

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 φ 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 λ_0 是线性变换 φ 的一个**特征值**, 向量 x 称为 φ 关于特征值 λ_0 的**特征向量**.


 **笔记** 显然 φ 的关于特征值 λ_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 λ_0 是线性空间 V 上的线性变换 φ 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_{λ_0} 是 V 的子空间, 称为 φ 的属于特征值 λ_0 的**特征子空间**.

 **笔记** 显然 V_{λ_0} 是 φ 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 α , 使

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

式成立, 则称 λ_0 为矩阵 A 的一个**特征值**, α 为 A 关于特征值 λ_0 的**特征向量**.

定义 0.4 (矩阵的特征子空间)

设 λ_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_{λ_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 λ_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 φ 是线性空间 V 上的线性变换, φ 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 φ 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 λ_1 是 A 的一个特征值, 则存在非零列向量 α_1 , 使

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

将 α_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 φ 为 n 维线性空间 V 上的线性变换, 则 φ 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 φ 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 $|\lambda I_V - \varphi| = |\lambda I_n - A|$ 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

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

故 φ 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, φ 是 V 上的线性变换: $\varphi(X) = AX$, 其中 A 是一个 n 阶矩阵. 求证: φ 和 A 具有相同的特征值 (重数可能不同).

证明 设 λ_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 λ_0 也是 φ 的特征值.

反之, 设 λ_0 是 φ 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 λ_0 也是 A 的特征值. \square

例题 0.2 设 λ_1, λ_2 是矩阵 A 的两个不同的特征值, α_1, α_2 分别是 λ_1, λ_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 φ 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 φ -不变子空间.

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

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

- (2) 设 λ_0 是 φ 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 φ 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 φ 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 λ_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 λ_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 λ_i 的特征向量, 称为 x_i 的延拓.
- (2) 任取 A 的特征值 λ_0 , 并设 λ_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 λ_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 λ_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).

综上, 容易验证当 $a = b = 0$ 或 $ab \neq 0$ 时, A 有完全的特征向量系或有 n 个不同的特征值, 从而此时 A 可对角化. 若 A 可对角化也不难得到 $a = b = 0$ 或 $ab \neq 0$. 故 A 可对角化的充分必要条件是 $a = b = 0$ 或 $ab \neq 0$. □

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 $f(\lambda_1), f(\lambda_2), \dots, f(\lambda_n)$. □

例题 0.5 设 n 阶矩阵 A 的全体特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 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)

证明下列循环矩阵的特征值:

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

的特征值为

$$f(1), f(\omega_1), \dots, f(\omega_{n-1}),$$

其中

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

◆

证明 设 $J = \begin{pmatrix} O & I_{n-1} \\ 1 & O \end{pmatrix}$, $f(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_nx^{n-1}$, 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)

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

(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 λ_0 也必适合 $g(x)$, 即 $g(\lambda_0) = 0$.

证明 证法一: 设 α 是 A 关于特征值 λ_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 $g(\lambda_0) = 0$.

证法二: 设 A 的极小多项式为 $m(x)$, 则 $m(x) \mid g(x)$, 由极小多项式的性质 (5) 及整除的传递性可知 $(x - \lambda_0) \mid g(x)$, 故 $g(\lambda_0) = 0$. \square

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 λ_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 λ^n , 从而 $A^n = O$. \square

例题 0.6 设 V 是数域 \mathbb{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 η 定义为 $\eta(X) = PX'P$. 试求 η 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 η 的特征值也适合多项式 $x^2 - 1$, 从而特征值只能是 ± 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 η 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 η 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 η 的特征值为 1 $\frac{n(n+1)}{2}$ 重, -1 $\frac{n(n-1)}{2}$ 重. \square

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 $\{A, A^2, A^3, \cdots\} \subseteq S$, 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 $\lambda_1, \cdots, \lambda_n$, 则 $I_n - A$ 的特征值为 $1 - \lambda_1, \cdots, 1 - \lambda_n$. 由假设 $|1 - \lambda_i| < 1$, 若 λ_i 是实数, 则

