

## 0.1 特征值与特征向量

### 定义 0.1 (线性变换的特征值和特征向量)

设  $\varphi$  是数域  $\mathbb{K}$  上线性空间  $V$  上的线性变换, 若  $\lambda_0 \in \mathbb{K}, x \in V$  且  $x \neq 0$ , 使

$$\varphi(x) = \lambda_0 x,$$

则称  $\lambda_0$  是线性变换  $\varphi$  的一个**特征值**, 向量  $x$  称为  $\varphi$  关于特征值  $\lambda_0$  的**特征向量**.


 **笔记** 显然  $\varphi$  的关于特征值  $\lambda_0$  的全体特征向量加上零向量构成  $V$  的子空间.

### 定义 0.2 (线性变换的特征子空间)

设  $\lambda_0$  是线性空间  $V$  上的线性变换  $\varphi$  的特征值, 令

$$V_{\lambda_0} = \{\alpha \in V \mid \varphi(\alpha) = \lambda_0 \alpha\} = \{\alpha \in V \mid \alpha \text{ 是 } \varphi \text{ 的属于 } \lambda_0 \text{ 的特征向量}\} \cup \{0\},$$

则显然  $V_{\lambda_0}$  是  $V$  的子空间, 称为  $\varphi$  的属于特征值  $\lambda_0$  的**特征子空间**.

 **笔记** 显然  $V_{\lambda_0}$  是  $\varphi$  的不变子空间.

### 定义 0.3 (矩阵的特征值和特征向量)

设  $A$  是数域  $\mathbb{F}$  上的  $n$  阶方阵, 若存在  $\lambda_0 \in \mathbb{F}$  及  $n$  维非零列向量  $\alpha$ , 使

$$A\alpha = \lambda_0 \alpha$$

式成立, 则称  $\lambda_0$  为矩阵  $A$  的一个**特征值**,  $\alpha$  为  $A$  关于特征值  $\lambda_0$  的**特征向量**.

### 定义 0.4 (矩阵的特征子空间)

设  $\lambda_0$  是  $\mathbb{F}$  上的  $n$  阶矩阵  $A$  的特征值, 令

$$V_{\lambda_0} = \{x \in \mathbb{F}^n \mid Ax = \lambda_0 x\} = \{x \in \mathbb{F}^n \mid x \text{ 是 } A \text{ 的属于 } \lambda_0 \text{ 的特征向量}\} \cup \{0\},$$

则  $V_{\lambda_0}$  是线性方程组  $(\lambda_0 I_n - A)x = 0$  的解空间, 从而是  $\mathbb{F}^n$  的子空间, 称为  $A$  的属于特征值  $\lambda_0$  的**特征子空间**.

### 定义 0.5 (特征多项式)

设  $A$  是  $n$  阶方阵, 称  $|\lambda I_n - A|$  为  $A$  的**特征多项式**.

### 定理 0.1 (特征值的和与积)

矩阵  $A$  的  $n$  个特征值的和与积分别为

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n = \text{tr}(A),$$

$$\lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n = |A|.$$

**证明** 设

$$\begin{aligned} |\lambda I_n - A| &= \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \cdots + a_{n-1} \lambda + a_n \\ &= (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \cdots (\lambda - \lambda_n). \end{aligned}$$

由 Vieta 定理知  $\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n = -a_1, \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n = (-1)^n a_n$ . 由例题??可知  $a_1 = -(a_{11} + a_{22} + \cdots + a_{nn}) = -\text{tr}(A), a_n = (-1)^n |A|$ . 因此矩阵  $A$  的  $n$  个特征值的和与积分别为

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n = \text{tr}(A),$$

$$\lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n = |A|.$$

□

**定义 0.6 (特征多项式)**

设  $\varphi$  是线性空间  $V$  上的线性变换,  $\varphi$  在  $V$  的某组基下的表示矩阵为  $A$ , 由相似矩阵有相同特征值知  $|\lambda I_n - A|$  与基或表示矩阵的选取无关, 称  $|\lambda I_n - A|$  为  $\varphi$  的**特征多项式**, 记为  $|\lambda I_V - \varphi|$ .

♣

**定理 0.2 (复方阵必相似于上三角阵)**

任何复方阵必相似于一个上三角阵, 并且对角元素都是其特征值.

♡

**注** 一般数域  $\mathbb{K}$  上的矩阵未必相似于上三角阵.

**证明** 设  $A$  是  $n$  阶复方阵, 现对  $n$  用数学归纳法. 当  $n = 1$  时结论显然成立. 假设对  $n - 1$  阶矩阵结论成立, 现对  $n$  阶矩阵  $A$  来证明. 设  $\lambda_1$  是  $A$  的一个特征值, 则存在非零列向量  $\alpha_1$ , 使

$$A\alpha_1 = \lambda_1 \alpha_1.$$

将  $\alpha_1$  作为  $C_n$  的一个基向量, 并扩展为  $C_n$  的一组基  $\{\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n\}$ . 将这些基向量按照列分块方式拼成矩阵  $P = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n)$ , 则  $P$  为  $n$  阶非异阵, 且

$$\begin{aligned} AP &= A(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n) = (A\alpha_1, A\alpha_2, \cdots, A\alpha_n) \\ &= (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n) \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ O & A_1 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

其中  $A_1$  是一个  $n - 1$  阶方阵. 注意到  $P = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n)$  非异, 上式即为

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ O & A_1 \end{pmatrix}.$$

因为  $A_1$  是一个  $n - 1$  阶方阵, 所以由归纳假设可知, 存在  $n - 1$  阶非异阵  $Q$ , 使  $Q^{-1}A_1Q$  是一个上三角阵. 令

$$R = \begin{pmatrix} 1 & O \\ O & Q \end{pmatrix},$$

则  $R$  是  $n$  阶非异阵, 且

$$\begin{aligned} R^{-1}P^{-1}APR &= \begin{pmatrix} 1 & O \\ O & Q \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ O & A_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & O \\ O & Q \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & O \\ O & Q^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ O & A_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & O \\ O & Q \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \lambda_1 & * \\ O & Q^{-1}A_1Q \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

这是一个上三角阵, 它与  $A$  相似, 并且对角元素都是其特征值.

□

**推论 0.1**

若数域  $\mathbb{K}$  上的  $n$  阶方阵  $A$  的特征值全在  $\mathbb{K}$  中, 则存在  $\mathbb{K}$  上的非异阵  $P$ , 使  $P^{-1}AP$  是一个上三角阵.

♡

**证明** 由复方阵必相似于上三角阵的证明类似可得.

□

**命题 0.1**

1. 设  $\varphi$  为  $n$  维线性空间  $V$  上的线性变换, 则  $\varphi$  在  $V$  上至少存在一个特征值  $\lambda_0 \in \mathbb{C}$  及其特征向量  $\alpha_0 \in V$ .
2. 设  $A$  为  $n$  阶复矩阵, 则  $A$  在复数域上至少存在一个特征值  $\lambda_0 \in \mathbb{C}$  及其特征向量  $\alpha_0 \in \mathbb{C}^n$ .

♣

**证明**

1. 任取  $V$  的一组基  $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ , 设  $\varphi$  在这组基下的表示矩阵为  $A$ , 由代数学基本定理可知, 特征多项式  $|\lambda I_n - \varphi| = |\lambda I_n - A|$  在复数域上至少有一个根  $\lambda_0 \in \mathbb{C}$ . 又由线性方程组理论可知,  $(\lambda_0 I_n - A)x = 0$  一定有非

零解  $(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ , 即  $\lambda_0 I_n \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ . 记  $\alpha_0 = (e_1, e_2, \dots, e_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ , 则

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha_0) &= \varphi(e_1, e_2, \dots, e_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = (e_1, e_2, \dots, e_n) A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \\ &= (e_1, e_2, \dots, e_n) \cdot \lambda_0 I_n \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \lambda_0 (e_1, e_2, \dots, e_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \lambda_0 \alpha_0. \end{aligned}$$

故  $\varphi$  在  $V$  上至少存在一个特征值  $\lambda_0 \in \mathbb{C}$  及其特征向量  $\alpha_0 \in V$ .

