第 1 章 d：克莱姆法则

数学系　　梁卓滨

2020-2019 学年 I

记号

对n元线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

记号

对n元线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

记号

对n元线性方程组
$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

称 $D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$ 为 **系数行列式**

记号

对n元线性方程组
$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

称 $D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$为 **系数行列式**

$$\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & a_{1,j} & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & a_{2,j} & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & a_{n,j} & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

记号

对n元线性方程组 $\begin{cases} a_{11}x_1+a_{12}x_2+\cdots+a_{1n}x_n=b_1 \\ a_{21}x_1+a_{22}x_2+\cdots+a_{2n}x_n=b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1+a_{n2}x_2+\cdots+a_{nn}x_n=b_n \end{cases}$

称 $D=\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$为 **系数行列式**

$$\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & b_1 & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & b_2 & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & b_n & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

记号

对n元线性方程组
$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

称 $D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$ 为**系数行列式**

令 $D_j = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & b_1 & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & b_2 & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & b_n & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}$

克莱姆法则

定理（克莱姆法则） 线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

当系数行列式 $D \neq 0$ 时，方程具有唯一解：

克莱姆法则

定理（克莱姆法则） 线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

当系数行列式 $D \neq 0$ 时，方程具有唯一解：

$$x_1 = \frac{D_1}{D}, \quad x_2 = \frac{D_2}{D}, \quad \ldots, \quad x_n = \frac{D_n}{D}$$

克莱姆法则

定理（克莱姆法则） 线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

当系数行列式 $D \neq 0$ 时，方程具有唯一解：

$$x_1 = \frac{D_1}{D}, \quad x_2 = \frac{D_2}{D}, \quad \ldots, \quad x_n = \frac{D_n}{D}$$

注 1 两个前提：**(1)** 未知元个数 = 方程个数；**(2)** 系数行列式 $D \neq 0$

克莱姆法则

定理（克莱姆法则） 线性方程组

$$
\begin{cases}
a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\
a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\
\vdots \\
a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n
\end{cases}
$$

当系数行列式 $D \neq 0$ 时，方程具有唯一解：

$$
x_1 = \frac{D_1}{D}, \quad x_2 = \frac{D_2}{D}, \quad \ldots, \quad x_n = \frac{D_n}{D}
$$

注 1 两个前提：**(1)** 未知元个数 = 方程个数；**(2)** 系数行列式 $D \neq 0$

注 2 若 $D = 0$，则方程或者无解、或者有无穷多解（以后详说）

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & b_1 & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & b_2 & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & b_n & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & a_{1j} & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & a_{2j} & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & a_{nj} & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{\qquad}{D}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & b_1 & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & b_2 & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & b_n & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & a_{1j} & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & a_{2j} & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & a_{nj} & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1 \qquad + b_2 \qquad + \cdots + b_n}{D}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & b_1 & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & b_2 & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & b_n & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & a_{1j} & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & a_{2j} & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & a_{nj} & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1 A_{1j} + b_2 \quad + \cdots + b_n}{D}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_n}{D}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D}$$

$$\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & b_1 & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & b_2 & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & b_n & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & a_{1j} & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & a_{2j} & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & a_{nj} & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n =$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & b_1 & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & b_2 & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & b_n & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j-1} & a_{1j} & a_{1j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j-1} & a_{2j} & a_{2j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj-1} & a_{nj} & a_{nj+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}\right)$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij}$$

$$b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1 A_{1j} + b_2 A_{2j} + \cdots + b_n A_{nj}}{D} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj} b_i A_{ij}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{kj} b_i A_{ij} \qquad b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij}$$

$$= \qquad \sum_{j=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij} \qquad\qquad b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1 A_{1j} + b_2 A_{2j} + \cdots + b_n A_{nj}}{D} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij}$$

$$= \qquad \sum_{j=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij} = \qquad b_i\sum_{j=1}^{n} a_{kj}A_{ij} \qquad\qquad b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij} = \qquad b_i\sum_{j=1}^{n} a_{kj}A_{ij} \qquad\qquad b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1 A_{1j} + b_2 A_{2j} + \cdots + b_n A_{nj}}{D} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj} b_i A_{ij}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{kj} b_i A_{ij} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i \sum_{j=1}^{n} a_{kj} A_{ij} \qquad b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1 A_{1j} + b_2 A_{2j} + \cdots + b_n A_{nj}}{D}$$

