

高等代数笔记

讲课：谢启鸿

记录：Cowboy

更新：2024 年 12 月 31 日 12:25

目 录

1	行列式	1
1.1	行列式的展开和转置	1
1.2	Gramer 法则	2
1.3	行列式的计算	4
1.4	<i>Laplace</i> 定理	5
2	矩阵	8
2.1	矩阵的逆	8
2.2	<i>Cauchy – Binet</i> 公式	8
3	线性空间	12
3.1	矩阵的秩	12
3.2	线性方程组的解	13
4	线性映射	16
4.1	线性映射与矩阵	16
4.2	线性映射的像与核	17
4.3	不变子空间	20
5	多项式	25
5.1	复系数多项式	25
5.2	结式和判别式	25
6	特征值	29
6.1	对角化	29
6.2	极小多项式与 Cayley-Hamilton 定理	29

6.3	特征值的估计	33
7	相似标准型	37
7.1	多项式矩阵	37
7.2	矩阵的法式	37
7.3	不变因子	40
7.4	有理标准型	43
7.5	初等因子	46
7.6	Jordan 标准型	47
7.7	Jordan 标准型的进一步讨论和应用	53

1 行列式

1.1 行列式的展开和转置

定理 1.1 若

$$|A| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}, \quad (1.1)$$

第 i 行第 j 列元素 a_{ij} 的代数余子式记为 A_{ij} , 则对任意的 $r (r = 1, 2, \dots, n)$ 列有展开式:

$$|A| = a_{1r}A_{1r} + a_{2r}A_{2r} + \cdots + a_{nr}A_{nr}. \quad (1.2)$$

又对任意的 $s \neq r$, 有

$$a_{1r}A_{1s} + a_{2r}A_{2s} + \cdots + a_{nr}A_{ns} = 0 \quad (1.3)$$

证明:

$$\begin{aligned} |A| &= \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1r} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & 0 & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & 0 & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2r} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & 0 & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \\ &\quad + \cdots + \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & 0 & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nr} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} \\ &= a_{1r}A_{1r} + a_{2r}A_{2r} + \cdots + a_{nr}A_{nr}. \end{aligned}$$

所以, (1.2)式成立。再在(1.1)式基础上, 将其第 s 列换成第 r 列, 构建一个新行列式, 其值为 0, 即:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1r} & \cdots & a_{1r} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \cdots & a_{2r} & \cdots & a_{2r} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nr} & \cdots & a_{nr} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = 0$$

将上面行列式按第 s 列展开:

$$a_{1r}A_{1s} + a_{2r}A_{2s} + \cdots + a_{nr}A_{ns} = 0$$

所以(1.3)式成立。

同理可证, 按照任意 $r (r = 1, 2, \dots, n)$ 行展开有展开式:

$$|A| = a_{r1}A_{1r} + a_{r2}A_{2r} + \cdots + a_{rn}A_{nr}. \quad (1.4)$$

又对任意的 $s \neq r$, 有

$$a_{r1}A_{s1} + a_{r2}A_{s2} + \cdots + a_{rn}A_{sn} = 0 \quad (1.5)$$

□

1.2 Gramer 法则

定理 1.2 (Gramer 法则) 设有方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2, \\ \dots\dots\dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n = b_n, \end{cases} \quad (1.6)$$

记这个方程组的系数行列式为 $|A|$, 若 $|A| \neq 0$, 则方程组有且仅有一组解:

$$x_1 = \frac{|A_1|}{|A|}, x_2 = \frac{|A_2|}{|A|}, \dots, x_n = \frac{|A_n|}{|A|}, \quad (1.7)$$

其中 $|A_j| (j = 1, 2, \dots, n)$ 是一个 n 阶行列式, 它由 $|A|$ 去掉第 j 列换上方程组的常数项 b_1, b_2, \dots, b_n 组成的列而成.

证明:

方法一: 只需验证(1.7)式确为方程组(1.6)的解.

将 $|A_j|$ 按第 j 列展开, 得

$$|A_j| = b_1A_{1j} + b_2A_{2j} + \cdots + b_nA_{nj} = \sum_{i=1}^n b_iA_{ij}, \quad (1.8)$$

根据式(1.7)和式(1.8),

$$x_j = \frac{|A_j|}{|A|} = \frac{1}{|A|} \sum_{i=1}^n b_iA_{ij}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (1.9)$$

方程组(1.6)第 k 个方程为

$$\sum_{j=1}^n a_{kj}x_j = b_k, 1 \leq k \leq n. \quad (1.10)$$

将(1.9)代入(1.10)左边得

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{kj}x_j &= \sum_{j=1}^n (a_{kj} \frac{1}{|A|} \sum_{i=1}^n b_iA_{ij}) \\ &= \frac{1}{|A|} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{kj}b_iA_{ij} \\ &= \frac{1}{|A|} \sum_{i=1}^n b_i (\sum_{j=1}^n a_{kj}A_{ij}) \end{aligned}$$

上式最后一个等式里 $\sum_{j=1}^n a_{kj}A_{ij}$ 部分的值如下:

当 $i \neq k$ 时, 为行列式 $|A|$ 第 k 行每个元素与第 i 行同列元素对应的代数余子式的乘积之和, 其值为 0;

当 $i = k$ 时, 为行列式 $|A|$ 按第 k 行元素展开, 即第 k 行每个元素与其对应代数余子式的乘积之和, 其值为 $|A|$. 所以,

$$\sum_{j=1}^n a_{kj}x_j = \frac{1}{|A|}b_k \sum_{j=1}^n a_{kj}A_{kj} = \frac{b_k}{|A|}|A| = b_k$$

由于 k 为任意 1 至 n 的自然数, 因此(1.7)式是(1.6)式的解.

方法二: 利用系数矩阵求逆的方法。方程组(1.6)可以写成矩阵形式

$$Ax = \beta,$$

其中, $A = (a_{ij})$. 若 $|A| \neq 0$, 则 A^{-1} 必存在, 因此

$$A^{-1}(Ax) = A^{-1}\beta,$$

即

$$x = A^{-1}\beta$$

将上式中的矩阵写出来就是

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \frac{1}{|A|} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}.$$

于是

$$x_1 = \frac{1}{|A|}(b_1A_{11} + b_2A_{21} + \cdots + b_nA_{n1})$$

其中

$$|A_1| = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_n & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

其余 x_i 同理可得.

□

1.3 行列式的计算

例 1.1 计算 n 阶 *VanderMonde* (范德蒙德) 行列式:

$$V_n = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-2} & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-2} & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n-1} & x_{n-1}^2 & \cdots & x_{n-1}^{n-2} & x_{n-1}^{n-1} \\ 1 & x_{n-2} & x_{n-2}^2 & \cdots & x_{n-2}^{n-2} & x_{n-2}^{n-1} \end{vmatrix}$$

解: 将第 $n-1$ 列乘以 $-x_n$ 后加到第 n 列上, 再将第 $n-2$ 列乘以 $-x_n$ 加到第 $n-1$ 列上. 这样一直做下去, 直到将第一列乘以 $-x_n$ 加到第二列上为止. 这样变形后行列式值不变. 得到

$$\begin{aligned} V_n &= \begin{vmatrix} 1 & x_1 - x_n & x_1^2 - x_1 x_n & \cdots & x_1^{n-2} - x_1^{n-3} x_n & x_1^{n-1} - x_1^{n-2} x_n \\ 1 & x_2 - x_n & x_2^2 - x_2 x_n & \cdots & x_2^{n-2} - x_2^{n-3} x_n & x_2^{n-1} - x_2^{n-2} x_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n-1} - x_n & x_{n-1}^2 - x_{n-1} x_n & \cdots & x_{n-1}^{n-2} - x_{n-1}^{n-3} x_n & x_{n-1}^{n-1} - x_{n-1}^{n-2} x_n \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix} \\ &= (-1)^{n+1} \begin{vmatrix} x_1 - x_n & x_1(x_1 - x_n) & \cdots & x_1^{n-3}(x_1 - x_n) & x_1^{n-2}(x_1 - x_n) \\ x_2 - x_n & x_2(x_2 - x_n) & \cdots & x_2^{n-3}(x_2 - x_n) & x_2^{n-2}(x_2 - x_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_{n-1} - x_n & x_{n-1}(x_{n-1} - x_n) & \cdots & x_{n-1}^{n-3}(x_{n-1} - x_n) & x_{n-1}^{n-2}(x_{n-1} - x_n) \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

提取每行公因子后得到 $n-1$ 阶行列式恰好是一个 x_1, x_2, \dots, x_{n-1} 的 $n-1$ 阶 *VanderMonde* 行列式, 将其标记为 V_{n-1} . 得到递推公式

$$\begin{aligned} V_n &= (-1)^{n+1} (x_1 - x_n)(x_2 - x_n) \cdots (x_{n-1} - x_n) \cdot \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-2} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n-1} & x_{n-1}^2 & \cdots & x_{n-1}^{n-2} \\ 1 & x_{n-2} & x_{n-2}^2 & \cdots & x_{n-2}^{n-2} \end{vmatrix} \\ &= (x_n - x_1)(x_n - x_2) \cdots (x_n - x_{n-1}) V_{n-1} \end{aligned}$$

即

$$V_n = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_j - x_i)$$

例 1.2 求下列行列式的值:

$$F_n = \begin{vmatrix} \lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_n \\ -1 & \lambda & 0 & \cdots & 0 & a_{n-1} \\ 0 & -1 & \lambda & \cdots & 0 & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & \lambda + a_1 \end{vmatrix}$$

解: 按第一行展开, a_n 的余子式是一个上三角行列式, 其值等于 $(-1)^{n-1}$, λ 的余子式是与 F_n 相类似的 $n-1$ 阶行列式, 记之为 F_{n-1} , 于是得到递推关系式:

$$F_n = \lambda F_{n-1} + (-1)^{1+n}(-1)^{n-1}a_n = \lambda F_{n-1} + a_n.$$

将递推公式不断代入, 最后求得

$$F_n = \lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + a_2\lambda^{n-2} + \cdots + a_n.$$

1.4 Laplace 定理

定理 1.3 (Laplace 定理) 设 $|A|$ 是 n 阶行列式, 在 $|A|$ 中任取 k 行 (列), 那么包含于这 k 行 (列) 的全部 k 阶子式与它们对应的代数余子式的乘积之和等于 $|A|$. 即若取定 k 个行: $1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_k \leq n$, 则

$$|A| = \sum_{1 \leq j_1 < j_2 < \cdots < j_k \leq n} A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k & n \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k & n \end{pmatrix} \hat{A} \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k & n \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k & n \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

同样若取定 k 个列: $1 \leq j_1 < j_2 < \cdots < j_k \leq n$, 则

$$|A| = \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_k \leq n} A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k & n \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k & n \end{pmatrix} \hat{A} \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k & n \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k & n \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

证明: 如果能证明 $|A|$ 的每个 k 阶子式与其代数余子式之积的展开式中的每一项都互不相同且都属于 $|A|$ 的展开式, 两者总项数相等, 那么就证明了 Laplace 定理.

首先证明 $|A|$ 的任意 k 阶子式与其代数余子式之积的展开式中的每一项都属于 $|A|$ 的展开式.

先证明特殊情形: $i_1 = 1, i_2 = 2, \cdots, i_k = k; j_1 = 1, j_2 = 2, \cdots, j_k = k$. 这时 $|A|$ 可写为:

$$\begin{vmatrix} A_1 & * \\ * & A_2 \end{vmatrix}, \quad (1.13)$$

其中

$$|A_1| = A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & k \\ 1 & 2 & \cdots & k \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{vmatrix}, \quad (1.14)$$

$$|A_2| = \widehat{A} \left(\begin{smallmatrix} 1 & 2 & \cdots & k \\ 1 & 2 & \cdots & k \end{smallmatrix} \right) = \begin{vmatrix} a_{k+1,k+1} & \cdots & a_{k+1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n,k+1} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}. \quad (1.15)$$

(1.14)式中的任一项具有形式:

$$(-1)^{N(j_1, j_2, \dots, j_k)} a_{j_1 1} a_{j_2 2} \cdots a_{j_k k},$$

其中 $N(j_1, j_2, \dots, j_k)$ 是排列 (j_1, j_2, \dots, j_k) 的逆序数. (1.15)式中的任一项具有形式:

$$(-1)^{N(j_{k+1}, j_{k+2}, \dots, j_n)} a_{j_{k+1}, k+1} a_{j_{k+2}, k+2} \cdots a_{j_n n},$$

所以

$$A \left(\begin{smallmatrix} 1 & 2 & \cdots & k \\ 1 & 2 & \cdots & k \end{smallmatrix} \right) \widehat{A} \left(\begin{smallmatrix} 1 & 2 & \cdots & k \\ 1 & 2 & \cdots & k \end{smallmatrix} \right)$$

中的任一项具有下列形式:

$$(-1)^\sigma a_{j_1 1} a_{j_2 2} \cdots a_{j_k k} a_{j_{k+1}, k+1} \cdots a_{j_n n}, \quad (1.16)$$

其中 $\sigma = N(j_1, \dots, j_k) + N(j_{k+1}, \dots, j_n)$. 注意 (j_1, \dots, j_k) 是 $(1, \dots, k)$ 的一个排列, (j_{k+1}, \dots, j_n) 是 $(k+1, \dots, n)$ 的一个排列, 因此 $(j_1, \dots, j_k, j_{k+1}, \dots, j_n)$ 是 $(1, 2, \dots, n)$ 的一个排列且

$$N(j_1, \dots, j_k, j_{k+1}, \dots, j_n) = N(j_1, \dots, j_k) + N(j_{k+1}, \dots, j_n).$$

因此, (1.16)式是 $|A|$ 中的某一项.

再证明一般情况, 设

$$1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_k \leq n; 1 \leq j_1 < j_2 < \cdots < j_k \leq n.$$

经过 $i_1 - 1$ 次相邻两行的对换, 可把 i_1 行调到第一行, 经过 $i_2 - 2$ 次相邻两行的对换, 可把 i_2 行调到第二行, \dots , 经过 $(i_1 + \cdots + i_k) - \frac{1}{2}k(k+1)$ 次对换, 可把第 i_1, i_2, \dots, i_k 行调至前 k 行. 同理, 经过 $(j_1 + \cdots + j_k) - \frac{1}{2}k(k+1)$ 次对换, 可把第 j_1, j_2, \dots, j_k 行调至前 k 列. 因此, $|A|$ 经过 $(i_1 + \cdots + i_k) + (j_1 + \cdots + j_k) - k(k+1)$ 次行列的对换 (其中 $k(k+1)$ 必为偶数), 得到了一个新的行列式:

$$|C| = \begin{vmatrix} D & * \\ * & B \end{vmatrix}$$

其中

$$|D| = A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix}$$

由以上分析可知, $|C| = (-1)^{p+q}|A|$, $p = i_1 + \cdots + i_k$, $q = j_1 + \cdots + j_k$. $|B|$ 是子式 $|D|$ 在 $|C|$ 中的代数余子式, 由前面特殊情况的分析可知, $|D||B|$ 中的任一项都是 $|C|$ 中的项. 由于

$$\widehat{A} \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix} = (-1)^{p+q}|B|,$$

因此,

$$A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix} \hat{A} \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

中的任一项都是 $(-1)^{p+q}|C| = |A|$ 中的项.

以上分析了(1.17)式中任一项均属于 $|A|$ 的展开式。

最后证明二者总项数相等: 当 i_1, i_2, \dots, i_k 固定时, 对不同的 $1 \leq j_1 < j_2 < \cdots < j_k \leq n$ 共有 C_n^k 个不同子式, 每个子式完全展开后均含有 $k!$ 项, 相应的余子式也有 C_n^k 个, 每个余子式展开后均含有 $(n-k)!$ 项. 由(1.17)式展开得到的项是没有重复的, 且一共有 $C_n^k \cdot k!(n-k)! = n!$ 项. $|A|$ 的展开式也有 $n!$ 项, 因此(1.11)式成立.(1.12)式同理可证. \square

2 矩阵

2.1 矩阵的逆

定理 2.1 设 A 为 n 阶方阵, A^* 为 A 的伴随矩阵, 若 $|A| \neq 0$, 则 A 是一个非异阵, 且

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} A^*. \quad (2.1)$$

证明:

$$AA^* = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix}.$$

上式中两个矩阵乘积的第 (i, j) 元素为

$$a_{i1}A_{j1} + a_{i2}A_{j2} + \cdots + a_{in}A_{jn}.$$

按照定理(1.1)可知: 当 $i = j$ 时上式为 $|A|$, 当 $i \neq j$ 时上式为零。因此

$$AA^* = \begin{pmatrix} |A| & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & |A| & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & |A| \end{pmatrix} = |A| \cdot I_n.$$

同理可证

$$A^*A = |A| \cdot I_n.$$

因为 $|A| \neq 0$, 由以上二式同除以 $|A|$ 可以得到

$$A\left(\frac{1}{|A|}A^*\right) = \left(\frac{1}{|A|}A^*\right)A = I_n,$$

因此

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|}A^*$$

A 是非异阵. □

2.2 Cauchy – Binet 公式

定理 2.2 (Cauchy – Binet 公式) 设 $A = (a_{ij})$ 是 $m \times n$ 矩阵, $B = (b_{ij})$ 是 $n \times m$ 矩阵. $A \begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_s \\ j_1 & \cdots & j_s \end{pmatrix}$ 表示 A 的一个 s 阶子式, 它由 A 的第 i_1, \cdots, i_s 行与第 j_1, \cdots, j_s 列交点上的元素按原次序排列组成的行列式, 同理可定义 B 的 s 阶子式.

(1) 若 $m > n$, 则必有 $|AB| = 0$;

(2) 若 $m \leq n$, 则必有

$$|AB| = \sum_{1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_m \leq n} A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix} B \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_m \\ 1 & 2 & \dots & m \end{pmatrix}$$

证明: 令 $C = \begin{pmatrix} A & O \\ -I_n & B \end{pmatrix}$. 用不同方法表示行列式 $|C|$:

首先, 对 C 进行第三类分块初等变换, 得到矩阵 $M = \begin{pmatrix} O & AB \\ -I_n & B \end{pmatrix}$, M 可以改写为 $M = \begin{pmatrix} I_m & A \\ O & I_n \end{pmatrix} C$. 因此, $|M| = |C|$.

用 Laplace 定理来计算 $|M|$, 由于 AB 占据 M 的前 m 行和第 $n+1$ 至第 $n+m$ 列, M 除 AB 外, 前 m 行的其余列都是 0, 因此 $|M|$ 按前 m 行展开得

$$\begin{aligned} |M| &= (-1)^{(n+1+n+2+\dots+n+m)+(1+2+\dots+m)} |-I_n| |AB| \\ &= (-1)^{nm+m(m+1)+n} |AB| \end{aligned}$$

上面第二个等式是因为 $|-I_n| = (-1)^n$. 由于 $m(m+1)$ 总是偶数, 可以去掉该式, 且 $nm+n = n(m+1)$, 所以

$$|M| = (-1)^{n(m+1)} |AB|. \quad (2.2)$$

再计算 $|C|$, 用 Laplace 定理按前 m 行展开, 分两种情况:

若 $m > n$, 则 A 为瘦长型的矩阵, B 为矮胖型矩阵, 如图(2.1)所示:

前 m 行中任意一个 m 阶子式至少有一列全部为 0, 即要从 O 中获取 $m-n$ 列用于构建 m 阶子

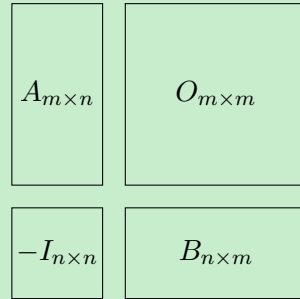


图 2.1: 瘦长型矩阵 A

式, 因此整个行列式的值为 0, 即 $|AB| = 0$.