2. 由代数学基本定理可知, 特征多项式  $|\lambda I_n - A|$  在复数域上至少有一个根  $\lambda_0 \in \mathbb{C}$ . 又由线性方程组理论可知,  $(\lambda_0 I_n - A)x = 0$  一定有非零解  $\alpha_0 \in \mathbb{C}^n$ . 故  $A$  在复数域上至少存在一个特征值  $\lambda_0 \in \mathbb{C}$  及其特征向量  $\alpha_0 \in \mathbb{C}^n$ .  $\square$

### 0.1.1 直接利用定义计算和证明

**例题 0.1** 设  $V$  是  $n$  阶矩阵全体组成的线性空间,  $\varphi$  是  $V$  上的线性变换:  $\varphi(X) = AX$ , 其中  $A$  是一个  $n$  阶矩阵. 求证:  $\varphi$  和  $A$  具有相同的特征值 (重数可能不同).

**证明** 设  $\lambda_0$  是  $A$  的特征值,  $x_0$  是对应的特征向量, 即  $Ax_0 = \lambda_0 x_0$ . 令  $X = (x_0, 0, \dots, 0)$ , 则  $\varphi(X) = AX = \lambda_0 X$  且  $X \neq 0$ , 因此  $\lambda_0$  也是  $\varphi$  的特征值.

反之, 设  $\lambda_0$  是  $\varphi$  的特征值,  $X$  是对应的特征向量, 即  $\varphi(X) = AX = \lambda_0 X$ . 令  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  为列分块, 设第  $i$  个列向量  $x_i \neq 0$ , 则  $Ax_i = \lambda_0 x_i$ , 因此  $\lambda_0$  也是  $A$  的特征值.  $\square$

**例题 0.2** 设  $\lambda_1, \lambda_2$  是矩阵  $A$  的两个不同的特征值,  $\alpha_1, \alpha_2$  分别是  $\lambda_1, \lambda_2$  的特征向量, 求证:  $\alpha_1 + \alpha_2$  必不是  $A$  的特征向量.

**证明** 用反证法, 设  $A(\alpha_1 + \alpha_2) = \mu(\alpha_1 + \alpha_2)$ , 又

$$A(\alpha_1 + \alpha_2) = A\alpha_1 + A\alpha_2 = \lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_2,$$

于是  $(\lambda_1 - \mu)\alpha_1 + (\lambda_2 - \mu)\alpha_2 = 0$ . 由于属于不同特征值的特征向量线性无关, 故有  $\lambda_1 = \mu, \lambda_2 = \mu$ , 从而  $\lambda_1 = \lambda_2$ , 引出矛盾.  $\square$

#### 命题 0.2

设  $\varphi$  是线性空间  $V$  上的线性变换,  $V$  有一个直和分解:

$$V = V_1 \oplus V_2 \oplus \dots \oplus V_m,$$

其中  $V_i$  都是  $\varphi$ -不变子空间.

- (1) 设  $\varphi$  限制在  $V_i$  上的特征多项式为  $f_i(\lambda)$ , 求证:  $\varphi$  的特征多项式

$$f(\lambda) = f_1(\lambda)f_2(\lambda)\cdots f_m(\lambda).$$

- (2) 设  $\lambda_0$  是  $\varphi$  的特征值,  $V_0 = \{v \in V \mid \varphi(v) = \lambda_0 v\}$  为特征子空间,  $V_{i,0} = V_i \cap V_0 = \{v \in V_i \mid \varphi(v) = \lambda_0 v\}$ ,

求证:

$$V_0 = V_{1,0} \oplus V_{2,0} \oplus \cdots \oplus V_{m,0}.$$

**证明**

- (1) 取  $V_i$  的一组基, 将它们拼成  $V$  的一组基。记  $A_i$  是  $\varphi$  在  $V_i$  上的限制在  $V_i$  所取基下的表示矩阵, 则由定理??可知  $\varphi$  在  $V$  的这组基下的表示矩阵为分块对角矩阵  $A = \text{diag}(A_1, A_2, \cdots, A_m)$ , 于是

$$f(\lambda) = |\lambda I_n - A| = |\lambda I - A_1| |\lambda I - A_2| \cdots |\lambda I - A_m|,$$

即  $f(\lambda) = f_1(\lambda) f_2(\lambda) \cdots f_m(\lambda)$ .

- (2) 任取  $\alpha \in V_0$ , 设  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_m$ , 其中  $\alpha_i \in V_i$ , 则

$$\varphi(\alpha_1) + \varphi(\alpha_2) + \cdots + \varphi(\alpha_m) = \varphi(\alpha) = \lambda_0 \alpha = \lambda_0 \alpha_1 + \lambda_0 \alpha_2 + \cdots + \lambda_0 \alpha_m.$$

注意到  $\varphi(\alpha_i) \in V_i$ ,  $\varphi(\alpha) = \lambda_0 \alpha \in V$ , 故由直和的等价条件 (5) 可得  $\varphi(\alpha_i) = \lambda_0 \alpha_i$ , 即  $\alpha_i \in V_{i,0}$ , 从而  $V_0 = V_{1,0} \oplus V_{2,0} \oplus \cdots \oplus V_{m,0}$ . 注意到  $V_{i,0} \subseteq V_i$ , 故

$$V_{i,0} \cap (V_{1,0} + \cdots + V_{i-1,0}) \subseteq V_i \cap (V_1 + \cdots + V_{i-1}) = \{0\}, \quad 2 \leq i \leq m,$$

于是由直和的等价条件 (2) 可知上述为直和。

□

### 推论 0.2

对分块对角矩阵  $A = \text{diag}\{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$  的任一特征值  $\lambda_0$ , 其代数重数等于每个分块的代数重数之和, 其几何重数等于每个分块的几何重数之和。

♥

**证明** 将命题 0.2 的条件和结论代数化之后, 即可得到结论。

□

### 命题 0.3 (特征向量的延拓)

设  $n$  阶分块对角矩阵  $A = \text{diag}\{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$ , 其中  $A_i$  是  $n_i$  阶矩阵。

- (1) 任取  $A_i$  的特征值  $\lambda_i$  及其特征向量  $x_i \in \mathbb{C}^{n_i}$ , 求证: 可在  $x_i$  的上下添加适当多的零, 得到非零向量  $\tilde{x}_i \in \mathbb{C}^n$ , 使得  $A\tilde{x}_i = \lambda_i \tilde{x}_i$ , 即  $\tilde{x}_i$  是  $A$  关于特征值  $\lambda_i$  的特征向量, 称为  $x_i$  的**延拓**.
- (2) 任取  $A$  的特征值  $\lambda_0$ , 并设  $\lambda_0$  是  $A_{i_1}, \cdots, A_{i_r}$  的特征值, 但不是其他  $A_j$  ( $1 \leq j \leq m, j \neq i_1, \cdots, i_r$ ) 的特征值, 求证:  $A$  关于特征值  $\lambda_0$  的特征子空间的一组基可取为  $A_{i_k}$  ( $1 \leq k \leq r$ ) 关于特征值  $\lambda_0$  的特征子空间的一组基的延拓的并集。

