac{n\pi}{4}\right).$$

定义命题 P_n 为等式

$$P_n : \frac{d^n}{dx^n}[e^x \cos x] = 2^{\frac{n}{2}} e^x \cos\left(x + \frac{n\pi}{4}\right), \quad n \in \mathbb{N}.$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 左式为一阶导数, 由乘积法则得

$$\frac{d}{dx}[e^x \cos x] = e^x \cos x + e^x(-\sin x) = e^x(\cos x - \sin x).$$

而右式为

$$2^{\frac{1}{2}} e^x \cos\left(x + \frac{\pi}{4}\right) = \sqrt{2} e^x \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cos x - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin x \right) = e^x(\cos x - \sin x)$$

此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即有

$$\frac{d^k}{dx^k}[e^x \cos x] = 2^{\frac{k}{2}} e^x \cos\left(x + \frac{k\pi}{4}\right).$$

欲证命题 P_{k+1} 成立, 对 P_k 的等式两边关于 x 求导:

$$\begin{aligned}\frac{d^{k+1}}{dx^{k+1}}[e^x \cos x] &= \frac{d}{dx} \left[2^{\frac{k}{2}} e^x \cos \left(x + \frac{k\pi}{4} \right) \right] \\ &= 2^{\frac{k}{2}} \left[e^x \cos \left(x + \frac{k\pi}{4} \right) + e^x \left(-\sin \left(x + \frac{k\pi}{4} \right) \right) \right] \\ &= 2^{\frac{k}{2}} e^x \left[\cos \left(x + \frac{k\pi}{4} \right) - \sin \left(x + \frac{k\pi}{4} \right) \right].\end{aligned}$$

利用辅助角公式

$$\cos A - \sin A = \sqrt{2} \cos \left(A + \frac{\pi}{4} \right),$$

有

$$\begin{aligned}\frac{d^{k+1}}{dx^{k+1}}[e^x \cos x] &= 2^{\frac{k}{2}} e^x \cdot \sqrt{2} \cos \left(x + \frac{k\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \right) \\ &= 2^{\frac{k+1}{2}} e^x \cos \left(x + \frac{(k+1)\pi}{4} \right).\end{aligned}$$

即命题 P_{k+1} 成立, 此时蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 皆成立。

25. 设 n 为正整数, 计算定积分:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin[(2n+1)x]}{\sin x} dx.$$

记

$$I_n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin[(2n+1)x]}{\sin x} dx$$

下面通过数学归纳法证明 $I_n = \frac{\pi}{2}$ 。

基础步骤: 当 $n=1$ 时, 利用三倍角公式 $\sin 3x = 3 \sin x - 4 \sin^3 x$, 可得:

$$I_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{3 \sin x - 4 \sin^3 x}{\sin x} dx = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (3 - 4 \sin^2 x) dx.$$

利用降幂公式 $4 \sin^2 x = 2(1 - \cos 2x)$, 积分化为

$$I_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 + 2 \cos 2x) dx = [x + \sin 2x]_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi}{2}.$$

故 $n=1$ 时结论成立。

归纳步骤: 假设对于 $n = k - 1$ 时结论成立, 即 $I_{k-1} = \frac{\pi}{2}$ 。考虑 I_k 与 I_{k-1} 的差值:

$$I_k - I_{k-1} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin(2k+1)x - \sin(2k-1)x}{\sin x} dx.$$

利用和差化积:

$$\sin(2k+1)x - \sin(2k-1)x = 2 \cos(2kx) \sin x.$$

于是

$$I_k - I_{k-1} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2 \cos(2kx) \sin x}{\sin x} dx = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(2kx) dx = \frac{\sin(k\pi)}{k}.$$

由于 k 是正整数, $\sin(k\pi) = 0$, 因此 $I_k - I_{k-1} = 0$, 即 $I_k = I_{k-1}$ 。根据归纳假设 $I_{k-1} = \frac{\pi}{2}$, 故 $I_k = \frac{\pi}{2}$ 也成立。