若 $m \leq n$, 则 A 为矮胖型矩阵, B 为瘦长型的矩阵, 如图(2.2)所示:

由 Laplace 定理得

$$|C| = \sum_{1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_m \leq n} A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix} \hat{C} \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

其中, $\hat{C} \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix}$ 是 $A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix}$ 在矩阵 C 中的代数余子式. 显然,

$$\hat{C} \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix} = (-1)^{\frac{1}{2}m(m+1)+(j_1+j_2+\dots+j_m)} |-e_{i_1}, -e_{i_2}, \dots, -e_{i_{n-m}}, B|, \quad (2.4)$$

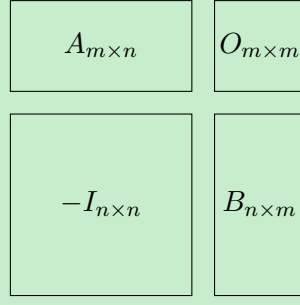


图 2.2: 矮胖型矩阵 A

其中 i_1, i_2, \dots, i_{n-m} 是 C 中前 n 列去掉 j_1, j_2, \dots, j_m 列后余下的列序号. $e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_{n-m}}$ 是相应的 n 维标准单位列向量. \hat{C} 除了包含全部 B , 还需要从 $-I_n$ 中获取 $n-m$ 个列. 记

$$|N| = |-e_{i_1}, -e_{i_2}, \dots, -e_{i_{n-m}}, B|,$$

下面计算 $|N| \cdot |N|$ 用 *Laplace* 定理按前 $n-m$ 列展开, 只有一个子式非零, 其值等于 $|-I_{n-m}| = (-1)^{n-m}$. 这个子式的余子式为 $B \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_m \\ 1 & 2 & \dots & m \end{pmatrix}$. 因此,

$$|N| = (-1)^{(n-m)+(i_1+i_2+\dots+i_{n-m})+(1+2+\dots+n-m)} B \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_m \\ 1 & 2 & \dots & m \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

将(2.5)式代入(2.4)式, 再将(2.4)式代入(2.3)式得

$$|C| = \sum_{1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_m \leq n} (-1)^l A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix} B \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_m \\ 1 & 2 & \dots & m \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

其中, $l = \frac{1}{2}m(m+1) + (j_1 + j_2 + \dots + j_m) + (n-m) + (i_1 + i_2 + \dots + i_{n-m}) + (1+2+\dots+n-m)$. 从图(2.2)可知, $j_1 + j_2 + \dots + j_m$ 是被选取到 $A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix}$ 中的列的序号, 则 $i_1 + i_2 + \dots + i_{n-m}$ 是前 n 列中剩余的列的序号, 所以 $j_1 + j_2 + \dots + j_m + i_1 + i_2 + \dots + i_{n-m} = 1 + 2 + \dots + n$. 因此, $l = (1+2+\dots+m) + (1+2+\dots+n) + (n-m) + (1+2+\dots+n-m)$. 因为 $m \leq n$, 所以 $l = 2(1+2+\dots+m) + 2(n-m) + (m+1) + (m+2) + \dots + n + (1+2+\dots+n-m-1)$. 其中, $2(1+2+\dots+m) + 2(n-m)$ 为偶数, 去掉该式后不影响 l 的奇偶性. 令 $l' = (m+1) + (m+2) + \dots + n + (1+2+\dots+n-m-1)$, 则 l 与 l' 有相同的奇偶性. 将 l' 首、尾对应项相加, 得 $l' = n(n-m)$. 又 $l' + n(m+1) = n(n-m) + n(m+1) = n(n+1)$, 因为 $n(n+1)$ 为偶数, 因此 l' 与 $n(m+1)$ 有相同的奇偶性, 因此, l 与 $n(m+1)$ 有相同的奇偶性.

最后, 由 $|M| = |C|$ 即(2.2)式=(2.6)式, 得

$$(-1)^{n(m+1)}|AB| = \sum_{1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_m \leq n} (-1)^l A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix} B \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_m \\ 1 & 2 & \dots & m \end{pmatrix}$$

因为 l 取值和 j_1, j_2, \dots, j_m 无关, 所以

$$(-1)^{n(m+1)}|AB| = (-1)^l \sum_{1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_m \leq n} A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & m \\ j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{pmatrix} B \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_m \\ 1 & 2 & \dots & m \end{pmatrix}$$

上式中 l 与 $n(m+1)$ 有相同的奇偶性, 所以

$$|AB| = \sum_{1 \leq j_1 < j_2 < \cdots < j_m \leq n} A \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & m \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_m \end{pmatrix} B \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \cdots & j_m \\ 1 & 2 & \cdots & m \end{pmatrix}$$

当 $m = n$ 时, 上式右边只有一个组合.

□

3 线性空间

3.1 矩阵的秩

例 3.1 设 $C = \begin{pmatrix} A & O \\ O & B \end{pmatrix}$, 求证: $\text{rank}(C) = \text{rank}(A) + \text{rank}(B)$.

证明: 设初等矩阵 P_1, P_2, Q_1, Q_2 s. t. $P_1 A Q_1 = \begin{pmatrix} I_{r_1} & O \\ O & O \end{pmatrix}$, $P_2 B Q_2 = \begin{pmatrix} I_{r_2} & O \\ O & O \end{pmatrix}$. 于是,

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} P_1 & O \\ O & P_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & O \\ O & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 & O \\ O & Q_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} P_1 A Q_1 & O \\ O & P_2 B Q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{r_1} & O & O & O \\ O & O & O & O \\ O & O & I_{r_2} & O \\ O & O & O & O \end{pmatrix} \\ &\longrightarrow \begin{pmatrix} I_{r_1} & O & O & O \\ O & I_{r_2} & O & O \\ O & O & O & O \\ O & O & O & O \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

由矩阵乘以非异阵其秩不变以及分块矩阵在分块初等变换下秩不变, 可得

$$\text{rank}(C) = r_1 + r_2 = \text{rank}(A) + \text{rank}(B).$$

□

例 3.2 设 $C = \begin{pmatrix} A & D \\ O & B \end{pmatrix}$ 或 $\begin{pmatrix} A & O \\ D & B \end{pmatrix}$, 求证: $\text{rank}(C) \geq \text{rank}(A) + \text{rank}(B)$.

证明:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} P_1 & O \\ O & P_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & D \\ O & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 & O \\ O & Q_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} P_1 A Q_1 & P_1 D Q_2 \\ O & P_2 B Q_2 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} I_{r_1} & O & D_{11} & D_{12} \\ O & O & D_{21} & D_{22} \\ O & O & I_{r_2} & O \\ O & O & O & O \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} I_{r_1} & O & O & O \\ O & O & O & D_{22} \\ O & O & I_{r_2} & O \\ O & O & O & O \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} I_{r_1} & O & O & O \\ O & D_{22} & O & O \\ O & O & I_{r_2} & O \\ O & O & O & O \end{pmatrix} \end{aligned}$$

由上例可知, $\text{rank}(C) = r_1 + \text{rank}(D_{22}) + r_2 \geq r_1 + r_2 = \text{rank}(A) + \text{rank}(B)$, 当 $D_{22} = O$ 时等号成立. □

例 3.3 设 $A \in M_{m \times n}(\mathbb{K})$, $B \in M_{n \times p}(\mathbb{K})$, 求证: $\text{rank}(A) + \text{rank}(B) - n \leq \text{rank}(AB) \leq \min\{\text{rank}(A), \text{rank}(B)\}$.

证明: 先证右边. 令 $B = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)$, 设 $\{\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{ir}\}$ 是其极大无关组且断言 $\forall 1 \leq j \leq p$, $A\beta_j$ 是 $A\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{ir}$ 的线性组合. 因为 $\forall \beta_j$, $\beta_j = \lambda_1 \beta_{i1} + \lambda_2 \beta_{i2} + \dots + \lambda_r \beta_{ir} \implies$

$A\beta_j = \lambda_1 A\beta_{i1} + \lambda_2 A\beta_{i2} + \cdots + \lambda_r A\beta_{ir}$ 所以, $AB = (A\beta_1, A\beta_2, \cdots, A\beta_p)$ 的每一个列向量都可由 $\{A\beta_{i1}, A\beta_{i2}, \cdots, A\beta_{ir}\}$ 线性表示 $\implies \text{rank}(AB) \leq r = \text{rank}(B)$. 同理, $\text{rank}(AB) = \text{rank}(B'A') \leq \text{rank}(A') = \text{rank}(A) \implies \text{rank}(AB) \leq \min\{\text{rank}(A), \text{rank}(B)\}$

再证左边.

$\begin{pmatrix} A & O \\ -I_n & B \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} O & AB \\ -I_n & B \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} O & AB \\ -I_n & O \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} AB & O \\ O & I_n \end{pmatrix}$. 由最右边矩阵可知, $\text{rank} \begin{pmatrix} AB & O \\ O & I_n \end{pmatrix} = \text{rank}(AB) + n = r \begin{pmatrix} A & O \\ -I_n & B \end{pmatrix} \geq \text{rank}(A) + \text{rank}(B) \implies \text{rank}(AB) \geq \text{rank}(A) + \text{rank}(B) - n$. \square

例 3.4 (秩的降阶公式) $M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$, 则:

- (1) 若 A 非异, 则 $\text{rank}(M) = \text{rank}(A) + \text{rank}(D - CA^{-1}B)$;
- (2) 若 D 非异, 则 $\text{rank}(M) = \text{rank}(D) + \text{rank}(A - BD^{-1}C)$;
- (3) 若 A, D 非异, 则 $\text{rank}(A) + \text{rank}(D - CA^{-1}B) = \text{rank}(D) + \text{rank}(A - BD^{-1}C)$.

证明: 只证 (1) 即可, 其余类似可证。

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} A & B \\ O & D - CA^{-1}B \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} A & O \\ O & D - CA^{-1}B \end{pmatrix}$$

由前面例题可知, $\text{rank}(M) = \text{rank}(A) + \text{rank}(D - CA^{-1}B)$ \square

3.2 线性方程组的解

例 3.5 设 $Ax = \beta (\beta \neq 0)$ 的特解为 γ , 相伴齐次线性方程组 $Ax = 0$ 的基础解系为 $\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_{n-r}$, 求证:

- (1) $\gamma, \gamma + \eta_1, \gamma + \eta_2, \cdots, \gamma + \eta_{n-r}$ 线性无关;
- (2) $Ax = \beta$ 的任一解必为如下形式: $c_0\gamma + c_1(\gamma + \eta_1) + c_2(\gamma + \eta_2) + \cdots + c_{n-r}(\gamma + \eta_{n-r})$, 其中 $c_0 + c_1 + \cdots + c_{n-r} = 1$.

证明:

(1) 设 $\lambda_0\gamma + \lambda_1(\gamma + \eta_1) + \lambda_2(\gamma + \eta_2) + \cdots + \lambda_{n-r}(\gamma + \eta_{n-r}) = 0$, 合并整理得下式:

$$\left(\sum_{i=0}^{n-r} \lambda_i\right)\gamma + \lambda_1\eta_1 + \lambda_2\eta_2 + \cdots + \lambda_{n-r}\eta_{n-r} = 0, \quad (3.1)$$

将 A 作用到上式两边, 得

$$\left(\sum_{i=0}^{n-r} \lambda_i\right)A\gamma + \lambda_1A\eta_1 + \lambda_2A\eta_2 + \cdots + \lambda_{n-r}A\eta_{n-r} = 0,$$

$$A\eta_i = 0 \implies \left(\sum_{i=0}^{n-r} \lambda_i\right) A\gamma = 0 \xrightarrow{A\gamma=\beta} \left(\sum_{i=0}^{n-r} \lambda_i\right) \beta = 0 \xrightarrow{\beta \neq 0} \sum_{i=0}^{n-r} \lambda_i = 0,$$

将 $\sum_{i=0}^{n-r} \lambda_i = 0$ 代入(3.1)式, 可得 $\lambda_1\eta_1 + \lambda_2\eta_2 + \cdots + \lambda_{n-r}\eta_{n-r} = 0$,

$\therefore \eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_{n-r}$ 是基础解系, $\therefore \lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_{n-r} = 0$,

由(3.1)式可知, $\gamma, \gamma + \eta_1, \gamma + \eta_2, \cdots, \gamma + \eta_{n-r}$ 线性无关.

(2) 设 α 为线性方程组 $Ax = \beta$ 的任一解, $k_i \in \mathbb{K}$, 那么

$$\begin{aligned} \alpha &= \gamma + k_1\eta_1 + k_2\eta_2 + \cdots + k_{n-r}\eta_{n-r} \\ &= (1 - k_1 - k_2 - \cdots - k_{n-r})\gamma + k_1(\gamma + \eta_1) + k_2(\gamma + \eta_2) + \cdots + k_{n-r}(\gamma + \eta_{n-r}) \end{aligned}$$

令:

$$\begin{aligned} c_0 &= 1 - k_1 - k_2 - \cdots - k_{n-r} \\ c_1 &= k_1 \\ c_2 &= k_2 \\ &\vdots \\ c_{n-r} &= k_{n-r} \end{aligned}$$

显然, $\sum_{i=0}^{n-r} c_i = 1$. □

例 3.6 $A^2 - A - 3I_n = 0$, 求证: $A - 2I_n$ 非异.

证明:

1、凑因子法: $(A - 2I_n)(A + I_n) = I_n$, 所以 $A - 2I_n$ 非异。

2、线性方程组解法: 只要证明 $(A - 2I_n)x = 0$ 只有零解。

设 x_0 是线性方程组 $(A - 2I_n)x = 0$ 的解, 那么

$$Ax_0 = 2x_0, A^2x_0 = 2Ax_0 = 4x_0,$$

$$(A^2 - A - 3I_n)x_0 = 0 \implies -x_0 = 0 \implies x_0 = 0. \quad \square$$

例 3.7 假设 $A \in M_{m \times n}(\mathbb{R})$, 证明: $\text{rank}(AA') = \text{rank}(A'A) = \text{rank}(A)$.

证明: 因为 $\text{rank}(AA') = \text{rank}(A'A)$, 故只需证明右边的等式。

设 $Ax = 0$ 的解空间为 V_A , $A'Ax = 0$ 的解空间为 $V_{A'A}$. $Ax = 0$ 时, $A'Ax$ 必为 0, 所以 $V_A \subseteq V_{A'A}$.

任取 $x_0 \in V_{A'A}$, 此时 $x_0 \in \mathbb{R}_n$ 且 $A'Ax_0 = 0$.
令 $Ax_0 = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} \in \mathbb{R}_m \implies (Ax_0)'(Ax_0) = 0 \implies (a_1, a_2, \cdots, a_m) \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} = 0$

$$\begin{aligned}
&\implies \sum_1^m a_i^2 = 0 \implies \forall i, a_i = 0 \implies Ax_0 = 0 \implies V_A' A \subseteq V_A \xrightarrow{V_A \subseteq V_{A'A}} V_A = V_{A'A} \\
&\implies \text{rank}(A) = \text{rank}(A'A) \qquad \square
\end{aligned}$$

4 线性映射

4.1 线性映射与矩阵

定理 4.1 设 $V \in \mathbb{K}^n, U \in \mathbb{K}^m, W \in \mathbb{K}^p$, 它们的基分别为 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}, \{f_1, f_2, \dots, f_m\}, \{g_1, g_2, \dots, g_p\}$, T 是从线性映射到其表示矩阵的线性同构. 设 $\varphi: V \rightarrow U, \psi: U \rightarrow W$ 为两个线性映射. 则 $\psi \circ \varphi: V \rightarrow W$ 为线性映射, 且 $T(\psi \circ \varphi) = T(\psi) \cdot T(\varphi)$.

证明: 依题意设 $T(\varphi) = A = (a_{ij})_{m \times n}, T(\psi) = B = (b_{ij})_{p \times m}$. 只要证 $T(\psi \circ \varphi) = BA$ 即可.

$$\begin{aligned}(\varphi(e_1), \varphi(e_2), \dots, \varphi(e_n)) &= (f_1, f_2, \dots, f_m)A \\ \iff \varphi(e_j) &= \sum_{i=1}^m a_{ij} f_i, \forall 1 \leq j \leq n \\ \xrightarrow{\text{将}\psi\text{作用到上式两边}} \psi(\varphi(e_j)) &= \psi\left(\sum_{i=1}^m a_{ij} f_i\right) = \sum_{i=1}^m a_{ij} \psi(f_i), \forall 1 \leq j \leq n \\ \implies (\psi\varphi(e_1), \psi\varphi(e_2), \dots, \psi\varphi(e_n)) &= (\psi(f_1), \psi(f_2), \dots, \psi(f_m))A\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\because (\psi(f_1), \psi(f_2), \dots, \psi(f_m)) &= (g_1, g_2, \dots, g_p)B, \\ \therefore (\psi\varphi(e_1), \psi\varphi(e_2), \dots, \psi\varphi(e_n)) &= (g_1, g_2, \dots, g_p)BA. \\ \therefore T(\psi \circ \varphi) &= T(\psi) \cdot T(\varphi).\end{aligned}$$

□

推论 4.1 $T: \mathcal{L}(V) \rightarrow M_n(\mathbb{K})$ 保持乘法, 从而 T 是一个 \mathbb{K} -代数同构.

推论 4.2 上述 T 同构有下列性质:

$$(1) T(I_V) = I_n;$$

$$(2) \varphi \in \mathcal{L}(V), \text{ 则 } \varphi \text{ 是自同构的充要条件是 } T(\varphi) \text{ 可逆且 } T(\varphi^{-1}) = T(\varphi)^{-1}.$$

证明:

$$(1) \text{ 任取 } V \text{ 的基 } \{e_1, e_2, \dots, e_n\}, I_V(e_i) = e_i \implies T(I_V) = I_n.$$

$$(2) \text{ 证明必要性: 设 } \varphi \text{ 为自同构, 则 } I_V = \varphi \cdot \varphi^{-1} = \varphi^{-1} \cdot \varphi.$$

$$I_n = T(I_V) = T(\varphi \cdot \varphi^{-1}) = T(\varphi) \cdot T(\varphi^{-1}) \implies T(\varphi) \text{ 为可逆阵且 } T(\varphi^{-1}) = T(\varphi)^{-1}.$$

证明充分性: 设 $T(\varphi)$ 为可逆阵, 即 $T(\varphi)^{-1}$ 存在. $T: \mathcal{L}(V) \rightarrow M_n(\mathbb{K})$ 为双射, 根据其满性: $\exists \psi \mapsto T(\varphi)^{-1}$, 即 $T(\psi) = T(\varphi)^{-1}$, 即 $I_n = T(\varphi) \cdot T(\psi) = T(\psi) \cdot T(\varphi) \implies T(I_V) = T(\varphi \circ \psi) = T(\psi \circ \varphi) \xrightarrow{\text{单性}} I_V = \varphi\psi = \psi\varphi \implies \psi = \varphi^{-1}, \varphi \text{ 为自同构.}$ □

4.2 线性映射的像与核

定理 4.2 设 $\varphi: V^n \rightarrow U^m$ 为线性映射, 设 V 的一组基为 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, U 的一组基为 $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, φ 在给定基下的表示矩阵为 $A \in M_{m \times n}(\mathbb{K})$. 则 $\text{rank}(\varphi) = \text{rank}(A)$, $\dim \text{Ker } \varphi = n - \text{rank}(A)$.

