

# 高等代数 I 习题课讲义 (2025 秋)

龚诚欣

[gongchengxin@pku.edu.cn](mailto:gongchengxin@pku.edu.cn)

2025 年 10 月 17 日

## 目录

<b>1</b>	<b>第 1 次习题课: Gauss-Jordan 消元法</b>	<b>2</b>
1.1	问题	2
1.2	解答	2
<b>2</b>	<b>线性相关性, 秩</b>	<b>4</b>
2.1	问题	4
2.2	解答	4
<b>3</b>	<b>线性方程组解的结构</b>	<b>5</b>
3.1	问题	5
3.2	解答	6
<b>4</b>	<b>行列式 (1)</b>	<b>8</b>
4.1	问题	8
4.2	解答	9
<b>5</b>	<b>行列式 (2)</b>	<b>11</b>
5.1	问题	11
5.2	解答	12
<b>6</b>	<b>致谢</b>	<b>14</b>

## 1 第 1 次习题课: Gauss-Jordan 消元法

## 1.1 问题

1. 是否存在二次函数  $f(x) = ax^2 + bx + c$ , 其图像经过下述 4 个点:  $A(1, 2), Q(-1, 3), M(-4, 5), N(0, 2)$ ?

2. 用 Gauss 消元法解以下方程组, 并用向量表示解的集合: 
$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + 3x_3 - 4x_4 = 4 \\ x_2 - x_3 + x_4 = -3 \\ x_1 + 3x_2 - 4x_4 = 1 \\ -7x_2 + 3x_3 + x_4 = -3 \end{cases}.$$

3. 某食品厂有四种原料  $A, B, C, D$ . 问能否用这四种原料配制含脂肪 5%, 碳水化合物 12%, 蛋白质 15% 的食品?

单位: %	A	B	C	D
脂肪	8	6	3	2
碳水化合物	5	25	10	15
蛋白质	15	5	20	10

4.  $a$  为何值时, 线性方程组 
$$\begin{cases} x_1 - 4x_2 + 2x_3 = -1 \\ -x_1 + 11x_2 - x_3 = 3 \\ 3x_1 - 5x_2 + 7x_3 = a \end{cases}$$
 有解? 当有解时, 求出它的所有解.

5. 解下述线性方程组: 
$$\begin{cases} (1 + a_1)x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n = b_1 \\ x_1 + (1 + a_2)x_2 + x_3 + \cdots + x_n = b_2 \\ \cdots \\ x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + (1 + a_n)x_n = b_n \end{cases}, \text{ 其中 } a_1 a_2 \cdots a_n \neq 0, \text{ 且 } \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \cdots + \frac{1}{a_n} \neq -1.$$

6. (1) 求复矩阵  $A = \begin{bmatrix} 1 & -i & -1 \\ 2 & 2 & -2 \\ i & 1+i & -i \end{bmatrix}$  的行简化阶梯型矩阵  $\text{rref}(A)$ ; (2) 求齐次方程组  $AX = 0$  在复数域上的解集合;

(3) 求齐次方程组  $AX = 0$  在实数域上的解集合; (4) 当  $y_1, y_2, y_3$  满足什么关系时, 方程组  $AX = (y_1, y_2, y_3)^T$  有解?

7. 设  $\alpha_1 = (1, 1, 4), \alpha_2 = (-2, 1, 5), \alpha_3 = (a, 2, 10), \beta = (1, b, -1)$ . 当  $a, b$  取何值时, 向量  $\beta$  能被  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  线性表出? 何时表示系数唯一?

8. 向量组  $\alpha_1, \cdots, \alpha_s$  线性无关,  $\beta = \sum_{j=1}^s b_j \alpha_j$ . 如果  $b_i \neq 0$ , 证明用  $\beta$  替换  $\alpha_i$  得到的向量组  $\alpha_1, \cdots, \alpha_{i-1}, \beta, \alpha_{i+1}, \cdots, \alpha_s$  也线性无关.

9. 用向量运算的性质证明: 若一组向量  $\alpha_1, \cdots, \alpha_s$  线性表出某个向量  $\beta$  的方式唯一 (不唯一), 则  $\alpha_1, \cdots, \alpha_s$  表出任何向量-如果能表出的话, 方式都唯一 (不唯一).

10. 求单叶双曲面  $x^2 + y^2 - z^2 = 1$  上的所有直线.

11. 用  $\mathbb{Q}(\sqrt{3})$  表示从全体有理数及  $\sqrt{3}$  出发, 反复作加减乘除四则运算能得到的所有数的集合, 称为由  $\sqrt{3}$  生成的数域. (1) 证明  $\mathbb{Q}(\sqrt{3}) = \{a + b\sqrt{3} : a, b \in \mathbb{Q}\}$ ; (2) 数域  $\mathbb{Q}(\sqrt{3})$  中的每个数写成  $a + b\sqrt{3}, a, b \in \mathbb{Q}$  的方式唯一.

12. 用  $\mathbb{Z}(\sqrt{-5})$  表示从全体整数及  $\sqrt{-5}$  出发, 通过加乘二则运算能得到的所有数的集合, 称为由  $\sqrt{-5}$  生成的整环. 证明在此环中, 不可约数和素数不等价.

## 1.2 解答

1. 直接代入求解 
$$\begin{cases} a + b + c = 2 \\ a - b + c = 3 \\ 16a - 4b + c = 5 \\ c = 2 \end{cases}, \text{ 发现无解.}$$

$$2. \begin{bmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -3 \\ 1 & 3 & 0 & -4 & 1 \\ 0 & -7 & 3 & 1 & -3 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{3}-=\textcircled{1}} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -3 \\ 0 & 5 & -3 & 0 & -3 \\ 0 & -7 & 3 & 1 & -3 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{3}-=5*\textcircled{2}, \textcircled{4}+=7*\textcircled{2}} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 2 & -5 & 12 \\ 0 & 0 & -4 & 8 & -24 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{4}+=2*\textcircled{3}} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 3 & -4 & 4 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 2 & -5 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow (x_1, x_2, x_3, x_4) = (-8, 3, 6, 0).$$

$$3. \text{ 注意 } A, B, C, D \text{ 的比例和为 } 1, \text{ 因此 } \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 6 & 3 & 2 & 5 \\ 5 & 25 & 10 & 15 & 12 \\ 15 & 5 & 20 & 10 & 15 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{3}-=5*\textcircled{1}, \textcircled{4}-=15*\textcircled{1}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & -5 & -6 & -3 \\ 0 & 20 & 5 & 10 & 7 \\ 0 & -10 & 5 & -5 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{3}+=10*\textcircled{2}, \textcircled{4}-=5*\textcircled{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & -5 & -6 & -3 \\ 0 & 0 & -45 & -50 & -23 \\ 0 & 0 & 30 & 25 & 15 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{4}+=\frac{2}{3}*\textcircled{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -2 & -5 & -6 & -3 \\ 0 & 0 & -45 & -50 & -23 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{25}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix}, \text{ 因此解是 } (\frac{7}{25}, \frac{16}{75}, \frac{7}{15}, \frac{1}{25}).$$

$$4. \begin{bmatrix} 1 & -4 & 2 & -1 \\ -1 & 11 & -1 & 3 \\ 3 & -5 & 7 & a \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{2}+=\textcircled{1}, \textcircled{3}-=3*\textcircled{1}} \begin{bmatrix} 1 & -4 & 2 & -1 \\ 0 & 7 & 1 & 2 \\ 0 & 7 & 1 & a+3 \end{bmatrix}. \text{ 因此有解当且仅当 } a = -1, \text{ 通解是 } \begin{cases} x_1 = -\frac{18}{7}x_3 + \frac{1}{7} \\ x_2 = -\frac{1}{7}x_3 + \frac{2}{7} \end{cases}.$$

$$5. \text{ 令 } y = x_1 + x_2 + \cdots + x_n, \text{ 原方程组改写为 } \begin{cases} y + a_1x_1 = b_1 \\ y + a_2x_2 = b_2 \\ \cdots \\ y + a_nx_n = b_n \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = \frac{b_1 - y}{a_1} \\ x_2 = \frac{b_2 - y}{a_2} \\ \cdots \\ x_n = \frac{b_n - y}{a_n} \end{cases}. \text{ 全部相加得到关于 } y \text{ 的一元}$$

一次方程, 解得  $y = \frac{1}{1 + \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \cdots + \frac{1}{a_n}} \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i}$ . 代入上式得到原线性方程组的解.

