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

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

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 $a_1 = -(a_{11}+a_{22}+\cdots+a_{nn}) = -\operatorname{tr}(A)$,$a_n = (-1)^n|A|$. 因此矩阵 A 的 n 个特征值的和与积分别为

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

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

□

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)

任何复方阵必复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 $\{e_1, e_2, \cdots, e_n\}$, 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, $(\lambda_0 I_n - A)x = 0$ 一定有非零解 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$, 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 $\alpha_0 = (e_1, e_2, \cdots, e_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$, 则
$$\begin{aligned}
\varphi(\alpha_0) &= \varphi(e_1, e_2, \cdots, e_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = (e_1, e_2, \cdots, e_n) A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \\
&= (e_1, e_2, \cdots, e_n) \cdot \lambda_0 I_n \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \lambda_0 (e_1, e_2, \cdots, e_n) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \lambda_0 \alpha_0.
\end{aligned}$$
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 $\alpha_0 \in \mathbb{C}^n$.

□

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 $X = (x_0, 0, \ldots, 0)$, 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 $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ 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.

□

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.

□

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:

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

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 $A = \mathrm{diag}(A_1, A_2, \cdots, A_m)$, 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 $V_0 = V_{1,0} + V_{2,0} + \cdots + V_{m,0}$. 注意到 $V_{i,0} \subseteq V_i$, 故

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

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 $A = \mathrm{diag}\{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$ 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 $A = \mathrm{diag}\{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$, 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 $(1 \leqslant j \leqslant m, j \neq i_1, \cdots, i_r)$ 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 $A_{i_k}(1 \leqslant k \leqslant r)$ 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 $\omega_i (1\leqslant i\leqslant n)$, 则

$$|\lambda I_n-A|=\frac{a(\lambda+b)^n-b(\lambda+a)^n}{a-b}=0 \Rightarrow \left(\frac{\lambda+b}{\lambda+a}\right)^n=\frac{b}{a}$$
$$\Rightarrow \frac{\lambda+b}{\lambda+a}=w_i\,(1\le i\le n) \Rightarrow \lambda=\frac{a\omega_i-b}{1-\omega_i}(1\le i\le n).$$

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

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,$f(x)=a_mx^m+a_{m-1}x^{m-1}+\cdots+a_1x+a_0$ 是一个多项式, 记

$$f(A)=a_mA^m+a_{m-1}A^{m-1}+\cdots+a_1A+a_0I_n.$$

♣

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

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

□

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

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

其中

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

♠

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

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

$$= \lambda^n + (-1)^{n+2}(-1)^{n-1} = \lambda^n - 1,$$

于是 J 的特征值为

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

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

□

定义 0.8 (友矩阵)

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

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)

$$|xE - \boldsymbol{A}| = \begin{vmatrix} x & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_0 \\ -1 & x & 0 & \cdots & 0 & a_1 \\ 0 & -1 & x & \cdots & 0 & a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & x & a_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & x + a_{n-1} \end{vmatrix} \xlongequal[i=n,n-1,\cdots,2]{xr_i + r_{i-1}} \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a_0 \\ -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x^{n-1} + a_{n-1}x^{n-2} + \cdots + a_2x + a_1 \\ 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 & x^{n-2} + a_{n-1}x^{n-3} + \cdots + a_3x + a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & x^2 + a_{n-1}x + a_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & x + a_{n-1} \end{vmatrix}$$

$$\xlongequal{\text{按第一行展开}} \left(x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a\right)(-1)^{n+1} \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{vmatrix}$$

$$= \left(x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a\right)(-1)^{n+1}(-1)^{n-1}$$

$$= x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1x + a = f(x).$$

(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 $g(\lambda_0)=0$.

□

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 $A^n=O$.

□

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 $(PX_0)'=\pm PX_0$, 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 $X_0=PE_{ii}\ (1\leqslant i\leqslant n), P(E_{ij}+E_{ji})\ (1\leqslant i<j\leqslant n)$.

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 $X_0=P(E_{ij}-E_{ji})\ (1\leqslant i<j\leqslant n)$. 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 $\dfrac{n(n+1)}{2}$ 重, -1 $\dfrac{n(n-1)}{2}$ 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 $\overline{\overline{S}}=2^nn!$, 即 S 是一个有限集合. 注意到矩阵 $M\in S$ 当且仅当 $M=P_1P_2\cdots P_r$, 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 $A^k\in S\ (k\geqslant 1)$, 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 $|A|=\pm1$, 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.

□

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 $0 < |A| < 2^n$.