证明: 参看下面映射交换图: 上图中, $\eta_U \circ \varphi = \varphi_A \circ \eta_V$. 只需证 $\text{Ker } \varphi \cong \text{Ker } \varphi_A$, $\text{Im } \varphi \cong \text{Im } \varphi_A$.

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\varphi} & U \\ \eta_V \downarrow \cong & & \cong \downarrow \eta_U \\ \mathbb{K}^n & \xrightarrow{\varphi_A} & \mathbb{K}^m \end{array}$$

图 4.1: 映射交换图

$\text{Im } \varphi_A$.

Step1: 先证 $\eta_V(\text{Ker } \varphi) \subseteq \text{Ker } \varphi_A$, $\eta_U(\text{Im } \varphi) \subseteq \text{Im } \varphi_A$.

(1) 任取 $v \in \text{Ker } \varphi$, 只要证 $\eta_V(v) \in \text{Ker } \varphi_A$.

$\because \varphi_A(\eta_V(v)) = \eta_U(\varphi(v)) = \eta_U(0) = 0$, 得证.

(2) 任取 $\varphi(v) \in \text{Im } \varphi$, $v \in V$, 只要证 $\eta_U(\varphi(v)) \in \text{Im } \varphi_A$.

$\because \eta_U(\varphi(v)) = \varphi_A(\eta_V(v)) \in \text{Im } \varphi_A$, 得证.

Step2: 作限制: $\eta_V: \text{Ker } \varphi \rightarrow \text{Ker } \varphi_A$, $\eta_U: \text{Im } \varphi \rightarrow \text{Im } \varphi_A$.

二者都是单线性映射, 只需证明以上两个映射是满射.

(1) 先证 $\eta_V: \text{Ker } \varphi \rightarrow \text{Ker } \varphi_A$ 是满射:

\because 任取 $x \in \text{Ker } \varphi_A$, 即 $\varphi_A(x) = 0$, $x \in \text{Ker } \varphi_A \subseteq \mathbb{K}^n$ 且 $\eta_V: V \rightarrow \mathbb{K}^n$ 是满射, 从而 $\exists v \in V$ s.t. $\eta_V(v) = x$. $\eta_U(\varphi(v)) = \varphi_A(\eta_V(v)) = \varphi_A(x) = 0$, 由 η_U 为同构可知, $\varphi(v) = 0$, 即 $v \in \text{Ker } \varphi$.

(2) 再证 $\eta_U: \text{Im } \varphi \rightarrow \text{Im } \varphi_A$ 是满射.

\because 任取 $\varphi_A(x) \in \text{Im } \varphi_A$, 其中 $x \in \mathbb{K}^n$. 取 $v \in V$ s.t. $\eta_V(v) = x$. $\eta_U(\varphi(v)) = \varphi_A(\eta_V(v)) = \varphi_A(x)$, $\varphi(v) \in \text{Im } \varphi$. 从而 $\eta_U: \text{Im } \varphi \rightarrow \text{Im } \varphi_A$ 是满射.

Step3: $\text{Ker } \varphi_A = \{x \in \mathbb{K}^n | Ax = 0\}$ 即 $\text{Ker } \varphi_A$ 为 $Ax = 0$ 的解空间 V_A .

$\text{Ker } \varphi \cong \text{Ker } \varphi_A \implies \dim \text{Ker } \varphi = \dim \text{Ker } \varphi_A = \dim V_A = n - \text{rank}(A)$.

作列分块 $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, 其中 $\alpha_i \in \mathbb{K}_m$,

另 $\text{Im } \varphi_A = \{Ax | x \in \mathbb{K}^n\}$, 其中 $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathbb{K}^n$,

从而推出 $\text{Im } \varphi_A = \{x_1\alpha_1 + x_2\alpha_2 + \dots + x_n\alpha_n | x_i \in \mathbb{K}\} = L(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$.

$\text{Im } \varphi \cong \text{Im } \varphi_A \implies \text{rank}(\varphi) = \dim \text{Im } \varphi = \dim \text{Im } \varphi_A = \dim L(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$

$= \text{rank}(\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}) = \text{rank}(A)$. □

推论 4.3 (线性映射的维数公式) 设 $\varphi: V^n \longrightarrow U^m$ 为线性映射, 则 $\dim \text{Ker } \varphi + \dim \text{Im } \varphi = \dim V$.

证明: \because 根据定理4.2, $\dim \text{Ker } \varphi = n - \text{rank}(A)$, $\dim \text{Im } \varphi = \text{rank}(A)$
 $\therefore \dim \text{Ker } \varphi + \dim \text{Im } \varphi = n = \dim V$. □

推论 4.4 设 $\varphi: V^n \longrightarrow U^m$ 为线性映射, φ 在某组基下的表示矩阵为 $A^{m \times n}$, 则

(1) φ 为满射 $\iff A$ 为行满秩矩阵, 即 $\text{rank}(A) = m$;

(2) φ 为单射 $\iff A$ 为列满秩矩阵, 即 $\text{rank}(A) = n$.

证明: (1) 根据定理4.2:

$$\begin{aligned} \varphi \text{ 是满射} &\iff \dim \text{Im } \varphi = \dim U = m \\ &\xLeftrightarrow{\text{rank}(\varphi)=\text{rank}(A)} \dim \text{Im } \varphi = \text{rank}(A) = m \end{aligned}$$

(2) 根据定理4.2:

$$\begin{aligned} \varphi \text{ 是单射} &\iff \dim \text{Ker } \varphi = 0 \\ &\xLeftrightarrow{\dim \text{Ker } \varphi = n - \text{rank}(A)} \text{rank}(A) = n \end{aligned}$$

□

推论 4.5 设 $\varphi: V^n \longrightarrow U^n$ 为线性映射且 $\dim V = \dim U = n$, 则以下结论等价:

(1) φ 为单射;

(2) φ 为满射;

(3) φ 为同构.

证明:

(1) 设 φ 为单射, 只要证 φ 为满射.

$$\begin{aligned} &\because 0 = \dim \text{Ker } \varphi = \dim V - \dim \text{Im } \varphi \\ &\implies \dim \text{Im } \varphi = \dim V = \dim U \\ &\implies \text{Im } \varphi = U \end{aligned}$$

(2) 设 φ 为满射, 只要证 φ 为单射.

$$\begin{aligned} \text{Im } \varphi = U &\implies \dim \text{Im } \varphi = \dim U = \dim V \\ &\implies \dim \text{Ker } \varphi = 0 \implies \text{Ker } \varphi = 0 \end{aligned}$$

(3) 由以上 (1) 和 (2) 可得.

特别地, 当 $\varphi \in \mathcal{L}(V^n)$ 时, φ 为自同构 $\iff \varphi$ 为单射 $\iff \varphi$ 为满射. \square

推论 4.6 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V^n)$, 则:

φ 为满射或单射 $\iff \varphi$ 在任一组基下的表示矩阵可逆.

证明: 从几何角度证明: 由推论 4.5 可知, φ 为满射或单射 $\iff \varphi$ 为自同构 $\iff \varphi$ 在任一组基下表示矩阵可逆.

从代数角度证明: φ 为满射或单射 $\iff A^{n \times n}$ 为行或列满秩矩阵 $\iff A$ 为非异矩阵. \square

例 4.1 设 $\varphi : V^n \implies U^m$ 为线性映射, V 的一组基为 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, U 的一组基为 $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$. 计算:

(1) $\text{Ker } \varphi$ 用 e_i 的线性组合表示;

(2) $\text{Im } \varphi$ 用 f_i 的线性组合表示.

解: 参考图 4.1:

$\eta_V : \text{Ker } \varphi \longrightarrow \text{Ker } \varphi_A$ 为线性同构. 该映射将 V 中任意向量 v 映射成其坐标向量, 即 $v \mapsto (x_1, x_2, \dots, x_n)'$; 其逆映射为 $\eta_V^{-1} : \text{Ker } \varphi_A \longrightarrow \text{Ker } \varphi$, 该映射将核空间中向量的坐标映射回核空间中的向量, 即 $(x_1, x_2, \dots, x_n)' \mapsto x_1 e_1 + x_2 e_2 + \dots + x_n e_n$.

同理, $\eta_U : \text{Im } \varphi \longrightarrow \text{Im } \varphi_A$ 为线性同构, 其逆映射为 $\eta_U^{-1} : \text{Im } \varphi_A \longrightarrow \text{Im } \varphi$, 将像的坐标向量映射回像向量, 即 $(y_1, y_2, \dots, y_m)' \mapsto y_1 f_1 + y_2 f_2 + \dots + y_m f_m$.

根据定理 4.2 中的证明中 Step3 中所述, $\text{Ker } \varphi = \{x \in \mathbb{K}_n | Ax = 0\}$ 即 $\text{Ker } \varphi_A$ 为 $Ax = 0$ 的解空间, 又 $\text{Im } \varphi_A = \{Ax | x \in \mathbb{K}_n\} = L(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, 即 $\text{Im } \varphi_A$ 为 A 的列向量张成的子空间.

计算方法:

(1) 对表示矩阵 A 实施初等行变换 (必要时进行列对换):

得到 A 的列向量极大无关组 $\{\alpha_{i_1}, \alpha_{i_2}, \dots, \alpha_{i_r}\}$, $r = \text{rank}(A)$;

得到 $Ax = 0$ 的基础解系 $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-r}\}$.

(2) 算出 $\text{Ker } \varphi$ 和 $\text{Im } \varphi$:

$$\text{Ker } \varphi = k_1 \eta_V^{-1}(\beta_1) + k_2 \eta_V^{-1}(\beta_2) + \dots + k_{n-r} \eta_V^{-1}(\beta_{n-r}), k \in \mathbb{K}$$

$$\text{Im } \varphi = l_1 \eta_U^{-1}(\alpha_{i_1}) + l_2 \eta_U^{-1}(\alpha_{i_2}) \dots + l_r \eta_U^{-1}(\alpha_{i_r}), l \in \mathbb{K}$$

例 4.2 V^5, U^4 为 \mathbb{K} 上两个线性空间且 $\varphi : V \longrightarrow U$ 为线性映射, $\{e_1, e_2, e_3, e_4,$

$e_5\}$ 为 V 的基, $\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ 为 U 的基. φ 在上述基下的表示矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & -3 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & -3 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & -2 \\ 2 & 3 & -5 & -17 & 10 \end{pmatrix},$$

求 $\text{Im } \varphi$ 和 $\text{Ker } \varphi$.

解: 将表示矩阵 A 做行变换,

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & -3 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & -3 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & -2 \\ 2 & 3 & -5 & -17 & 10 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & -\frac{9}{4} \\ 0 & 1 & 0 & -3 & \frac{11}{4} \\ 0 & 0 & 1 & 2 & -\frac{5}{4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

其中, A 的最大无关列向量组为

$$\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\} = \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ -5 \end{pmatrix} \right\},$$

$\text{Im } \varphi = k_1(f_1 + 2f_2 + f_3 + 2f_4) + k_2(2f_1 + f_2 + f_3 + 3f_4) + k_3(f_1 + f_2 + 2f_3 - 5f_4), k \in \mathbb{K};$

$Ax = 0$ 的基础解系为

$$\beta_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \\ -2 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \beta_2 = \begin{pmatrix} 9 \\ -11 \\ 5 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix},$$

$\text{Ker } \varphi = l_1(-e_1 + 3e_2 - 2e_3 + e_4) + l_2(9e_1 - 11e_2 + 5e_3 + 4e_5), l \in \mathbb{K}.$

4.3 不变子空间

例 4.3 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V)$ 是纯量变换, 即 $\varphi(\alpha) = k\alpha$, 其中 $k \in \mathbb{K}$ 固定, 则 V 的任一子空间都是 φ -不变子空间.

引理 4.1 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V)$, $U = L(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, 其中, $\alpha_i \in V$, 则 U 为 φ -不变子空间 $\iff \varphi(\alpha_i) \in U, \forall 1 \leq i \leq m.$

证明:

先证必要性: U 是 φ -不变子空间, 由不变子空间的定义可知, $\varphi(\alpha_i) \in U.$

再证必要性: 设 $\varphi(\alpha_i) \in U, 1 \leq i \leq m$.

任取 $\alpha \in U$, 可设 $\alpha = \lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2 + \cdots + \lambda_m \alpha_m, \lambda_i \in \mathbb{K}$,

则 $\varphi(\alpha) = \lambda_1 \varphi(\alpha_1) + \lambda_2 \varphi(\alpha_2) + \cdots + \lambda_m \varphi(\alpha_m) \in U$. \square

定理 4.3 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V^n)$, U 是 φ -不变子空间, 取 U 的一组基 $\{e_1, e_2, \cdots, e_r\}$, 再扩张为 V 的基 $\{e_1, e_2, \cdots, e_r, e_{r+1}, \cdots, e_n\}$, 则 φ 在上述基下的表示矩阵为 $\begin{pmatrix} A & B \\ O & D \end{pmatrix}$.

证明: 由不变子空间的定义可知, $\varphi(e_i) \in U (1 \leq i \leq r)$,

$$\varphi(e_1) = a_{11}e_1 + a_{21}e_2 + \cdots + a_{r1}e_r,$$

$$\varphi(e_2) = a_{12}e_1 + a_{22}e_2 + \cdots + a_{r2}e_r,$$

\cdots

$$\varphi(e_r) = a_{1r}e_1 + a_{2r}e_2 + \cdots + a_{rr}e_r,$$

$$\therefore (\varphi(e_1), \varphi(e_2), \cdots, \varphi(e_n)) = (e_1, e_2, \cdots, e_n) \begin{pmatrix} A & B \\ O & D \end{pmatrix}$$

\square

注 定理4.3的逆命题也成立: 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V^n)$, φ 在一组基 $\{e_1, e_2, \cdots, e_n\}$ 下的表示矩阵为 $\begin{pmatrix} A & B \\ O & D \end{pmatrix}$. 令 $U = L(e_1, e_2, \cdots, e_r)$, 则 U 是 φ -不变子空间.

证明: 由引理4.1 \implies 只要 $\varphi(e_i) \in U, \forall 1 \leq i \leq r$.

由表示矩阵定义可知:

$$(\varphi(e_1), \varphi(e_2), \cdots, \varphi(e_r), \cdots, \varphi(e_n)) = (e_1, e_2, \cdots, e_r, \cdots, e_n) \begin{pmatrix} A^{r \times r} & B^{r \times (n-r)} \\ O & D^{(n-r) \times (n-r)} \end{pmatrix}$$

$$\implies \varphi(e_i) \in U, \forall 1 \leq i \leq r. \quad \square$$

引理 4.2 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V^n)$, $V = V_1 \oplus V_2$, 其中, V_1, V_2 都是 φ -不变子空间, 则可取 V_1, V_2 的一组基拼成 V 的一组基, 使得 φ 在这组基下的表示矩阵为 $\begin{pmatrix} A & O \\ O & D \end{pmatrix}$.

证明: 取 V_1 的基 $\{e_1, e_2, \cdots, e_r\}$ 及 V_2 的基 $\{e_{r+1}, e_{r+2}, \cdots, e_n\}$

$$\implies \varphi(e_i) \in V_1 (1 \leq i \leq r), \varphi(e_j) \in V_2 (r+1 \leq j \leq n)$$

$$\implies \varphi(e_1), \varphi(e_2), \cdots, \varphi(e_r), \cdots, \varphi(e_n) = (e_1, e_2, \cdots, e_r, \cdots, e_n) \begin{pmatrix} A^{r \times r} & O \\ O & D^{(n-r) \times (n-r)} \end{pmatrix} \quad \square$$

推广 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V^n)$, $V = V_1 \oplus V_2 \oplus \cdots \oplus V_m$, 其中 V_i 均为 φ -不变子空间, 取定 V_i 的基, 设 $\varphi|_{V_i}$ 在给定基下的表示矩阵为 $A_i (1 \leq i \leq m)$. 将 V_i 的基拼成 V 的基, 则 φ 的表示矩阵为 $\text{diag}\{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$.

例 4.4 V^3 的基为 $\{e_1, e_2, e_3\}$, $\varphi \in \mathcal{L}(V)$ 的表示矩阵为 $A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -1 \\ 2 & 2 & -1 \\ 2 & 2 & 0 \end{pmatrix}$. 求证:

$U = L(e_3, e_1 + e_2 + 2e_3)$ 是 φ -不变子空间.

证明: 由引理4.1 \implies 只要证 $\varphi(e_3) \in U, \varphi(e_1 + e_2 + 2e_3) \in U$.

方法一: 直接验证

$\because \eta: V \longrightarrow \mathbb{K}^3$ 为线性同构, \therefore 只要对坐标向量进行验证即可.

$$\because e_3 \mapsto \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, e_1 + e_2 + 2e_3 \mapsto \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix},$$

$$\therefore \varphi(e_3) = A \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \varphi(e_1 + e_2 + 2e_3) = A \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix}.$$

因此 $\varphi(e_3) = -(e_1 + e_2 + 2e_3) + 2e_3, \varphi(e_1 + e_2 + 2e_3) = 2(e_1 + e_2 + 2e_3)$

所以, $\varphi(e_3) \in U, \varphi(e_1 + e_2 + 2e_3) \in U$.

方法二: 证明 $\varphi(e_3)$ 和 $\varphi(e_1 + e_2 + 2e_3)$ 是 e_3 和 $e_1 + e_2 + 2e_3$ 的线性组合

$$\because \text{rank } U = \text{rank}(e_3, e_1 + e_2 + 2e_3) = \text{rank} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} = 2,$$

\therefore 只要证 $\text{rank}(\varphi(e_3), e_3, e_1 + e_2 + 2e_3) = \text{rank}(\varphi(e_1 + e_2 + 2e_3), e_3, e_1 + e_2 + 2e_3) = 2$ 即可.

$$\text{显然, } \text{rank}(\varphi(e_3), e_3, e_1 + e_2 + 2e_3) = \text{rank} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix} = 2,$$

$$\text{rank}(\varphi(e_1 + e_2 + 2e_3), e_3, e_1 + e_2 + 2e_3) = \text{rank} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ 4 & 1 & 2 \end{pmatrix} = 2. \quad \square$$

从图4.1可以看出, 上面是线性空间表示的几何语言, 下面是向量空间表示的代数语言, 很多问题可以在几何和代数之间互相转化.

1. 几何转化成代数

例 4.5 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V, U), \text{rank}(\varphi) = r \geq 1$, 求证: 存在 $\varphi_i \in \mathcal{L}(V, U), \text{rank}(\varphi_i) = 1$ 且 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_r$.