♥

**证明**

- (1) 令  $\tilde{x}_i = (0, \cdots, 0, x_i, 0, \cdots, 0)'$ , 即  $\tilde{x}_i$  的第  $i$  块为  $x_i$ , 其余块均为 0, 显然  $\tilde{x}_i \neq 0$ . 容易验证  $A\tilde{x}_i = \lambda_i \tilde{x}_i$ , 故结论成立。
- (2) 由命题 0.2(2) 以及直和的等价条件 (5) 即得。

□

**例题 0.3** 设  $A$  是  $n$  阶整数矩阵,  $p, q$  为互素的整数且  $q > 1$ . 求证: 矩阵方程  $Ax = \frac{p}{q}x$  必无非零解。

**证明** 用反证法。设上述矩阵方程有非零解, 则  $\frac{p}{q}$  为  $A$  的特征值, 即为特征多项式  $f(\lambda) = \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \cdots + a_{n-1} \lambda + a_n$  的根。由于  $A$  是整数矩阵, 故  $f(\lambda)$  为整数系数多项式。由整数系数多项式有有理根的必要条件可知  $q \mid 1$ , 从而

$q = \pm 1$ , 于是  $q \mid p$ , 这与  $p, q$  互素矛盾。□

**例题 0.4** 求下列  $n$  阶矩阵的特征值:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & a & \cdots & a & a \\ b & 0 & \cdots & a & a \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ b & b & \cdots & 0 & a \\ b & b & \cdots & b & 0 \end{pmatrix}.$$

**解** 若  $a = 0$  或  $b = 0$ , 则  $A$  是主对角元全为零的下三角或上三角矩阵, 故  $A$  的特征值全为零. 设  $a \neq 0, b \neq 0$ , 则由命题??可知: 若  $a \neq b$ , 则  $|\lambda I_n - A| = \frac{a(\lambda+b)^n - b(\lambda+a)^n}{a-b}$ . 设  $\frac{b}{a}$  的  $n$  次方根为  $\omega_i (1 \leq i \leq n)$ , 则

$$\begin{aligned} |\lambda I_n - A| &= \frac{a(\lambda+b)^n - b(\lambda+a)^n}{a-b} = 0 \Rightarrow \left( \frac{\lambda+b}{\lambda+a} \right)^n = \frac{b}{a} \\ \Rightarrow \frac{\lambda+b}{\lambda+a} &= \omega_i (1 \leq i \leq n) \Rightarrow \lambda = \frac{a\omega_i - b}{1 - \omega_i} (1 \leq i \leq n). \end{aligned}$$

从而  $A$  的特征值为  $\frac{a\omega_i - b}{1 - \omega_i} (1 \leq i \leq n)$ .

若  $a = b$ , 则  $|\lambda I_n - A| = (\lambda - (n-1)a)(\lambda + a)^{n-1}$ , 从而  $A$  的特征值为  $(n-1)a$  (1 重),  $-a$  ( $n-1$  重).

## 0.1.2 正向利用矩阵的多项式

### 定义 0.7 (矩阵多项式)

若  $A$  是一个  $n$  阶矩阵,  $f(x) = a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \cdots + a_1 x + a_0$  是一个多项式, 记

$$f(A) = a_m A^m + a_{m-1} A^{m-1} + \cdots + a_1 A + a_0 I_n.$$

### 命题 0.4

设  $n$  阶矩阵  $A$  的全部特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ ,  $f(x)$  是一个多项式, 则  $f(A)$  的全部特征值为  $f(\lambda_1), f(\lambda_2), \cdots, f(\lambda_n)$ .

**注** 这个命题告诉我们: 如果能够将一个复杂矩阵写成一个简单矩阵的多项式, 那么就可以由简单矩阵的特征值得到复杂矩阵的特征值.

**证明** 因为任一  $n$  阶矩阵均复相似于上三角阵, 可设

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * & \cdots & * \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{pmatrix}.$$

因为上三角阵的和、数乘及乘方仍是上三角阵, 经计算不难得到

$$P^{-1}f(A)P = f(P^{-1}AP) = \begin{pmatrix} f(\lambda_1) & * & \cdots & * \\ 0 & f(\lambda_2) & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & f(\lambda_n) \end{pmatrix}.$$

因此  $f(A)$  的全部特征值为  $f(\lambda_1), f(\lambda_2), \cdots, f(\lambda_n)$ . □

**例题 0.5** 设  $n$  阶矩阵  $A$  的全体特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ , 求  $2n$  阶矩阵

$$\begin{pmatrix} A^2 & A \\ A^2 & A \end{pmatrix}$$

的全体特征值。

**证明** 由命题??可知

$$\left| \lambda I_{2n} - \begin{pmatrix} A^2 & A \\ A^2 & A \end{pmatrix} \right| = \left| \begin{pmatrix} \lambda I_n - A & -A^2 \\ -A^2 & \lambda I_n - A \end{pmatrix} \right| = |\lambda I_n - A - A^2| |\lambda I_n - A + A^2|.$$

由命题 0.4 可知  $A + A^2$  的全体特征值为  $\lambda_i + \lambda_i^2 (1 \leq i \leq n)$ ,  $A - A^2$  的全体特征值为  $\lambda_i - \lambda_i^2 (1 \leq i \leq n)$ , 因此所求矩阵的全体特征值为

$$\lambda_1 + \lambda_1^2, \lambda_1 - \lambda_1^2, \lambda_2 + \lambda_2^2, \lambda_2 - \lambda_2^2, \dots, \lambda_n + \lambda_n^2, \lambda_n - \lambda_n^2.$$

□

### 命题 0.5 (循环矩阵的特征值)

求下列循环矩阵的特征值:

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_n \\ a_n & a_1 & a_2 & \cdots & a_{n-1} \\ a_{n-1} & a_n & a_1 & \cdots & a_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_2 & a_3 & a_4 & \cdots & a_1 \end{pmatrix}.$$

♣

**解** 设  $J = \begin{pmatrix} O & I_{n-1} \\ 1 & O \end{pmatrix}$ ,  $f(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \cdots + a_nx^{n-1}$ , 则由循环矩阵的性质 2 可知  $A = f(J)$ 。经简单计算可得

$$\begin{aligned} |\lambda I_n - J| &= \begin{vmatrix} \lambda & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda & -1 \\ -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda \end{vmatrix} \xrightarrow{\text{按第一列展开}} \lambda \begin{vmatrix} \lambda & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda & -1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda \end{vmatrix} + (-1)^{n+1} (-1) \begin{vmatrix} -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \lambda & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda & -1 \end{vmatrix} \\ &= \lambda^n + (-1)^{n+2} (-1)^{n-1} = \lambda^n - 1, \end{aligned}$$

于是  $J$  的特征值为

$$\omega_k = \cos \frac{2k\pi}{n} + i \sin \frac{2k\pi}{n}, \quad 0 \leq k \leq n-1$$

因此  $A$  的特征值为  $f(1), f(\omega_1), \dots, f(\omega_{n-1})$ 。

### 定义 0.8 (友矩阵)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & -a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -a_{n-1} \end{pmatrix}$$

称为多项式  $f(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0$  的友矩阵。

♣

**命题 0.6 (友矩阵的特征多项式及特征值)**

设首一多项式  $f(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0$ ,  $f(x)$  的友矩阵

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -a_1 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & -a_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -a_{n-1} \end{pmatrix}.$$

(1) 求证: 矩阵  $C$  的特征多项式就是  $f(\lambda)$ 。

(2) 设  $f(x)$  的根为  $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ ,  $g(x)$  为任一多项式, 求以  $g(\lambda_1), g(\lambda_2), \cdots, g(\lambda_n)$  为根的  $n$  次多项式。