由数学归纳法可知, 对所有正整数 n , 该积分的值恒为 $\frac{\pi}{2}$ 。

26. 已知矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix},$$

用数学归纳法证明: 对所有正整数 n , 有

$$\mathbf{A}^n = n\mathbf{A} - (n-1)\mathbf{I}, \quad n \in \mathbb{N}.$$

定义命题

$$P_n: \mathbf{A}^n = n\mathbf{A} - (n-1)\mathbf{I}.$$

基础步骤: 当 $n = 1$ 时, 左式为 $\mathbf{A}^1 = \mathbf{A}$, 右式为 $1 \cdot \mathbf{A} - (1-1)\mathbf{I} = \mathbf{A}$ 。此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $k \in \mathbb{N}$, 假设归纳假设 P_k 成立, 即

$$\mathbf{A}^k = k\mathbf{A} - (k-1)\mathbf{I}.$$

欲证命题 P_{k+1} 成立, 考虑 \mathbf{A}^{k+1} :

$$\mathbf{A}^{k+1} = \mathbf{A}^k \cdot \mathbf{A} = [k\mathbf{A} - (k-1)\mathbf{I}]\mathbf{A} = k\mathbf{A}^2 - (k-1)\mathbf{A}.$$

观察到

$$\mathbf{A}^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 4 & 1 \end{pmatrix} = 2\mathbf{A} - \mathbf{I}$$

因此

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}^{k+1} &= k(2\mathbf{A} - \mathbf{I}) - (k-1)\mathbf{A} \\
 &= 2k\mathbf{A} - k\mathbf{I} - k\mathbf{A} + \mathbf{A} \\
 &= (k+1)\mathbf{A} - k\mathbf{I} \\
 &= (k+1)\mathbf{A} - [(k+1) - 1]\mathbf{I}.
 \end{aligned}$$

即命题 P_{k+1} 成立, 此时蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 皆成立。

27. 设 V_n 为 n 阶范德蒙行列式, 定义如下:

$$V_n = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{n-1} \end{vmatrix}$$

试以数学归纳法证明

$$V_n = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_j - x_i).$$

定义命题

$$P_n : V_n = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{n-1} \end{vmatrix} = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_j - x_i) \quad , n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 显然 P_1 成立, 因 $V = 1 = |1| = 1$, 且显然 P_2 亦成立, 因为

$$V_2 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{vmatrix} = x_2 - x_1$$

归纳步骤: 假设命题 P_k 成立, 即

$$V_k = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{k-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{k-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_k & x_k^2 & \cdots & x_k^{k-1} \end{vmatrix} = \prod_{1 \leq i < j \leq k} (x_j - x_i)$$

观察 V_{k+1} , 将 x_1 写成变量 x , 即

$$V_{k+1} = \begin{vmatrix} 1 & x & x^2 & \cdots & x^k \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_k & x_k^2 & \cdots & x_k^k \\ 1 & x_{k+1} & x_{k+1}^2 & \cdots & x_{k+1}^k \end{vmatrix}$$

V_{k+1} 按 R_1 展开后是次数不大于 k 的多项式, 设 $f(x) = V_{k+1}$, 发现当 $x = x_2, x_3, \cdots, x_{k+1}$, 行列式 V_{k+1} 有相同的两行, 故

$$f(x_2) = f(x_3) = \cdots = f(x_{k+1}) = 0$$

故 $f(x)$ 是一个次数为 k 且以 $x_2, x_3, \cdots, x_{k+1}$ 为根的多项式, 由余氏定理,

$$f(x) = C(x - x_2)(x - x_3) \cdots (x - x_{k+1}) \quad (1)$$

且 C 是一常数。又 V_{k+1} 按 R_1 展开式中 x^k 的系数为

$$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{k-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{k-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_k & x_k^2 & \cdots & x_k^{k-1} \end{vmatrix}$$

由归纳假设知此系数为

$$\prod_{2 \leq i < j \leq k+1} (x_j - x_i)$$

故由 (1) 知

$$C = \prod_{2 \leq i < j \leq k+1} (x_j - x_i)$$

即

$$f(x) = (x - x_2)(x - x_3) \cdots (x - x_{k+1}) \prod_{2 \leq i < j \leq k+1} (x_j - x_i)$$

将 x 置换回 x_1 , 即得命题 P_{k+1} 成立, 此时蕴含 $P_k \implies P_{k+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 皆成立。验证是 $x_j - x_i$ 还是 $x_i - x_j$