证明: 设 $A \in M_{m \times n}(\mathbb{K}), \text{rank}(A) = r \geq 1$.

只需证明 $\exists A_i \in M_{m \times n}(\mathbb{K}), \text{rank}(A_i) = 1$ 且 $A = A_1 + A_2 + \cdots + A_r$.

$$\because \exists \text{非异阵 } P, Q \text{ s.t. } A = P \begin{pmatrix} I_r & O \\ O & O \end{pmatrix} Q,$$

设 $E_{ij} (i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n)$ 是第 (i, j) 元素为 1、其余所有元素为 0 的 $m \times n$ 矩阵, 令 $A_i = P E_{ii} Q, 1 \leq i \leq r$, 则 $\text{rank}(A_i) = 1$ 且 $A = A_1 + A_2 + \cdots + A_r$. \square

例 4.6 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V^m), \varphi^m = 0, n = mq + 1$, 求证: $\text{rank}(\varphi) \leq n - q - 1$.

证明: 设 $A \in M_n(\mathbb{K})$, $A^m = 0$, $n = mq + 1$, 只要证 $\text{rank}(A) \leq n - q - 1$.

用反证法: 设 $\text{rank}(A) \geq n - q$.

$$\because 0 = \text{rank}(A^m) = \text{rank}(A^{m-1} \cdot A) \stackrel{\text{Sylvester 不等式}}{\geq} \text{rank}(A^{m-1}) + \text{rank}(A) - n \geq \text{rank}(A^{m-1}) - q \\ \implies \text{rank}(A^{m-1}) \leq q$$

$$\therefore q \geq \text{rank}(A^{m-1}) = \text{rank}(A^{m-2} \cdot A) \geq \text{rank}(A^{m-2}) + \text{rank}(A) - n \geq \text{rank}(A^{m-2}) - q \implies \\ \text{rank}(A^{m-2}) \leq 2q \xrightarrow{\text{反复应用以上过程}} \dots \implies \text{rank}(A) \leq (m-1)q$$

这与 $\text{rank}(A) \geq n - q \stackrel{n=mq+1}{=} (m-1)q + 1$ 矛盾. \square

2. 代数转化成几何

例 4.7 设 A 是 n 阶方阵, 求证: $\text{rank}(A^n) = \text{rank}(A^{n+1}) = \text{rank}(A^{n+2}) = \dots$.

证明: 转化成几何问题: 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V^n)$, 则存在 $m \in [0, n]$ 使得:

$$\text{Im } \varphi^m = \text{Im } \varphi^{m+1} = \dots, \quad (4.1)$$

$$\text{Ker } \varphi^m = \text{Ker } \varphi^{m+1} = \dots, \quad (4.2)$$

$$V = \text{Ker } \varphi^m \oplus \text{Im } \varphi^m. \quad (4.3)$$

$$\because \varphi^2(v) = \varphi(\varphi(v)) \in \text{Im } \varphi, \therefore V \supseteq \text{Im } \varphi \supseteq \text{Im } \varphi^2 \supseteq \text{Im } \varphi^3 \supseteq \dots,$$

$$\text{同理, } \because v \in \text{Ker } \varphi \text{ 时, } \varphi^2(v) = \varphi(\varphi(v)) = \varphi(0) = 0,$$

$$\therefore \text{Ker } \varphi \subseteq \text{Ker } \varphi^2 \subseteq \text{Ker } \varphi^3 \subseteq \dots \subseteq V.$$

$$\therefore V \supseteq \text{Im } \varphi \supseteq \text{Im } \varphi^2 \supseteq \dots \supseteq \text{Im } \varphi^n \supseteq \text{Im } \varphi^{n+1},$$

$$\therefore \dim V = n \geq \dim \text{Im } \varphi \geq \dim \text{Im } \varphi^2 \geq \dim \text{Im } \varphi^n \geq \dim \text{Im } \varphi^{n+1} \geq 0,$$

由抽屉原理, 以上 $n+2$ 个整数维数必有两个相等,

不妨设 $\exists m \in [0, n]$, s. t. $\dim \text{Im } \varphi^m = \dim \text{Im } \varphi^{m+1}$,

上式等价于 $\text{Im } \varphi^m = \text{Im } \varphi^{m+1}$, 只要证 $\forall k \geq m, \text{Im } \varphi^k = \text{Im } \varphi^{k+1}$.

$\therefore \text{Im } \varphi^{k+1} \subseteq \text{Im } \varphi^k$, 任取 $\varphi^k(v) \in \text{Im } \varphi^k$:

$$\varphi^m(v) \in \text{Im } \varphi^m = \text{Im } \varphi^{m+1}, \exists u \in V \text{ s. t. } \varphi^m(v) = \varphi^{m+1}(u).$$

$$\varphi^k(v) = \varphi^{k-m}(\varphi^m(v)) = \varphi^{k-m}(\varphi^{m+1}(u)) = \varphi^{k+1}(u) \in \text{Im } \varphi^{k+1}.$$

$$\forall k \geq m, \dim \text{Ker } \varphi^k + \dim \text{Im } \varphi^k = \dim V = n.$$

上式中, $\forall k \geq m, \text{Im } \varphi^k$ 的值不变, 所以 $\text{Ker } \varphi^k$ 的值亦不变. 因此, 4.1、4.2 两式得证.

下面证 4.3 式:

①先证 $\text{Ker } \varphi^m \cap \text{Im } \varphi^m = 0$.

\therefore 任取 $\alpha \in \text{Ker } \varphi^m \cap \text{Im } \varphi^m$, 即 $\varphi^m(\alpha) = 0, \alpha = \varphi^m(\beta) \implies 0 = \varphi^m(\alpha) = \varphi^{2m}(\beta)$

即 $\beta \in \text{Ker } \varphi^{2m} = \text{Ker } \varphi^m \implies \varphi^m(\beta) = 0$.

②再证 $V = \text{Ker } \varphi^m + \text{Im } \varphi^m$.

\therefore 任取 $\alpha \in V, \varphi^m(\alpha) \in \text{Im } \varphi^m = \text{Im } \varphi^{2m}, \exists \beta \in V \text{ s. t. } \varphi^m(\alpha) = \varphi^{2m}(\beta)$

$\varphi^m(\alpha - \varphi^m(\beta)) = 0$, 设 $\alpha - \varphi^m(\beta) = \gamma$, 即 $\gamma \in \text{Ker } \varphi^m \implies \alpha = \gamma + \varphi^m(\beta) \in \text{Ker } \varphi^m + \text{Im } \varphi^m$.

以上证毕. 此外, 由①亦可结合维数公式 $\implies V = \text{Ker } \varphi^m \oplus \text{Im } \varphi^m$. \square

例 4.8 证明线性映射的维数公式: $\varphi \in \mathcal{L}(V^n, U^m)$, 则 $\dim \text{Ker } \varphi + \dim \text{Im } \varphi = \dim V = n$.

证明: 任取 $\text{Ker } \varphi$ 的一组基 $\{e_1, e_2, \dots, e_k\}$, 扩展为 V 的一组基 $\{e_1, e_2, \dots, e_k, e_{k+1}, \dots, e_n\}$, $\forall \alpha \in V$, 设 $\alpha = \sum_{i=1}^n \lambda_i e_i$, 则:

$$\varphi(\alpha) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi(e_i) = \lambda_{k+1} \varphi(e_{k+1}) + \lambda_{k+2} \varphi(e_{k+2}) + \dots + \lambda_n \varphi(e_n).$$

$\Rightarrow \text{Im } \varphi = L(\varphi(e_{k+1}), \varphi(e_{k+2}), \dots, \varphi(e_n))$, 只要证: $\varphi(e_{k+1}), \varphi(e_{k+2}), \dots, \varphi(e_n)$ 线性无关.

设 $c_{k+1} \varphi(e_{k+1}) + c_{k+2} \varphi(e_{k+2}) + \dots + c_n \varphi(e_n) = 0$, 则 $\varphi(c_{k+1} e_{k+1} + c_{k+2} e_{k+2} + \dots + c_n e_n) = 0$, 因此, $c_{k+1} e_{k+1} + c_{k+2} e_{k+2} + \dots + c_n e_n \in \text{Ker } \varphi$

$$\Rightarrow c_{k+1} e_{k+1} + c_{k+2} e_{k+2} + \dots + c_n e_n = -c_1 e_1 - c_2 e_2 - \dots - c_k e_k$$

$$\Rightarrow c_1 e_1 + c_2 e_2 + \dots + c_k e_k + c_{k+1} e_{k+1} + \dots + c_n e_n = 0.$$

$\because \{e_1, e_2, \dots, e_k, e_{k+1}, \dots, e_n\}$ 是 V 的一组基, $\therefore c_1 = c_2 = \dots = c_k = c_{k+1} = \dots = c_n = 0 \quad \square$

例 4.9 设 A, B 都是 $m \times n$ 矩阵, 求证: 方程组 $Ax = 0, Bx = 0$ 同解的充分必要条件是存在 m 阶非异阵 P , 使 $B = PA$.

证明: 转换成几何表述:

设 $\varphi, \psi \in \mathcal{L}(V^n, U^m)$, $\text{Ker } \varphi = \text{Ker } \psi$ 的充分必要条件是 \exists 自同构 $\xi \in \mathcal{L}(U)$ s. t. $\psi = \xi \varphi$. \square

5 多项式

5.1 复系数多项式

定理 5.1 (代数基本定理) 每个次数大于零的复数域上的多项式都至少有一个复数根.

推论 5.1 设 $n \geq 1$, 以下记法等价:

- (1) 任一 n 次复系数多项式至少有一个复根;
- (2) 复系数不可约多项式都是一次多项式;
- (3) 任一复系数多项式都是一次多项式的乘积;
- (4) 任一 n 次复系数多项式恰有 n 个复根 (计重根) .

证明: (1) \implies (2): 设 $P(x)$ 在 \mathbb{C} 上不可约.

由 (1) 可知, b 为 $P(x)$ 的根, 则 $(x - b) \mid P(x)$, 即 $P(x) = (x - b)q(x)$,

由 $P(x)$ 不可约可知, $q(x) = c \neq 0$, 从而 $P(x) = c(x - b)$ 是一次多项式.

(2) \implies (3): 因式分解定理即得.

(3) \implies (4): $f(x) = c(x - b_1)(x - b_2) \cdots (x - b_n)$, 则 $f(x)$ 的根为 b_1, b_2, \dots, b_n .

(4) \implies (1): 显然. □

定理 5.2 (Osada) $f(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0$ 为整系数多项式, 且 $|a_0| > 1 + \sum_{i=1}^{n-1} |a_i|$, 其中 $|a_0|$ 为素数, 则 $f(x)$ 在有理数域上不可约.

5.2 结式和判别式

定理 5.3 $f(x)$ 与 $g(x)$ 在 \mathbb{C} 上有公根 $\iff R(f, g) = 0$, $(f(x), g(x)) = 1 \iff R(f, g) \neq 0$.

定理 5.4 设 $f(x)$ 的 n 个根为 x_1, x_2, \dots, x_n , $g(x)$ 的 m 个根为 y_1, y_2, \dots, y_m , 则

$$R(f, g) = a_0^m b_0^n \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (x_i - y_j) \quad (\dagger)$$

证明: Step 1 首一化: 令 $f(x) = a_0 f_1(x)$, $g(x) = b_0 g_1(x)$, f_1, g_1 均为首一多项式.

$$R(f, g) = \begin{vmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \cdots & a_n & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_0 & a_1 & \cdots & a_{n-1} & a_n & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & a_0 & \cdots & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_0 & a_1 & \cdots & a_n \\ b_0 & b_1 & b_2 & \cdots & b_m & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & b_0 & b_1 & \cdots & b_{m-1} & b_m & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & b_0 & \cdots & b_{m-2} & b_{m-1} & b_m & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_0 & b_1 & \cdots & b_m \end{vmatrix}$$

从 $R(f, g)$ 前 m 行各提取一个 a_0 , 从 $R(f, g)$ 后 n 行各提取一个 b_0 , 得 $R(f, g) = a_0^m b_0^n R(f_1, g_1)$.
所以只要证明 $R(f_1, g_1) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (x_i - y_j)$.

Step 2: 设 $f_1(x) = (x - x_1)(x - x_2) \cdots (x - x_n)$, $g_1(x) = (x - y_1)(x - y_2) \cdots (x - y_m)$.

若 $\exists 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ s.t. $x_i = y_j$, 由定理5.3 \implies (†)式成立.

下面设 $x_i \neq y_j, \forall 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ 且 x_1, x_2, \cdots, x_n 互不相同, y_1, y_2, \cdots, y_m 互不相同,
设 $R(f_1, g_1)$ 在是 f_1 和 g_1 结式的方阵, 则

$$R(f_1, g_1) \begin{pmatrix} x_1^{m+n-1} & x_2^{m+n-1} & \cdots & x_n^{m+n-1} & y_1^{m+n-1} & y_2^{m+n-1} & \cdots & y_m^{m+n-1} \\ x_1^{m+n-2} & x_2^{m+n-2} & \cdots & x_n^{m+n-2} & y_1^{m+n-2} & y_2^{m+n-2} & \cdots & y_m^{m+n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n & y_1 & y_2 & \cdots & y_m \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} x_1^{m-1} f_1(x_1) & x_2^{m-1} f_1(x_2) & \cdots & x_n^{m-1} f_1(x_n) & y_1^{m-1} f_1(y_1) & y_2^{m-1} f_1(y_2) & \cdots & y_m^{m-1} f_1(y_m) \\ x_1^{m-2} f_1(x_1) & x_2^{m-2} f_1(x_2) & \cdots & x_n^{m-2} f_1(x_n) & y_1^{m-2} f_1(y_1) & y_2^{m-2} f_1(y_2) & \cdots & y_m^{m-2} f_1(y_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(x_1) & f_1(x_2) & \cdots & f_1(x_n) & f_1(y_1) & f_1(y_2) & \cdots & f_1(y_m) \\ x_1^{n-1} g_1(x_1) & x_2^{n-1} g_1(x_2) & \cdots & x_n^{n-1} g_1(x_n) & y_1^{n-1} g_1(y_1) & y_2^{n-1} g_1(y_2) & \cdots & y_m^{n-1} g_1(y_m) \\ x_1^{n-2} g_1(x_1) & x_2^{n-2} g_1(x_2) & \cdots & x_n^{n-2} g_1(x_n) & y_1^{n-2} g_1(y_1) & y_2^{n-2} g_1(y_2) & \cdots & y_m^{n-2} g_1(y_m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_1(x_1) & g_1(x_2) & \cdots & g_1(x_n) & g_1(y_1) & g_1(y_2) & \cdots & g_1(y_m) \end{pmatrix}$$

$\because x_i, y_j$ 分别是 $f_1(x), g_1(x)$ 的解, $\therefore f_1(x_i) = 0, g_1(y_j) = 0$, 但是 $f_1(y_j) \neq 0, g_1(x_i) \neq 0$. 于是,

$$\begin{aligned}
 R(f_1, g_1) & \begin{pmatrix} x_1^{m+n-1} & x_2^{m+n-1} & \cdots & x_n^{m+n-1} & y_1^{m+n-1} & y_2^{m+n-1} & \cdots & y_m^{m+n-1} \\ x_1^{m+n-2} & x_2^{m+n-2} & \cdots & x_n^{m+n-2} & y_1^{m+n-2} & y_2^{m+n-2} & \cdots & y_m^{m+n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n & y_1 & y_2 & \cdots & y_m \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & y_1^{m-1}f_1(y_1) & \cdots & y_m^{m-1}f_1(y_m) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & f_1(y_1) & \cdots & f_1(y_m) \\ x_1^{n-1}g_1(x_1) & \cdots & x_n^{n-1}g_1(x_n) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_1(x_1) & \cdots & g_1(x_n) & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

(5.1)式左边是结式方阵和一个降幂的 Vander Monde 矩阵的乘积, 其乘积的行列式值为:

$$R(f_1, g_1) \prod_{1 \leq i < k \leq n} (x_i - x_k) \prod_{1 \leq j < l \leq m} (y_j - y_l) \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (x_i - y_j) \quad (5.2)$$

(5.1)式右边是一个分块对角方阵, 前 n 列分别提出 $g_1(x_i)$, 后 m 列分别提出 $f_1(y_j)$ 之后, 剩下非零部分是两个降幂 Vander Monde 矩阵, 按前 m 行、 n 列进行 Laplace 展开, 其行列式值为:

$$(-1)^{mn} \prod_{i=1}^n g_1(x_i) \prod_{j=1}^m f_1(y_j) \prod_{1 \leq i < k \leq n} (x_i - x_k) \prod_{1 \leq j < l \leq m} (y_j - y_l) \quad (5.3)$$

(5.2) = (5.3), 等式两边约去非零的相同部分后, 得:

$$R(f_1, g_1) \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (x_i - y_j) = (-1)^{mn} \prod_{i=1}^n g_1(x_i) \prod_{j=1}^m f_1(y_j) \quad (5.4)$$

(5.4)式右边里,

$$\begin{aligned}
 (-1)^{mn} \prod_{j=1}^m f_1(y_j) &= \prod_{j=1}^m ((-1)^n f_1(y_j)) \\
 &= \prod_{j=1}^m ((-1)^n (y_j - x_1) \cdots (y_j - x_n)) \\
 &= \prod_{j=1}^m ((x_1 - y_j) \cdots (x_n - y_j)) \\
 &= \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (x_i - y_j) \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

将(5.5)式代入(5.4)式右边并约去非零部分，得

$$\begin{aligned}
 R(f_1, g_1) &= \prod_{i=1}^n g_1(x_i) \\
 &= \prod_{i=1}^n ((x_i - y_1) \cdots (x_i - y_m)) \\
 &= \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (x_i - y_j)
 \end{aligned}$$

Step 3: 摄动. $\exists c_1, \dots, c_n, d_1, \dots, d_n \in \mathbb{C}$

s. t. $\forall 0 < t \ll 1, x_1 + c_1 t, \dots, x_n + c_n t, y_1 + d_1 t, \dots, y_m + d_m t$ 互不相同.

设 $f_t(x) = (x - x_1 - c_1 t) \cdots (x - x_n - c_n t), g_t(x) = (x - y_1 - d_1 t) \cdots (x - y_m - d_m t),$
 $\forall 0 < t \ll 1, f_t(x), g_t(x)$ 系数是 t 的多项式，且 $f_0(x) = f_1(x), g_0(x) = g_1(x)$, 由 Step 2 知,

$$R(f_t, g_t) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (x_i + c_i t - y_j - d_j t)$$

令 $t \rightarrow 0^+$, 得

$$R(f_1, g_1) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (x_i - y_j)$$

□

6 特征值

6.1 对角化

定理 6.1 设 φ 是 n 维线性空间 V 上的线性变换, 则存在 V 的一组基, 使得 φ 在这组基下的表示矩阵为对角阵的充分必要条件是 φ 有 n 个线性无关的特征向量 (这样的线性变换成为可对角化线性变换).