$0 < \lambda_i < 2$; 若 λ_i 是虚数, 则 $\overline{\lambda_i}$ 也是 A 的特征值, 此时 $1 - \overline{\lambda_i}$ 也是 $I_n - A$ 的特征值. 从而 $|1 - \lambda_i| < 1, |1 - \overline{\lambda_i}| < 1$, 于是

$$|1 - \lambda_i^2| = |(1 - \lambda_i)(1 - \overline{\lambda_i})| = |1 - \lambda_i||1 - \overline{\lambda_i}| < 1.$$

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

综上, 无论 λ_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 $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}, \dots, \lambda_n^{-1}$. \square

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

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

\square

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 α 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. 进一步, 容易验证 A 有完全的特征向量系 ($|\lambda I_n - A|$ 为零, 但其 $n-1$ 阶子式不为零), 于是 A 可对角化. □

例题 0.10 设 A 为 n 阶方阵, α, β 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. 进一步, 容易验证此时 B 有完全的特征向量系, 从而可对角化. 若 $\beta' A\alpha = 0$, 则 B 的特征值为 $0(n)$ 重.

综上, 容易验证 $B = A\alpha\beta'$ 可对角化的充要条件是 $\beta' A\alpha \neq 0$ 或 $A\alpha\beta' = O$. □

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, $n-1, a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_n^2 - 1$. 进一步, 若 a_i 全部为零, 则特征值 -1 和 $n-1$ 都有完全的特征向量系. 若 $\sum_{i=1}^n a_i^2 = n$, 利用秩的降价公式可得特征值 -1 和 $n-1$ 都有完全的特征向量系. 在剩余情况, 利用秩的降价公式可得 3 个特征值都有完全的特征向量系. 因此, A 可对角化. 事实上, 即使去掉 $a_1 + a_2 + \cdots + a_n = 0$ 的条件, 也可以计算出 A 的全体特征值的代数重数和几何重数, 从而得到 A 可对角化. 这一结论的深层次背景是:

A 是实对称矩阵, 从而可正交对角化. □

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 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 则

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

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


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

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

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \lambda_i &= \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n = 0, \\ \sum_{1 \leq i < j \leq n} \lambda_i \lambda_j &= \lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_3 + \cdots + \lambda_{n-1} \lambda_n = 0. \end{aligned}$$

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 λ_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

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

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

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

由(4)式和特征值与特征多项式系数的关系可得

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

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. \square

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

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

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

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

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 阶对称矩阵, 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 ± 1 . 设 A 的特征值为 $1(p \text{ 重}), -1(q \text{ 重})$, 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

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

\square

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 σ_4 . \square

命题 0.12 (幂零矩阵关于迹的充要条件)

求证: n 阶矩阵 A 是幂零矩阵的充要条件是 $\text{tr}(A^k) = 0$ ($1 \leq k \leq n$).

\blacktriangle

证明 设 A 的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$.

必要性: 若 A 是幂零矩阵, 则 A 的特征值全为零, 从而 $\text{tr}(A^k) = s_k = 0$ ($k \geq 1$).

充分性: **证法一:** 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 λ^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.

证法二: 若 $\text{tr}(A^k) = 0$ ($1 \leq k \leq n$), 则

(i) 若 $\lambda_i (1 \leq i \leq n)$ 全为零, 则结论显然成立.

(ii) 若 $\lambda_i (1 \leq i \leq n)$ 不全为零, 则不妨设 $\lambda_1, \dots, \lambda_k \neq 0, \lambda_{k+1} = \dots = \lambda_n = 0$. 再不妨设

$$x_1 = \lambda_1 = \dots = \lambda_{i_1},$$

$$x_2 = \lambda_{i_1+1} = \dots = \lambda_{i_2},$$

.....

$$x_{s+1} = \lambda_{i_s+1} = \dots = \lambda_k,$$


其中 $1 \leq i_1, \dots, i_s \leq k$, 并且 x_1, x_2, \dots, x_{s+1} 两两互异. 再由 $\text{tr}(A^k) = 0 (1 \leq k \leq n)$ 可得