$$6. (1) \begin{bmatrix} 1 & -i & -1 \\ 2 & 2 & -2 \\ i & 1+i & -i \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{2}-=2*\textcircled{1}, \textcircled{3}-=i*\textcircled{1}} \begin{bmatrix} 1 & -i & -1 \\ 0 & 2+2i & 0 \\ 0 & i & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{3}-=\frac{i}{2+2i}*\textcircled{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i & -1 \\ 0 & 2+2i & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{2}*= \frac{1}{2+2i}} \begin{bmatrix} 1 & -i & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \\ (2) (x_1, x_2, x_3) = \{(t, 0, t) : t \in \mathbb{C}\}. (3) (x_1, x_2, x_3) = \{(t, 0, t) : t \in \mathbb{R}\}. (4) \text{ 将 } A \text{ 变换为行简化阶梯型矩阵后, 对应的常数向量是 } (y_1, \frac{y_2 - 2y_1}{2+2i}, y_3 - \frac{1+i}{4}y_2 + \frac{1-i}{2}y_1), \text{ 因此只有当 } y_3 - \frac{1+i}{4}y_2 + \frac{1-i}{2}y_1 = 0 \text{ 时才有解.}$$

$$7. \begin{bmatrix} 1 & -2 & a & 1 \\ 1 & 1 & 2 & b \\ 4 & 5 & 10 & -1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{2}-=\textcircled{1}, \textcircled{3}-=4*\textcircled{1}} \begin{bmatrix} 1 & -2 & a & 1 \\ 0 & 3 & 2-a & b-1 \\ 0 & 13 & 10-4a & -5 \end{bmatrix} \xrightarrow{\textcircled{3}-=\frac{13}{3}*\textcircled{2}} \begin{bmatrix} 1 & -2 & a & 1 \\ 0 & 3 & 2-a & b-1 \\ 0 & 0 & \frac{4}{3}+\frac{1}{3}a & -\frac{13}{3}b-\frac{2}{3} \end{bmatrix}. \text{ 因此,}$$

当  $a \neq -4$  或  $a = -4, b = -\frac{2}{13}$  时,  $\beta$  能被线性表出, 且对于前者表出系数唯一.

8. 设  $k_1\alpha_1 + \cdots + k_{i-1}\alpha_{i-1} + k_i\beta + k_{i+1}\alpha_{i+1} + \cdots + k_s\alpha_s = 0 \Leftrightarrow k_1\alpha_1 + \cdots + k_{i-1}\alpha_{i-1} + k_i(b_1\alpha_1 + \cdots + b_s\alpha_s) + k_{i+1}\alpha_{i+1} + \cdots + k_s\alpha_s = 0 \Leftrightarrow (k_1 + k_ib_1)\alpha_1 + \cdots + (k_{i-1} + k_ib_{i-1})\alpha_{i-1} + k_ib_i\alpha_i + (k_{i+1} + k_ib_{i+1})\alpha_{i+1} + \cdots + (k_s + k_ib_s)\alpha_s = 0$ . 由线性无关性知  $k_1 + k_ib_1 = \cdots = k_{i-1} + k_ib_{i-1} = k_ib_i = k_{i+1} + k_ib_{i+1} = \cdots = k_s + k_ib_s = 0$ , 由于  $b_i \neq 0$ , 因此  $k_i = 0$ , 进一步得到  $k_1 = \cdots = k_s = 0$ , 这也意味着  $\alpha_1, \cdots, \alpha_{i-1}, \beta, \alpha_{i+1}, \cdots, \alpha_s$  线性无关.

9. 只需注意到表出某个向量  $\beta$  唯一  $\Leftrightarrow$  表出 0 向量唯一  $\Leftrightarrow (k_1\alpha_1 + \cdots + k_s\alpha_s = 0 \Rightarrow k_1 = \cdots = k_s = 0)$ .

10.  $(x-z)(x+z) = (1-y)(1+y)$ , 因此直线可以表示形式为  $\begin{cases} x-z = k(1-y) \\ x+z = \frac{1}{k}(1+y) \end{cases}$ , 即是  $\begin{cases} x+ky-z=k \\ kx-y+kz=1 \end{cases}$ . 特别

地, 当  $y = \pm 1$  时,  $z = \pm x$  也是位于该曲面上的直线.

11. (1) 只需证明  $\{a+b\sqrt{3}: a, b \in \mathbb{Q}\}$  对于加减乘除封闭. (2) 只需证明  $\sqrt{3}$  不是有理数 (因为  $a_1+b_1\sqrt{3} = a_2+b_2\sqrt{3} \Leftrightarrow \sqrt{3} = \frac{a_1-a_2}{b_2-b_1} \in \mathbb{Q}$ ). 用反证法,  $\sqrt{3} = \frac{a}{b}$ ,  $\gcd(a, b) = 1$ , 那么  $a^2 = 3b^2 \Rightarrow 3|a \Rightarrow 9|a^2 \Rightarrow 3|b^2 \Rightarrow 3|b$ , 矛盾.

12. 类似可知  $\mathbb{Z}(\sqrt{-5}) = \{a+b\sqrt{-5}: a, b \in \mathbb{Z}\}$ . 容易证明  $2+\sqrt{-5}$  是不可约数:  $2+\sqrt{-5} = (a+b\sqrt{-5})(c+d\sqrt{-5}) \Rightarrow 9 = (2+\sqrt{-5})(2-\sqrt{-5}) = (a+b\sqrt{-5})(a-b\sqrt{-5})(c+d\sqrt{-5})(c-d\sqrt{-5}) = (a^2+5b^2)(c^2+5d^2)$  无解; 但是  $2+\sqrt{-5} \nmid 3 \times 3$  而  $2+\sqrt{-5} \nmid 3$ , 因此不是素数.

## 2 线性相关性, 秩

### 2.1 问题

1. 对不同的  $\lambda$  取值, 讨论矩阵  $A = \begin{bmatrix} 1 & \lambda & -1 & 2 \\ 2 & -2 & \lambda & 5 \\ 1 & 2 & -3 & 1 \end{bmatrix}$  的秩.

2. 判断以下向量组线性相关还是线性无关; 若线性相关, 试找出其中一个线性无关的部分组, 同时能线性表出向量组其

余的每个向量. (1)  $A$  的列向量组; (2)  $A$  的行向量组.  $A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 & -6 & 8 \\ 1 & -2 & -4 & 3 & -2 \\ -7 & 8 & 10 & 3 & -10 \\ 4 & -5 & -7 & 0 & 5 \end{bmatrix}$ .

3. 作初等行变换将矩阵  $A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 5 & 2 & -1 \\ 4 & -1 & 9 & 3 & 4 \\ 3 & -2 & 8 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 5 & 8 & 6 \end{bmatrix}$  化为简化阶梯型矩阵, 再利用以上计算直接回答下列问题. (1) 求

$A$  列组的秩和一个极大无关组, 并用此极大无关组表出  $A$  的每个列向量. (2) 求  $A$  行空间的维数和一组基, 写出  $A$  的各个行向量在此基下的坐标. (3)  $a, b$  取何值时, 向量  $(3, a, b, b, 3)$  属于  $A$  的行空间?

4. 已知  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  线性无关, 试判断以下各向量组的线性相关性: (1)  $\alpha_1 + \alpha_2, \alpha_2 + \alpha_3, \alpha_3 + \alpha_4, \alpha_4 + \alpha_1$ ; (2)  $\alpha_1, \alpha_2 - \alpha_3, \alpha_1 - \alpha_3 + \alpha_4$ ; (3)  $\alpha_1, \alpha_1 + \alpha_2, \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3, \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$ ; (4)  $\alpha_1 + \alpha_4, \alpha_2 + 8\alpha_4, \alpha_2 + 5\alpha_3 + \alpha_4, 3\alpha_1 + 7\alpha_2 + \alpha_3, \alpha_1 - \alpha_3$ .

5. 证明: 若向量组 I 能线性表出向量组 II, 且  $\text{rank}(\text{I}) = \text{rank}(\text{II})$ , 则向量组 II 也能表出向量组 I.

6. 设向量组  $\alpha_1, \dots, \alpha_r$  能线性表出  $\beta_1, \dots, \beta_s$ , 并且有  $\beta_i = b_{i1}\alpha_1 + \dots + b_{ir}\alpha_r, \forall i = 1, 2, \dots, s$ . 证明若矩阵  $B = (b_{ij})_{s \times r}$  列向量线性无关, 则  $\beta_1, \dots, \beta_s$  也能线性表出  $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ .

7. 若矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  满足  $|a_{ii}| > \sum_{j \neq i} |a_{ij}|, \forall 1 \leq i \leq n$ , 则称  $A$  是主对角占优矩阵. 证明主对角占优矩阵满秩.

8. 证明秩等式  $\text{rank} \begin{pmatrix} A & O \\ O & B \end{pmatrix} = \text{rank}(A) + \text{rank}(B)$  和秩不等式  $\text{rank} \begin{pmatrix} A & C \\ O & B \end{pmatrix} \geq \text{rank}(A) + \text{rank}(B)$ .

9. 已知矩阵  $\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}$  满秩, 求两直线  $\frac{x-a_3}{a_1-a_2} = \frac{y-b_3}{b_1-b_2} = \frac{z-c_3}{c_1-c_2}, \frac{x-a_1}{a_2-a_3} = \frac{y-b_1}{b_2-b_3} = \frac{z-c_1}{c_2-c_3}$  的位置关系.

10. 设  $W = \{f(x) | f(1) = 0, f(x) \in \mathbb{R}[x]_n\}$ , 这里  $\mathbb{R}[x]_n$  表示实数域  $\mathbb{R}$  上的次数小于  $n$  的多项式添上零多项式构成的线性空间. (1) 证明  $W$  是  $\mathbb{R}[x]_n$  的线性子空间; (2) 求  $W$  的维数和一组基.