**证明**

(1)

$$\begin{aligned} |xE - A| &= \begin{vmatrix} x & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_0 \\ -1 & x & 0 & \cdots & 0 & a_1 \\ 0 & -1 & x & \cdots & 0 & a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x & a_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & x + a_{n-1} \end{vmatrix} \xrightarrow[i=n, n-1, \cdots, 2]{x r_i + r_{i-1}} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0 \\ -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x^{n-1} + a_{n-1}x^{n-2} + \cdots + a_2x + a_1 \\ 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 & x^{n-2} + a_{n-1}x^{n-3} + \cdots + a_3x + a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x^2 + a_{n-1}x + a_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & x + a_{n-1} \end{vmatrix} \\ &\xrightarrow{\text{按第一行展开}} \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{vmatrix} (x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0)(-1)^{n+1} \\ &= (x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0)(-1)^{n+1}(-1)^{n-1} \\ &= x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0 = f(x). \end{aligned}$$

(2) 由假设及 (1) 的结论可知  $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$  是  $C$  的全体特征值, 故由命题 0.4 可知  $g(\lambda_1), g(\lambda_2), \cdots, g(\lambda_n)$  是  $g(C)$  的全体特征值, 从而  $h(x) = |xI_n - g(C)|$  即为所求的多项式。

□

### 0.1.3 反向利用矩阵的多项式

#### 命题 0.7

设  $n$  阶矩阵  $A$  适合一个多项式  $g(x)$ , 即  $g(A) = O$ , 则  $A$  的任一特征值  $\lambda_0$  也必适合  $g(x)$ , 即  $g(\lambda_0) = 0$ .

**证明** 设  $\alpha$  是  $A$  关于特征值  $\lambda_0$  的特征向量, 经简单计算得

$$g(\lambda_0)\alpha = g(A)\alpha = 0.$$

而  $\alpha \neq 0$ , 因此  $g(\lambda_0) = 0$ .

□

#### 命题 0.8 (幂零矩阵关于特征值的充要条件)

求证:  $n$  阶矩阵  $A$  为幂零矩阵的充要条件是  $A$  的特征值全为零。

**证明** 若  $A$  为幂零矩阵, 即存在正整数  $k$ , 使得  $A^k = O$ , 则由命题 0.7 可知  $A$  的任一特征值  $\lambda_0$  也适合  $x^k$ , 于是  $\lambda_0 = 0$ 。

反之, **证法一**: 若  $A$  的特征值全为零, 则存在可逆矩阵  $P$ , 使得  $P^{-1}AP = B$  为上三角矩阵且主对角元素全为零。由上三角阵性质 (1) 可知  $B^n = O$ , 于是  $A^n = (PBP^{-1})^n = PB^nP^{-1} = O$ , 即  $A$  为幂零矩阵。

**证法二**: 也可以利用 Cayley-Hamilton 定理来证明, 由于  $A$  的特征值全为零, 故其特征多项式为  $\lambda^n$ , 从而  $A^n = O$ .  $\square$

**例题 0.6** 设  $V$  是数域  $F$  上的  $n$  阶方阵全体构成的线性空间,  $n$  阶方阵

$$P = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix},$$

$V$  上的线性变换  $\eta$  定义为  $\eta(X) = PX'P$ . 试求  $\eta$  的全体特征值及其特征向量。

**笔记** 任意  $n$  阶矩阵  $A$  左乘  $P$  相当于行倒排, 右乘  $P$  矩阵相当于列倒排。

**解** 由  $P = P'$ ,  $P^2 = I_n$  容易验证  $\eta^2(X) = P(PX'P)P = X$ , 即  $\eta^2 = I_V$ , 于是  $\eta$  的特征值也适合多项式  $x^2 - 1$ , 从而特征值只能是  $\pm 1$ .

设  $\eta(X_0) = PX_0'P = \pm X_0$ , 这等价于  $(PX_0')P = \pm PX_0$ , 即  $PX_0$  为对称矩阵或反对称矩阵。

令  $PX_0 = E_{ii}, E_{ij} + E_{ji}$  (对称矩阵空间的基向量), 容易证明  $\eta$  关于特征值 1 的线性无关的特征向量为  $X_0 = PE_{ii}$  ( $1 \leq i \leq n$ ),  $P(E_{ij} + E_{ji})$  ( $1 \leq i < j \leq n$ ).

令  $PX_0 = E_{ij} - E_{ji}$  (反对称矩阵空间的基向量), 容易证明  $\eta$  关于特征值 -1 的线性无关的特征向量为  $X_0 = P(E_{ij} - E_{ji})$  ( $1 \leq i < j \leq n$ ). 注意到这些特征向量恰好构成  $V$  的一组基, 故  $\eta$  的特征值为 1  $\frac{n(n+1)}{2}$  重, -1  $\frac{n(n-1)}{2}$  重。

**例题 0.7** 设  $n$  阶方阵  $A$  的每行每列只有一个元素非零, 并且那些非零元素为 1 或 -1, 证明:  $A$  的特征值都是单位根。

**证明** 设  $S$  为由每行每列只有一个元素非零, 并且那些非零元素为 1 或 -1 的所有  $n$  阶方阵构成的集合, 由排列组合可得  $\bar{S} = 2^n n!$ , 即  $S$  是一个有限集合. 注意到矩阵  $M \in S$  当且仅当  $M = P_1 P_2 \cdots P_r$ , 其中  $P_k$  是初等矩阵  $P_{ij}$  或  $P_i(-1)$ , 因此对任意的  $M, N \in S$ ,  $MN \in S$ . 特别地, 由  $A \in S$  可知  $A^k \in S$  ( $k \geq 1$ ), 即  $\{A, A^2, A^3, \dots\} \subseteq S$ , 于是存在正整数  $k > l$ , 使得  $A^k = A^l$ . 注意到  $|A| = \pm 1$ , 故  $A$  可逆, 于是  $A^{k-l} = I_n$ , 从而  $A$  的特征值适合多项式  $x^{k-l} - 1$ , 即为单位根.  $\square$

**例题 0.8** 设  $A$  是  $n$  阶实方阵, 又  $I_n - A$  的特征值的模长都小于 1, 求证:  $0 < |A| < 2^n$ .

**证明** 设  $A$  的特征值为  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ , 则  $I_n - A$  的特征值为  $1 - \lambda_1, \dots, 1 - \lambda_n$ . 由假设  $|1 - \lambda_i| < 1$ , 若  $\lambda_i$  是实数, 则  $0 < \lambda_i < 2$ ; 若  $\lambda_i$  是虚数, 则  $\bar{\lambda}_i$  也是  $A$  的特征值, 此时  $1 - \bar{\lambda}_i$  也是  $I_n - A$  的特征值. 从而  $|1 - \lambda_i| < 1, |1 - \bar{\lambda}_i| < 1$ , 于是

$$|1 - \lambda_i^2| = |(1 - \lambda_i)(1 - \bar{\lambda}_i)| = |1 - \lambda_i||1 - \bar{\lambda}_i| < 1.$$

因此  $0 < \lambda_i^2 < 2$ , 故此时  $0 < \lambda_i < \sqrt{2}$ .