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k = 0 \\ \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_k^2 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \lambda_1^n + \lambda_2^n + \dots + \lambda_k^n = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_{s+1} x_{s+1} = 0 \\ c_1 x_1^2 + c_2 x_2^2 + \dots + c_{s+1} x_{s+1}^2 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ c_1 x_1^n + c_2 x_2^n + \dots + c_{s+1} x_{s+1}^n = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

其中 $c_1 = i_1, c_k = i_k - i_{k-1} (k = 2, 3, \dots, s), c_{s+1} = k - i_s$. 显然 $(c_1, c_2, \dots, c_{s+1})'$ 非零. 注意到方程组(5)的系数矩阵行列式为 Vandermonde 行列式非零, 故方程组(5)只有零解, 这与 $(c_1, c_2, \dots, c_{s+1})'$ 非零矛盾! \square

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 φ 为 n 维线性空间, λ_0 为 φ 的一个特征值, V_0 为特征值 λ_0 的特征子空间, 则存在 V_0 上的一组基, 使得 φ 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 φ 属于 λ_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 λ_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 $\text{diag}\{\lambda_0, \lambda_0, \dots, \lambda_0\}$. \square

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 λ_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.

证法三: 注意到问题的条件和结论在同时相似变换: $A \mapsto P^{-1}AP, B \mapsto P^{-1}BP, C \mapsto P^{-1}CP$ 下不改变, 故不妨从一开始就假设 C 为 Jordan 标准型. 设 $C = \text{diag}\{J_1, J_2, \dots, J_k\}$, 其中 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ 是 C 的全体不同特征值, J_i 是属于特征值 λ_i 的所有 Jordan 块拼成的根子空间分块. 由于 J_i 的特征值为 λ_i , 它们互不相同, 又 $AC = CA, BC = CB$, 故由例题??可知, $A = \text{diag}\{A_1, A_2, \dots, A_k\}, B = \text{diag}\{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ 和 C 一样也是分块对角矩阵. 于是我们有 $J_i = A_i B_i - B_i A_i$, 两边同取迹可得

$$n_i \lambda_i = \text{tr}(J_i) = \text{tr}(A_i B_i - B_i A_i) = \text{tr}(A_i B_i) - \text{tr}(B_i A_i) = 0,$$

从而 $k = 1$ 且 C 的特征值全为零. □

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

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:

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

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, λ_1, λ_2 不可能同时落在 D_1 或 D_2 除去切点的区域中. □

命题 0.15 (不可对角化矩阵的摄动)

- (1) 设 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 是 n 阶复方阵, 证明: 存在一个关于所有矩阵元 a_{ij} 的 n^2 元多项式 $f(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n)$, 使得只要 A 不可对角化, 就有 $f(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n) = 0$.
- (2) 设 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 是 n 阶复方阵, 证明: 存在 n^2 个多项式 $p_{ij}(t)$ 以及 $\delta > 0$, 满足 $p_{ij}(0) = 0$ 并且对任意 $t \in (0, \delta)$, 矩阵 $A(t) = A + (p_{ij}(t))_{n \times n}$ 都可对角化.
- (3) 设 $A = (a_{ij})$ 为 n 阶复方阵, 证明: 存在正数 δ , 使得对任意的 $s \in (0, \delta)$, 下列矩阵 $A(s)$ 均有 n 个不同的特征值, 进而 $A(s)$ 可对角化.

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



注 (1) 说明: 可对角化的矩阵远远多于不可对角化的. 因为形式上从 f 里面可以反解一个 a_{ij} 出来, 也即只要一个 A 不可对角化, 就一定满足 $a_{nn} =$ 某个关于其余 $n^2 - 1$ 元的函数, 显然让两个东西相等是没那么容易的 (因为随便取, 一般都不等), 所以不可对角化的矩阵很少且完全包含在一个曲面当中.

(2)(3) 则是给出了摄动的方法 (不唯一), 实现: 用可对角化的矩阵逼近任意一个矩阵.