$$= \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1} x_1 + \cdots + a_{kn} x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj} x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj} \left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} b_i A_{ij} \right) = \frac{1}{D} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} a_{kj} b_i A_{ij}$$

$$= \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_{kj} b_i A_{ij} = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n} b_i \sum_{j=1}^{n} a_{kj} A_{ij} \qquad b_k \sum_{j=1}^{n} a_{kj} A_{kj} \qquad b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i \sum_{j=1}^{n} a_{kj}A_{ij} = \frac{1}{D}\cdot b_k \sum_{j=1}^{n} a_{kj}A_{kj} \qquad b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i\sum_{j=1}^{n} a_{kj}A_{ij} = \frac{1}{D}\cdot b_k\sum_{j=1}^{n} a_{kj}A_{kj} = \frac{1}{D}\cdot b_kD \quad b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

克莱姆法则证明

1.（存在性） 验证 $x_j = \frac{D_j}{D}$ 是解：

$$x_j = \frac{D_j}{D} = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & b_1 & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & b_2 & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & b_n & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1\,j-1} & a_{1j} & a_{1\,j+1} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2\,j-1} & a_{2j} & a_{2\,j+1} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{n\,j-1} & a_{nj} & a_{n\,j+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}} = \frac{b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj}}{D} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}$$

验证第 k 条方程成立（$k = 1, 2, \cdots, n$）：

$$a_{k1}x_1 + \cdots + a_{kn}x_n = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}x_j = \sum_{j=1}^{n} a_{kj}\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_iA_{ij}\right) = \frac{1}{D}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij}$$

$$= \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{kj}b_iA_{ij} = \frac{1}{D}\sum_{i=1}^{n} b_i\sum_{j=1}^{n} a_{kj}A_{ij} = \frac{1}{D}\cdot b_k\sum_{j=1}^{n} a_{kj}A_{kj} = \frac{1}{D}\cdot b_kD = b_k$$

2.（唯一性） 前一节已证明：若方程有解，则 $x_j = \frac{D_j}{D}$。

下面举例说明系数行列式 $D = 0$ 时，则方程有无穷多解或无解

下面举例说明系数行列式 $D=0$ 时，则方程有无穷多解或无解

- $\begin{cases} x+y=1 \\ x+y=1 \end{cases}$

- $\begin{cases} x+y=1 \\ x+y=0 \end{cases}$

这两个方程组的系数行列式 $D=\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}=0$。

下面举例说明系数行列式 $D = 0$ 时，则方程有无穷多解或无解

- $\begin{cases} x + y = 1 \\ x + y = 1 \end{cases}$，实质上只有一条方程 $x + y = 1$，显然有无穷多解。

- $\begin{cases} x + y = 1 \\ x + y = 0 \end{cases}$

这两个方程组的系数行列式 $D = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 0$。

下面举例说明系数行列式 $D=0$ 时，则方程有无穷多解或无解

- $\begin{cases} x+y=1 \\ x+y=1 \end{cases}$，实质上只有一条方程 $x+y=1$，显然有无穷多解。

- $\begin{cases} x+y=1 \\ x+y=0 \end{cases}$，方程组包含矛盾方程，显然无解。

这两个方程组的系数行列式 $D=\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}=0$。

下面举例说明系数行列式 $D=0$ 时，则方程有无穷多解或无解

- $\begin{cases} x+y=1 \\ x+y=1 \end{cases}$，实质上只有一条方程 $x+y=1$，显然有无穷多解。
  平行相交直线
- $\begin{cases} x+y=1 \\ x+y=0 \end{cases}$，方程组包含矛盾方程，显然无解。
  平行不交直线

这两个方程组的系数行列式 $D=\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}=0$。

例 解线性方程组

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 - x_3 = 1 \\ 3x_1 - x_2 - x_3 = -2 \\ -x_1 + 2x_2 + x_3 = 6 \end{cases}$$

练习 解线性方程组

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 90 \\ x_2 + x_3 = 86 \\ x_1 + x_3 = 80 \end{cases}$$