证明: 必要性. 设 φ 可对角化, 根据定义即存在 V 的一组基 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 使得 φ 在此基下的表示矩阵为对角阵 $\text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, 则

$$\begin{aligned}(\varphi(e_1), \varphi(e_2), \dots, \varphi(e_n)) &= (e_1, e_2, \dots, e_n) \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \dots \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix} \\ \implies \varphi(e_1) &= \lambda_1 e_1, \varphi(e_2) = \lambda_2 e_2, \dots, \varphi(e_n) = \lambda_n e_n \\ \xrightarrow{e_i \text{ 为基向量}} \varphi &\text{ 有 } n \text{ 个线性无关的特征向量.}\end{aligned}$$

充分性. 设 φ 有 n 个线性无关的特征向量 e_1, e_2, \dots, e_n , 即 $\varphi(e_i) = \lambda_i e_i, (1 \leq i \leq n)$, 并且 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 是 V 的一组基, 所以

$$\begin{aligned}(\varphi(e_1), \varphi(e_2), \dots, \varphi(e_n)) &= (e_1, e_2, \dots, e_n) \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \dots \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix} \\ \implies \varphi &\text{ 的表示矩阵为对角阵}\end{aligned}$$

故 φ 可对角化. □

定理 6.2 若 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ 为数域 \mathbb{K} 上 n 维线性空间 V 上线性变换 φ 的不同特征值, 则 $V_1 + V_2 + \dots + V_k = V_1 \oplus V_2 \oplus \dots \oplus V_k$.

推论 6.1 线性变换 φ 属于不同特征值的特征向量必线性无关.

证明: 设 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ 为 φ 的不同特征值, v_1, v_2, \dots, v_k 为对应的特征向量. 令 $c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots + c_k v_k = 0$, 那么, $c_1 v_1 \in V_1, c_2 v_2 \in V_2, \dots, c_k v_k \in V_k$, 由定理 6.2 可知, $c_1 v_1 = c_2 v_2 = \dots = c_k v_k = 0$, 由于 v_i 都是特征向量, 故 $v_i \neq 0$, 所以, $c_1 = c_2 = \dots = c_k = 0$, 因此, v_1, v_2, \dots, v_k 线性无关. □

6.2 极小多项式与 Cayley-Hamilton 定理

命题 6.1 任一 n 阶矩阵的极小多项式必唯一.

命题 6.2 相似的矩阵具有相同的极小多项式.

命题 6.3 设 A 是一个分块对角阵

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & A_2 & \\ & & \ddots \\ & & & A_k \end{pmatrix},$$

其中 A_i 都是方阵, 则 A 的极小多项式等于诸 A_i 的极小多项式之最小公倍式.

例 6.1 设 A 的全体不同特征值为 $\lambda_1, \dots, \lambda_k$, 求证: 若 A 可对角化, 则极小多项式为 $m(x) = (x - \lambda_1)(x - \lambda_2) \cdots (x - \lambda_k)$.

证明: 存在非异矩阵 P , 使得

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 I & & \\ & \lambda_2 I & \\ & & \ddots \\ & & & \lambda_k I \end{pmatrix} = B$$

由命题 6.2 可知, A 与 B 有相同极小多项式, 即

$$m(x) = m_B(x).$$

因为 B 是分块对角阵, 由命题 6.3 可推出

$$m_B(x) = [x - \lambda_1, x - \lambda_2, \dots, x - \lambda_k] = (x - \lambda_1)(x - \lambda_2) \cdots (x - \lambda_k).$$

□

注 A 可对角化 $\iff A$ 的极小多项式无重根.

命题 6.4 设 $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ & \lambda_2 & \cdots & a_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix}$, 则

$$(A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_n I_n) = 0, \quad (6.1)$$

即 A 适合其特征多项式

$$f(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \cdots (\lambda - \lambda_n). \quad (6.2)$$

证明: 设 $e_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$ 是第 i 行为 1 的单位列向量, 可得如下 n 个等式:

$$Ae_1 = \lambda_1 e_1, \quad (6.3)$$

$$Ae_1 = a_{12}e_1 + \lambda_2 e_2, \quad (6.4)$$

.....

$$Ae_i = a_{1i}e_1 + \cdots + a_{i-1,i}e_{i-1} + \lambda_i e_i, \quad (6.5)$$

.....

$$Ae_n = a_{1n}e_1 + \cdots + a_{n-1,n}e_{n-1} + \lambda_n e_n. \quad (6.6)$$

$$\because f(A)g(A) = g(A)f(A),$$

$$\therefore (A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_n I_n) = (A - \lambda_{i+1} I_n)(A - \lambda_{i+2} I_n) \cdots (A - \lambda_n I_n)(A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_i I_n),$$

只要证

$$(A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_n I_n)e_i = 0, \forall 1 \leq i \leq n \quad (6.7)$$

只要证

$$(A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_i I_n)e_i = 0, \forall 1 \leq i \leq n \quad (6.8)$$

对 i 进行归纳:

$i = 1$ 时, 由(6.3)式可知, $(A - \lambda_1 I_n)e_i = 0$ 成立.

现假设 $i - 1$ 时结论成立, 则 i 时, 由(6.5)可知,

$$Ae_i - \lambda_i e_i = a_{1i}e_1 + \cdots + a_{i-1,i}e_{i-1} \quad (6.9)$$

即

$$(A - \lambda_i I_n)e_i = a_{1i}e_1 + \cdots + a_{i-1,i}e_{i-1} \quad (6.10)$$

将(6.10)式代入(6.8)式, 得

$$\begin{aligned} & (A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_i I_n)e_i \\ &= (A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_{i-1} I_n)(a_{1i}e_1 + \cdots + a_{i-1,i}e_{i-1}) \end{aligned} \quad (6.11)$$

将(6.11)式前 $i - 1$ 个因式和第 i 个因式中的每一项相乘, 可得

$$\begin{aligned} & (A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_i I_n)e_i \\ &= \sum_{j=1}^{i-1} a_{ji}(A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_{i-1} I_n)e_j \end{aligned} \quad (6.12)$$

由归纳假设可知, (6.12)式的 $i - 1$ 项全部为 0, 从而(6.8)式为 0. □

定理 6.3 (Cayley-Hamilton(凯莱-哈密顿) 定理) 设 A 是数域 \mathbb{K} 上的 n 阶矩阵, $f(x)$ 是 A 的特征多项式, 则 $f(A) = O$.

证明: \exists 非异阵 P s. t. $P^{-1}AP = B = \begin{pmatrix} \lambda_1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ & \lambda_2 & \cdots & a_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix},$

其特征多项式为 $f(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \cdots (\lambda - \lambda_n)$.

由命题(6.4)可知 $f(B) = O$, 则

$$f(A) = f(PBP^{-1}) = Pf(B)P^{-1} = O. \quad \square$$

推论 6.2 条件和假设同定理(6.3), 则 $f(\lambda) \mid m(\lambda)^n$.

证明: $f(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)^{m_1}(\lambda - \lambda_2)^{m_2} \cdots (\lambda - \lambda_k)^{m_k}$, 其中 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_k$ 是 A 的全体不同特征值,

$m(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)^{r_1}(\lambda - \lambda_2)^{r_2} \cdots (\lambda - \lambda_k)^{r_k}$, 其中 $r_1, r_2, \cdots, r_k \in \mathbb{Z}^+$.

$$m_1 + m_2 + \cdots + m_k = n \implies m_i \leq n \leq n \cdot r_i, 1 \leq i \leq k \implies f(\lambda) \mid m(\lambda). \quad \square$$

推论 6.3 (Cayley-Hamilton 定理 (几何领域)) 设 φ 是 n 维线性空间 V 上的线性变换, $f(x)$ 是 φ 的特征多项式, 则 $f(\varphi) = 0$.

证明: 设 φ 的表示矩阵为 $A \in M_n(\mathbb{K})$.

先证 A 可对角化的情形:

设 $\Lambda = P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \cdots & \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix}$, 其特征多项式为 $f(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \cdots (\lambda - \lambda_n)$.

$$f(\Lambda) = \begin{pmatrix} 0 & & & \\ & \lambda_2 - \lambda_1 & & \\ & & \cdots & \\ & & & \lambda_n - \lambda_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 - \lambda_2 & & & \\ & 0 & & \\ & & \cdots & \\ & & & \lambda_n - \lambda_2 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} \lambda_1 - \lambda_n & & & \\ & \lambda_2 - \lambda_n & & \\ & & \cdots & \\ & & & 0 \end{pmatrix} = 0,$$

$$f(A) = f(P\Lambda P^{-1}) = Pf(\Lambda)P^{-1} = O.$$

再证一般情形 (摄动法):

$$\exists \text{ 非异阵 } P \text{ s. t. } P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * & * & * \\ & \lambda_2 & * & * \\ & & \cdots & * \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix},$$

$\exists c_1, c_2, \cdots, c_n \in \mathbb{C}$ s. t. $\forall 0 < t \ll 1, \lambda_1 + c_1 t, \lambda_2 + c_2 t, \cdots, \lambda_n + c_n t$ 互不相同.

构造矩阵 $A_t = P \begin{pmatrix} \lambda_1 + c_1 t & * & * & * \\ & \lambda_2 + c_2 t & * & * \\ & & \cdots & * \\ & & & \lambda_n + c_n t \end{pmatrix} P^{-1},$

当 $0 < t \ll 1$ 时, A_t 可对角化, 当 $t = 0$ 时, $A_0 = A$.

$$\forall 0 < t \ll 1, (A_t - (\lambda_1 + c_1 t)I_n)(A_t - (\lambda_2 + c_2 t)I_n) \cdots (A_t - (\lambda_n + c_n t)I_n) = 0,$$

令 $t \rightarrow 0$, 得 $(A - \lambda_1 I_n)(A - \lambda_2 I_n) \cdots (A - \lambda_n I_n) = 0$

□

6.3 特征值的估计

例 6.2 已知 $A^2 - A - 3I_n = 0$, 求证: $A - 2I_n$ 可逆.

证明:

方法一、凑因子法:

$$\because (A - 2I_n)(A + I_n) = I_n, \therefore A - 2I_n \text{ 可逆.}$$

方法二、线性方程组求解法:

只要证 $(A - 2I_n)x = 0$ 只有零解.

方法三、互素多项式法:

$(x^2 - x - 3, x - 2) = 1$, A 代入 $x^2 - x - 3$ 等于零, 则 A 代入 $x - 2$ 必不为零.

方法四、特征值法:

反正法: 设 $A - 2I_n$ 不可逆 $\Rightarrow 2$ 是 A 的特征值,

将 $\lambda = 2$ 代入 $A^2 - A - 3I_n$ 得 $2^2 - 2 - 3 \neq 0$ 产生矛盾, 从而 $A - 2I_n$ 可逆.

□

例 6.3 A 是 4 阶方阵且满足 $\text{tr}(A^i) = i, i = 1, 2, 3, 4$, 求 $|A|$.

解: 方法一: 利用牛顿公式

设 A 的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, 则 A^i 的特征值为 $\lambda_1^i, \lambda_2^i, \lambda_3^i, \lambda_4^i \Rightarrow \sum_{k=1}^4 \lambda_k^i = i$.

根据上一章 Newton 公式:

$$s_k - s_{k-1}\sigma_1 + s_{k-2}\sigma_2 - \cdots + (-1)^k k\sigma_k = 0, k \leq n = 4 \quad (6.13)$$

上式中, $s_1 = 1, s_2 = 2, s_3 = 3, s_4 = 4$, 只要求 $|A| = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 = \sigma_4$.

$$\sigma_1 = s_1 = 1$$

$$s_2 - s_1\sigma_1 + 2\sigma_2 = 0 \Rightarrow \sigma_2 = -\frac{1}{2}$$

$$s_3 - s_2\sigma_2 + s_1\sigma_1 - 3\sigma_3 = 0 \Rightarrow \sigma_3 = \frac{1}{6}$$

$$s_4 - s_3\sigma_3 + s_2\sigma_2 - s_1\sigma_1 + 4\sigma_4 = 0 \Rightarrow \sigma_4 = \frac{1}{24}$$

方法二：利用教材 P250 习题 6(1) 结论

$$\therefore \sigma_k = \frac{1}{k!} \begin{vmatrix} s_1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ s_2 & s_1 & 2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{k-1} & s_{k-2} & s_{k-3} & \vdots & k-1 \\ s_k & s_{k-1} & s_{k-2} & \cdots & s_1 \end{vmatrix}, \quad \therefore \sigma_4 = \frac{1}{4!} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 2 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 3 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{24}.$$

例 6.4 $A^{m \times m}, B^{n \times n}$ 无公共特征值, 求证: 矩阵方程 $AX = XB$ 只有零解.

证明:

证法一: 设 $f(x) = |\lambda I - A|$ 为 A 的特征多项式, 由 Cayley-Hamilton 定理 $\implies f(A) = 0$.
 $A^2 X = A(AX) = A(XB) = (AX)B = XB^2$, 因此 $A^n X = XB^n, n \in N$,
 因为 $f(A)$ 是关于 A 的多项式, $f(B)$ 是关于 B 的多项式, 所以

$$0 = f(A)X = Xf(B) \quad (6.14)$$

设 B 的特征值为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, 则 $f(B)$ 的特征值为 $f(\mu_1), f(\mu_2), \dots, f(\mu_n)$.

$\therefore A, B$ 无公共特征值,

$\therefore f(\mu_1), f(\mu_2), \dots, f(\mu_n)$ 皆不为零 $\implies f(B)$ 可逆 \implies (6.14) 式只有零解.

证法二: 设 B 的特征多项式为 $g(\lambda)$,

A, B 无公共特征值 $\implies f(\lambda), g(\lambda)$ 无公共根 $\implies (f(\lambda), g(\lambda)) = 1$

因而 \exists 非零多项式 $u(\lambda), v(\lambda)$ s. t.

$$f(\lambda)u(\lambda) + g(\lambda)v(\lambda) = 1.$$

将 $\lambda = B$ 代入上式, 即

$$f(B)u(B) + g(B)v(B) = I \quad (6.15)$$

$\therefore g(\lambda)$ 为 B 的特征多项式,

\therefore (6.15) 式中 $g(B) = O \implies f(B)u(B) = I \implies f(B)$ 可逆. □

应用 6.1 A, B 为 n 阶方阵且特征值全大于零, $A^2 = B^2$, 求证: $A = B$.

证明: $A(A - B) = A^2 - AB = B^2 - AB = (A - B)(-B)$

上式中, $A, -B$ 必无公共特征值, 由例 6.4 $\implies A - B = 0$. □

应用 6.2 A 为 n 阶方阵且特征值全为偶数, 求证: 矩阵方程 $X + AX = XA^2$ 只有零解.

证明: $X + AX = XA^2 \implies (A + I)X = XA^2$,

$\therefore A$ 的特征值都是偶数, $\therefore A + I$ 的特征值为奇数, A^2 的特征值为偶数,

因此 $A + I$ 与 A^2 无公共特征值, 由例 6.4 可知,

$(A + I)X = XA^2$ 只有零解, 从而 $X + AX = XA^2$ 只有零解. □

应用 6.3 A 是 n 阶方阵且适合多项式 $a_mx^m + a_{m-1}x^{m-1} + \cdots + a_1x + a_0$, 其中 $|a_m| > \sum_{i=0}^{m-1} |a_i|$, 求证: $2X + AX = XA$ 只有零解.

证明: 任取 A 的特征值 λ_0 , 断言: $|\lambda_0| < 1$, 用反正法: 设 $|\lambda_0| \geq 1$.
由题意知: $a_m\lambda_0^m + a_{m-1}\lambda_0^{m-1} + \cdots + a_1\lambda_0 + a_0 = 0$, 则

$$a_m = -\frac{a_{m-1}}{\lambda_0} - \frac{a_{m-2}}{\lambda_0^2} - \cdots - \frac{a_1}{\lambda_0^{m-1}} - \frac{a_0}{\lambda_0^m} \implies |a_m| \leq \sum_{i=0}^{m-1} |a_i|, \text{与题意矛盾.}$$

$\therefore A$ 的所有特征值必小于 1.

如图 6.1 所示, A 的所有特征值都位于左边的单位圆内, 且不包括圆周; $A + 2I_n$ 的所有特征值都位于右边的单位圆内, 且不包括圆周, 即左边的单位圆向右平移两个单位. 由于两个圆相切且不包括圆周, 因此 A 和 $A + 2I_n$ 没有公共特征值. 根据例 6.4 可知, $(A + 2I_n)X = XA$ 只有零解. \square

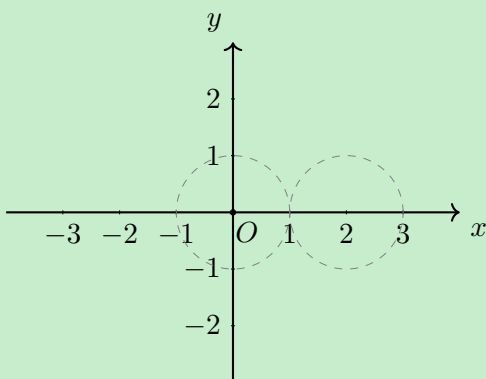


图 6.1

应用 6.4 $A^{m \times m}, B^{n \times n}$ 是数域 \mathbb{K} 上的方阵且无公共特征值, 求证: 对 $\forall C \in M_{m \times n}(\mathbb{K})$, 矩阵方程 $AX - XB = C$ 有唯一解.

证明: 构建一个线性变换:

$$\begin{aligned} \varphi: M_{m \times n}(\mathbb{K}) &\mapsto M_{m \times n}(\mathbb{K}) \\ X &\mapsto AX - XB \end{aligned}$$

由题意 A, B 无公共特征值, 根据例 6.4 可知:

$AX = XB$ 只有零解, 即 $AX - XB = 0$ 只有零解, 从而只有 $X = 0$ 与 $AX - XB = 0$ 相对应, 即 $\text{Ker } \varphi = 0 \implies \varphi$ 为单射, 由于 φ 为线性变换, 单射线性变换必为满射, 从而 φ 为线性同构, 因此, 对 $\forall C \in M_{m \times n}(\mathbb{K})$, 当 $AX - XB = C$ 时, 必有唯一的 X 与其对应, 即 $AX - XB = C$ 有唯一解. \square

例 6.5 $A^{m \times m}, B^{n \times n}$ 是数域 \mathbb{K} 上的方阵且无公共特征值, 若 A, B 可对角化, 则 $M = \begin{pmatrix} A & C \\ 0 & B \end{pmatrix}$ 可对角化.

证明: 由应用6.4 $\implies \exists X_0$ s. t. $AX_0 - X_0B = C$, 则

$$\begin{pmatrix} I_m & X_0 \\ O & I_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & C \\ O & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_m & -X_0 \\ O & I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & C + X_0B - AX_0 \\ O & B \end{pmatrix}$$

上式等号右边, $C + X_0B - AX_0 = 0$, 所以, $M \sim \begin{pmatrix} A & O \\ O & B \end{pmatrix}$, A, B 可对角化, 故 M 也可对角化. \square

例 6.6 A 为非异的循环矩阵, 求证: A^{-1} 也是循环矩阵.