11. 证明: 若数域  $K$  上的  $n$  阶方阵  $A = (a_{ij})$  的主对角元  $a_{ii}$  均不为零, 则存在向量  $X$  使得  $AX$  的每个分量都不为零.

### 2.2 解答

1. 显然矩阵  $A$  的秩至少为 2 (第 1 列和第 4 列线性无关), 至多为 3. 下面考虑第 2 列和第 3 列能否被第 1 列和第 4 列线性表出. 先看第 2 列和最后两行, 知表出系数必然为 4 和  $-2$ , 因此  $\lambda = 0$ , 此时验证第 3 列知确实能被第 1 列和第 4

列线性表出. 综上,  $\lambda = 0$  时秩为 2, 否则为 3.

2. (1) 线性相关; 其中第 1 列、第 2 列和第 5 列构成线性无关组, 且  $2\alpha_1 + 3\alpha_2 = \alpha_3$ ,  $-5\alpha_1 - 4\alpha_2 = \alpha_4$ ;

(2) 线性相关; 其中第 2 行、第 3 行和第 4 行构成线性无关组, 且  $-\frac{3}{2}\beta_2 - \frac{1}{2}\beta_3 = \beta_1$ .

3.  $A$  的简化阶梯型矩阵是  $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ . (1) 列秩是 3, 一个极大无关组是  $\beta_1, \beta_2, \beta_4$ , 且  $\beta_3 = 2\beta_1 -$

$\beta_2, \beta_5 = 3\beta_1 + 5\beta_2 - \beta_4$ . (2) 行空间维数和列秩相同, 一组基是  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4$ , 且  $\alpha_3 = -\frac{31}{9}\alpha_1 - \frac{55}{9}\alpha_2 + \frac{17}{9}\alpha_4, \alpha_5 = -\frac{20}{9}\alpha_1 - \frac{23}{9}\alpha_2 + \frac{22}{9}\alpha_4$ . (3) 仔细计算即可.  $a = 4, b = 2$ .

4. (1) 线性相关;  $(\alpha_1 + \alpha_2) - (\alpha_2 + \alpha_3) + (\alpha_3 + \alpha_4) - (\alpha_4 + \alpha_1) = 0$ . (2) 线性无关. (3) 线性无关. (4) 线性相关; 因为这五个向量却只有四个自由度.

5. 设  $\beta_1, \dots, \beta_s$  是组 II 极大线性无关组. 任取组 I 向量  $\alpha$ , 由于组 I 能表出  $\beta_1, \dots, \beta_s, \alpha$ , 从而  $\text{rank}(\beta_1, \dots, \beta_s, \alpha) \leq s$ , 即  $\beta_1, \dots, \beta_s, \alpha$  线性相关. 由于  $\beta_1, \dots, \beta_s$  线性无关, 因此它们能表出  $\alpha$ .

6. 只需证明能表出  $\alpha_1$ . 利用高斯消元法去解方程  $\beta_{i1} = b_{i1}\alpha_1 + \dots + b_{ir}\alpha_r$ , 由于  $B$  列满秩, 因此其简化阶梯型矩阵必然可写成  $\begin{bmatrix} I_{r \times r} \\ 0_{(s-r) \times r} \end{bmatrix}$  (可用递推法或归纳法证明之), 从而  $\alpha_1$  能被  $\beta_1, \dots, \beta_s$  线性表出.

7. 反证法. 假设  $A$  的列向量组线性相关, 那么存在不全为 0 的系数使得  $k_1\alpha_1 + k_2\alpha_2 + \dots + k_n\alpha_n = 0$ . 我们不妨设在这  $n$  个系数里面  $k_1$  的绝对值最大, 那么就有  $k_1a_{11} + k_2a_{12} + \dots + k_na_{1n} = 0$ . 但是  $|k_1a_{11} + k_2a_{12} + \dots + k_na_{1n}| \geq |k_1a_{11}| - |k_2a_{12}| - \dots - |k_na_{1n}| \geq |k_1a_{11}| - |k_1|(|a_{12}| + \dots + |a_{1n}|) > 0$ , 矛盾. 因此  $A$  满秩.

8. (1) 设  $A$  的一个列极大线性无关组是  $\alpha_{i_1}, \dots, \alpha_{i_r}$ ,  $B$  的一个列极大线性无关组是  $\beta_{j_1}, \dots, \beta_{j_s}$ . 利用线性无关的定义可以验证  $\begin{pmatrix} \alpha_{i_1} \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} \alpha_{i_r} \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ \beta_{j_1} \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} 0 \\ \beta_{j_s} \end{pmatrix}$  线性无关, 且可以分别用对应小矩阵  $A, B$  的相同系数表出其他大矩阵的列向量, 因此这是一个大矩阵的列极大线性无关组, 有第一个秩等式.

(2) 利用线性无关的定义可以验证  $\begin{pmatrix} \alpha_{i_1} \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} \alpha_{i_r} \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \gamma_{j_1} \\ \beta_{j_1} \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} \gamma_{j_s} \\ \beta_{j_s} \end{pmatrix}$  线性无关, 其中  $\gamma_{j_k}$  是矩阵  $C$  对应于  $j_k$  的列向量, 因此大矩阵的秩至少是  $\text{rank}(A) + \text{rank}(B)$ , 有第二个秩不等式. 这里我们无法判断这是不是一个大矩阵的列极大线性无关组, 因此可以严格取到大于号. 一个例子是  $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ , 其中  $A = (0), B = (0), C = (1)$ .

9. 由矩阵满秩知  $(a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2)$  和  $(a_2 - a_3, b_2 - b_3, c_2 - c_3)$  线性无关 (用第一列减第二列和用第二列减第三列), 因此不平行. 再检查是否相交, 只需验证  $x_3 + k(x_1 - x_2) = x_1 + t(x_2 - x_3), x = a, b, c$  对于  $k, t$  是否有解. 由于矩阵满秩, 合并同类项知该方程系数必须满足  $t + 1 = k - 1 = t + k = 0$ , 因此  $t = -1, k = 1$ . 从而两直线相交.

10. (1) 容易证明对  $\forall f(x), g(x) \in W \Rightarrow af(x) + bg(x) \in W$ , 因此是线性子空间. (2) 令  $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_{n-1}x^{n-1}$ ,  $f(1) = 0 \Rightarrow a_0 + a_1 + \dots + a_{n-1} = 0$ , 因此  $f(x) = a_1(x - 1) + a_2(x^2 - 1) + \dots + a_{n-1}(x^{n-1} - 1)$ . 下面我们只需证明  $x - 1, x^2 - 1, \dots, x^{n-1} - 1$  确实是  $W$  的一组基, 而其线性无关性是显然的, 所以  $\dim W = n - 1$ .

11. 注意到  $W_i = \{X \in K^n : (a_{i1}, \dots, a_{in})X = 0\}, i = 1, 2, \dots, n$  都是  $K^n$  的  $n - 1$  维子空间, 由于有限个  $n - 1$  维子空间张不满  $n$  维全空间, 从而存在  $X_0 \in K^n \setminus (W_1 \cup W_2 \cup \dots \cup W_n)$ , 此时  $AX_0$  的每个分量都不为零.

### 3 线性方程组解的结构

#### 3.1 问题

1. 已知矩阵  $A = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5]$  与  $\begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 5 & 3 \\ 2 & 2 & 4 & 8 & 7 \\ 3 & 1 & 2 & 6 & 3 \end{bmatrix}$  的行向量组等价, 且  $\alpha_2 = (2, 1, 2, 1)^T, \alpha_5 = (7, 3, 7, 3)^T$ . 又知方

程组  $AX = \beta$  的一个解为  $X = (1, 1, -1, 0, 1)^T$ , 这里  $\beta = (7, 5, 7, 4)^T$ . (1) 写出矩阵  $A$  及其行简化阶梯形矩阵  $J$ ; (2) 求  $A$  行空间的一组基, 并确定当  $a, b$  为何值时,  $(5, 3, 6, a, b)$  落在  $A$  的行空间里; (3) 求方程组  $AX = \beta$  的解空间.

$$2. \text{ 讨论下列方程组的解空间: } (1) \begin{cases} x_1 + x_2 - 2x_3 + 2x_4 = 0 \\ 3x_1 + 5x_2 + 6x_3 - 4x_4 = 0 \\ 4x_1 + 5x_2 - 2x_3 + 3x_4 = 0 \\ 3x_1 + 8x_2 + 24x_3 - 19x_4 = 0 \end{cases} ; (2) \begin{cases} x_1 + x_2 = 0 \\ x_1 + x_2 + x_3 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ x_{n-2} + x_{n-1} + x_n = 0 \\ x_{n-1} + x_n = 0 \end{cases} .$$

$$3. \text{ 讨论下列方程组的解空间: } (1) \begin{cases} 8x_1 + 6x_2 + 3x_3 + 2x_4 = 5 \\ -12x_1 - 3x_2 - 3x_3 + 3x_4 = -6 \\ 4x_1 + 5x_2 + 2x_3 + 3x_4 = 3 \\ \lambda x_1 + 4x_2 + x_3 + 4x_4 = 2 \end{cases} ; (2) \begin{cases} -6x_1 + 8x_2 - 5x_3 - x_4 = 9 \\ -2x_1 + 4x_2 + 7x_3 + 3x_4 = 1 \\ -3x_1 + 5x_2 + 4x_3 + 2x_4 = 3 \\ -3x_1 + 7x_2 + 17x_3 + 7x_4 = \lambda \end{cases} .$$

4.  $A$  是  $m \times n$  矩阵,  $b$  是  $m \times 1$  矩阵. 证明线性方程组  $A^T A x = A^T b$  总有解.