□

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 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$, 则 A^{-1} 的全部特征值为 $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}, \cdots, \lambda_n^{-1}$.

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 $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}, \cdots, \lambda_n^{-1}$.

□

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 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$, 求证:$A^*$ 的全体特征值为

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

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

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

因此 A^* 的全部特征值为

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

□

命题 0.11 (实对称 (反称) 阵的特征值)

1. 设 A 为 n 阶实对称矩阵, 则 A 的特征值都是实数.
2. 设 A 为 n 阶实反称矩阵, 则 A 的特征值都是 0 或纯虚数.

证明

1. 设 λ 为 A 的特征值,α 为对应的特征向量, 则

$$A\alpha = \lambda\alpha \Longrightarrow \alpha^T A\alpha = \lambda\alpha^T\alpha \Longrightarrow \lambda = \frac{\alpha^T A\alpha}{\alpha^T\alpha}$$

两边同时取共轭转置得

$$\overline{\lambda} = \frac{\left(\overline{\alpha^T A\alpha}\right)^T}{\left(\overline{\alpha^T\alpha}\right)^T} = \frac{\alpha^T A\alpha}{\alpha^T\alpha} = \lambda.$$

故 λ 为实数.

2. 设 λ 为 A 的特征值,α 为对应的特征向量, 则

$$A\alpha = \lambda\alpha \Longrightarrow \alpha^T A\alpha = \lambda\alpha^T\alpha \Longrightarrow \lambda = \frac{\alpha^T A\alpha}{\alpha^T\alpha}$$

两边同时取共轭转置得

$$\overline{\lambda} = \frac{\left(\overline{\alpha^T A\alpha}\right)^T}{\left(\overline{\alpha^T\alpha}\right)^T} = -\frac{\alpha^T A\alpha}{\alpha^T\alpha} = -\lambda.$$

故 λ 为 0 或纯虚数.

□

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 $m\geqslant n$. 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, 故由行列式的降阶公式可得

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

即有

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

成立.

当 $\lambda = 0$ 时, 若 $m>n$, 则 $r(AB)\leqslant \min\{r(A), r(B)\}\leqslant \min\{m,n\} = n < m$, 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 $t_k \to 0$, 使得 $t_kI_n + A$ 是可逆矩阵. 由可逆情形的证明可得

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

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 $t_k \to 0$, 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 ($|-I_n - A|$ 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 $B = \boldsymbol{A\alpha\beta'}$ 可对角化的充要条件是 $\boldsymbol{\beta' A\alpha} \neq 0$ 或 $\boldsymbol{A\alpha\beta'} = \boldsymbol{O}$.

□

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

$$A = \begin{pmatrix} a_1^2 & a_1a_2+1 & \cdots & a_1a_n+1 \\ a_2a_1+1 & a_2^2 & \cdots & a_2a_n+1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_na_1+1 & a_na_2+1 & \cdots & a_n^2 \end{pmatrix}.$$

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 $\sum\limits_{i=1}^{n} a_i^2 = n$, 利用秩的降阶公式可得特征值 -1 和 $n-1$ 都有完全的特征向量系. 在剩余情况, 利用秩的降阶公式可得 3 个特征值都有完全的特征向量系. 因此, $\boldsymbol{A}$ 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 $\boldsymbol{A}$ 的全体特征值的代数重数和几何重数, 从而得到 $\boldsymbol{A}$ 可对角化. 这一结论的深层次背景是: $\boldsymbol{A}$ 是实对称矩阵, 从而可正交对角化.

□

命题 0.12

设 A, B, C 分别是 $m \times m, n \times n, m \times n$ 矩阵, 满足: $AC = CB$, $\mathrm{r}(C) = r$. 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 0.13 (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

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

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

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

♠

注 上述结论中最常用的是 $r = 1$ 和 $r = n$ 的情形:

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

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

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

因此第二种结论也成立.

□

例题 0.12 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 0.13 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 $\mathrm{tr}(B)=0$ 即可. 由迹的线性和交换性即得

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

□

例题 0.14 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 是幂零矩阵.

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

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

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

则

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

由于 λ_i 都是实数, 故 $\lambda_i=0\ (1\leqslant i\leqslant n)$ 成立, 再由命题 0.8可知 A 为幂零矩阵.