证明:

证法一:

单位循环矩阵为:

$$J = \begin{pmatrix} & & I_{n-1} \\ 1 & & \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

依题意可知:

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ a_n & a_1 & \cdots & a_{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_2 & \cdots & a_n & a_1 \end{pmatrix} = a_1 I_n + a_2 J + \cdots + a_n J^{n-1} \quad (6.17)$$

令 $g(x) = a_n x^{n-1} + a_{n-1} x^{n-2} + \cdots + a_2 x + a_1$,

J 的特征多项式为 $f(\lambda) = \lambda^n - 1$, J 的 \mathbf{h} 特征值为 $w_k = e^{\frac{2k\pi i}{n}}, 0 \leq k \leq n-1$,

$A = g(J)$, A 的特征值为 $g(w_k), k = 0, 1, \cdots, n-1$,

又因为 A 非异, 所以 $g(w_i) \neq 0$, 但 $f(w_i) = 0$,

因此,

$$\begin{aligned} f(x), g(x) \text{ 没有公共根} &\implies (f(x), g(x)) = 1 \\ \implies \exists \text{非零多项式 } u, v \text{ s. t. } f(x)u(x) + g(x)v(x) &= 1 \end{aligned} \quad (6.18)$$

将 $x = J$ 代入(6.18)式, 得

$$f(J)u(J) + g(J)v(J) = I_n \quad (6.19)$$

上式中, $f(J) = 0, g(J) = A$, 因而 $Av(J) = I_n \implies A^{-1} = v(J)$ 为循环矩阵.

证法二:

A 非异 $\xrightarrow{\text{Cayley-Hamilton定理}} A^{-1} = h(A)$, $h(A)$ 为 A 的 $n-1$ 次多项式, 见 P282 习题 1.

$h(A) = h(g(J))$ 仍为循环矩阵. \square

7 相似标准型

7.1 多项式矩阵

定义 7.1 $M(\lambda) = M_m\lambda^m + M_{m-1}\lambda^{m-1} + \cdots + M_1\lambda + M_0$, 其中 $M_i \in M_{r \times s}(\mathbb{K})$, 称 $M(\lambda)$ 为矩阵多项式. 若 $M_m \neq 0$, 定义 $\deg M(\lambda) = m$, 约定 $\deg 0 = -\infty$.

$$N(\lambda) = N_n\lambda^n + N_{n-1}\lambda^{n-1} + \cdots + N_1\lambda + N_0, N_n \neq 0, \text{ 则}$$

$$M(\lambda) = N(\lambda) \xLeftrightarrow{\text{def}} m = n, M_i = N_i, \forall 0 \leq i \leq m$$

设 $m \geq n$,

$$\text{定义加法: } M(\lambda) + N(\lambda) = M_m\lambda^m + \cdots + M_{n+1}\lambda^{n+1} + (M_n + N_n)\lambda^n + \cdots + (M_0 + N_0)$$

$$\text{定义数乘: } k \cdot M(\lambda) = k \cdot M_m\lambda^m + \cdots + k \cdot M_0$$

$$\text{定义乘法: } M(\lambda) \cdot N(\lambda) = P(\lambda) = \sum P_k\lambda^k, P_k = \sum_{i+j=k} M_i N_j$$

引理 7.1 $\deg(M(\lambda) \cdot N(\lambda)) \leq \deg M(\lambda) + \deg N(\lambda)$, 若 M_m 或 N_n 是可逆阵, 则等号成立.

证明: $M(\lambda) \cdot N(\lambda)$ 的首项是 $M_m \cdot N_n \cdot \lambda^{m+n}$, 若 M_m 或 N_n 可逆, 则 $M(\lambda) \cdot N(\lambda) \neq 0$. \square

定理 7.1 设 A, B 是数域 \mathbb{K} 上的矩阵, 则 A, B 相似的充分必要条件是 λ - 矩阵 $\lambda I - A$ 与 $\lambda I - B$ 相抵.

7.2 矩阵的法式

定理 7.2 设 $A(\lambda)$ 是一个 n 阶 λ - 矩阵, 则 $A(\lambda)$ 相抵于对角阵

$$\text{diag}\{d_1(\lambda), d_1(\lambda), \cdots, d_r(\lambda); 0, \cdots, 0\},$$

其中 $d_i(\lambda)$ 是非零首一多项式且 $d_i(\lambda) \mid d_{i+1}(\lambda) (i = 1, 2, \cdots, r-1)$.

引理 7.2 设 $A(\lambda), B(\lambda)$ 为 n 阶 λ - 矩阵, 则:

$$(1) |A(\lambda) \cdot B(\lambda)| = |A(\lambda)| \cdot |B(\lambda)|;$$

$$(2) A(\lambda)A(\lambda)^* = A(\lambda)^*A(\lambda) = |A(\lambda)| \cdot I_n.$$

证明: (1) 令 $f(\lambda) = |A(\lambda) \cdot B(\lambda)| - |A(\lambda)| \cdot |B(\lambda)|$ 是 λ 的多项式, 对任意的 $a \in \mathbb{K}$, $f(a) = |A(a) \cdot B(a)| - |A(a)| \cdot |B(a)| = 0$, 从而 $f(\lambda) \equiv 0$.

(2) 令 $(f_{ij}(\lambda))_{n \times n} = A(\lambda) \cdot A(\lambda)^* - |A(\lambda)| \cdot I_n, f_{ij}(\lambda) \in \mathbb{K}[\lambda]$,
 $\forall a \in \mathbb{K}, (f_{ij}(a)) = A(a) \cdot A(a)^* - |A(a)| \cdot I_n = 0 \implies f_{ij}(\lambda) \equiv 0, \forall i, j$ \square

定理 7.3 设 $A(\lambda)$ 是 n 阶 λ - 矩阵, 则下列结论等价:

(1) $A(\lambda)$ 是可逆 λ - 阵;

- (2) $|A(\lambda)|$ 是非零常数;
 (3) $A(\lambda)$ 的相抵标准型为 I_n ;
 (4) $A(\lambda)$ 只通过初等行(列)变换可变为 I_n ;
 (5) $A(\lambda)$ 是初等 λ - 矩阵的乘积.

证明: (1) \implies (2): $\exists B(\lambda)$ s. t. $A(\lambda)B(\lambda) = B(\lambda)A(\lambda) = I_n$,
 等式两边同取行列式, 得: $|A(\lambda) \cdot B(\lambda)| = |A(\lambda)| \cdot |B(\lambda)| = |I_n| = 1$,
 因为上式左边是两个关于 λ 的多项式相乘, 右边是 1,
 因此 $|A(\lambda)|$ 和 $|B(\lambda)|$ 只能是非零常数.

(2) \implies (3): 由定理 7.2 $\implies \exists \lambda$ - 矩阵 $P(\lambda), Q(\lambda)$ s. t. $P(\lambda)A(\lambda)Q(\lambda) = \text{diag}\{d_1(\lambda), d_2(\lambda), \dots, d_r(\lambda); 0, \dots, 0\}$, 其中, $d_i(\lambda)$ 皆为关于 λ 的首一多项式, 且 $d_1(\lambda) \mid d_2(\lambda) \mid \dots \mid d_r(\lambda)$, $P(\lambda), Q(\lambda)$ 为初等 λ - 矩阵的乘积. 由引理 7.2 可知,

$$|P(\lambda)| \cdot |A(\lambda)| \cdot |Q(\lambda)| = d_1(\lambda)d_2(\lambda) \cdots d_r(\lambda)0 \cdots 0$$

上式左边, $P(\lambda), Q(\lambda)$ 为初等 λ - 矩阵的乘积, 所以皆不为零, 又 $|A(\lambda)|$ 为非零常数, 故等式左边不等于零, 从而等式右边的 $n - r$ 个 0 均不会出现, 因此 $r = n$ 且 $d_i(\lambda)$ 都是非零常数. 又因为 $d_i(\lambda)$ 皆是首一多项式, 故对 $\forall i, d_i(\lambda) = 1$, 由此可推出 $A(\lambda) = I_n$.

(3) \implies (4): 设 $\exists P(\lambda), Q(\lambda)$ 是初等 λ - 矩阵的乘积 s. t.

$$\begin{aligned} P(\lambda)A(\lambda)Q(\lambda) &= I_n \\ \implies P(\lambda)A(\lambda) &= Q(\lambda)^{-1} \\ \implies Q(\lambda)P(\lambda)A(\lambda) &= I_n \end{aligned}$$

即 $A(\lambda)$ 只需通过初等行变换即可变为 I_n . 同理可证 $A(\lambda)$ 只需通过初等列变换即可变为 I_n .

(4) \implies (5): 设 $P(\lambda)$ 是初等 λ - 矩阵 s. t.

$$\begin{aligned} P_r(\lambda)P_{r-1}(\lambda) \cdots P_1(\lambda)A(\lambda) &= I_n \\ \implies P_{r-1}(\lambda)P_{r-2}(\lambda) \cdots P_1(\lambda)A(\lambda) &= P_r(\lambda)^{-1} \\ &\dots\dots\dots \\ \implies A(\lambda) &= P_1(\lambda)^{-1}P_2(\lambda)^{-1} \cdots P_r(\lambda)^{-1} \\ \implies A(\lambda) &\text{是初等 } \lambda - \text{ 矩阵的乘积.} \end{aligned}$$

(5) \implies (1): 初等 λ - 矩阵都是可逆阵, 且有限个可逆阵的乘积仍然是可逆阵, 因此推出 (1), 此时,

$$A(\lambda)^{-1} = \frac{1}{|A(\lambda)|} \cdot A(\lambda)^*.$$

证明: 由引理7.2可知,

$$\begin{aligned} A(\lambda) \cdot A(\lambda)^* &= A(\lambda)^* A(\lambda) = |A(\lambda)| \cdot I_n \\ \xrightarrow{A(\lambda) \text{可逆故} |A(\lambda)| \neq 0} A(\lambda) \left(\frac{1}{|A(\lambda)|} A(\lambda)^* \right) &= \left(\frac{1}{|A(\lambda)|} A(\lambda)^* \right) A(\lambda) = I_n \\ \implies A(\lambda)^{-1} &= \frac{1}{|A(\lambda)|} A(\lambda)^* \end{aligned}$$

□

□

定理 7.4 设 $A \in M_n(\mathbb{K})$, 则 $\lambda - A$ 相抵于

$$\text{diag}\{1, \dots, 1, d_1(\lambda), \dots, d_m(\lambda)\},$$

其中, $d_i(\lambda)$ 为非常数首一多项式且 $d_1(\lambda) \mid d_2(\lambda) \mid \dots \mid d_m(\lambda)$.

证明: 由定理7.2可知, $\exists P(\lambda), Q(\lambda)$ 为可逆 λ - 矩阵 s. t.

$$P(\lambda)(\lambda I_n - A)Q(\lambda) = \text{diag}\{d_1(\lambda), d_2(\lambda), \dots, d_r(\lambda), 0, \dots, 0\}$$

两边同时取行列式, 得

$$c \cdot |\lambda I_n - A| = d_1(\lambda)d_2(\lambda) \cdots d_r(\lambda)0 \cdots 0, c \neq 0$$

上式左边非零, 所以右边也不等于零, 故右边的 $n - r$ 个零均不会出现, 从而 $r = n$ 且

$$\begin{aligned} c|\lambda I_n - A| &= d_1(\lambda)d_2(\lambda) \cdots d_n(\lambda) \\ \implies c &= 1 \\ \implies |\lambda I_n - A| &= d_1(\lambda)d_2(\lambda) \cdots d_n(\lambda) \end{aligned} \tag{7.1}$$

把 $d_i(\lambda)$ 中的 1 都列出, 即可得到结论.

□

例 7.1 若 $\deg d_i(\lambda) \geq 1$, 则 $A = cI_n$.

证明: 由(7.1)两边取多项式次数, 得

$$n = \sum_{i=1}^n \deg d_i(\lambda) \geq n$$

从而 $d_1(\lambda), d_2(\lambda), \dots, d_n(\lambda)$ 是一次首一多项式. 又由整除条件可知,

$$d_1(\lambda) = d_2(\lambda) = \cdots = d_n(\lambda) = \lambda - c$$

即 $\lambda I_n - A$ 相抵于矩阵

$$\text{diag}\{\lambda - c, \lambda - c, \dots, \lambda - c\} = \lambda I_n - cI_n,$$

由定理7.1可知, A 与 cI_n 相似, 从而 $cI_n = P^{-1}AP \implies A = cI_n$.

□

例 7.2 已知 $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 3 & -2 & 0 \\ -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$, 求 $\lambda I_n - A$ 的相似标准型.

解:

$$\begin{aligned} \lambda I_3 - A &= \begin{pmatrix} \lambda & -1 & 1 \\ -3 & \lambda+2 & 0 \\ 1 & -1 & \lambda+1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & \lambda+1 \\ -3 & \lambda+2 & 0 \\ \lambda & -1 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & \lambda+1 \\ 0 & \lambda-1 & 3(\lambda+1) \\ 0 & \lambda-1 & -\lambda^2-\lambda+1 \end{pmatrix} \\ &\longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda-1 & 3(\lambda+1) \\ 0 & \lambda-1 & -\lambda^2-\lambda+1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda-1 & 6 \\ 0 & \lambda-1 & -\lambda^2-4\lambda+4 \end{pmatrix} \\ &\longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & \lambda-1 \\ 0 & -\lambda^2-4\lambda+4 & \lambda-1 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 6(\lambda-1) \\ 0 & -\lambda^2-4\lambda+4 & 6(\lambda-1) \end{pmatrix} \\ &\longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \\ 0 & -\lambda^2-4\lambda+4 & (\lambda-1)^2(\lambda^2+4\lambda+2) \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda-1)^2(\lambda^2+4\lambda+2) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

7.3 不变因子

引理 7.3 设 $A(\lambda)$ 的非零行列式因子为 $D_1(\lambda), D_2(\lambda), \dots, D_r(\lambda)$, 则

$$D_i(\lambda) \mid D_{i+1}(\lambda), \forall 1 \leq i \leq r-1.$$

证明: 任取 $A(\lambda)$ 的 $i+1$ 阶子式 M_{i+1} , 将 M_{i+1} 按某行(列)展开, 这里假设按第一行展开:

$$M_{i+1} = a_{11}(\lambda)M_{11} - a_{12}(\lambda)M_{12} + \dots + (-1)^{i+2}a_{1,i+1}M_{1,i+1} \quad (7.2)$$

由行列式因子定义 $\implies D_i(\lambda) \mid (\lambda)M_{1j}, 1 \leq j \leq i+1$

$$\implies D_i(\lambda) \mid M_{i+1}$$

$$\xrightarrow{D_i(\lambda) \text{ 是 } M_{i+1} \text{ 公因子}} D_i(\lambda) \mid D_{i+1}(\lambda), \forall 1 \leq i \leq r-1$$

□

定理 7.5 相抵的 λ - 矩阵有相同的行列式因子, 从而有相同的不变因子.

证明: 设

$$B(\lambda) = P(\lambda)A(\lambda)Q(\lambda)$$

其中, $P(\lambda), Q(\lambda)$ 是可逆 λ - 矩阵, 设 $A(\lambda), B(\lambda)$ 的行列式因子分别为

$$D_k(\lambda), E_k(\lambda), 1 \leq k \leq n$$

要证

$$D_k(\lambda) = E_k(\lambda), \forall 1 \leq k \leq n.$$

$$B(\lambda) \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Cauchy-Binet 公式}} P(\lambda)A(\lambda)Q(\lambda) \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

$$= \sum_{\substack{1 \leq r_1 < \cdots < r_k \leq n \\ 1 \leq s_1 < \cdots < s_k \leq n}} P(\lambda) \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ r_1 & r_2 & \cdots & r_k \end{pmatrix} A(\lambda) \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & \cdots & r_k \\ s_1 & s_2 & \cdots & s_k \end{pmatrix} Q(\lambda) \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & \cdots & s_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

1°. 若 $D_k(\lambda) = 0$: 由(7.4)式可得:

$$B(\lambda) \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix} = 0,$$

从而 $E_k(\lambda) = 0$;

2°. 若 $D_k(\lambda) \neq 0$: 由行列式因子定义可知:

$$D_k(\lambda) \mid A(\lambda) \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix}$$

从而由(7.4)式可知:

$$D_k(\lambda) \mid B(\lambda) \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_k \\ j_1 & j_2 & \cdots & j_k \end{pmatrix}$$

从而 $D_k(\lambda) \mid E_k(\lambda)$.

由于 $A(\lambda) = P(\lambda)^{-1}B(\lambda)Q(\lambda)^{-1}$, 因此同理可证,

1°. $E_k(\lambda) = 0 \implies D_k(\lambda) = 0$;

2°. 若 $E_k(\lambda) \neq 0$, 则 $D_k(\lambda) \neq 0$ 且 $E_k(\lambda) \mid D_k(\lambda)$.

由以上可知,

$$E_k(\lambda) = 0 \iff D_k(\lambda) = 0$$

或者

$$D_k(\lambda) \mid E_k(\lambda), E_k(\lambda) \mid D_k(\lambda)$$

结合以上可推出,

$$\exists 0 \neq c \text{ s. t. } D_r(\lambda) = c \cdot E_k(\lambda),$$

又因为 $D_k(\lambda), E_k(\lambda)$ 都是首一多项式, 因此 $c = 1 \implies D_k(\lambda) = E_k(\lambda)$. □

推论 7.1 设 n 阶 λ - 矩阵 $A(\lambda)$ 的法式为

$$\Lambda = \text{diag}\{d_1(\lambda), d_1(\lambda), \cdots, d_r(\lambda), 0, \cdots, 0\},$$

其中 d_i 是非零首一多项式且 $d_i(\lambda) \mid d_{i+1}(\lambda) (i = 1, 2, \cdots, r-1)$, 则 $A(\lambda)$ 的不变因子为 $d_1(\lambda), d_2(\lambda), \cdots, d_r(\lambda)$. 特别, 法式和不变因子之间相互唯一确定.

证明: 因为 $A(\lambda)$ 相抵于 Λ , 由定理7.5可知 $A(\lambda)$ 的不变因子即为 Λ 的不变因子, 而 Λ 的不变因子即 $d_1(\lambda), d_2(\lambda), \dots, d_r(\lambda)$. \square

推论 7.2 设 $A(\lambda), B(\lambda)$ 为 n 阶 λ - 矩阵, 则 $A(\lambda)$ 与 $B(\lambda)$ 相抵当且仅当它们有相同的法式.

证明: 若 $A(\lambda)$ 和 $B(\lambda)$ 有相同的法式, 设为 Λ , 则 $A(\lambda) \sim \Lambda \sim B(\lambda)$, 由相抵的传递性可知, $A(\lambda) \sim B(\lambda)$.

若 $A(\lambda)$ 和 $B(\lambda)$ 相抵, 设 $A(\lambda)$ 的法式为 Λ_1 , 设 $B(\lambda)$ 的法式为 Λ_2 , 则

$$A(\lambda) \sim \Lambda_1, B(\lambda) \sim \Lambda_2, \text{ 且 } A(\lambda) \sim B(\lambda)$$

由相抵的传递性可知, $\Lambda_1 \sim \Lambda_2$, 由定理7.5可知, Λ_1 与 Λ_2 有相同的不变因子. 由于 Λ_1 与 Λ_2 都是法式, 所以它们主对角线上的非零首一多项式元素都相同, 从而 $\Lambda_1 = \Lambda_2$. \square

推论 7.3 λ - 矩阵在相抵关系下的全系不变量是它的行列式因子组或不变因子组.