5.  $A, B$  都是  $m \times n$  矩阵, 线性方程组  $AX = 0$  和  $BX = 0$  同解. 问  $A, B$  的列向量组是否等价、行向量组是否等价.

6. 证明:  $AX = 0$  有强非零解 (解向量的每个系数都不为零) 的充要条件是  $A$  的任一列向量均可表示为其余列向量的线性组合.

7. 设线性方程组  $AX = b$  中矩阵  $A$  的秩等于矩阵  $B = \begin{bmatrix} A & b \\ b^T & 0 \end{bmatrix}$  的秩. 证明该方程组有解, 并问其逆命题是否成立.

8. 设  $A, B$  是数域  $K$  上的  $n$  阶方阵,  $AX = 0, BX = 0$  分别有  $l, m$  个线性无关的解向量. 证明: (1)  $(AB)X = 0$  至少有  $\max(l, m)$  个线性无关的解向量; (2) 如果  $l + m > n$ , 那么  $(A + B)X = 0$  必有非零解; (3) 如果  $AX = 0$  和  $BX = 0$  没有公共的非零解向量, 且  $l + m = n$ , 那么  $K^n$  中的任一向量  $\alpha$  都可以唯一的分解为  $\alpha = \beta + \gamma$ , 其中  $\beta, \gamma$  分别是  $AX = 0$  和  $BX = 0$  的解向量.

9. 设  $A$  是  $n$  阶方阵, 证明: (1) 若  $A^{k-1}\alpha \neq 0, A^k\alpha = 0$ , 那么  $\alpha, A\alpha, \dots, A^{k-1}\alpha$  线性无关; (2)  $\text{rank}(A^n) = \text{rank}(A^{n+1})$ .

10. 判断方的整系数线性方程组如果模任一素数的意义下都有解, 那么它是否在整数环上有解.

11. 给定复系数线性方程组  $AX = b$ , 其中  $A$  满秩. 假设矩阵  $I + A$  的每行元素的模的和小于  $q$ , 其中  $0 < q < 1$ . 设  $X_0$  是  $\mathbb{C}^n$  中任一向量, 归纳定义  $X_{m+1} = (A + I)X_m - b$ . 证明序列  $X_m$  收敛到方程组  $AX = b$  的解.

12. 已知矩阵  $A$  的列数与矩阵  $B$  的行数相等. 记  $A$  的解空间为  $W$ ,  $B$  的列空间为  $V$ . 证明  $\text{rank}(B) = \text{rank}(AB)$  当且仅当  $V \cap W = \{0\}$ .

## 3.2 解答

1. (1) 容易得到  $\alpha_1 - \alpha_3 = (-2, 1, -2, 0)^T$ , 并求出题给定的矩阵行空间一组基是  $(1, 0, 0, 1, 0), (0, 1, 2, 3, 0), (0, 0, 0, 0, 1)$ . 考虑其前三个分量, 由能被这组基表出知  $\alpha_3 = 2\alpha_2 = (4, 2, 4, 2)^T$ ,  $\alpha_1 = (2, 3, 2, 2)^T$ , 从而  $\alpha_4 = (8, 6, 8, 3)$ . 因此

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 4 & 8 & 7 \\ 3 & 1 & 2 & 6 & 3 \\ 2 & 2 & 4 & 8 & 7 \\ 2 & 1 & 2 & 5 & 3 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

(2) 一组基为  $(1, 0, 0, 1, 0), (0, 1, 2, 3, 0), (0, 0, 0, 0, 1)$ . 考察各系数, 知当  $a = 14, b \in \mathbb{R}$  时, 该向量落在  $A$  的行空间里.

(3) 先求出  $AX = 0$  的解, 即  $(\alpha_1, \alpha_2, 2\alpha_2, \alpha_1 + 3\alpha_2, \alpha_5)X = 0$ , 其中  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_5$  线性无关. 通解为  $(t_1, 3t_1 - 2t_2, t_2, -t_1, 0)^T$ ,  $t_1, t_2 \in \mathbb{R}$  是自由变元. 因此  $AX = \beta$  的通解是  $(t_1 + 1, 3t_1 - 2t_2 + 1, t_2 - 1, -t_1, 1)^T$ , 写成解空间是  $\{t_1(1, 3, 0, -1, 0)^T + t_2(0, -2, 1, 0, 0)^T + (1, 1, -1, 0, 1)^T : t_1, t_2 \in \mathbb{R}\}$ .

2. (1) 通解是  $x_1 = 8x_3 - 7x_4, x_2 = -6x_3 + 5x_4$ , 写成解空间是  $\{k_1(8, -6, 1, 0)^T + k_2(-7, 5, 0, 1)^T : k_1, k_2 \in \mathbb{R}\}$ .

(2)  $n = 3m$  或  $3m + 1$  时只有零解.  $n = 3m + 2$  时有非零解, 通解是  $x_{3i} = 0, x_{3i+1} = -x_n, x_{3i+2} = x_n, i = 1, 2, \dots, m$ , 写成解空间是  $\{k(-1, 1, 0, -1, 1, 0, \dots, 0, -1, 1) : k \in \mathbb{R}\}$ .

3. (1) 利用高斯消元得到  $\begin{cases} 4x_1 + 5x_2 + 2x_3 + 3x_4 = 3 \\ 4x_2 + x_3 + 4x_4 = 1 \\ -3\lambda x_3 + 8\lambda x_4 = 16 - 7\lambda \end{cases}$ , 因此  $\lambda \neq 0$  时有解, 通解是  $x_1 = \frac{1}{\lambda}, x_3 = \frac{9\lambda - 16}{5\lambda} - \frac{8}{5}x_2, x_4 =$

$\frac{4-\lambda}{5\lambda} - \frac{3}{5}x_2$ , 写成解空间是  $\{k(0, 5, -8, -3)^T + \left(\frac{1}{\lambda}, 0, \frac{9\lambda-16}{5\lambda}, \frac{4-\lambda}{5\lambda}\right)^T : k \in \mathbb{R}\}$ .

(2) 利用高斯消元得到  $\begin{cases} -2x_1 + 4x_2 + 7x_3 + 3x_4 = 1 \\ -2x_2 - 13x_3 - 5x_4 = 3 \\ 0 = 2\lambda \end{cases}$ , 因此  $\lambda = 0$  时有解, 通解是  $x_1 = -\frac{1}{2}(7 + 19x_3 + 7x_4)$ ,  $x_2 =$

$-\frac{1}{2}(3 + 13x_3 + 5x_4)$ , 写成解空间是  $\{k_1(-19, -13, 2, 0)^T + k_2(-7, -5, 0, 2)^T + \left(-\frac{7}{2}, -\frac{3}{2}, 0, 0\right)^T : k_1, k_2 \in \mathbb{R}\}$ .

4. 先证明  $\text{rank}(A^T A) = \text{rank}(A)$ . 首先显然  $\text{rank}(A^T A) \leq \text{rank}(A)$ , 其次  $A^T A x = 0 \Rightarrow x^T A^T A x = 0 \Rightarrow \|Ax\|_2^2 = 0 \Rightarrow Ax = 0 \Rightarrow \text{Ker}(A^T A) \subset \text{Ker}(A) \Rightarrow \text{rank}(A^T A) \geq \text{rank}(A)$ . 接着, 由于  $\text{rank}(A^T A) \leq \text{rank}(A^T A, A^T b) \leq \text{rank}(A^T) = \text{rank}(A) = \text{rank}(A^T A)$  知系数矩阵和增广矩阵秩相等, 因此方程有解.

5. 第 1 个结论不对, 比如  $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ . 第 2 个结论对. 若解空间 0 维, 则  $A, B$  均列满秩, 也都可以通

过初等行列变换得到其简化阶梯形矩阵  $\begin{pmatrix} I_{n \times n} \\ 0_{(m-n) \times n} \end{pmatrix}$ , 因此等价. 其余情况, 设解空间  $r \geq 1$  维, 任取  $AX = 0$  的一个基础解系  $X_1, \dots, X_r$  构成  $n \times r$  矩阵  $C$ . 考虑线性方程组  $C^T X = 0$ , 其解空间维数为  $n - r = \text{rank}(A)$ . 由于  $C^T A^T = 0$ , 因此  $A$  的行空间是该解空间的一个子空间. 由于它们维数相等, 因此  $A$  的行空间就是该解空间. 同理  $B$  的行空间也是该解空间.