28. 试证莱布尼茨公式: 设函数 f, g 定义在开区间 I 上, n 为正整数, $x \in I$ 为 I 内一点使得 f, g

均可导 n 次, 则有

$$(f(x)g(x))^{(n)} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k)}(x)g^{(n-k)}(x),$$

其中 (n) 表示导数的阶数。

定义命题

$$P_n : (f(x)g(x))^{(n)} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k)}(x)g^{(n-k)}(x) \quad , n \in \mathbb{N}$$

基础步骤: 观察当 $n = 1$ 时, 由乘积求导法则, 左式为

$$(f(x)g(x))' = f(x)g'(x) + f'(x)g(x)$$

而右式为

$$\sum_{k=0}^1 \binom{1}{k} f^{(k)}(x)g^{(1-k)}(x) = \binom{1}{0} f^{(0)}(x)g^{(1)}(x) + \binom{1}{1} f^{(1)}(x)g^{(0)}(x) = f(x)g'(x) + f'(x)g(x),$$

此时左式等于右式, 即 P_1 成立。

归纳步骤: 设 $n \in \mathbb{N}$, 假设归纳假设 P_n 成立, 有

$$(f(x)g(x))^{(n)} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k)}(x)g^{(n-k)}(x)$$

欲证

$$(f(x)g(x))^{(n+1)} = \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} f^{(k)}(x)g^{(n+1-k)}(x)$$

由归纳假设,

$$\begin{aligned} (f(x)g(x))^{(n+1)} &= \left(\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k)}(x)g^{(n-k)}(x) \right)' \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (f^{(k)}(x)g^{(n-k)}(x))' \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (f^{(k+1)}(x)g^{(n-k)}(x) + f^{(k)}(x)g^{(n-k+1)}(x)) \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k+1)}(x)g^{(n-k)}(x) + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{(k)}(x)g^{(n-k+1)}(x) \end{aligned}$$

将第一个求和中 $k = n$ 的项分离, 第二个求和中 $k = 0$ 的项分离, 得

$$\begin{aligned}(f(x)g(x))^{(n+1)} &= \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} f^{(k+1)}(x)g^{(n-k)}(x) + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} f^{(k)}(x)g^{(n-k+1)}(x) \\ &\quad + \binom{n}{n} f^{(n+1)}(x)g^{(0)}(x) + \binom{n}{0} f^{(0)}(x)g^{(n+1)}(x) \\ &= \sum_{k=1}^{n-1} \binom{n}{k-1} f^{(k)}(x)g^{(n+1-k)}(x) + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} f^{(k)}(x)g^{(n-k+1)}(x) \\ &\quad + \binom{n}{n} f^{(n+1)}(x)g^{(0)}(x) + \binom{n}{0} f^{(0)}(x)g^{(n+1)}(x)\end{aligned}$$

由帕斯卡恒等式,

$$\begin{aligned}(f(x)g(x))^{(n+1)} &= \sum_{k=1}^n \binom{n+1}{k} f^{(k)}(x)g^{(n+1-k)}(x) + \binom{n}{0} f^{(0)}(x)g^{(n+1)}(x) + \binom{n}{n} f^{(n+1)}(x)g^{(0)}(x) \\ &= \sum_{k=1}^n \binom{n+1}{k} f^{(k)}(x)g^{(n+1-k)}(x) + \binom{n+1}{0} f(x)g^{(n+1)}(x) + \binom{n+1}{n+1} f^{(n+1)}(x)g(x) \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} f^{(k)}(x)g^{(n+1-k)}(x)\end{aligned}$$

即命题 P_{n+1} 成立, 此时蕴含 $P_n \implies P_{n+1}$ 成立。

由数学归纳法, 命题 P_n 对所有正整数 n 皆成立。

29. 设 a_0, a_1, a_2, \dots 为一无限实数数列, 且满足

$$\frac{a_{n-1} + a_{n+1}}{2} \geq a_n, \forall n \in \mathbb{N}$$

证明

$$\frac{a_0 + a_{n+1}}{2} \geq \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n}, \forall n \in \mathbb{N}$$