综上, 无论  $\lambda_i$  是实数还是虚数, 都有  $0 < |\lambda_i| < 2$ . 由于  $|A|$  等于所有特征值之积, 故  $0 < |A| < 2^n$ .  $\square$

#### 命题 0.9 (逆矩阵的特征值)

设  $n$  阶矩阵  $A$  是可逆矩阵, 且  $A$  的全部特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , 则  $A^{-1}$  的全部特征值为  $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}, \dots, \lambda_n^{-1}$ .  $\blacktriangle$

**证明** 首先注意到  $A$  是可逆矩阵,  $\lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n = |A| \neq 0$ , 因此每个  $\lambda_i \neq 0$  (事实上,  $A$  可逆的充分必要条件是它的特征值全不为零). 由复方阵必相似于上三角阵可设

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * & \cdots & * \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{pmatrix}.$$



因为上三角矩阵的逆矩阵仍然是上三角矩阵, 经过计算不难得到

$$P^{-1}A^{-1}P = (P^{-1}AP)^{-1} = \begin{pmatrix} \lambda_1^{-1} & * & \cdots & * \\ 0 & \lambda_2^{-1} & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n^{-1} \end{pmatrix}.$$

因此  $A^{-1}$  的全部特征值为  $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}, \dots, \lambda_n^{-1}$ . □

#### 命题 0.10 (伴随矩阵的特征值)

设  $n$  阶矩阵  $A$  的全体特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , 求证:  $A^*$  的全体特征值为

$$\prod_{i \neq 1} \lambda_i, \prod_{i \neq 2} \lambda_i, \dots, \prod_{i \neq n} \lambda_i.$$

**证明** 因为任一  $n$  阶矩阵均复相似于上三角矩阵, 故可设

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} \lambda_1 & * & \cdots & * \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{pmatrix}.$$

注意到上三角矩阵的伴随矩阵仍是上三角矩阵, 经计算可得

$$P^{-1}A^*P = P^*A^*(P^{-1})^* = (P^{-1}AP)^* = \begin{pmatrix} \prod_{i \neq 1} \lambda_i & * & \cdots & * \\ 0 & \prod_{i \neq 2} \lambda_i & \cdots & * \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \prod_{i \neq n} \lambda_i \end{pmatrix}.$$

因此  $A^*$  的全部特征值为

$$\prod_{i \neq 1} \lambda_i, \prod_{i \neq 2} \lambda_i, \dots, \prod_{i \neq n} \lambda_i.$$

□


### 0.1.4 特征值的降价公式

#### 定理 0.3 (特征值的降价公式)

设  $A$  是  $m \times n$  矩阵,  $B$  是  $n \times m$  矩阵, 且  $m \geq n$ . 求证:

$$|\lambda I_m - AB| = \lambda^{m-n} |\lambda I_n - BA|.$$

特别地, 若  $A, B$  都是  $n$  阶矩阵, 则  $AB$  与  $BA$  有相同的特征多项式. ♥

 **笔记** 本质上就是打洞原理.

**证明** **证法一 (打洞原理):** 当  $\lambda \neq 0$  时, 考虑下列分块矩阵:

$$\begin{pmatrix} \lambda I_m & A \\ B & I_n \end{pmatrix},$$

因为  $\lambda I_m, I_n$  都是可逆矩阵, 故由行列式的降价公式可得

$$|I_n| \cdot |\lambda I_m - A(I_n)^{-1}B| = |\lambda I_m| \cdot |I_n - B(\lambda I_m)^{-1}A|,$$

即有

$$|\lambda I_m - AB| = \lambda^{m-n} |\lambda I_n - BA|$$

成立.

当  $\lambda = 0$  时, 若  $m > n$ , 则  $r(AB) \leq \min\{r(A), r(B)\} \leq \min\{m, n\} = n < m$ , 故  $|-AB| = 0$ , 结论成立; 若  $m = n$ , 则  $|-AB| = (-1)^n |A||B| = |-BA|$ , 结论也成立.

事实上,  $\lambda = 0$  的情形也可以用 Cauchy-Binet 公式来处理, 还可以通过摄动法由  $\lambda \neq 0$  的情形来得到.

**证法二 (相抵标准型):** 设  $A$  的秩等于  $r$ , 则存在  $m$  阶可逆矩阵  $P$  和  $n$  阶可逆矩阵  $Q$ , 使得

$$PAQ = \begin{pmatrix} I_r & O \\ O & O \end{pmatrix}.$$

令

$$Q^{-1}BP^{-1} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix},$$

其中  $B_{11}$  是  $r \times r$  矩阵, 则

$$PABP^{-1} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ O & O \end{pmatrix}, \quad Q^{-1}BAQ = \begin{pmatrix} B_{11} & O \\ B_{21} & O \end{pmatrix}.$$

因此

$$|\lambda I_m - AB| = \left| \begin{pmatrix} \lambda I_r - B_{11} & -B_{12} \\ O & \lambda I_{m-r} \end{pmatrix} \right| = \lambda^{m-r} |\lambda I_r - B_{11}|,$$

同理

$$|\lambda I_n - BA| = \left| \begin{pmatrix} \lambda I_r - B_{11} & O \\ -B_{21} & \lambda I_{n-r} \end{pmatrix} \right| = \lambda^{n-r} |\lambda I_r - B_{11}|.$$

比较上面两个式子即可得出结论。

**证法三 (摄动法):** 先证明  $m = n$  的情形. 若  $A$  可逆, 则  $BA = A^{-1}(AB)A$ , 即  $AB$  和  $BA$  相似, 因此它们的特征多项式相等. 对于一般的方阵  $A$ , 可取到一列有理数  $t_k \rightarrow 0$ , 使得  $t_k I_n + A$  是可逆矩阵. 由可逆情形的证明可得

$$|\lambda I_n - (t_k I_n + A)B| = |\lambda I_n - B(t_k I_n + A)|.$$

注意到上述两边的行列式都是  $t_k$  的多项式, 从而关于  $t_k$  连续. 上式两边同时取极限, 令  $t_k \rightarrow 0$ , 即有  $|\lambda I_n - AB| = |\lambda I_n - BA|$  成立.

再证明  $m > n$  的情形. 令

$$C = \begin{pmatrix} A & O \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} B \\ O \end{pmatrix},$$

其中  $C, D$  均为  $m \times m$  分块矩阵, 则

$$CD = AB, \quad DC = \begin{pmatrix} BA & O \\ O & O \end{pmatrix}.$$

因此由方阵的情形可得

$$|\lambda I_m - AB| = |\lambda I_m - CD| = |\lambda I_m - DC| = \lambda^{m-n} |\lambda I_n - BA|.$$

□

**例题 0.9** 设  $\alpha$  是  $n$  维实列向量且  $\alpha' \alpha = 1$ , 试求矩阵  $I_n - 2\alpha \alpha'$  的特征值.

**解** 设  $A = I_n - 2\alpha \alpha'$ , 则由特征值的降价公式可得

$$|\lambda I_n - A| = |(\lambda - 1)I_n + 2\alpha \alpha'| = (\lambda - 1)^{n-1} (\lambda - 1 + 2\alpha' \alpha) = (\lambda - 1)^{n-1} (\lambda + 1).$$

因此, 矩阵  $A$  的特征值为  $1(n-1)$  重,  $-1(1)$  重.

**例题 0.10** 设  $A$  为  $n$  阶方阵,  $\alpha, \beta$  为  $n$  维列向量, 试求矩阵  $A\alpha\beta'$  的特征值.

**解** 设  $B = A\alpha\beta'$ , 则由特征值的降价公式可得

$$|\lambda I_n - B| = |I_n - (A\alpha)\beta'| = \lambda^{n-1} (\lambda - \beta' A\alpha).$$

若  $\beta' A \alpha \neq 0$ , 则  $B$  的特征值为  $0$  ( $n-1$  重),  $\beta' A \alpha$  ( $1$  重); 若  $\beta' A \alpha = 0$ , 则  $B$  的特征值为  $0$  ( $n$  重).