6. 必要性. 设  $X = (x_1, \dots, x_n)^T$  是强非零解, 则  $\alpha_i = \sum_{k \neq i} \left(-\frac{x_k}{x_i}\right) \alpha_k, \forall i = 1, \dots, n$ .

充分性. 不妨设  $\alpha_i = \sum_{k \neq i} t_{ki} \alpha_k, \forall i = 1, \dots, n$ , 则记  $T = \begin{pmatrix} 1 & -t_{12} & -t_{13} & \cdots & -t_{1,n-1} & -t_{1,n} \\ -t_{21} & 1 & -t_{23} & \cdots & -t_{2,n-1} & -t_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -t_{n-1,1} & -t_{n-1,2} & -t_{n-1,3} & \cdots & 1 & -t_{n-1,n} \\ -t_{n1} & -t_{n2} & -t_{n3} & \cdots & -t_{n,n-1} & 1 \end{pmatrix}$ , 从而

$AT = 0$ . 由于  $T$  的任一主对角元均不为零, 从而存在  $X_0$  使得  $TX_0$  每个分量都不为零, 此即该强非零解.

7. (1)  $\text{rank}(A) \leq \text{rank}(A, b) \leq \text{rank} \begin{bmatrix} A & b \\ b^T & 0 \end{bmatrix} = \text{rank}(B) = \text{rank}(A)$ , 因此每一步都取等号, 从而方程组有解.

(2) 不成立, 考虑  $\begin{cases} x_1 + 2x_2 = 1 \\ 3x_1 + 4x_2 = 3 \end{cases}$ ,  $\text{rank}(A) = 2$ , 而  $\text{rank}(B) = 3$ .

8. (1)  $n - \text{rank}(AB) \geq \max(n - \text{rank}(A), n - \text{rank}(B)) \geq \max(l, m)$ .

(2)  $\text{rank}(A + B) \leq \text{rank}(A) + \text{rank}(B) \leq n - l + n - m < n$ , 因此  $(A + B)X = 0$  必有非零解.

(3) 设  $\alpha_1, \dots, \alpha_l$  与  $\beta_1, \dots, \beta_m$  分别是  $AX = 0, BX = 0$  线性无关的解. 考虑方程  $\lambda_1 \alpha_1 + \dots + \lambda_l \alpha_l + \mu_1 \beta_1 + \dots + \mu_m \beta_m = 0$ , 则  $\lambda_1 \alpha_1 + \dots + \lambda_l \alpha_l = -\mu_1 \beta_1 - \dots - \mu_m \beta_m$  是  $AX = 0$  和  $BX = 0$  的公共解. 由题意知其必然为零向量, 又由  $\{\alpha_i\}_{i=1}^l, \{\beta_j\}_{j=1}^m$  线性无关性知  $\lambda_1 = \dots = \lambda_l = \mu_1 = \dots = \mu_m = 0$ . 因此  $\alpha_1, \dots, \alpha_l, \beta_1, \dots, \beta_m$  整体线性无关. 又由于  $l + m = n$ , 因此他们是  $K^n$  一组基, 从而任一向量都可唯一被它们线性表出, 相应的被表出的两部分也就对应了  $\beta$  和  $\gamma$ . 唯一性可由  $\alpha = \beta_1 + \gamma_1 = \beta_2 + \gamma_2 \Rightarrow \beta_1 - \beta_2 = \gamma_2 - \gamma_1$  是  $AX = 0$  和  $BX = 0$  的公共解  $\Rightarrow \beta_1 - \beta_2 = \gamma_2 - \gamma_1 = 0$  得到.

9. (1) 设  $\lambda_1 \alpha + \lambda_2 A\alpha + \dots + \lambda_k A^{k-1} \alpha = 0$ , 两边左乘  $A^{k-1}$  知  $\lambda_1 = 0$ , 再左乘  $A^{k-2}$  知  $\lambda_2 = 0$ , 以此类推知线性无关.

(2) 显然  $A^n X = 0 \Rightarrow A^{n+1} X = 0$ . 若存在  $A^{n+1} \alpha = 0$  但  $A^n \alpha \neq 0$ , 则根据 (1) 结论知  $\alpha, A\alpha, \dots, A^n \alpha$  线性无关, 这是  $n$  维空间是不可能的. 因此  $A^{n+1}$  和  $A^n$  解空间相同, 从而  $\text{rank}(A^n) = \text{rank}(A^{n+1})$ .

10. 不一定, 一个反例是  $4x = 2$ .

11. 记  $\|X\|$  为向量  $X$  元素模的最大值 ( $l_\infty$  范数). 则  $\|X_n - X_m\| = \|(A + I)X_{n-1} - (A + I)X_{m-1}\| = \|(A + I)(X_{n-1} - X_{m-1})\| < q\|X_{n-1} - X_{m-1}\|$ , 因此由 Cauchy 收敛原理知  $X_n$  在  $l_\infty$  范数意义下收敛 (有限维线性空间所有范数等价). 记极限值为  $X_\infty$ , 两边求极限知  $X_\infty = (A + I)X_\infty - b \Leftrightarrow AX_\infty = b$ .

12. 注意到  $\text{rank}(B) = \text{rank}(AB) \Leftrightarrow \text{Ker}(B) = \text{Ker}(AB)$ .

“ $\Rightarrow$ ”: 考虑  $x \in V \cap W$ , 则可设  $x = By$ . 由于  $AB y = Ax = 0$ , 因此  $y \in \text{Ker}(AB) = \text{Ker}(B) \Rightarrow By = 0 \Rightarrow x = 0$ .

“ $\Leftarrow$ ”: 显然  $\text{rank}(AB) \leq \text{rank}(B)$ . 若  $\text{rank}(AB) < \text{rank}(B)$ , 则  $\text{Ker}(AB) \neq \text{Ker}(B)$ , 即  $\exists x \in \text{Ker}(AB)$  但  $x \notin \text{Ker}(B)$ , 此时  $Bx \neq 0$ , 但是  $Bx \in V \cap W$ .

## 4 行列式 (1)

### 4.1 问题

1. 计算行列式: (1)  $\begin{vmatrix} x-2 & 2 & -2 \\ 2 & x+1 & -4 \\ -2 & -4 & x+1 \end{vmatrix}$ ; (2)  $\begin{vmatrix} 3 & 2 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 0 & 0 \\ -12 & -4 & 3 & 4 \\ 3 & x & 5 & 7 \end{vmatrix}$ .

2. 计算行列式  $\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_n \\ b_2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_3 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix}$ .

3. 计算行列式  $D_n = \begin{vmatrix} 1 & \cos \phi_1 & \cos 2\phi_1 & \cdots & \cos(n-1)\phi_1 \\ 1 & \cos \phi_2 & \cos 2\phi_2 & \cdots & \cos(n-1)\phi_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cos \phi_n & \cos 2\phi_n & \cdots & \cos(n-1)\phi_n \end{vmatrix}$ .

4. 计算行列式  $D_n = \begin{vmatrix} \alpha & \beta & & & \\ \gamma & \alpha & \beta & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & \gamma & \alpha & \beta \\ & & & \gamma & \alpha \end{vmatrix} \in \det(\mathbb{R}^{n \times n})$ , 其中  $\alpha^2 - 4\beta\gamma > 0$ .

5. (1) 计算行列式  $D_n = \begin{vmatrix} a & b & b & \cdots & b \\ c & a & b & \cdots & b \\ c & c & a & \cdots & b \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c & c & c & \cdots & a \end{vmatrix}$ ; (2) 计算行列式  $E_n = \begin{vmatrix} a_1 & b & b & \cdots & b \\ c & a_2 & b & \cdots & b \\ c & c & a_3 & \cdots & b \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c & c & c & \cdots & a_n \end{vmatrix}$ .

6. 计算行列式  $\begin{vmatrix} 1+x_1^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_1x_4 \\ x_2x_1 & 1+x_2^2 & x_2x_3 & x_2x_4 \\ x_3x_1 & x_3x_2 & 1+x_3^2 & x_3x_4 \\ x_4x_1 & x_4x_2 & x_4x_3 & 1+x_4^2 \end{vmatrix}$ .

7. 计算行列式  $\begin{vmatrix} x_1 - a_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ x_1 & x_2 - a_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ x_1 & x_2 & x_3 - a_3 & \cdots & x_n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n - a_n \end{vmatrix}$ , 其中  $a_1a_2 \cdots a_n \neq 0$ .

8. 计算行列式  $D_n = \begin{vmatrix} \cos \alpha & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 2\cos \alpha & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2\cos \alpha & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2\cos \alpha & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 2\cos \alpha \end{vmatrix} \in \det(\mathbb{R}^{n \times n})$ .



9. 计算行列式  $D_n = \begin{vmatrix} \frac{1}{a_1+b_1} & \frac{1}{a_1+b_2} & \cdots & \frac{1}{a_1+b_n} \\ \frac{1}{a_2+b_1} & \frac{1}{a_2+b_2} & \cdots & \frac{1}{a_2+b_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_n+b_1} & \frac{1}{a_n+b_2} & \cdots & \frac{1}{a_n+b_n} \end{vmatrix} \in \det(\mathbb{R}^{n \times n})$ .