先证明:

$$a_0 + na_{n+1} \geq (n+1)a_n \quad (*)$$

当 $n = 1$ 时, $a_0 + a_2 \geq 2a_1$, 显然 $(*)$ 成立; 假设 $n = k$ 时 $(*)$ 成立, 即

$$a_0 + ka_{k+1} \geq (k+1)a_k \quad (1)$$

又

$$a_{k+2} + a_k \geq 2a_{k+1} \quad (2)$$

由 (1), (2) 得

$$a_0 + (k+1)a_{k+2} \geq (k+1)(a_{k+2} + a_k) - ka_{k+1} \geq 2(k+1)a_{k+1} - ka_{k+1} = (k+2)a_{k+1}$$

即 $n = k+1$ 时 (*) 也成立, 由数学归纳法知 (*) 对所有 $n \in \mathbb{N}$ 均成立。

现证:

$$n(a_n + a_{n+1}) \geq 2 \sum_{i=1}^n a_i \quad (**)$$

当 $n = 1$ 时, $a_0 + a_2 \geq 2a_1$, (**) 成立; 假设 $n = k$ 时 (**) 成立, 即

$$k(a_0 + a_{k+1}) \geq 2 \sum_{i=1}^k a_i \quad (3)$$

由 (*) 知

$$a_0 + (k+1)a_{k+2} \geq (k+2)a_{k+1} \quad (4)$$

由 (3), (4) 得

$$(k+1)(a_0 + a_{k+2}) \geq (k+2)a_{k+1} + 2 \sum_{i=1}^k a_i - ka_{k+1} = 2 \sum_{i=1}^{k+1} a_i$$

即 $n = k+1$ 时 (**) 也成立, 由数学归纳法知 (**) 对所有 $n \in \mathbb{N}$ 均成立即

$$\frac{a_0 + a_{n+1}}{2} \geq \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n}, \forall n \in \mathbb{N}$$

证毕。

设 $a_{n+1} - a_n = d_n$, 由题意可知

$$a_{n+1} - a_n \geq a_n - a_{n-1} \Rightarrow d_n \geq d_{n-1}$$

且 $a_n = a_0 + d_1 + d_2 + \cdots + d_{n-1}$, 欲证等价于

$$\begin{aligned} \frac{a_0 + a_{n+1}}{2} &\geq \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n} \\ \iff n(a_0 + a_{n+1}) &\geq 2(a_1 + a_2 + \cdots + a_n) \\ \iff na_0 + n(a_0 + d_0 + d_1 + \cdots + d_{n-1}) \\ &\geq 2[(a_0 + d_0) + (a_0 + d_0 + d_1) + \cdots + (a_0 + d_0 + d_1 + \cdots + d_{n-1})] \\ \iff nd_n &\geq nd_0 + (n-2)d_1 + (n-4)d_2 + (n-6)d_3 + \cdots + (4-n)d_{n-2} + (2-n)d_{n-1} \end{aligned}$$

当 n 为奇数, 即证

$$n(d_0 - d_n) + (n-2)(d_1 - d_{n-1}) + (n-4)(d_2 - d_{n-2}) + \cdots + (d_{\frac{n-1}{2}} - d_{\frac{n+1}{2}}) \leq 0 \quad (1)$$

而 $d_n \geq d_{n-1}$, 则

$$d_0 - d_n \leq 0, d_1 - d_{n-1} \leq 0, \cdots, d_{\frac{n-1}{2}} - d_{\frac{n+1}{2}} \leq 0$$

此时 (1) 显然成立。

当 n 为偶数, 即证

$$n(d_0 - d_n) + (n-2)(d_1 - d_{n-1}) + (n-4)(d_2 - d_{n-2}) + \cdots + 2(d_{\frac{n-2}{2}} - d_{\frac{n+2}{2}}) \leq 0 \quad (2)$$

上式中 $d_{\frac{n}{2}}$ 这一项没有, 而 $d_n \geq d_{n-1}$ 则

$$d_0 - d_n \leq 0, d_1 - d_{n-1} \leq 0, \cdots, d_{\frac{n-2}{2}} - d_{\frac{n+2}{2}} \leq 0$$