**例题 0.11** 设  $a_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 都是实数, 且  $a_1 + a_2 + \cdots + a_n = 0$ , 试求下列矩阵的特征值:

$$A = \begin{pmatrix} a_1^2 & a_1 a_2 + 1 & \cdots & a_1 a_n + 1 \\ a_2 a_1 + 1 & a_2^2 & \cdots & a_2 a_n + 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n a_1 + 1 & a_n a_2 + 1 & \cdots & a_n^2 \end{pmatrix}.$$

**解** 矩阵  $A$  可以分解为  $A = -I_n + BC$ , 其中

$$B = \begin{pmatrix} a_1 & 1 \\ a_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ a_n & 1 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}.$$

由特征值的降价公式得

$$\begin{aligned} |\lambda I_n - A| &= |(\lambda + 1)I_n - BC| \\ &= (\lambda + 1)^{n-2} |(\lambda + 1)I_2 - CB|. \end{aligned}$$

注意到  $a_1 + a_2 + \cdots + a_n = 0$ , 故有

$$CB = \begin{pmatrix} a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_n^2 & 0 \\ 0 & n \end{pmatrix}.$$

因此  $A$  的特征值为  $-1$  ( $n-2$  重),  $n-1$ ,  $a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_n^2 - 1$ .

**例题 0.12** 设  $A, B, C$  分别是  $m \times m, n \times n, m \times n$  矩阵, 满足:  $AC = CB$ ,  $r(C) = r$ . 求证:  $A$  和  $B$  至少有  $r$  个相同的特征值.

**注** 不妨设  $C = \begin{pmatrix} I_r & O \\ O & O \end{pmatrix}$  的原因: 假设当  $C = \begin{pmatrix} I_r & O \\ O & O \end{pmatrix}$  时, 结论已经成立, 则对于一般的满足条件的矩阵  $C$ , 由条件我们有

$$r(C) = r, \quad AC = BC.$$

由  $r(C) = r$  可知, 存在可逆矩阵  $P, Q$ , 使得

$$PCQ = \begin{pmatrix} I_r & O \\ O & O \end{pmatrix}.$$

从而对  $AC = BC$  两边同时左乘  $P$ , 右乘  $Q$  得到

$$(PAP^{-1})(PCQ) = (PCQ)(Q^{-1}BQ).$$

于是由假设可知  $PAP^{-1}$  和  $Q^{-1}BQ$  都至少有  $r$  个相同的特征值. 又因为相似矩阵有相同的特征值, 所以  $A, B$  也至少有  $r$  个相同的特征值. 故不妨设成立.

**证明** 设  $P$  为  $m$  阶非异阵,  $Q$  为  $n$  阶非异阵, 使得

$$PCQ = \begin{pmatrix} I_r & O \\ O & O \end{pmatrix}.$$

注意到问题的条件和结论在相抵变换  $C \mapsto PCQ, A \mapsto PAP^{-1}, B \mapsto Q^{-1}BQ$  下保持不变, 故不妨从一开始就假设  $C = \begin{pmatrix} I_r & O \\ O & O \end{pmatrix}$  是相抵标准型. 设

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix}$$

为对应的分块, 则

$$AC = \begin{pmatrix} A_{11} & O \\ A_{21} & O \end{pmatrix}, \quad CB = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ O & O \end{pmatrix}.$$

由  $AC = CB$  可得  $A_{11} = B_{11}, A_{21} = 0, B_{12} = 0$ . 于是

$$|\lambda I_m - A| = |\lambda I_r - A_{11}| \cdot |\lambda I_{m-r} - A_{22}|,$$

$$|\lambda I_n - B| = |\lambda I_r - B_{11}| \cdot |\lambda I_{n-r} - B_{22}|.$$

从而  $A, B$  至少有  $r$  个相同的特征值 (即  $A_{11} = B_{11}$  的特征值). □

### 0.1.5 特征值与特征多项式系数的关系

**命题 0.11** (特征值与特征多项式系数的关系)

设  $n$  阶矩阵  $A$  的特征多项式为

$$f(\lambda) = \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \cdots + a_{n-1} \lambda + a_n.$$

求证:  $a_r$  等于  $(-1)^r$  乘以  $A$  的所有  $r$  阶主子式之和, 即

$$a_r = (-1)^r \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_r \leq n} A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_r \\ i_1 & i_2 & \cdots & i_r \end{pmatrix}, \quad 1 \leq r \leq n.$$

进一步, 若设  $A$  的特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ , 则

$$\sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_r \leq n} \lambda_{i_1} \lambda_{i_2} \cdots \lambda_{i_r} = \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_r \leq n} A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_r \\ i_1 & i_2 & \cdots & i_r \end{pmatrix}, \quad 1 \leq r \leq n.$$

**注** 上述结论中最常用的是  $r = 1$  和  $r = n$  的情形:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n = \operatorname{tr}(A), \quad \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n = |A|.$$

特别地,  $A$  是非异阵的充要条件是  $A$  的特征值全不为零. 因此, 特征值的计算是判断矩阵是否非异阵的重要依据.

**证明** 第一种结论是推论??.

由 Vieta 定理可得


$$\begin{aligned} \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_r \leq n} \lambda_{i_1} \lambda_{i_2} \cdots \lambda_{i_r} &= (-1)^r a_r = (-1)^r (-1)^r \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_r \leq n} A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_r \\ i_1 & i_2 & \cdots & i_r \end{pmatrix} \\ &= \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \cdots < i_r \leq n} A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_r \\ i_1 & i_2 & \cdots & i_r \end{pmatrix}, \quad 1 \leq r \leq n. \end{aligned}$$

因此第二种结论也成立. □

**例题 0.13** 设  $n$  阶方阵  $A$  满足

$$A^2 - A - 3I_n = O,$$

求证:  $A - 2I_n$  是非奇异阵.

 **笔记** 用特征值判断矩阵非异性.

**证明** 用反证法. 设  $A - 2I_n$  为奇异阵, 则 2 是  $A$  的特征值. 注意到  $A$  适合

$$f(x) = x^2 - x - 3,$$

但特征值 2 却不适合  $f(x)$ , 这与命题 0.7 矛盾. □

**例题 0.14** 设  $P$  是可逆矩阵,  $B = PAP^{-1} - P^{-1}AP$ , 求证:  $B$  的特征值之和为零.

**证明** 由特征值与特征多项式系数的关系可知, 只要证  $\operatorname{tr}(B) = 0$  即可. 由迹的线性和交换性即得

$$\operatorname{tr}(B) = \operatorname{tr}(PAP^{-1}) - \operatorname{tr}(P^{-1}AP) = \operatorname{tr}(A) - \operatorname{tr}(A) = 0.$$

□

**例题 0.15** 设  $n$  阶实方阵  $A$  的特征值全是实数, 且  $A$  的一阶主子式之和与二阶主子式之和都等于零. 求证:  $A$  是零矩阵.

**证明** 设  $A$  的特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , 由条件和特征值与特征多项式系数的关系可知

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 0,$$

$$\sum_{1 \leq i < j \leq n} \lambda_i \lambda_j = \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \dots + \lambda_{n-1} \lambda_n = 0.$$

则

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 = \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)^2 - 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} \lambda_i \lambda_j = 0.$$

由于  $\lambda_i$  都是实数, 故  $\lambda_i = 0$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 成立, 再由命题 0.8 可知  $A$  为零矩阵. □

**例题 0.16** 设  $n$  ( $n \geq 3$ ) 阶非异实方阵  $A$  的特征值都是实数, 且  $A$  的  $n-1$  阶主子式之和等于零. 证明: 存在  $A$  的一个  $n-2$  阶主子式, 其符号与  $|A|$  的符号相反.