## 4.2 解答

1. (1)  $\begin{vmatrix} x-2 & 2 & -2 \\ 2 & x+1 & -4 \\ -2 & -4 & x+1 \end{vmatrix} = (x-2)(x+1)^2 + 16 + 16 - 4(x+1) - 16(x-2) - 4(x+1) = x^3 - 27x + 54;$

(2)  $\begin{vmatrix} 3 & 2 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 0 & 0 \\ -12 & -4 & 3 & 4 \\ 3 & x & 5 & 7 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 5 & 3 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} 3 & 4 \\ 5 & 7 \end{vmatrix} = -1.$

2. 用第一列减去第  $i$  列的  $b_i$  倍,  $i = 2, 3, \dots, n$ , 得到

$$\begin{vmatrix} a_1 - \sum_{i=2}^n a_i b_i & a_2 & a_3 & \cdots & a_n \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix} = a_1 - \sum_{i=2}^n a_i b_i.$$

3. 由高中三角函数知识知  $\cos k\theta = 2^{k-1} \cos^k \theta + P_{k-2}(\cos \theta)$ , 其中  $P_{k-2}$  是  $k-2$  次多项式. 因此通过初等列变换有

$$D_n = 2^{\frac{(n-1)(n-2)}{2}} \begin{vmatrix} 1 & \cos \phi_1 & \cos^2 \phi_1 & \cdots & \cos^{n-1} \phi_1 \\ 1 & \cos \phi_2 & \cos^2 \phi_2 & \cdots & \cos^{n-1} \phi_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cos \phi_n & \cos^2 \phi_n & \cdots & \cos^{n-1} \phi_n \end{vmatrix} = 2^{\frac{(n-1)(n-2)}{2}} \prod_{1 \leq j < i \leq n} (\cos \phi_i - \cos \phi_j).$$

4. 若  $\beta\gamma = 0$ , 则行列式为  $\alpha^n$ . 对于一般情形, 按第一行展开得到  $D_n = \alpha D_{n-1} - \beta\gamma D_{n-2}$ , 且有初值条件  $D_1 = \alpha, D_2 = \alpha^2 - \beta\gamma$ , 然后用数列的特征值和特征公式设  $D_n = A \left( \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta\gamma}}{2} \right)^n + B \left( \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4\beta\gamma}}{2} \right)^n$ , 代入  $n = 1, 2$  解出  $A$  和  $B$ , 得到  $D_n = \frac{(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta\gamma})^{n+1} - (\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4\beta\gamma})^{n+1}}{2^{n+1} \sqrt{\alpha^2 - 4\beta\gamma}}$ .

5. (1) 用倒数第一行减去倒数第二行, 然后用倒数第二行减去倒数第三行, 以此类推, 得到

$$D_n = \begin{vmatrix} a & b & b & \cdots & b & b \\ c-a & a-b & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & c-a & a-b & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c-a & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & c-a & a-b \end{vmatrix}.$$

按最后一列展开, 知  $D_n = b(-1)^{n+1}(c-a)^{n-1} + (a-b)D_{n-1}$ . 初始条件是  $D_1 = a$ , 因此知  $D_n = \frac{b(a-c)^n - c(a-b)^n}{b-c}$ .

(2) 按第  $n$  列拆项, 得  $E_n = \begin{vmatrix} a_1 & b & b & \cdots & b+0 \\ c & a_2 & b & \cdots & b+0 \\ c & c & a_3 & \cdots & b+0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c & c & c & \cdots & b+(a_n-b) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & b & b & \cdots & b \\ c & a_2 & b & \cdots & b \\ c & c & a_3 & \cdots & b \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c & c & c & \cdots & b \end{vmatrix} + (a_n - b)E_{n-1} = b(a_1 - c)(a_2 -$

$c) \cdots (a_{n-1} - c) + (a_n - b)E_{n-1}$ ; 按第  $n$  列拆项 (或由对称性), 得  $E_n = c(a_1 - b)(a_2 - b) \cdots (a_{n-1} - b) + (a_n - c)E_{n-1}$ .  
两式联立得  $E_n = \frac{bf(c) - cf(b)}{b - c}$ , 其中  $f(x) = (a_1 - x)(a_2 - x) \cdots (a_n - x)$ .

$$6. \text{ 法 1(拆项法): } \begin{vmatrix} 1+x_1^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_1x_4 \\ x_2x_1 & 1+x_2^2 & x_2x_3 & x_2x_4 \\ x_3x_1 & x_3x_2 & 1+x_3^2 & x_3x_4 \\ x_4x_1 & x_4x_2 & x_4x_3 & 1+x_4^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1+x_1^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_1x_4 \\ 0+x_2x_1 & 1+x_2^2 & x_2x_3 & x_2x_4 \\ 0+x_3x_1 & x_3x_2 & 1+x_3^2 & x_3x_4 \\ 0+x_4x_1 & x_4x_2 & x_4x_3 & 1+x_4^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_1x_4 \\ 0 & 1+x_2^2 & x_2x_3 & x_2x_4 \\ 0 & x_3x_2 & 1+x_3^2 & x_3x_4 \\ 0 & x_4x_2 & x_4x_3 & 1+x_4^2 \end{vmatrix} +$$

$$\begin{vmatrix} x_1^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_1x_4 \\ x_2x_1 & 1+x_2^2 & x_2x_3 & x_2x_4 \\ x_3x_1 & x_3x_2 & 1+x_3^2 & x_3x_4 \\ x_4x_1 & x_4x_2 & x_4x_3 & 1+x_4^2 \end{vmatrix}, \text{ 然后再依次拆第 2、3、4 列, 只需注意到若两列成比例则行列式为 0, 因此最后只剩下五}$$

$$\text{项: } \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} x_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ x_2x_1 & 1 & 0 & 0 \\ x_3x_1 & 0 & 1 & 0 \\ x_4x_1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 1 & x_1x_2 & 0 & 0 \\ 0 & x_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & x_3x_2 & 1 & 0 \\ 0 & x_4x_2 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 1 & 0 & x_3x_1 & 0 \\ 0 & 1 & x_3x_2 & 0 \\ 0 & 0 & x_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & x_3x_4 & 1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x_4x_1 \\ 0 & 1 & 0 & x_4x_2 \\ 0 & 0 & 1 & x_4x_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_4^2 \end{vmatrix}, \text{ 原行列式是 } 1+x_1^2+x_2^2+x_3^2+x_4^2.$$

$$\text{法 2(加边法): } \begin{vmatrix} 1+x_1^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_1x_4 \\ x_2x_1 & 1+x_2^2 & x_2x_3 & x_2x_4 \\ x_3x_1 & x_3x_2 & 1+x_3^2 & x_3x_4 \\ x_4x_1 & x_4x_2 & x_4x_3 & 1+x_4^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ 0 & 1+x_1^2 & x_1x_2 & x_1x_3 & x_1x_4 \\ 0 & x_2x_1 & 1+x_2^2 & x_2x_3 & x_2x_4 \\ 0 & x_3x_1 & x_3x_2 & 1+x_3^2 & x_3x_4 \\ 0 & x_4x_1 & x_4x_2 & x_4x_3 & 1+x_4^2 \end{vmatrix}, \text{ 然后用第 } i+1 \text{ 行减去第 1 行}$$

$$\text{的 } x_i \text{ 倍, } i=1,2,3,4, \text{ 得到 } \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -x_2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -x_3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1+x_1^2+x_2^2+x_3^2+x_4^2.$$

$$7. \text{ 采用第 6 题的法 1(拆项法), 最后剩下 } n+1 \text{ 项: } \begin{vmatrix} -a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -a_n \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} x_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ x_1 & -a_2 & 0 & \cdots & 0 \\ x_1 & 0 & -a_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1 & 0 & 0 & \cdots & -a_n \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} -a_1 & x_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x_2 & -a_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & x_2 & 0 & \cdots & -a_n \end{vmatrix}, \cdots, \text{ 它们分别是 } (-1)^n a_1 a_2 \cdots a_n, (-1)^{n-1} x_1 a_2 \cdots a_n, (-1)^{n-1} a_1 x_2 \cdots a_n, \cdots, \text{ 整理得到原}$$

$$\text{行列式为 } (-1)^{n-1} a_1 a_2 \cdots a_n \left[ \left( \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{a_i} \right) - 1 \right].$$

8. 先计算  $n=1$  时,  $D_1 = \cos \alpha$ ;  $n=2$  时,  $D_2 = \cos 2\alpha$ ; 因此可以猜测  $D_n = \cos n\alpha$ . 然后用数学归纳法, 对第一行展开得到  $D_{n+1} = 2 \cos \alpha D_n - D_{n-1} = \cos(n+1)\alpha$ , 知该假设成立.