证明: 由定理7.5可知, 相抵的 λ - 矩阵有相同的行列式因子 (组), 从而有相同的不变因子 (组).

反过来, 如果两个 λ - 矩阵有相同的行列式因子或不变因子, 由推论7.1可知, 它们必具有相同的法式, 从而由推论7.2可知, $A(\lambda) \sim B(\lambda)$. \square

推论 7.4 n 阶 λ - 矩阵 $A(\lambda)$ 的法式与初等变换的选取无关.

证明: 设 $A(\lambda)$ 可通过某初等变换过程变换为法式 Λ_1 , 设 $A(\lambda)$ 可通过另一初等变换过程变换为法式 Λ_2 , 只要证 $\Lambda_1 = \Lambda_2$.

$$A(\lambda) \sim \Lambda_1, A(\lambda) \sim \Lambda_2 \implies \Lambda_1 \sim \Lambda_2$$

由推论7.2可知, $\Lambda_1 = \Lambda_2$. \square

定理 7.6 数域 \mathbb{K} 上 n 阶矩阵 A 与 B 相似的充分必要条件是它们的特征矩阵 $\lambda I - A$ 和 $\lambda I - B$ 具有相同的行列式因子或不变因子.

证明: 由定理7.1可知,

$$A \text{ 与 } B \text{ 相似} \iff \lambda I - A \text{ 与 } \lambda I - B \text{ 相抵}.$$

由推论7.3可知, $\lambda I - A$ 与 $\lambda I - B$ 有相同的行列式因子或不变因子. \square

注 特征矩阵 $\lambda I - A$ 的行列式因子及不变因子均简称为 A 的行列式因子及不变因子.

推论 7.5 设 $\mathbb{F} \subseteq \mathbb{K}$ 是两个数域, A, B 是 \mathbb{F} 上的两个矩阵, 则 A 与 B 在 \mathbb{F} 上相似的充分必要条件是他们在 \mathbb{K} 上相似.

证明: A 与 B 在 \mathbb{F} 上相似 $\stackrel{\text{def}}{\iff} \exists$ 非异矩阵 $P \in M_n(\mathbb{F})$ s.t. $B = P^{-1}AP$, A 与 B 在 \mathbb{K} 上相似 $\stackrel{\text{def}}{\iff} \exists$ 非异矩阵 $Q \in M_n(\mathbb{K})$ s.t. $B = Q^{-1}AQ$.

必要性: 设 \exists 非异矩阵 $P \in M_n(\mathbb{F})$ s.t. $B = P^{-1}AP$, 可知 $P^{-1} \in \mathbb{F}$. 把 P, P^{-1} 看成是 \mathbb{K} 上的矩阵, 从而 P 在 \mathbb{K} 上可逆, 可以推出 A 与 B 在 \mathbb{K} 上也相似.

充分性: 若 A 与 B 在 \mathbb{K} 上相似, 由推论 7.6 可知, $\lambda I - A$ 与 $\lambda I - B$ 作为 \mathbb{K} 上的 λ -矩阵有相同的不变因子组 (法式). 实际上 $\lambda I - A$ 与 $\lambda I - B$ 都是 \mathbb{F} 上的 λ -矩阵, 由推论 7.4 可知, 在求法式的过程中, 只要取 $\mathbb{F}[\lambda]$ 上的初等变换, 就可以得到 $\lambda I - A$ 与 $\lambda I - B$ 的法式, 且法式中的不变因子多项式 $d_i(\lambda)$ 仍是 \mathbb{F} 上的多项式. 因此, 存在 \mathbb{F} 上的可逆 λ -矩阵 $P(\lambda), Q(\lambda), M(\lambda), N(\lambda)$ s.t.

$$P(\lambda)(\lambda I - A)Q(\lambda) = M(\lambda)(\lambda I - B)N(\lambda) = \text{diag}\{d_1(\lambda), d_2(\lambda), \dots, d_n(\lambda)\},$$

从而

$$(\lambda I - B) = M(\lambda)^{-1}P(\lambda)(\lambda I - A)Q(\lambda)N(\lambda)^{-1},$$

即 $\lambda I - A$ 与 $\lambda I - B$ 在 \mathbb{F} 相抵, 由定理 7.1 可知, A 与 B 在 \mathbb{F} 上相似. □

推论 7.6 矩阵的不变因子组在基域扩张下不变.

7.4 有理标准型

引理 7.4 设 r 阶矩阵

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_r & -a_{r-1} & -a_{r-2} & \cdots & -a_1 \end{pmatrix}, \quad (7.5)$$

则

(1) F 的行列式因子为

$$1, \dots, 1, f(\lambda), \quad (7.6)$$

其中共有 $r-1$ 个 1, $f(\lambda) = \lambda^r + a_1\lambda^{r-1} + \cdots + a_r$, F 的不变因子组也由 (7.6) 式给出;

(2) F 的极小多项式和特征多项式都等于 $f(\lambda)$.

证明: (1)

$$\lambda I_r - F = \begin{pmatrix} \lambda & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda & -1 \\ a_r & a_{r-1} & a_{r-2} & \cdots & \lambda + a_1 \end{pmatrix}$$

$$D_r(\lambda) = |\lambda I_r - F| = \lambda^r + a_1 \lambda^{r-1} + \cdots + a_r = f(\lambda)$$

对 $\forall 1 \leq k < r$, $\lambda I - F$ 总有一个 k 阶子式 $= (-1)^k$, 从而

$$D_k(\lambda) = 1, \forall 1 \leq k < r.$$

(2) 设 F 极小多项式为 $m(\lambda)$, 只要证 $m(\lambda) = f(\lambda)$.

由定理6.3(Cayley-Hamilton 定理) $\implies m(\lambda) \mid f(\lambda) \implies \deg m(\lambda) \leq r$.

1°. 若 $\deg m(\lambda) = r$, 则 $m(\lambda) = f(\lambda)$;

2°. 若 $\deg m(\lambda) < r$, 用反正法: 设

$$m(\lambda) = c_{r-1} \lambda^{r-1} + c_{r-2} \lambda^{r-2} + \cdots + c_1 \lambda + c_0, c_i \text{不全为} 0,$$

设 e_i 为第 i 个元素为 1, 其余元素为 0 的单位行向量, 则

$$e_1 F = e_2, e_2 F = e_3, \cdots, e_{r-1} F = e_r,$$

即

$$e_1 F = e_2, e_1 F^2 = e_3, \cdots, e_1 F^{r-1} = e_r. \quad (7.7)$$

由于 $m(\lambda)$ 是 F 的极小多项式, 所以

$$0 = m(F) = c_{r-1} F^{r-1} + c_{r-2} F^{r-2} + \cdots + c_1 F + c_0 I_r,$$

上式左右两边同时左乘 e_1 , 可得

$$0 = c_{r-1} e_1 F^{r-1} + c_{r-2} e_1 F^{r-2} + \cdots + c_1 e_1 F + c_0 e_1,$$

上式各项分别应用(7.7)式的结论, 可得

$$0 = c_{r-1} e_r + c_{r-2} e_{r-1} + \cdots + c_1 e_2 + c_0 e_1 = (c_0, c_1, \cdots, c_{r-1}) \implies c_0 = c_1 = \cdots = c_{r-1} = 0$$

与假设矛盾. □

引理 7.5 设 λ - 矩阵 $A(\lambda)$ 相抵于对角 λ - 矩阵

$$\text{diag}\{d_1(\lambda), d_2(\lambda), \cdots, d_n(\lambda)\}, \quad (7.8)$$

λ - 矩阵 $B(\lambda)$ 相抵于对角 λ - 矩阵

$$\text{diag}\{d_{i_1}(\lambda), d_{i_2}(\lambda), \cdots, d_{i_n}(\lambda)\}, \quad (7.9)$$

且 i_1, i_2, \cdots, i_n 是 $1, 2, \cdots, n$ 的全排列, 则 $A(\lambda) \sim B(\lambda)$.

证明: 利用行对换及列对换即可将(7.8)式变换成(7.9)式, 因此(7.8)式所表示的矩阵和(7.9)式所表示的矩阵相抵, 所以 $A(\lambda) \sim B(\lambda)$. □

定理 7.7 设 A 是数域 \mathbb{K} 上的 n 阶方阵, A 的不变因子组为

$$1, \cdots, 1, d_1(\lambda), \cdots, d_k(\lambda),$$

其中 $\deg d_i(\lambda) = m_i$, 则 A 相似于下列分块对角阵:

$$F = \begin{pmatrix} F_1 & & & \\ & F_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & F_k \end{pmatrix}$$

其中 F_i 的阶等于 m_i , 且 F_i 是形如(7.5)式的矩阵, F_i 的最后一行由 $d_i(\lambda)$ 的系数(除最高次项)的负值组成.

证明:

$$\begin{aligned} \lambda I_n - A &\sim \text{diag}\{1, \cdots, 1, d_1(\lambda), \cdots, d_k(\lambda)\} \\ \implies |\lambda I_n - A| &= d_1(\lambda) \cdots d_k(\lambda) \end{aligned} \quad (7.10)$$

则 $m_1 + m_2 + \cdots + m_k = n$,

$$\lambda I - F_i = \lambda I - F(d_i(\lambda)) \sim \text{diag}\{1, \cdots, 1, d_i(\lambda)\},$$

上式中 $d_i(\lambda)$ 前有 $m_i - 1$ 个 1, 则

$$\lambda I - F = \begin{pmatrix} \lambda I - F(d_1(\lambda)) & & & \\ & \lambda I - F(d_2(\lambda)) & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda I - F(d_k(\lambda)) \end{pmatrix}$$

即 $\lambda I - A$ 的法式为

$$\text{diag}\{1, \cdots, 1, d_1(\lambda); 1, \cdots, 1, d_2(\lambda); \cdots; 1, \cdots, 1, d_k(\lambda)\}, \quad (7.11)$$

上式中, 每个 $d_i(\lambda)$ 前都配有 $m_i - 1$ 个 1, 即共有 $m_1 - 1 + m_2 - 1 + \cdots + m_k - 1 = n - k$ 个 1. 因此, (7.11)式是(7.10)式的一个置换. 由引理7.5可知, $\lambda I_n - A \sim \lambda I_n - F$, 由定理7.1可知, $A \sim F$. \square

定理 7.8 设数域 \mathbb{K} 上的 n 阶矩阵 A 的不变因子为

$$1, \cdots, 1, d_1(\lambda), \cdots, d_k(\lambda),$$

其中 $d_i(\lambda) \mid d_{i+1}(\lambda) (i = 1, \cdots, k-1)$, 则 A 的极小多项式 $m(\lambda) = d_k(\lambda)$.

证明: 由定理7.6可知,

$$A \sim \text{diag}\{F(d_1(\lambda)), F(d_2(\lambda)), \cdots, F(d_k(\lambda))\},$$

1°. $m_A(\lambda) = m_F(\lambda)$;

2°. 令 $F_i = F(d_i(\lambda))$, 则

$$m_F(\lambda) = [m_{F_1}(\lambda), m_{F_2}(\lambda), \dots, m_{F_k}(\lambda)].$$

由引理7.4 $\implies m_{F_i}(\lambda) = d_i(\lambda), 1 \leq i \leq k$

$$\implies m_A(\lambda) = [d_1(\lambda), d_2(\lambda), \dots, d_k(\lambda)] \xrightarrow{d_i(\lambda) | d_{i+1}(\lambda)} d_k(\lambda).$$

□

推论 7.7 设 $A \in M_n(\mathbb{F})$, 其极小多项式为 $m_{\mathbb{F}}(\lambda)$. $\mathbb{F} \subseteq \mathbb{K}$, 将 A 看成是 \mathbb{K} 上的矩阵, 极小多项式为 $m_{\mathbb{K}}(\lambda)$, 则 $m_{\mathbb{K}}(\lambda) = m_{\mathbb{F}}(\lambda)$.

7.5 初等因子

定义 7.2 设 $f(\lambda) \in \mathbb{K}[\lambda]$, $p(\lambda)$ 为不可约多项式, 若存在 $e \in \mathbb{Z}^+$, 使得 $p(\lambda)^e \mid f(\lambda)$ 但 $p(\lambda)^{e+1} \nmid f(\lambda)$, 则称 $p(\lambda)^e$ 为 $f(\lambda)$ 的准素因子.

定义 7.3 设 $d_1(\lambda), d_2(\lambda), \dots, d_k(\lambda)$ 是数域 \mathbb{K} 上矩阵 A 的非常数不变因子, 在 \mathbb{K} 上把 $d_i(\lambda)$ 分解成不可约因式之积:

$$\begin{aligned} d_1(\lambda) &= p_1(\lambda)^{e_{11}} p_2(\lambda)^{e_{12}} \cdots p_t(\lambda)^{e_{1t}}, \\ d_2(\lambda) &= p_1(\lambda)^{e_{21}} p_2(\lambda)^{e_{22}} \cdots p_t(\lambda)^{e_{2t}}, \\ &\dots\dots\dots \\ d_k(\lambda) &= p_1(\lambda)^{e_{k1}} p_2(\lambda)^{e_{k2}} \cdots p_t(\lambda)^{e_{kt}}, \end{aligned} \tag{7.12}$$

其中 e_{ij} 是非负整数 (注意 e_{ij} 可以为零!). 由于 $d_i(\lambda) \mid d_{i+1}$, 因此

$$e_{1j} \leq e_{2j} \leq \cdots \leq e_{kj} (j = 1, 2, \dots, t).$$

若(7.12)式中的 $e_{ij} > 0$, 则称 $p_j(\lambda)^{e_{ij}}$ 为 A 的一个**初等因子**, A 的全体初等因子成为 A 的**初等因子组**.

由因式分解的唯一性可知 A 的初等因子被 A 的不变因子唯一确定. 反过来, 若给定一组初等因子 $p_j(\lambda)^{e_{ij}}$, 适当添加一些 1 (表示为 $p_j(\lambda)^{e_{ij}} = 0$), 则可将这组初等因子按降幂排列如下:

$$\begin{aligned} &p_1(\lambda)^{e_{k1}}, p_1(\lambda)^{e_{k-1,1}}, \dots, p_1(\lambda)^{e_{11}}, \\ &p_2(\lambda)^{e_{k2}}, p_1(\lambda)^{e_{k-1,2}}, \dots, p_1(\lambda)^{e_{12}}, \\ &\dots\dots\dots \\ &p_t(\lambda)^{e_{kt}}, p_1(\lambda)^{e_{k-1,t}}, \dots, p_1(\lambda)^{e_{1t}}, \end{aligned} \tag{7.13}$$

令

$$\begin{aligned}d_k(\lambda) &= p_1(\lambda)^{e_{k1}} p_2(\lambda)^{e_{k2}} \cdots p_t(\lambda)^{e_{kt}}, \\d_{k-1}(\lambda) &= p_1(\lambda)^{e_{k-1,1}} p_2(\lambda)^{e_{k-1,2}} \cdots p_t(\lambda)^{e_{k-1,t}}, \\&\dots\dots\dots \\d_1(\lambda) &= p_1(\lambda)^{e_{11}} p_2(\lambda)^{e_{12}} \cdots p_t(\lambda)^{e_{1t}},\end{aligned}$$

则 $d_i(\lambda) \mid d_{i+1}(\lambda) (i = 1, 2, \dots, k-1)$, 且 $d_1(\lambda), \dots, d_k(\lambda)$ 的初等因子组就如 (7.13) 式所示, 因此, 给定 A 的初等因子组, 我们可唯一地确定 A 的不变因子组. 这一事实表明, A 的不变因子组与初等因子组在讨论矩阵相似关系中的作用是相同的. 因此, 有下述定理.

定理 7.9 数域 \mathbb{K} 上的两个矩阵 A 与 B 相似的充分必要条件是它们具有相同的初等因子组, 即矩阵的初等因子组是矩阵相似关系的全系不变量.

7.6 Jordan 标准型

引理 7.6 r 阶矩阵

$$J = \begin{pmatrix} \lambda_0 & 1 & & & \\ & \lambda_0 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & 1 \\ & & & & \lambda_0 \end{pmatrix}$$

的初等因子组为 $(\lambda - \lambda_0)^r$.

证明:

$$\lambda I - J = \begin{pmatrix} \lambda - \lambda_0 & -1 & & & \\ & \lambda - \lambda_0 & -1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & -1 \\ & & & & \lambda - \lambda_0 \end{pmatrix}, \quad (7.14)$$

$$D_r(\lambda) = |\lambda I_r - J| = (\lambda - \lambda_0)^r,$$

如(7.14)式矩阵中虚线右上角部分所示,

$$\begin{aligned}\forall 1 \leq k < r, \exists k \text{ 阶子式} &= (-1)^k \\ \implies D_k(\lambda) &= 1, \forall 1 \leq k < r.\end{aligned}$$

(7.14)式的行列式因子为

$$1, \dots, 1, (\lambda - \lambda_0)^r,$$

(7.14)式的不变因子也为上式, 因此矩阵 J 的初等因子组为 $(\lambda - \lambda_0)^r$. □

引理 7.7 设特征矩阵 $\lambda I - A$ 经过初等变换化为下列对角阵:

$$\begin{pmatrix} f_1(\lambda) & & & \\ & f_2(\lambda) & & \\ & & \ddots & \\ & & & f_n(\lambda) \end{pmatrix} \quad (7.15)$$

其中, $f_i(\lambda) (i = 1, \dots, n)$ 为非零首一多项式. 将 $f_i(\lambda)$ 作不可约分解, 若 $(\lambda - \lambda_0)^k$ 能整除 $f_i(\lambda)$, 但 $(\lambda - \lambda_0)^{k+1}$ 不能整除 $f_i(\lambda)$, 就称 $(\lambda - \lambda_0)^k$ 是 $f_i(\lambda)$ 的一个准素因子, 则矩阵 A 的初等因子组等于所有 $f_i(\lambda)$ 的准素因子的集合.

证明: Step 1: 对 $\forall 1 \leq i < j \leq n$, 设

$$(f_i(\lambda), f_j(\lambda)) = g(\lambda), [f_i(\lambda), f_j(\lambda)] = h(\lambda),$$

先证

$$\begin{pmatrix} f_1(\lambda) & & & \\ & \dots & & \\ & & f_i(\lambda) & \\ & & & \dots \\ & & & & f_j(\lambda) \\ & & & & & \dots \\ & & & & & & f_n(\lambda) \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} f_1(\lambda) & & & \\ & \dots & & \\ & & g(\lambda) & \\ & & & \dots \\ & & & & h(\lambda) \\ & & & & & \dots \\ & & & & & & f_n(\lambda) \end{pmatrix} \quad (7.16)$$

并且两个对角阵主对焦元素的准素因子全体相同.