□

例题 0.15 设 $n(n\geqslant 3)$ 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 $\lambda_1,\lambda_2,\ldots,\lambda_n$, 由 A 非异可知它们都是非零实数. 再由条件和例 6.24 可知

$$\sum_{1\leqslant i_1<i_2<\cdots<i_{n-1}\leqslant n}\lambda_{i_1}\lambda_{i_2}\cdots\lambda_{i_{n-1}}=0. \tag{1}$$

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

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\lambda_i}=0, \tag{2}$$

将(2) 式左边平方, 并将平方项移到等式的右边可得

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

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

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

由 (4)式和特征值与特征多项式系数的关系可得

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

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 $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_n$, 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

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

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

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

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 0.16 设 A 是 n 阶对合矩阵, 即 $A^2=I_n$, 证明: $n-\operatorname{tr}(A)$ 为偶数, 并且 $\operatorname{tr}(A)=n$ 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 $1(p$ 重$)$, $-1(q$ 重$)$, 则 $p+q=n$. 且 $\operatorname{tr}(A)=p-q$, 于是 $n-\operatorname{tr}(A)=2q$ 为偶数. 若 $A=I_n$, 则 $\operatorname{tr}(A)=n$. 反之, 若 $\operatorname{tr}(A)=n$, 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 0.17 设 4 阶方阵 A 满足: $\operatorname{tr}(A^k)=k\ (1\leqslant k\leqslant 4)$, 试求 A 的行列式.

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

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

可依次算出 $\sigma_1=1,\sigma_2=-\dfrac{1}{2},\sigma_3=\dfrac{1}{6},\sigma_4=\dfrac{1}{24}$. 故 $|A|=\dfrac{1}{24}$. 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.

□

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 0.14

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 $\operatorname{diag}\{\lambda_0,\lambda_0,\cdots,\lambda_0\}$, 从而 $\operatorname{tr}\left(\varphi|_{V_0}\right)=\lambda_0\dim V_0$.

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 $\{x_1,x_2,\cdots,x_r\}$, 则 $r=\dim V_0$. 注意到 $x_1,x_2,\cdots,x_r$ 也是 $\varphi|_{V_0}$ 属于 λ_0 的特征向量, 从而

$$\varphi|_{V_0}(x_1,x_2,\cdots,x_r)=(\lambda_0x_1,\lambda_0x_2,\cdots,\lambda_0x_r)=(x_1,x_2,\cdots,x_r)\begin{pmatrix}\lambda_0&&&\\&\lambda_0&&\\&&\ddots&\\&&&\lambda_0\end{pmatrix}.$$

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

□

命题 0.15

设 A,B,C 是 n 阶矩阵, 其中 $C=AB-BA$. 若它们满足条件 $AC=CA$ 或 $BC=CB$, 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.

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 $\mathrm{tr}(C^k)=0\ (k\geqslant 1)$, 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 0.14可知

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

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 $C=\mathrm{diag}\{J_1,J_2,\cdots,J_k\}$, 其中 $\lambda_1,\lambda_2\cdots,\lambda_k$ 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,$A=\mathrm{diag}\{A_1,A_2,\cdots,A_k\}$, $B=\mathrm{diag}\{B_1,B_2,\cdots,B_k\}$ 和 C 一样也是分块对角矩阵. 于是我们有 $J_i=A_iB_i-B_iA_i$, 两边同取迹可得

$$n_i\lambda_i=\mathrm{tr}(J_i)=\mathrm{tr}(A_iB_i-B_iA_i)=\mathrm{tr}(A_iB_i)-\mathrm{tr}(B_iA_i)=0,$$

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 $AC=CA$, 或 $BC=CB$, 求证: A,B,C 可同时上三角化.

证明 对阶数进行归纳. 由命题 0.15 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

$$Ae_1=A|_{V_0}(e_1)=\lambda_1e_1,\ Be_1=B|_{V_0}(e_1)=\mu_1e_1,\ Ce_1=0.$$

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.

□

例题 0.18 设 A,B 是 n 阶方阵, 满足 $A^2B+BA^2=2ABA$, 证明:$AB-BA$ 是幂零矩阵.

证明 记 $C = AB - BA$, 则显然 $\operatorname{tr}(C) = 0$. 由条件可知

$$A^2B + BA^2 = 2ABA \iff A^2B - ABA = ABA - BA^2 \iff A(AB - BA) = (AB - BA)A \iff AC = CA.$$

从而由上式及矩阵迹的交换性可得, 对 $\forall k \in [1, n] \cap \mathbb{N}$, 都有

$$\operatorname{tr}(C^k) = \operatorname{tr}(C^{k-1}(AB - BA)) = \operatorname{tr}(C^{k-1}AB) - \operatorname{tr}(C^{k-1}BA) = \operatorname{tr}(AC^{k-1}B) - \operatorname{tr}(AC^{k-1}B) = 0.$$

故由命题**??**可知 $C = AB - BA$ 是幂零矩阵.