9. 法 1: 将第 1 行至第  $n-1$  行减去第  $n$  行, 并提出各行和各列公因子, 得

$$D_n = \frac{\prod_{i=1}^{n-1} (a_n - a_i)}{\prod_{j=1}^n (a_n + b_j)} \begin{vmatrix} \frac{1}{a_1 + b_1} & \frac{1}{a_1 + b_2} & \cdots & \frac{1}{a_1 + b_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \frac{1}{a_{n-1} + b_1} & \frac{1}{a_{n-1} + b_2} & \cdots & \frac{1}{a_{n-1} + b_n} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{vmatrix};$$

再将第 1 列至第  $n-1$  列减去第  $n$  列, 并提出各行和各列的公因子, 得

$$D_n = \frac{\prod_{i=1}^{n-1}(a_n - a_i) \prod_{j=1}^{n-1}(b_n - b_j)}{\prod_{j=1}^n(a_n + b_j) \prod_{i=1}^{n-1}(a_i + b_n)} \begin{vmatrix} \frac{1}{a_1 + b_1} & \cdots & \frac{1}{a_1 + b_{n-1}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{n-1} + b_1} & \cdots & \frac{1}{a_{n-1} + b_{n-1}} & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

按第  $n$  行展开得到递推式  $D_n = \frac{\prod_{i=1}^{n-1}(a_n - a_i) \prod_{j=1}^{n-1}(b_n - b_j)}{\prod_{j=1}^n(a_n + b_j) \prod_{i=1}^{n-1}(a_i + b_n)} D_{n-1}$ , 并直接计算出  $D_2$ , 得

$$D_n = \frac{\prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j)(b_i - b_j)}{\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (a_i + b_j)}.$$

法 2: 若  $a_i = a_j$  或  $b_i = b_j (i \neq j)$ , 即两行 (或两列) 相同, 则  $D_n = 0$ . 因此  $D_n$  含有因子  $\prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j)(b_i - b_j)$ . 将

$D_n$  的每一行的公分母都作为公因子提到行列式符号之外, 得  $D_n = \frac{1}{\prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^n (a_i + b_j)} D'_n$ . 显然  $D'_n$  也含有上述因子.

另一方面, 由于  $D'_n$  的  $(i, j)$  元为  $\prod_{k \neq j} (a_i + b_k)$ , 所以每一个  $a_i$  在  $D'_n$  的展开式中的次数均为  $n-1$ , 因此可设  $D_n =$

$\lambda \prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j)(b_i - b_j)$ . 为确定常数  $\lambda$ , 我们不妨令  $a_i = -b_i, i = 1, 2, \dots, n$ . 此时  $D'_n$  为对角行列式, 且  $D_n = \prod_{i \neq j} (a_i - a_j) = \prod_{1 \leq j < i \leq n} (a_i - a_j)(b_i - b_j) \Rightarrow \lambda = 1$ . 因此可得一样的结果.

## 5 行列式 (2)

### 5.1 问题

1. 当  $\lambda$  为何值时, 线性方程组  $\begin{cases} 2x_1 - 3x_2 = 7 \\ 5x_1 + (4 + \lambda)x_2 = 6 \end{cases}$  有唯一解, 此时用 Cramer 法则求解之.

2. 设  $f(x)$  是复系数一元多项式, 且对于任意整数  $n$  有  $f(n)$  仍是整数. 证明或否定: (1)  $f(x)$  系数都是有理数; (2)  $f(x)$  系数都是整数.

3. 设数域  $K$  上  $m \times n$  矩阵  $H$  的列向量为  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ . 证明:  $H$  的任意  $s (s \leq \min(m, n))$  都线性无关当且仅当齐次线性方程组  $HX = 0$  的任一非零解的非零分量数目大于  $s$ .

4. 设  $n \geq 3, f_1, f_2, \dots, f_n$  是次数  $\leq n-2$  的多项式, 证明: 对  $\forall a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ , 行列式  $\begin{vmatrix} f_1(a_1) & f_2(a_2) & \cdots & f_n(a_1) \\ f_1(a_2) & f_2(a_2) & \cdots & f_n(a_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(a_n) & f_2(a_n) & \cdots & f_n(a_n) \end{vmatrix} \equiv 0$ , 并举例说明条件“次数  $\leq n-2$ ”不可去.

5. 设  $\alpha_1, \dots, \alpha_r$  与  $\beta_1, \dots, \beta_r$  是  $\mathbb{R}^n$  中的两个向量组, 其中  $\beta_1, \dots, \beta_r$  线性无关. 证明存在无穷多个实数  $k$ , 使得向量组  $\alpha_1 + k\beta_1, \dots, \alpha_r + k\beta_r$  线性无关.

6. 计算行列式  $D_n = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n \\ n & 1 & 2 & \cdots & n-1 \\ n-1 & n & 1 & \cdots & n-2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2 & 3 & 4 & \cdots & 1 \end{vmatrix}$ . 你能求出行列式  $E_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_n \\ a_n & a_1 & a_2 & \cdots & a_{n-1} \\ a_{n-1} & a_n & a_1 & \cdots & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_2 & a_3 & a_4 & \cdots & a_1 \end{vmatrix}$  的通式吗?

7. 计算行列式  $D_1 = \begin{vmatrix} 0 & a & b & c \\ -a & 0 & d & e \\ -b & -d & 0 & f \\ -c & -e & -f & 0 \end{vmatrix}$  和  $D_2 = \begin{vmatrix} 0 & 741 & 886 & 114 & 514 \\ -741 & 0 & 1919 & 810 & 2002 \\ -886 & -1919 & 0 & 520 & 1314 \\ -114 & -810 & -520 & 0 & 220 \\ -514 & -2002 & -1314 & -220 & 0 \end{vmatrix}$ .

8. 若矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  满足  $|a_{ii}| > \sum_{j \neq i} |a_{ij}|, \forall 1 \leq i \leq n$ , 则称  $A$  是主对角占优矩阵. 证明若  $a_{ii} > 0, \forall 1 \leq i \leq n$ , 则  $\det(A) > 0$ .

9. 设矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  满足 (1)  $a_{ii} > 0, \forall 1 \leq i \leq n$ ; (2)  $a_{ij} < 0, \forall 1 \leq i \neq j \leq n$ ; (3)  $\sum_{i=1}^n a_{ij} = 0, \forall 1 \leq j \leq n$ . 求矩阵  $A$  的秩.

10. 计算矩阵  $A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 & 6 & 3 \\ 2 & 2 & 4 & 8 & 7 \\ 2 & 2 & 4 & 8 & 7 \\ 2 & 1 & 2 & 5 & 3 \end{pmatrix}$  的秩  $r$ , 并计算其  $r$  阶非零子式的个数.

11. 试确定所有 3 阶 (0, 1) 行列式 (即所有元素只能是 0 或 1) 的最大值, 并给出证明和取到最大值的一个构造.

12. 设  $W$  是矩阵空间  $M_n(K)$  的一个子空间. 证明: 若  $\dim(W) \geq n^2 - n + 1$ , 则  $W$  中至少包含一个满秩的矩阵.

## 5.2 解答

1. 由 Cramer 法则,  $\begin{vmatrix} 2 & -3 \\ 5 & 4 + \lambda \end{vmatrix} \neq 0 \Leftrightarrow \lambda \neq -\frac{23}{2}$  时有唯一解.  $x_1 = \frac{\begin{vmatrix} 7 & -3 \\ 6 & 4 + \lambda \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2 & -3 \\ 5 & 4 + \lambda \end{vmatrix}} = \frac{7\lambda + 46}{2\lambda + 23}, x_2 = \frac{\begin{vmatrix} 2 & 7 \\ 5 & 6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2 & -3 \\ 5 & 4 + \lambda \end{vmatrix}} = \frac{-23}{2\lambda + 23}.$

2. (1) 设  $f(x) = a_0 + a_1x + \cdots + a_mx^m (a_m \neq 0)$ . 取  $x_k = k$  代入, 得到线性方程组 
$$\begin{cases} a_0 + a_1x_0 + \cdots + a_mx_0^m = f(x_0), \\ a_0 + a_1x_1 + \cdots + a_mx_1^m = f(x_1), \\ \cdots \\ a_0 + a_1x_m + \cdots + a_mx_m^m = f(x_m). \end{cases},$$

其系数行列式是 Vandermonde 行列式不为 0, 因此由 Cramer 法则其有唯一解  $a_i = \frac{D_i}{D}, i = 0, 1, \cdots, m$ . 由于  $D_i$  的元素均为整数, 因此  $a_i$  是有理数. (2) 结论不对, 反例是  $f(x) = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}x$ .

3. 必要性. 若存在非零解  $(0, \cdots, 0, c_{i_1}, 0, \cdots, 0, c_{i_l}, 0, \cdots, 0)$ , 其中  $c_{i_1}, \cdots, c_{i_l}$  不全为 0 且  $l \leq s$ , 则意味着  $c_{i_1}\alpha_{i_1} + \cdots + c_{i_l}\alpha_{i_l} = 0$ , 从而他们线性相关, 矛盾.