此时 (2) 也成立。

故得证

$$\frac{a_0 + a_{n+1}}{2} \geq \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n}, \forall n \in \mathbb{N}$$

30. 已知多项式 $P(x) = x^2 + 2019x + 1$, 试证对任意正整数 n , 函数 $P^{(n)}(x) = 0$ 至少有一个实数根, 其中 $P^{(n)}(x)$ 表示 P 自身复合 n 次。

定义命题: 对任意正整数 n , $P^{(n)}(x)$ 有一个负实根 $-c_n$, 且 $0 < c_n < 2$ 。

基础步骤: 当 $n = 1$ 时,

$$P^{(1)}(x) = P(x) = x^2 + 2019x + 1$$

其判别式为 $\Delta_1 = 2019^2 - 4 > 0$, 所以 $P^{(1)}(x)$ 有两个实数根, 设为 $-b_1, -c_1$, 其中 $c_1 \leq b_1$,

由韦达定理,

$$b_1 + c_1 = 2019, \quad b_1 c_1 = 1$$

因此 b_1, c_1 都为正数, 且因为乘积是 1, 可得 $c_1 \leq 1 < 2$, 所以 $-c_1$ 是一个负实根, 满足 $0 < c_1 < 2$, 故命题在 $n = 1$ 时成立。

归纳步骤: 假设命题在 $n = k$ 时成立, 即 $P^{(k)}(x)$ 有一负实根 $-c_k$, 其中 $0 < c_k < 2$, 即

$$P^{(k)}(x) = (x + c_k)Q_k(x)$$

其中 $Q_k(x)$ 为某多项式, 则有

$$P^{(k+1)}(x) = P^{(k)}(P(x)) = (P(x) + c_k)Q_k(P(x))$$

其中

$$P(x) + c_k = x^2 + 2019x + 1 + c_k$$

的判别式为

$$\Delta_{k+1} = 2019^2 - 4(1 + c_k) > 0$$

即 $P(x) + c_k$ 有两个实根, 设为 $-b_{k+1}, -c_{k+1}$, 其中 $c_{k+1} \leq b_{k+1}$, 由韦达定理,

$$b_{k+1} + c_{k+1} = 2019, \quad b_{k+1} c_{k+1} = 1 + c_k > 0$$

可知 b_{k+1}, c_{k+1} 都为正数, 且

$$c_{k+1} \leq \sqrt{1 + c_k} < \sqrt{3} < 2$$

所以 $-c_{k+1}$ 是 $P^{(k+1)}(x)$ 的负实根, 满足 $0 < c_{k+1} < 2$, 故命题在 $n = k + 1$ 时也成立。

由数学归纳法, 对任意正整数 n , $P^{(n)}(x)$ 至少有一个实数根。

参考出处



- Arts of Problem Solving (AoPS): Contest Collections
- Brilliant (Kudos to the unmonetized version in the past)
- International Mathematics Competition (IMC) for University Students
- Missouri Collegiate Mathematics Competition
- American Mathematics Competition 10
- University of Waterloo CEMC - Euclid, Fermat, Cayley, Hypatia, Galois
- Lehigh University High School Math Contest
- Joint Entrance Examination (Advanced)
- The USSR Olympiad Problem Book: Selected Problems and Theorems of Elementary Mathematics
- LetsSolveMathProblems - Weekly Math Challenges
- Maths 505 - Differential Equations
- Michael Penn
- Prime Newtons
- TRML
- MadasMaths
- 日本留学試験-理系数学
- 中国复旦大学往年试题
- 雪隆森中学华罗庚杯数学比赛
- 厦门大学马来西亚分校-陈景润杯中学数学竞赛
- 微积分福音
- 线代启示录
- 福气老师
- 指考历届试题
- 统测历届试题与解答
- 印度人的作业
- 北京高考在线
- 朱式幸福教甄
- 普通型高级中学数学科能力竞赛 (决赛)
- 2014-2024 全国中学生数学竞赛联赛试题及答案汇总
- 如此醉的图书馆
- 菁优网
- 08 高考文科试题分类圆锥曲线
- 08 高考文科试题分类数列
- 福伦-隆中高数笔记
- 曾龙文师-高二数理培训队笔记