□

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:

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

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, $D_i : |z - a_{ii}| \leqslant R_i (1 \leqslant i \leqslant n)$ 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:

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

由于当 $0 \leqslant t < 1$ 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 $tD_i (1 \leqslant i \leqslant n)$ 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 0.16 (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 $f(a_{ij}, 1 \leqslant i, j \leqslant n)$, 使得只要 A 不可对角化, 就有 $f(a_{ij}, 1 \leqslant i, j \leqslant n) = 0$.

(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

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

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 $\Delta=\prod\limits_{1\le i<j\le n}(x_i-x_j)^2$ 是一个关于 $p_1(a_{ij},1\le i,j\le n),\cdots,p_n(a_{ij},1\le i,j\le n)$ 的多项式, 记为 $F(a_{ij},1\le i,j\le n)$. 从而此时 $F(a_{ij},1\le i,j\le n)=0$. 故 $F(a_{ij},1\le i,j\le n)$ 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 $\lambda_1,\cdots,\lambda_n$ 为 A 的特征值. 令 $P(t)=G\begin{pmatrix} c_1t & & \\ & \ddots & \\ & & c_nt \end{pmatrix}G^{-1}$, 其中 c_i 是互不相同的常数, 则 $P(0)=0$.

从而

$$A(t)=A+P(t)=G\begin{pmatrix} \lambda_1+c_1t & & * \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n+c_nt \end{pmatrix}G^{-1}.$$

显然 $A(t)$ 的特征值分别为 $\lambda_1+c_1t,\cdots,\lambda_n+c_st$. 再设 A 有 $s(\leqslant n)$ 个互不相同的特征值, 分别记为 $\lambda_1',\cdots,\lambda_s'$, 则 $\lambda_i\in\{\lambda_1',\cdots,\lambda_s'\},i=1,2,\cdots,n$. 取 $\delta=\dfrac{1}{2}\min\limits_{1\le i,j\le s}\left\{\left|\dfrac{\lambda_j'-\lambda_i'}{c_i-c_j}\right|\right\}$, 则对 $\forall t\in(0,\delta)$, 都有

$$\lambda_i+c_it\ne\lambda_j+c_jt,\quad \forall i,j\in\{1,2,\cdots,n\}\text{且}i\ne j.$$

若 $\lambda_i+c_it=\lambda_j+c_jt$, 则此时 $t=\dfrac{\lambda_j-\lambda_i}{c_i-c_j}>\delta$ 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:

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

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 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 $f : M_n(\mathbb{C}) \to M_n(\mathbb{C})$ 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

$$|\lambda I - A| = 0 \iff |f(\lambda I - A)| = |\lambda f(I) - f(A)| = 0. \tag{5}$$

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

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

从而由 (5) 式可知

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

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

$$|f(\lambda I - A)| = |\lambda f(I) - f(A)| = c_A(\lambda - \lambda_1) \cdots (\lambda - \lambda_n) = c_A|\lambda I - A|, \quad \forall \lambda \in \mathbb{C}. \tag{6}$$

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 (6) 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 0.16(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

$$|f(A(s))| = |f(I)||A(s)| \iff |f(A_0 + D_s)| = |f(I)||A_0 + D_s| \iff |f(A_0)| + |f(D_s)| = |f(I)||A_0 + D_s|. \tag{7}$$

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

$$|f(D_s)|=|D_s|. \tag{8}$$

于是结合 (7) (8) 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 $s\to 0$, 可得

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

故结论得证.

□

例题 0.21 设矩阵 $A=(a_{ij})_{n\times n}$ 满足所有元素均非负且 $\sum\limits_{i,j=1}^{n}a_{ij}=1$, 证明:$|\det A|\leqslant 1$ 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 $\lambda_1,\cdots,\lambda_n$,$D_i:|z-a_{ii}|\leqslant\sum\limits_{j\neq i}a_{ij}(1\leqslant i\leqslant n)$ 是 A 的 n 个戈氏圆盘. 由第一圆盘定理可知 $\lambda_1,\cdots,\lambda_n$ 都落在 $\bigcup\limits_{i=1}^{n}D_i$ 中. 对 $\forall\lambda\in\bigcup\limits_{i=1}^{n}D_i$, 都存在 $k\in\{1,2,\cdots,n\}$, 使得 $\lambda\in D_k$, 从而

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

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

□