证明

- (1) 若 A 不可对角化, 则 A 的极小多项式 $m(x)$ 有重根, 于是 A 的特征多项式 $f(x) = |xI - A|$ 有重根, 从而等价于 $f(x)$ 的判别式 $\Delta = 0$. 注意到

$$f(x) = |xI - A| = x^n - \text{tr}(A)x^{n-1} + \cdots + (-1)^n |A| = x^n + p_1(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n)x^{n-1} + \cdots + p_n(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n).$$

其中 p_k 都是 n^2 元多项式. 设 x_1, \cdots, x_n 是 $f(x) = 0$ 的根, 则根据 Vieta 定理可知, $f(x)$ 的判别式 $\Delta = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_i - x_j)^2$ 是一个关于 $p_1(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n), \cdots, p_n(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n)$ 的多项式, 记为 $F(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n)$.

从而此时 $F(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n) = 0$. 故 $F(a_{ij}, 1 \leq i, j \leq n)$ 就为所求多项式.

(2) 因为任何复矩阵都可上三角化, 所以存在可逆阵 G , 使得

$$A = G \begin{pmatrix} \lambda_1 & & * \\ & \ddots & \\ & & \lambda_s \end{pmatrix} G^{-1},$$

其中 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为 A 的特征值. 令 $P(t) = G \begin{pmatrix} c_1 t & & \\ & \ddots & \\ & & c_n t \end{pmatrix} G^{-1}$, 其中 c_i 是互不相同的常数, 则 $P(0) = 0$.

从而

$$A(t) = A + P(t) = G \begin{pmatrix} \lambda_1 + c_1 t & & * \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n + c_n t \end{pmatrix} G^{-1}.$$

显然 $A(t)$ 的特征值分别为 $\lambda_1 + c_1 t, \dots, \lambda_n + c_n t$. 再设 A 有 $s (\leq n)$ 个互不相同的特征值, 分别记为 $\lambda'_1, \dots, \lambda'_s$,

则 $\lambda_i \in \{\lambda'_1, \dots, \lambda'_s\}, i = 1, 2, \dots, n$. 取 $\delta = \frac{1}{2} \min_{1 \leq i, j \leq s} \left\{ \left| \frac{\lambda'_i - \lambda'_j}{c_i - c_j} \right| \right\}$, 则对 $\forall t \in (0, \delta)$, 都有

$$\lambda_i + c_i t \neq \lambda_j + c_j t, \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \text{ 且 } i \neq j.$$

若 $\lambda_i + c_i t = \lambda_j + c_j t$, 则此时 $t = \frac{\lambda_j - \lambda_i}{c_i - c_j} > \delta$ 矛盾! 故 $P(t)$ 为所求矩阵.

(3) 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 $s^n \gg s^{n-1} \gg \dots \gg s$. 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 δ ; 若 $\Delta(f_s(\lambda))$ 的复根不全为零, 则可取 δ 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.

□

例题 0.20 设 $f: M_n(\mathbb{C}) \rightarrow M_n(\mathbb{C})$ 是线性映射, 满足 A 可逆当且仅当 $f(A)$ 可逆, 证明: 存在常数 c 使得 $|f(A)| = c|A|$ 对任意 A 恒成立.

证明 由条件可知, $|A| = 0$ 当且仅当 $|f(A)| = 0$. 于是对 $\forall A \in M_n(\mathbb{C}), \forall \lambda \in \mathbb{C}$, 都有

$$|\lambda I - A| = 0 \iff |\lambda f(I) - f(A)| = |\lambda f(I) - f(A)| = 0. \quad (6)$$

任取 $A \in M_n(\mathbb{C})$, 设 A 的特征值分别为 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, 则当 A 有 n 个不同特征值时, 即 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 互不相同, 则

$$|\lambda I - A| = (\lambda - \lambda_1) \cdots (\lambda - \lambda_n).$$

从而由 (6) 式可知

$$|\lambda f(I) - f(A)| = |\lambda f(I) - f(A)| = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

又因为 $\deg |\lambda f(I) - f(A)| \leq n$, 所以存在 $c_A \neq 0$, 使得

$$|\lambda f(I) - f(A)| = |\lambda f(I) - f(A)| = c_A (\lambda - \lambda_1) \cdots (\lambda - \lambda_n) = c_A |\lambda I - A|, \quad \forall \lambda \in \mathbb{C}. \quad (7)$$