例 解线性方程组

$$\begin{cases} 2x_1 + \quad x_2 - x_3 = 1 \\ 3x_1 - \quad x_2 - x_3 = -2 \\ -x_1 + 2x_2 + x_3 = 6 \end{cases}$$

提示 $D = -5$, $D_1 = -5$, $D_2 = -10$, $D_3 = -15$

练习 解线性方程组

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 90 \\ x_2 + x_3 = 86 \\ x_1 + x_3 = 80 \end{cases}$$

例 解线性方程组

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 - x_3 = 1 \\ 3x_1 - x_2 - x_3 = -2 \\ -x_1 + 2x_2 + x_3 = 6 \end{cases}$$

提示 $D = -5,\ D_1 = -5,\ D_2 = -10,\ D_3 = -15$

练习 解线性方程组

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 90 \\ x_2 + x_3 = 86 \\ x_1 + x_3 = 80 \end{cases}$$

提示 $D = 2,\ D_1 = 84,\ D_2 = 96,\ D_3 = 76$

齐次线性方程组

定理 **齐次线性方程组**

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = 0 \end{cases}$$

成立：

- 系数行列式 $D \neq 0 \Leftrightarrow$ 方程组仅有零解（$x_1 = x_2 = \cdots = x_n = 0$）。
- 系数行列式 $D = 0 \Leftrightarrow$ 方程组有无穷多的解。

齐次线性方程组

定理 齐次线性方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = 0 \end{cases}$$

成立：

- 系数行列式 $D \neq 0 \Leftrightarrow$ 方程组仅有零解（$x_1 = x_2 = \cdots = x_n = 0$）。
- 系数行列式 $D = 0 \Leftrightarrow$ 方程组有无穷多的解。

证明 回忆线性方程组的解只有 3 种情况：

唯一解、无穷多解、无解

齐次线性方程组

定理 **齐次线性方程组**

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = 0 \end{cases}$$

成立：

- 系数行列式 $D \neq 0 \Leftrightarrow$ 方程组仅有零解（$x_1 = x_2 = \cdots = x_n = 0$）。
- 系数行列式 $D = 0 \Leftrightarrow$ 方程组有无穷多的解。

证明 回忆线性方程组的解只有 3 种情况：

唯一解、无穷多解、无解

齐次线性方程组

定理 **齐次线性方程组**

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = 0 \end{cases}$$

成立：

- 系数行列式 $D \neq 0 \Leftrightarrow$ 方程组仅有零解（$x_1 = x_2 = \cdots = x_n = 0$）。
- 系数行列式 $D = 0 \Leftrightarrow$ 方程组有无穷多的解。

证明 回忆线性方程组的解只有 3 种情况：

$D \neq 0$ $\boxed{\text{唯一解}}$、$\boxed{\text{无穷多解、无解}}$ $D = 0$

齐次线性方程组

定理 **齐次线性方程组**

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = 0 \end{cases}$$

成立：

- 系数行列式 $D \neq 0 \Leftrightarrow$ 方程组仅有零解（$x_1 = x_2 = \cdots = x_n = 0$）。
- 系数行列式 $D = 0 \Leftrightarrow$ 方程组有无穷多的解。

证明 回忆线性方程组的解只有 3 种情况：

$D \neq 0$ 唯一解、无穷多解、无解 $D = 0$

由于 $x_1 = x_2 = \cdots = x_n = 0$ 总是方程组的解，不可能出现“无解”情况。所以结论成立。

例子

例 齐次方程组 $\begin{cases} x_1 - 2x_2 = 0 \\ 2x_1 - 4x_2 = 0 \end{cases}$ 的系数矩阵 $D = \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 2 & -4 \end{vmatrix}$

例子

例 齐次方程组 $\begin{cases} x_1 - 2x_2 = 0 \\ 2x_1 - 4x_2 = 0 \end{cases}$ 的系数矩阵 $D = \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 2 & -4 \end{vmatrix} = 0$

例子

例 齐次方程组 $\begin{cases} x_1 - 2x_2 = 0 \\ 2x_1 - 4x_2 = 0 \end{cases}$ 的系数矩阵 $D = \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 2 & -4 \end{vmatrix} = 0$，所以有无穷多的解。