不妨设 $i = 1, j = 2$, 设

$$f_1(\lambda) = g(\lambda)q(\lambda), \quad (7.17)$$

$$h(\lambda) = f_1(\lambda)f_2(\lambda)/g(\lambda) = f_2(\lambda)q(\lambda), \quad (7.18)$$

$$\exists u(\lambda), v(\lambda) \text{ s. t. } g(\lambda) = f_1(\lambda)u(\lambda) + f_2(\lambda)v(\lambda). \quad (7.19)$$

由于对角阵第 1, 2 两行 (列) 的初等行 (列) 变换和其他行 (列) 无关, 因此, 下面只对前 2 行 (列) 进行操作:

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} f_1(\lambda) & 0 \\ 0 & f_2(\lambda) \end{pmatrix} \xrightarrow{(7.19)\text{式}} \begin{pmatrix} f_1(\lambda) & g(\lambda) \\ 0 & f_2(\lambda) \end{pmatrix} \xrightarrow{(7.17)\text{式}} \begin{pmatrix} 0 & g(\lambda) \\ -f_2(\lambda)q(\lambda) & f_2(\lambda) \end{pmatrix} \\ & \xrightarrow{g(\lambda)\text{是}f_2(\lambda)\text{的因子}} \begin{pmatrix} 0 & g(\lambda) \\ -h(\lambda) & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} g(\lambda) & 0 \\ 0 & h(\lambda) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

在数域 \mathbb{K} 上做公共因式分解:

$$\begin{aligned} f_1(\lambda) &= p_1(\lambda)^{r_1} p_2(\lambda)^{r_2} \cdots p_t(\lambda)^{r_t}, \\ f_2(\lambda) &= p_1(\lambda)^{s_1} p_2(\lambda)^{s_2} \cdots p_t(\lambda)^{s_t}, \end{aligned} \quad (7.20)$$

其中 $p_i(\lambda)$ 是首一互异的不可约多项式且 $r_i, s_i \geq 0$, 令 $e_i = \min\{r_i, s_i\}, k_i = \max\{r_i, s_i\}$, 则

$$\begin{aligned} g(\lambda) &= p_1(\lambda)^{e_1} p_2(\lambda)^{e_2} \cdots p_t(\lambda)^{e_t}, \\ h(\lambda) &= p_1(\lambda)^{k_1} p_2(\lambda)^{k_2} \cdots p_t(\lambda)^{k_t}, \end{aligned} \quad (7.21)$$

(7.21)式和(7.20)式中, e_i, k_i 和对应的 r_i, s_i 相同或只是互换个位置, 由构造过程可知:

$\text{diag}\{f_1(\lambda), f_2(\lambda)\}$ 与 $\text{diag}\{g(\lambda), h(\lambda)\}$ 有相同的准素因子组.

Step 2: 反复利用 **Step 1**, 将 $\text{diag}\{f_1(\lambda), \cdots, f_n(\lambda)\}$ 变为法式. 依次将第 $(1, 1)$ 元素与 $(2, 2)$ 元素, 第 $(3, 3)$ 元素, ..., 第 (n, n) 元素进行 **Step 1** 的操作, 从而使第 $(1, 1)$ 元素的多项式幂次均是最小的. 一般地, 设第 $(1, 1)$ 元素, ..., 第 $(i-1, i-1)$ 元素已完成如上操作, 第 (i, i) 元素, 第 $(i+1, i+1)$ 元素, ..., 第 (n, n) 元素重复进行 **Step 1** 的操作, 可使原矩阵相抵于 $\text{diag}\{d_1(\lambda), d_2(\lambda), \cdots, d_n(\lambda)\}$ 且满足 $d_1(\lambda) \mid d_2(\lambda) \mid \cdots \mid d_n(\lambda)$, 即原矩阵和其法式相抵. \square

例 7.3 $\lambda I - A$ 相抵于 $\text{diag}\{1, (\lambda - 1)^2(\lambda + 2), \lambda + 2, 1, \lambda - 1\}$, 求它的所有初等因子.

解: 由引理7.7可知, 初等因子为 $\lambda - 1, (\lambda - 1)^2, \lambda + 2, \lambda + 2$.

引理 7.8 设 $A = \text{diag}\{J_{r_1}(\lambda_1), J_{r_2}(\lambda_2), \cdots, J_{r_k}(\lambda_k)\}$, 则 A 的初等因子组为 $(\lambda - \lambda_1)^{r_1}, (\lambda - \lambda_2)^{r_2}, \cdots, J_{r_k}(\lambda)^{r_k}$.

证明:

$$\lambda I - A = \begin{pmatrix} \lambda I - J_{r_1}(\lambda_1) & & & \\ & \lambda I - J_{r_2}(\lambda_2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda I - J_{r_k}(\lambda_k) \end{pmatrix} \quad (7.22)$$

由引理7.6可推出 $\lambda I - J_{r_i}(\lambda_i) \sim \text{diag}\{1, \cdots, 1, (\lambda - \lambda_i)^{r_i}\}$, 因此

$$\lambda I - A \sim \text{diag}\{1, \cdots, 1, (\lambda - \lambda_1)^{r_1}; 1, \cdots, 1, (\lambda - \lambda_2)^{r_2}; \cdots; 1, \cdots, 1, (\lambda - \lambda_k)^{r_k}\},$$

由引理7.7可推出, A 的初等因子组为 $(\lambda - \lambda_1)^{r_1}, (\lambda - \lambda_2)^{r_2}, \cdots, (\lambda - \lambda_k)^{r_k}$. \square

定理 7.10 设 $A \in M_n(\mathbb{C})$ 的初等因子组为 $(\lambda - \lambda_1)^{r_1}, (\lambda - \lambda_2)^{r_2}, \cdots, (\lambda - \lambda_k)^{r_k}$, 则 A 相似于 $J = \text{diag}\{J_{r_1}(\lambda_1), J_{r_2}(\lambda_2), \cdots, J_{r_k}(\lambda_k)\}$.

证明: 由引理7.8可知 J 的初等因子组也为 $(\lambda - \lambda_1)^{r_1}, (\lambda - \lambda_2)^{r_2}, \cdots, (\lambda - \lambda_k)^{r_k}$, 从而

$$A \simeq J.$$

\square

定义 7.4 定理7.10中的 $J = \text{diag}\{J_{r_1}(\lambda_1), J_{r_2}(\lambda_2), \cdots, J_{r_k}(\lambda_k)\}$ 称为 A 的 Jordan 标准型, $J_{r_i}(\lambda_i)$ 称为 Jordan 块.

注 Jordan 标准型中, Jordan 块次序可以互换. 每个 Jordan 块由一个初等因子唯一确定.

$$J_r(\lambda_0) \longleftrightarrow (\lambda - \lambda_0)^r,$$

从而在不考虑 Jordan 块的次序时, Jordan 标准型由 A 唯一确定.

定理 7.11 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V_{\mathbb{C}}^n)$, 则存在 V 的一组基 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, 使得 φ 在这组基下的表示矩阵为 Jordan 标准型 $J = \text{diag}\{J_{r_1}(\lambda_1), \dots, J_{r_k}(\lambda_k)\}$.

推论 7.8 设 $A \in M_n(\mathbb{C})$, 则下列结论等价:

- (1) A 可对角化;
- (2) A 的极小多项式无重根;
- (3) A 的初等因子都是一次多项式.

证明: (1) \implies (2): 由例题6.1可得.

(2) \implies (3): 设 A 的不变因子组为 $1, \dots, 1, d_1(\lambda), \dots, d_k(\lambda)$, 由有理标准型理论可知, A 的极小多项式为 $m(\lambda) = d_k(\lambda)$, 从而 $d_k(\lambda)$ 无重根, 因此 $d_1(\lambda), \dots, d_k(\lambda)$ 均无重根, 由此可推出, $d_i(\lambda)$ 的准素因子都是一次的, 即 A 的初等因子都是一次多项式.

(3) \implies (1): 设 A 的初等因子组为 $\lambda - \lambda_1, \lambda - \lambda_2, \dots, \lambda - \lambda_n$, 由定理7.11可知,

$$A \simeq J = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix},$$

所以, A 可对角化, 即 A 的 Jordan 块都是一阶的. □

命题 7.1 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V_{\mathbb{C}}^n)$, V_0 是 φ 的不变子空间. 若 φ 可对角化, 则 $\varphi|_{V_0}$ 也可对角化.

证明: 设 φ 的极小多项式为 $m(\lambda)$, $\varphi|_{V_0}$ 的极小多项式为 $g(\lambda)$, 则

$$m(\varphi|_{V_0}) = m(\varphi)|_{V_0} = 0.$$

$$\text{由极小多项式性质} \implies g(\lambda) | m(\lambda)$$

$$\varphi \text{ 可对角化、推论7.6} \implies m(\lambda) \text{ 无重根} \implies g(\lambda) \text{ 也无重根}$$

$$\xrightarrow{\text{推论7.6}} \varphi|_{V_0} \text{ 也可对角化.}$$

□

推论 7.9 若

$$M = \begin{pmatrix} A^{m \times m} & C^{m \times n} \\ O & B^{n \times n} \end{pmatrix}$$

可对角化, 则 A, B 均可对角化.

证明: 设 M 的极小多项式为 $m(\lambda)$, 则

$$0 = m(M) = \begin{pmatrix} m(A) & * \\ O & m(B) \end{pmatrix},$$

从而

$$m(A) = m(B) = 0.$$

由极小多项式性质可以推出

$$m_A(\lambda) \mid m(\lambda), m_B(\lambda) \mid m(\lambda).$$

由推论 7.6 $\implies m(\lambda)$ 无重根 $\implies m_A(\lambda), m_B(\lambda)$ 无重根 $\implies A, B$ 可对角化.

□

命题 7.2 $\varphi \in \mathcal{L}(V), V = V_1 \oplus V_2 \oplus \cdots \oplus V_k, V_i$ 为 φ 的不变子空间. 则

$$\varphi \text{ 可对角化} \iff \varphi|_{V_i} \text{ 均可对角化}.$$

证明: 必要性由命题 7.1 可得结论.

充分性 $\exists V_i$ 的一组基 $\{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in_i}\}$ s. t. $\varphi|_{V_i}$ 的表示矩阵为对角阵.

$$V = V_1 \oplus V_2 \oplus \cdots \oplus V_k \implies V_i \text{ 的基可拼成 } V \text{ 的一组基},$$

$\therefore \varphi$ 在每个 $\varphi|_{V_i}$ 的表示矩阵在对应的基下都是对角阵,

$\therefore \varphi$ 在这组基下的表示矩阵也为对角阵.

□

推论 7.10

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & & \\ & A_2 & \\ & & \dots \\ & & & A_k \end{pmatrix},$$

则 A 可对角化 $\iff A_1, A_2, \dots, A_k$ 均可对角化.

证明:

$$m_A(\lambda) = [m_{A_1}(\lambda), m_{A_2}(\lambda), \dots, m_{A_k}(\lambda)].$$

□

推论 7.11 设 $A \in M_n(\mathbb{K})$ 的特征值全部在 \mathbb{K} 中, 则 A 在 \mathbb{K} 上相似于其 Jordan 标准型.

证明: 有定理 7.10 可推出, 在复数域上

$$A \simeq J = \text{diag}\{J_{r_1}(\lambda_1), \dots, J_{r_K}(\lambda_K)\},$$

由相似关系的基域扩张不变形可知, 在数域 \mathbb{K} 上

$$A \simeq J.$$

□

例 7.4 A 的初等因子组为 $(\lambda - 1), (\lambda - 1)^3, (\lambda + 2)^2, (\lambda + 2)^3$, 求 A 的 Jordan 标准型.

解:

$$J = \text{diag} \left\{ 1, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ & 1 & 1 \\ & & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2 & 1 \\ & -2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -2 & 1 \\ & -2 & 1 \\ & & -2 \end{pmatrix} \right\}$$

例 7.5 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V_{\mathbb{C}}^4)$ 在基 $\{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ 下的表示矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 & 0 \\ -4 & -1 & 0 & 0 \\ 6 & 1 & 2 & 1 \\ -14 & -5 & -1 & 0 \end{pmatrix},$$

φ 在新基 $\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ 下的表示矩阵为 Jordan 标准型 J , 求过渡矩阵 P .

解:

$$P^{-1}AP = J,$$

$$\lambda I - A \longrightarrow \cdots \longrightarrow \text{diag}\{1, 1, (\lambda - 1)^2, (\lambda - 1)^2\},$$

所以 A 的初等因子组为 $(\lambda - 1)^2, (\lambda - 1)^2$, 由此可算出

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 1 & & \\ 0 & 1 & & \\ & & 1 & 1 \\ & & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

设 $P = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$,

$$P^{-1}AP = J \implies AP = PJ \implies (A\alpha_1, A\alpha_2, A\alpha_3, A\alpha_4) = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \begin{pmatrix} 1 & 1 & & \\ 0 & 1 & & \\ & & 1 & 1 \\ & & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\implies \begin{cases} A\alpha_1 = \alpha_1 \\ A\alpha_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \implies (A - I_4)\alpha_2 = \alpha_1 \\ A\alpha_3 = \alpha_3 \\ A\alpha_4 = \alpha_3 + \alpha_4 \implies (A - I_4)\alpha_4 = \alpha_3 \end{cases} \implies \alpha_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 4 \\ 0 \end{pmatrix}, \alpha_3 = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix},$$

$$\implies \alpha_2 = \begin{pmatrix} \frac{5}{4} \\ -\frac{7}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \alpha_4 = \begin{pmatrix} \frac{1}{4} \\ -\frac{3}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \implies P = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = \begin{pmatrix} -1 & \frac{5}{4} & -1 & \frac{1}{4} \\ 2 & -\frac{7}{2} & 2 & -\frac{3}{2} \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

7.7 Jordan 标准型的进一步讨论和应用

设 V 是 n 维复线性空间, φ 是 V 上的线性变换. 设 φ 的初等因子组为

$$(\lambda - \lambda_1)^{r_1}, (\lambda - \lambda_2)^{r_2}, \dots, (\lambda - \lambda_k)^{r_k}, \quad (7.23)$$

由定理 7.11 可知, 存在 V 的一组基 $\{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1r_1}; e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2r_2}; \dots; e_{k1}, e_{k2}, \dots, e_{kr_k}\}$, 使得 φ 在这组基下的表示矩阵为

$$J = \begin{pmatrix} J_1 & & \\ & J_2 & \\ & & \dots \\ & & & J_k \end{pmatrix}.$$

上式中每个 J_i 是相应于初等因子 $(\lambda - \lambda_i)^{r_i}$ 的 Jordan 块, 其阶正好为 r_i . 令 V_i 是由基元 $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{ir_i}$ 生成的子空间, 则

$$\begin{aligned} \varphi(e_{i1}) &= \lambda_i e_{i1}, \\ \varphi(e_{i2}) &= e_{i1} + \lambda_i e_{i2}, \\ &\dots\dots\dots \\ \varphi(e_{ir_i}) &= e_{ir_i-1} + \lambda_i e_{ir_i}. \end{aligned} \quad (7.24)$$

这表明 $\varphi(V_i) \subseteq V_i$, 即 $V_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 是 φ 的不变子空间, 且有

$$V = V_1 \oplus V_2 \oplus \dots \oplus V_k.$$

定理 7.12 线性变换 φ 的特征值 λ_1 的代数重数等于属于 λ_1 的 Jordan 块的阶数之和; λ_1 的几何重数等于属于 λ_1 的 Jordan 块的个数.

令 $\psi = \varphi - \lambda_i I_V$, 则(7.24)式可化为下式:

$$\begin{aligned} \psi(e_{i1}) &= 0, \\ \psi(e_{i2}) &= e_{i1}, \\ &\dots\dots\dots \\ \psi(e_{ir_i}) &= e_{ir_i-1}. \end{aligned} \quad (7.25)$$

即有如下循环链:

$$e_{ir_i} \xrightarrow{\psi} e_{ir_i-1} \xrightarrow{\psi} e_{ir_i-2} \xrightarrow{\psi} \dots \xrightarrow{\psi} e_{i2} \xrightarrow{\psi} e_{i1} \xrightarrow{\psi} 0.$$

从而

$$\{e_{ir_i}, \psi(e_{ir_i}), \dots, \psi^{r_i-1}(e_{ir_i})\}$$

构成了 V_i 的一组基. 从以下定义可知, V_i 是关于 $\psi = \varphi - \lambda_i I_V$ 的循环子空间.

定义 7.5 设 $\varphi \in \mathcal{L}(V)$, V_0 是 r 维 φ -不变子空间. 若存在 $0 \neq \alpha \in V_0$ 使得 $\{\alpha, \varphi(\alpha), \dots, \varphi^{r-1}(\alpha)\}$ 是 V_0 的一组基, 则称 V_0 为关于 φ 的循环子空间, α 称为循环向量.

引理 7.9 设 $R(\lambda_1) = V_1 \oplus V_2 \oplus \cdots \oplus V_s$, 则

$$R(\lambda_1) = \text{Ker}(\varphi - \lambda_1 I_V)^n = \{v \in V \mid (\varphi - \lambda_1 I_V)^n(v) = 0\}.$$

证明: 先证 $R(\lambda_1) \subseteq \text{Ker}(\varphi - \lambda_1 I_V)^n$:

任取 $v \in R(\lambda_1), v = v_1 + v_2 + \cdots + v_s, v_i \in V_i$, 则 V_i 的基有如下循环链:

$$e_{ir_i} \xrightarrow{\varphi - \lambda_1 I_V} e_{ir_i-1} \xrightarrow{\varphi - \lambda_1 I_V} e_{ir_i-2} \xrightarrow{\varphi - \lambda_1 I_V} \cdots \xrightarrow{\varphi - \lambda_1 I_V} e_{i2} \xrightarrow{\varphi - \lambda_1 I_V} e_{i1} \xrightarrow{\varphi - \lambda_1 I_V} 0.$$

可得以下结论:

$$\begin{aligned} (\varphi - \lambda_1 I_V)^{r_i}(e_{ij}) &= 0, \forall j \implies (\varphi - \lambda_1 I_V)^{r_i}(v_i) = 0 \\ \implies (\varphi - \lambda_1 I_V)^n(v) &= (\varphi - \lambda_1 I_V)^n(v_1) + \cdots + (\varphi - \lambda_1 I_V)^n(v_s) = 0 \end{aligned}$$

上式中的 n 可缩小到 $\max\{r_1, r_2, \cdots, r_s\}$.

再证 $\text{Ker}(\varphi - \lambda_1 I)^n \subseteq R(\lambda_1)$:

设 $v \in V$ 在上述基下的坐标向量 $x = (x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{1r_1}, \cdots)'$, 求 $(J - \lambda_1 I_n)^n x = 0$ 的解.

$$(J_{r_i}(\lambda_i) - \lambda_1 I_{r_i})^n = \begin{pmatrix} \lambda_i - \lambda_1 & 1 & & & \\ & \lambda_i - \lambda_1 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & 1 \\ & & & & \lambda_i - \lambda_1 \end{pmatrix}^n = \begin{cases} 0, 1 \leq i \leq s \\ \text{非异}, s < i \leq k \end{cases}$$

由上式可推出

$$\begin{cases} x_{i1} - x_{i2} = \cdots = x_{ir_i} = 0, s < i \leq k \\ (x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{1r_1}; \cdots; x_{s1}, x_{s2}, \cdots, x_{sr_s}) \text{ 为任意解} \end{cases}$$

由上式可得

$$\text{Ker}(\varphi - \lambda_1 I)^n \subseteq V_1 \oplus V_2 \oplus \cdots \oplus V_s = R(\lambda_1).$$

□