充分性. 若存在  $l (l \leq s)$  列  $\alpha_{i_1}, \cdots, \alpha_{i_l}$  线性相关, 即存在不全为 0 的数  $c_{i_1}, \cdots, c_{i_l}$  使得  $c_{i_1}\alpha_{i_1} + \cdots + c_{i_l}\alpha_{i_l} = 0$ , 则  $(0, \cdots, 0, c_{i_1}, 0, \cdots, 0, c_{i_l}, 0, \cdots, 0)$  是一个非零分量数不大于  $s$  的非零解, 矛盾.

4. 不妨设  $a_1, a_2, \cdots, a_n$  互不相同. 考虑  $F(x) = \begin{vmatrix} f_1(x) & f_2(x) & \cdots & f_n(x) \\ f_1(a_2) & f_2(a_2) & \cdots & f_n(a_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(a_n) & f_2(a_n) & \cdots & f_n(a_n) \end{vmatrix}$ , 这是一个至多  $n-2$  次多项式, 有至少

$a_2, a_3, \cdots, a_n$  这  $n-1$  个不同的根, 因此必恒等于 0. 若删去条件“次数  $\leq n-2$ ”, 则可令  $f_k(x) = x^{k-1}$ , 此时原行列式构成 Vandermonde 行列式, 只要  $a_1, a_2, \cdots, a_n$  两两不同就不为 0.

5. 将  $\beta_1, \cdots, \beta_r$  扩充为  $\mathbb{R}^n$  的一组基  $\beta_1, \cdots, \beta_n$ , 并任意选择  $n-r$  个向量  $\alpha_{r+1}, \cdots, \alpha_n$ . 行列式  $|(\alpha_1 + k\beta_1, \cdots, \alpha_n + k\beta_n)|$  是一个关于  $k$  的至多  $n$  次多项式, 其等于零至多只有  $n$  个解 (令  $k \rightarrow \infty$  知此多项式不恒为零), 且在该行列式不等于零时  $\alpha_1 + k\beta_1, \cdots, \alpha_r + k\beta_r$  线性无关, 因此存在无穷多个实数  $k$ .

6. 把后  $n-1$  列加到第一列, 提出公因子  $\frac{1}{2}n(n+1)$ , 用第 (1, 1) 元消去同列其他元素, 再按第一列展开得到  $n-1$  阶行列式:

$$D_n = \frac{1}{2}n(n+1) \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n-1 & n \\ 1 & 1 & 2 & \cdots & n-2 & n-1 \\ 1 & n & 1 & \cdots & n-3 & n-2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 4 & 5 & \cdots & 1 & 2 \\ 1 & 3 & 4 & \cdots & n & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{2}n(n+1) \begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & \cdots & n-1 & n \\ 0 & -1 & -1 & \cdots & -1 & -1 \\ 0 & n-2 & -2 & \cdots & -2 & -2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 2 & 2 & \cdots & 2-n & 2-n \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1-n \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{2}n(n+1) \begin{vmatrix} -1 & -1 & \cdots & -1 & -1 \\ n-2 & -2 & \cdots & -2 & -2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 2 & 2 & \cdots & 2-n & 2-n \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1-n \end{vmatrix}.$$

用所得  $n-1$  阶行列式的第  $(1,1)$  元消去同行的其他元素, 再按第一行展开得到  $n-2$  阶上三角行列式:

$$D_n = \frac{1}{2}n(n+1) \begin{vmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ n-2 & -n & \cdots & -n & -n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 2 & 0 & \cdots & -n & -n \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -n \end{vmatrix} = -\frac{1}{2}n(n+1) \begin{vmatrix} -n & \cdots & -n & -n \\ & \ddots & \vdots & \vdots \\ & & -n & -n \\ & & & -n \end{vmatrix} = (-1)^{n-1} \frac{n+1}{2} n^{n-1}.$$

7. 前者是偶数阶斜对称矩阵. 若  $a=0$ . 则按第 1、2 行展开, 得到  $D_1 = (-1)^{1+2+3+4} \begin{vmatrix} b & c \\ d & e \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} -b & -d \\ -c & -e \end{vmatrix} = (be - cd)^2$ .

若  $a \neq 0$ , 则将第 1 行的  $\frac{d}{a}$  倍和第 2 行的  $\frac{b}{a}$  倍加到第 3 行上, 将第 1 行的  $\frac{e}{a}$  倍和第 2 行的  $\frac{c}{a}$  倍加到第 4 行上, 得到

$$D_2 = \begin{vmatrix} 0 & a & b & c \\ -a & 0 & d & e \\ 0 & 0 & 0 & f + \frac{cd}{a} - \frac{be}{a} \\ 0 & 0 & -f + \frac{be}{a} - \frac{cd}{a} & 0 \end{vmatrix}. \text{ 然后按第 1、2 行展开, 得到 } D_1 = (af - be + cd)^2.$$

后者是奇数阶斜对称矩阵, 因此行列式为  $D_2 = 0$  (因为  $|M_2| = |M_2^T| = |-M_2| = (-1)^{2k+1}|M_2| \Rightarrow |M_2| = 0$ ).

8. 我们已经知道主对角占优矩阵满秩. 考虑函数  $A(t) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12}t & a_{13}t & \cdots & a_{1n}t \\ a_{21}t & a_{22} & a_{23}t & \cdots & a_{2n}t \\ a_{31}t & a_{32}t & a_{33} & \cdots & a_{3n}t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}t & a_{n2}t & a_{n3}t & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$ . 那么任意  $t \in [0, 1]$ ,  $A(t)$  都

是主对角阵占优矩阵, 因此  $\det(A(t)) \neq 0$ . 由于  $\det(A(0)) > 0$ , 由函数连续性知  $\det(A(1)) > 0$ , 此即原命题.

9. 首先由条件 (3) 知  $|A| = 0$ , 因此  $\text{rank}(A) \leq n-1$ . 其次考虑  $A$  中元素  $a_{11}$  的余子式  $M_{11}$ , 由条件 (1)(2) 知其严格主对角占优, 因此  $M_{11} > 0$ . 这意味着  $\text{rank}(A) = n-1$ .

10. 先求出其行简化阶梯矩阵  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$  知其秩为 3, 且有 5 个列极大线性无关组 (第 5 列必选, 第 2 列、第 3 列至多选一个, 其余随意); 观察原矩阵易知有 2 个行极大无关组 (第 2 行、第 3 行至多选一个, 其余随意); 因此有  $2 \times 5 = 10$  个 3 阶非零子式.

11. 按第 1 行展开, 得到  $D = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + a_{12} \begin{vmatrix} a_{23} & a_{21} \\ a_{33} & a_{31} \end{vmatrix} + a_{13} \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} \leq 3$ . 下面证明  $D \neq 3$ . 若不然, 则必有

$$a_{11} = a_{12} = a_{13} = 1, \text{ 且 } \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{23} & a_{21} \\ a_{33} & a_{31} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} = 1. \text{ 前两个行列式为 1 可以得到 } a_{22} = a_{33} = 1, a_{23} =$$

$$a_{31} = 1, \text{ 而此时 } \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix} = a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31} = a_{21}a_{32} - 1 \leq 0, \text{ 矛盾. 因此 } D \leq 2, \text{ 一个构造是 } \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 2.$$

12. 将  $M_n(K)$  的矩阵平铺开看成是  $n^2$  维的行向量, 并取该子空间的一组基  $A_1, \dots, A_r$ . 把这  $r$  个行向量在  $\text{axis} = 0$  方向拼成  $r \times n^2$  的矩阵, 并可得到其简化阶梯型矩阵  $J$ . 注意到  $J$  的行向量  $B_1, \dots, B_r$  也是该子空间的一组基, 这组基的线性组合能使得矩阵在某  $r$  个位置取到任意的值. 下面用归纳法证明: 任取  $n \times n$  矩阵  $A$  中的  $n^2 - n + 1$  个位置,

我们总可以在这些位置填上 0 或 1, 使得不管矩阵  $A$  其余的  $n - 1$  个位置填什么数,  $A$  的行列式总为  $\pm 1$ . 假设命题对  $n - 1$  级的方阵成立, 考察  $n$  阶方阵. 由抽屉原理, 总有一行 (不妨设是第  $i$  行), 该行的  $n$  个元素都可任意填选. 再选一列 (不妨设是第  $j$  列), 该列中存在某个位置不能任意填选. 取  $(i, j)$  元为 1,  $(i, \neq j)$  元为 0, 那么在  $(i, j)$  元的余子式中最多只有  $n - 2$  个元素不能任选, 由归纳假设知总可在子阵中能任意填选的地方填上 0 或 1, 使得  $(i, j)$  元的余子式取  $\pm 1$ . 在此填法下,  $n$  阶方阵  $A$  的行列式是  $(i, j)$  元的代数余子式, 即  $\pm 1$ . 由数学归纳法知命题得证.

## 6 致谢

感谢北京大学数学科学学院的高峡老师、王福正老师和田青春老师, 他们教会了笔者高等代数的基本知识, 他们的讲义也成为了笔者的重要参考. 感谢选修 2025 秋高等代数 I 习题课 6 班的全体同学, 他们提供了很多有意思的做法和反馈.