例子

例 齐次方程组 $\begin{cases} x_1 - 2x_2 = 0 \\ 2x_1 - 4x_2 = 0 \end{cases}$ 的系数矩阵 $D = \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 2 & -4 \end{vmatrix} = 0$，所以有无穷多的解。事实上，对任意的数 k，$\begin{cases} x_1 = 2k \\ x_2 = k \end{cases}$ 都是解。

例子

例 齐次方程组 $\begin{cases} x_1 - 2x_2 = 0 \\ 2x_1 - 4x_2 = 0 \end{cases}$ 的系数矩阵 $D = \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 2 & -4 \end{vmatrix} = 0$，所以有无穷多的解。事实上，对任意的数 k，$\begin{cases} x_1 = 2k \\ x_2 = k \end{cases}$ 都是解。

例 判断线性方程组 $\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 5x_4 = 0 \\ 3x_1 + 4x_2 + 5x_3 + 5x_4 = 0 \\ 4x_1 + 5x_2 + 6x_3 + 6x_4 = 0 \\ 5x_1 + 6x_2 + 8x_3 + 9x_4 = 0 \end{cases}$ 是否只有零解。

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4 - r_3}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4 - r_3} \begin{vmatrix} & & & \\ & & & \\ & & & \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4 - r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1} \begin{vmatrix} 2 & & & \\ 3 & & & \\ 4 & & & \\ 1 & & & \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4 - r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3 - 2c_1 \\ c_4 - 3c_1}]{c_2 - c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & & \\ 3 & 1 & & \\ 4 & 1 & & \\ 1 & 0 & & \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & \\ 3 & 1 & -1 & \\ 4 & 1 & -2 & \\ 1 & 0 & 0 & \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 \\ 3 & 1 & -1 & -4 \\ 4 & 1 & -2 & -6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 \\ 3 & 1 & -1 & -4 \\ 4 & 1 & -2 & -6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= 1 \times (-1)^{4+1} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -4 \\ 1 & -2 & -6 \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 \\ 3 & 1 & -1 & -4 \\ 4 & 1 & -2 & -6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= 1 \times (-1)^{4+1} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -4 \\ 1 & -2 & -6 \end{vmatrix} \xlongequal{c_3+c_1}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 \\ 3 & 1 & -1 & -4 \\ 4 & 1 & -2 & -6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= 1 \times (-1)^{4+1} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -4 \\ 1 & -2 & -6 \end{vmatrix} \xlongequal{c_3+c_1} - \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -3 \\ 1 & -2 & -5 \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 \\ 3 & 1 & -1 & -4 \\ 4 & 1 & -2 & -6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= 1 \times (-1)^{4+1} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -4 \\ 1 & -2 & -6 \end{vmatrix} \xlongequal{c_3+c_1} - \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -3 \\ 1 & -2 & -5 \end{vmatrix}$$

$$= - \begin{vmatrix} -1 & -3 \\ -2 & -5 \end{vmatrix}$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4-r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3-2c_1 \\ c_4-3c_1}]{c_2-c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 \\ 3 & 1 & -1 & -4 \\ 4 & 1 & -2 & -6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= 1 \times (-1)^{4+1} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -4 \\ 1 & -2 & -6 \end{vmatrix} \xlongequal{c_3+c_1} - \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -3 \\ 1 & -2 & -5 \end{vmatrix}$$

$$= - \begin{vmatrix} -1 & -3 \\ -2 & -5 \end{vmatrix} = 1 \neq 0$$

解

$$\begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 5 & 6 & 8 & 9 \end{vmatrix} \xlongequal{r_4 - r_3} \begin{vmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 6 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \xlongequal[\substack{c_3 - 2c_1 \\ c_4 - 3c_1}]{c_2 - c_1} \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 & -1 \\ 3 & 1 & -1 & -4 \\ 4 & 1 & -2 & -6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= 1 \times (-1)^{4+1} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -4 \\ 1 & -2 & -6 \end{vmatrix} \xlongequal{c_3 + c_1} - \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -3 \\ 1 & -2 & -5 \end{vmatrix}$$