显然此时 $|\lambda f(I) - f(A)|$ 是 n 次多项式, 于是 $f(I)$ 可逆. 否则, $f(I)$ 一定有零特征值, 从而由矩阵的相抵标准型可知,

存在可逆阵 G , 使得

$$f(I) = GBG^{-1}, \quad \text{其中} \quad B = \begin{pmatrix} 0 & & * \\ & \ddots & \\ & & b \end{pmatrix}.$$

于是

$$|\lambda f(I) - f(A)| = |G(\lambda f(I) - f(A))G^{-1}| = |\lambda B - Gf(A)G^{-1}| = \begin{vmatrix} b_1 & & * \\ & \ddots & \\ & & \lambda - b_n \end{vmatrix}.$$

故 $\deg |\lambda f(I) - f(A)| < n$, 这与 $|\lambda f(I) - f(A)|$ 是 n 次多项式矛盾! 从而

$$|\lambda f(I) - f(A)| = |f(I)||\lambda I - f(I)^{-1}f(A)| = c_A |\lambda I - A|, \quad \forall \lambda \in \mathbb{C}.$$

比较上式等式两边多项式 (关于 λ) 的最高次项的系数即得 $c_A = |f(I)|$, 因此 c_A 与 A 无关. 再结合 (7) 式可得

$$|f(\lambda I - A)| = |\lambda f(I) - f(A)| = |f(I)||\lambda I - A|, \quad \forall \lambda \in \mathbb{C}.$$

令 $\lambda = 0$, 则有 $|f(A)| = |f(I)||A|$.

综上, 对任何 $A \in M_n(\mathbb{C})$ 且 A 具有 n 个不同特征值的矩阵, 都有 $|f(A)| = |f(I)||A|$.

对一般的矩阵 A_0 , 令

$$A(s) = A_0 + D_s, \quad \text{其中} \quad D_s = \begin{pmatrix} s & & \\ & \ddots & \\ & & s^n \end{pmatrix},$$

则由命题 0.15(3) 可知, 存在 $\delta \in (0, 1)$, 使得对 $\forall s \in (0, \delta)$, 都有 $A(s)$ 可对角化, 从而此时 $A(s)$ 由 n 个不同的特征值. 于是由上述讨论可知

$$|f(A(s))| = |f(I)||A(s)| \iff |f(A_0 + D_s)| = |f(I)||A_0 + D_s| \iff |f(A_0)| + |f(D_s)| = |f(I)||A_0 + D_s|. \quad (8)$$

注意到此时 $s < 1$, 并且 D_s 的特征值为 s, \dots, s^n 互不相同. 故由上述讨论可得

$$|f(D_s)| = |D_s|. \quad (9)$$

于是结合 (8) (9) 式可得

$$|f(A_0)| + |D_s| = |f(I)||A_0 + D_s|, \quad \forall s \in (0, \delta).$$

由于上式两边都是关于 s 的多项式, 令 $s \rightarrow 0$, 可得

$$|f(A_0)| = |f(I)||A_0|.$$

故结论得证. \square

例题 0.21 设矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 满足所有元素均非负且 $\sum_{i,j=1}^n a_{ij} = 1$, 证明: $|\det A| \leq 1$ 且如果取等, 则所有特征值的模长均为 1.

证明 设 A 的特征值分别为 $\lambda_1, \dots, \lambda_n, D_i: |z - a_{ii}| \leq \sum_{j \neq i} a_{ij} (1 \leq i \leq n)$ 是 A 的 n 个戈氏圆盘. 由第一圆盘定理可知

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 都落在 $\bigcup_{i=1}^n D_i$ 中. 对 $\forall \lambda \in \bigcup_{i=1}^n D_i$, 都存在 $k \in \{1, 2, \dots, n\}$, 使得 $\lambda \in D_k$, 从而

$$|\lambda| \leq |\lambda - a_{kk}| + a_{kk} \leq \sum_{j \neq k} a_{kj} + a_{kk} \leq 1.$$

因此 $|\lambda_1|, \dots, |\lambda_n| \leq 1$, 故 $\det A \leq |\lambda_1 \cdots \lambda_n| \leq 1$, 当且仅当 A 的所有特征值模长为 1 等号成立. \square