**证明** 设  $A$  的特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , 由  $A$  非异可知它们都是非零实数. 再由条件和例 6.24 可知

$$\sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_{n-1} \leq n} \lambda_{i_1} \lambda_{i_2} \dots \lambda_{i_{n-1}} = 0. \quad (1)$$

将(1)式左边除以  $|A| = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n$  可得

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} = 0, \quad (2)$$

将(2)式左边平方, 并将平方项移到等式的右边可得

$$\sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{1}{\lambda_i \lambda_j} = -\frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \right)^2 < 0, \quad (3)$$

将(3)式两边同时乘以  $|A| = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n$  可得

$$\sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_{n-2} \leq n} \lambda_{i_1} \lambda_{i_2} \dots \lambda_{i_{n-2}} = -\frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i^2} \right) |A|. \quad (4)$$

由(4)式和特征值与特征多项式系数的关系可得

$$\sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_{n-2} \leq n} A \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \dots & i_{n-2} \\ i_1 & i_2 & \dots & i_{n-2} \end{pmatrix} = -\frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i^2} \right) |A|,$$

于是  $A$  的  $n-2$  阶主子式之和与  $|A|$  的符号相反, 从而至少存在  $A$  的一个  $n-2$  阶主子式, 其符号与  $|A|$  的符号相反. □

**结论** 设  $n$  阶方阵  $A$  的特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , 则对任意的正整数  $k$ ,  $A^k$  的特征值为  $\lambda_1^k, \lambda_2^k, \dots, \lambda_n^k$ , 于是特征值的  $k$  次幂和

$$s_k = \lambda_1^k + \lambda_2^k + \dots + \lambda_n^k = \text{tr}(A^k), \quad k \geq 1.$$

若已知  $n$  阶方阵  $A$  的迹  $\text{tr}(A^k)$  ( $1 \leq k \leq n$ ), 则由 Newton 公式可以计算出特征值的初等对称多项式

$$\sigma_r = \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_r \leq n} \lambda_{i_1} \lambda_{i_2} \dots \lambda_{i_r}, \quad 1 \leq r \leq n,$$

从而可以确定特征多项式的系数, 最后便可计算出  $A$  的所有特征值.

**例题 0.17** 设  $A$  是  $n$  阶对合矩阵, 即  $A^2 = I_n$ , 证明:  $n - \text{tr}(A)$  为偶数, 并且  $\text{tr}(A) = n$  的充要条件是  $A = I_n$ .

**证明** 由  $A^2 = I_n$  可知  $A$  的特征值也适合  $x^2 - 1$ , 从而只能是  $\pm 1$ . 设  $A$  的特征值为  $1$  ( $p$  重),  $-1$  ( $q$  重), 则  $p + q = n$ . 且  $\text{tr}(A) = p - q$ , 于是  $n - \text{tr}(A) = 2q$  为偶数. 若  $A = I_n$ , 则  $\text{tr}(A) = n$ . 反之, 若  $\text{tr}(A) = n$ , 则由上述讨论可知  $p = n$ ,

$q = 0$ , 从而  $-1$  不是  $A$  的特征值, 即  $A + I_n$  是非奇阵. 最后由  $A^2 = I_n$  可得

$$(A - I_n)(A + I_n) = O \Rightarrow A - I_n = O \Rightarrow A = I_n.$$

□

**例题 0.18** 设 4 阶方阵  $A$  满足:  $\text{tr}(A^k) = k$  ( $1 \leq k \leq 4$ ), 试求  $A$  的行列式.

**证明** 题目条件即为  $s_k = k$  ( $1 \leq k \leq 4$ ), 要求  $|A| = \sigma_4$ . 根据 Newton 公式 (白皮书这一部分还没看)

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

可依次算出  $\sigma_1 = 1, \sigma_2 = -\frac{1}{2}, \sigma_3 = \frac{1}{6}, \sigma_4 = \frac{1}{24}$ . 故  $|A| = \frac{1}{24}$ . 也可以直接利用例 5.64 (白皮书这一部分还没看) 来计算  $\sigma_4$ . □

#### 命题 0.12 (幂零矩阵关于迹的充要条件)

求证:  $n$  阶矩阵  $A$  是零矩阵的充要条件是  $\text{tr}(A^k) = 0$  ( $1 \leq k \leq n$ ).

◆

**证明** 设  $A$  的特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . 若  $A$  是零矩阵, 则  $A$  的特征值全为零, 从而  $\text{tr}(A^k) = s_k = 0$  ( $k \geq 1$ ). 若  $s_k = \text{tr}(A^k) = 0$  ( $1 \leq k \leq n$ ), 则由 Newton 公式 (白皮书这一部分还没看) 或直接利用例 5.64 (白皮书这一部分还没看) 可计算出  $\sigma_r = 0$  ( $1 \leq r \leq n$ ), 于是  $A$  的特征多项式为  $\lambda^n$ , 从而  $A$  的特征值全为零, 再由 **幂零矩阵关于特征值的充要条件** 可知  $A$  为零矩阵. □

#### 定义 0.9 (线性变换的迹)

线性变换的迹定义为它在任一组基下的表示矩阵的迹.

♣

**笔记** 因为矩阵的迹在相似变换下保持不变, 并且同一线性变换在不同基下的表示矩阵必相似, 所以同一线性变换在任意一组基下的表示矩阵的迹都相同, 故线性变换的迹是良定义的.

#### 命题 0.13

设  $\varphi$  为  $n$  维线性空间,  $\lambda_0$  为  $\varphi$  的一个特征值,  $V_0$  为特征值  $\lambda_0$  的特征子空间, 则存在  $V_0$  上的一组基, 使得  $\varphi$  在  $V_0$  上的限制  $\varphi|_{V_0}$  在这组基下的表示矩阵为  $\dim V_0$  阶的对角阵  $\text{diag}\{\lambda_0, \lambda_0, \dots, \lambda_0\}$ , 从而  $\text{tr}(\varphi|_{V_0}) = \lambda_0 \dim V_0$ . ◆

**注** 因为线性变换的特征子空间一定是不变子空间, 所以线性变换在其特征子空间上做限制后仍是线性变换, 因此线性变换在其特征子空间上的限制是良定义的.

**证明** 设  $x_1$  是  $\varphi$  属于  $\lambda_0$  的特征向量, 将其扩充成  $V_0$  的一组基  $\{x_1, x_2, \dots, x_r\}$ , 则  $r = \dim V_0$ . 注意到  $x_1, x_2, \dots, x_r$  也是  $\varphi|_{V_0}$  属于  $\lambda_0$  的特征向量, 从而

$$\varphi|_{V_0}(x_1, x_2, \dots, x_r) = (\lambda_0 x_1, \lambda_0 x_2, \dots, \lambda_0 x_r) = (x_1, x_2, \dots, x_r) \begin{pmatrix} \lambda_0 & & & \\ & \lambda_0 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_0 \end{pmatrix}.$$

故  $\varphi|_{V_0}$  在  $\{x_1, x_2, \dots, x_r\}$  下的表示矩阵为  $\dim V_0$  阶对角阵  $\text{diag}\{\lambda_0, \lambda_0, \dots, \lambda_0\}$ . □

#### 命题 0.14


设  $A, B, C$  是  $n$  阶矩阵, 其中  $C = AB - BA$ . 若它们满足条件  $AC = CA, BC = CB$ , 求证:  $C$  的特征值全为零. ◆

**注** 若将条件减弱为  $ABC = CAB, BAC = CBA$ , 则上述结论不再成立. 原因如下:

如将条件减弱为如题所述, 则结论不再成立, 可参考下面的反例:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