$$= - \begin{vmatrix} -1 & -3 \\ -2 & -5 \end{vmatrix} = 1 \neq 0$$

所以齐次线性方程组有唯一解。

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 \qquad\qquad\qquad + \ x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 \qquad\quad - \ x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - \ x_2 \qquad + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + \ x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 + x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 - x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - x_2 + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix}$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 + x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 - x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - x_2 + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3 \cdot$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 \qquad\qquad + x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 \qquad - x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - x_2 \qquad + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3 \cdot (-1)^{3+4} \begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 + x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 - x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - x_2 + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3 \cdot (-1)^{3+4} \begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\underline{\underline{r_2 + r_1}}$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 \qquad\qquad\qquad + \ x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 \qquad\quad - \ x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - \ x_2 \qquad + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + \ x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3\cdot(-1)^{3+4}\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\xlongequal{r_2+r_1} (-3)\cdot\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ & & \\ & & \end{vmatrix}$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 \qquad\qquad\qquad + \ x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 \qquad\quad - \ x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - \ x_2 \qquad\quad + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + \ x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3\cdot(-1)^{3+4}\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\overset{r_2+r_1}{=\!=\!=\!=} (-3)\cdot\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ k+1 & 2 & 0 \\ & & \end{vmatrix}$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 \quad\quad\quad\quad\quad + \; x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 \quad\quad - \; x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - \; x_2 \quad\quad + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + \; x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3 \cdot (-1)^{3+4} \begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\xlongequal[r_3 - 4r_1]{r_2 + r_1} (-3) \cdot \begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ k+1 & 2 & 0 \\ & & \end{vmatrix}$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 \qquad\qquad\qquad + \ x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 \qquad\quad - \ x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - \ x_2 \qquad + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + \ x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3 \cdot (-1)^{3+4} \begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\overset{r_2+r_1}{\underset{r_3-4r_1}{=\!=\!=\!=}} (-3) \cdot \begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ k+1 & 2 & 0 \\ -3k+2 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 + x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 - x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - x_2 + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3 \cdot (-1)^{3+4} \begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\xlongequal[r_3-4r_1]{r_2+r_1} (-3)\cdot \begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ k+1 & 2 & 0 \\ -3k+2 & -1 & 0 \end{vmatrix} = (-3)\cdot(-1)^{1+3}\cdot \begin{vmatrix} k+1 & 2 \\ -3k+2 & -1 \end{vmatrix}$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 \qquad\qquad\qquad + \ x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 \qquad - \ x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - \ x_2 \qquad + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + \ x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3\cdot(-1)^{3+4}\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\xlongequal[r_3-4r_1]{r_2+r_1}(-3)\cdot\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ k+1 & 2 & 0 \\ -3k+2 & -1 & 0 \end{vmatrix} = (-3)\cdot(-1)^{1+3}\cdot\begin{vmatrix} k+1 & 2 \\ -3k+2 & -1 \end{vmatrix}$$

$$= -3(5k-5)$$

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 + x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 - x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - x_2 + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3\cdot(-1)^{3+4}\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\xlongequal[r_3-4r_1]{r_2+r_1} (-3)\cdot\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ k+1 & 2 & 0 \\ -3k+2 & -1 & 0 \end{vmatrix} = (-3)\cdot(-1)^{1+3}\cdot\begin{vmatrix} k+1 & 2 \\ -3k+2 & -1 \end{vmatrix}$$

$$= -3(5k-5)$$

有非零解当且仅当 $D = 0$，

练习 齐次线性方程组 $\begin{cases} kx_1 + x_4 = 0 \\ x_1 + 2x_2 - x_4 = 0 \\ (k+2)x_1 - x_2 + 4x_4 = 0 \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 + kx_4 = 0 \end{cases}$ 有非零解

的充分必要条件是 k 满足 ____

解

$$D = \begin{vmatrix} k & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ k+2 & -1 & 0 & 4 \\ 2 & 1 & 3 & k \end{vmatrix} = 3\cdot(-1)^{3+4}\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ 1 & 2 & -1 \\ k+2 & -1 & 4 \end{vmatrix}$$

$$\xlongequal[r_3-4r_1]{r_2+r_1} (-3)\cdot\begin{vmatrix} k & 0 & 1 \\ k+1 & 2 & 0 \\ -3k+2 & -1 & 0 \end{vmatrix} = (-3)\cdot(-1)^{1+3}\cdot\begin{vmatrix} k+1 & 2 \\ -3k+2 & -1 \end{vmatrix}$$

$$= -3(5k-5)$$

有非零解当且仅当 $D=0$，当且仅当 $k=1$。