由计算可得  $C = AB - BA$ ,  $ABC = CAB$ ,  $CBA = BAC$ , 但  $C$  的特征值为 1 和 -1。

 **笔记** 从下述的证法一不难看出: 只需要  $AC = CA$  和  $BC = CB$  这两个条件中的一个就能证明本题的结论。

**证明 证法一:** 由  $AC = CA$  可知, 对任意的正整数  $k$ ,

$$C^k = C^{k-1}AB - C^{k-1}BA = A(C^{k-1}B) - (C^{k-1}B)A.$$

由迹的线性和交换性可得  $\text{tr}(C^k) = 0$  ( $k \geq 1$ ), 再由幂零矩阵关于迹的充要条件可知  $C$  为幂零矩阵, 从而  $C$  的特征值全为零。

**证法二:** 将  $A, B, C$  看成是  $n$  维复列向量空间  $V$  上的线性变换. 任取  $C$  的特征值  $\lambda_0$  及其特征子空间  $V_0$ , 由  $AC = CA$ ,  $BC = CB$  以及命题??可知,  $V_0$  是  $A$ -不变子空间, 也是  $B$ -不变子空间. 将等式  $C = AB - BA$  两边的线性变换同时限制在  $V_0$  上, 可得  $V_0$  上线性变换的等式  $C|_{V_0} = A|_{V_0}B|_{V_0} - B|_{V_0}A|_{V_0}$ . 两边同时取迹, 由迹的线性和交换性及命题 0.13 可知

$$\lambda_0 \dim V_0 = \text{tr}(C|_{V_0}) = \text{tr}(A|_{V_0}B|_{V_0}) - \text{tr}(B|_{V_0}A|_{V_0}) = 0,$$

从而  $\lambda_0 = 0$ , 结论得证. □

**注** 上述证法二中,  $A, B, C$  在不变子空间  $V_0$  上的限制只能理解成线性变换在不变子空间上的限制, 而不是矩阵在不变子空间上的限制。

### 推论 0.3

设  $A, B, C$  是  $n$  阶矩阵, 其中  $C = AB - BA$ . 若它们满足条件  $AC = CA$ ,  $BC = CB$ , 求证:  $A, B, C$  可同时上三角化.

**证明** 对阶数进行归纳. 由命题 0.14 证法二可知,  $C$  的特征值全为 0, 其特征子空间  $V_0$  满足

$$A|_{V_0}B|_{V_0} - B|_{V_0}A|_{V_0} = C|_{V_0} = 0,$$

即  $A|_{V_0}, B|_{V_0}$  乘法可交换. 由命题??可知  $A|_{V_0}, B|_{V_0}$  有公共的特征向量, 即存在  $0 \neq e_1 \in V_0$ , 使得

$$Ae_1 = A|_{V_0}(e_1) = \lambda_1 e_1, Be_1 = B|_{V_0}(e_1) = \mu_1 e_1, Ce_1 = 0.$$

余下的证明完全类似于命题??的证明, 请读者自行补充相关的细节. □

## 0.1.6 特征值的估计

### 定理 0.4 (第一圆盘定理)

设  $A = (a_{ij})$  是  $n$  阶矩阵, 则  $A$  的特征值在复平面的下列圆盘中:

$$|z - a_{ii}| \leq R_i, \quad 1 \leq i \leq n,$$

其中  $R_i = |a_{i1}| + \cdots + |a_{i,i-1}| + |a_{i,i+1}| + \cdots + |a_{in}|$ .

**注** 该定理又称为 Gerschgorin 圆盘第一定理, 即戈氏圆盘第一定理. 上述圆盘称为戈氏圆盘.

**证明** □

### 定理 0.5 (第二圆盘定理)

若  $n$  阶矩阵  $A$  的  $n$  个戈氏圆盘分成若干个连通区域, 其中某个连通区域恰含  $k$  个戈氏圆盘, 则有且仅有  $k$  个特征值落在该连通区域内 (若两个圆盘重合应计算重数, 若特征值为重根也要计算重数).

**证明** □

**例题 0.19** 如果圆盘定理中有一个连通分支由两个圆盘外切组成, 证明: 每个圆盘除去切点的区域不可能同时包含两个特征值.

**证明** 设  $A = (a_{ij})$  为  $n$  阶矩阵,  $D_i : |z - a_{ii}| \leq R_i (1 \leq i \leq n)$  是  $A$  的  $n$  个戈氏圆盘. 不妨设  $A$  的两个戈氏圆盘  $D_1, D_2$  外切并组成一个连通分支. 令

$$A(t) = \begin{pmatrix} a_{11} & ta_{12} & \cdots & ta_{1n} \\ ta_{21} & a_{22} & \cdots & ta_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ ta_{n1} & ta_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix},$$

由**第一圆盘定理**,  $A(t)$  的特征值落在下列圆盘中:

$$tD_i : |z - a_{ii}| \leq tR_i, \quad 1 \leq i \leq n.$$

由于当  $0 \leq t < 1$  时,  $A(t)$  的特征值是关于  $t$  的连续函数, 故  $A(t)$  的特征值  $\lambda_i(t)$  从  $D_i$  的圆心开始, 始终在圆盘  $tD_i (1 \leq i \leq n)$  中连续变动. 注意此时  $tD_1, tD_2$  不相交, 它们是两个连通分支, 于是特征值  $\lambda_i(t)$  落在  $tD_i (i = 1, 2)$  中. 最后当  $t = 1$  时,  $A$  的特征值  $\lambda_1 = \lambda_1(1)$  落在  $D_1$  中, 特征值  $\lambda_2 = \lambda_2(1)$  落在  $D_2$  中. 因此,  $\lambda_1, \lambda_2$  不可能同时落在  $D_1$  或  $D_2$  除去切点的区域中.  $\square$

**例题 0.20** 设  $A = (a_{ij})$  为  $n$  阶矩阵, 证明: 存在正数  $\delta$ , 使得对任意的  $s \in (0, \delta)$ , 下列矩阵均有  $n$  个不同的特征值:

$$A(s) = \begin{pmatrix} a_{11} + s & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} + s^2 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} + s^n \end{pmatrix}.$$

**证明** 先证当  $s$  充分大时,  $A(s)$  有  $n$  个不同的特征值. 由**第一圆盘定理**,  $A(s)$  的特征值落在下列戈氏圆盘中:

$$D_i : |z - a_{ii} - s^i| \leq R_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}|, \quad 1 \leq i \leq n.$$

取  $s$  充分大, 使得  $s^n \gg s^{n-1} \gg \cdots \gg s$ . 注意到  $R_i$  的值固定, 故  $D_i$  的圆心之间的距离大于半径  $R_i$ , 从而  $D_i$  互不相交, 各自构成了一个连通分支. 再由**第二圆盘定理**, 每个连通分支  $D_i$  中有且仅有一个特征值, 于是  $A(s)$  有  $n$  个不同的特征值.

设  $f_s(\lambda) = |\lambda I_n - A(s)|$  是  $A(s)$  的特征多项式, 则其判别式  $\Delta(f_s(\lambda))$  是关于  $s$  的多项式. 由前面的讨论可知, 当  $s$  充分大时,  $f_s(\lambda)$  无重根, 从而  $\Delta(f_s(\lambda)) \neq 0$ , 即  $\Delta(f_s(\lambda))$  是关于  $s$  的非零多项式. 若  $\Delta(f_s(\lambda))$  的所有复根都是零, 则任取一个正数  $\delta$ ; 若  $\Delta(f_s(\lambda))$  的复根不全为零, 则可取  $\delta$  为  $\Delta(f_s(\lambda))$  的非零复根的模长的最小值. 于是对任意的  $s \in (0, \delta)$ ,  $s$  都不是  $\Delta(f_s(\lambda))$  的根, 即  $\Delta(f_s(\lambda)) \neq 0$ , 从而  $f_s(\lambda)$  都无重根, 即  $A(s)$  都有  $n$  个不同的特征值.  $\square$