

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 (相似矩阵有相同的特征多项式与特征值)

若 B 与 A 相似, 则 B 与 A 具有相同的特征多项式, 从而具有相同的特征值 (计重数).

证明 设 $B = P^{-1}AP$, 其中 P 是可逆矩阵, 则

$$|\lambda I_n - B| = |P^{-1}(\lambda I_n - A)P| = |P^{-1}| |\lambda I_n - A| |P| = |\lambda I_n - A|.$$

因此相似矩阵必有相同的特征多项式, 从而必有相同的特征值 (不计重数).

定理 0.2 (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

$$\begin{aligned} \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n &= \text{tr}(A), \\ \lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n &= |A|. \end{aligned}$$

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 0.3 (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{R} 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{R} 上的 n 阶方阵 A 的特征值全在 \mathbb{R} 中, 则存在 \mathbb{R} 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。

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。

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 0.1

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 $A = \text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_m)$, 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 $A = \text{diag}\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 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 0.1 的条件和结论代数化之后, 即可得到结论.

命题 0.2 (特征向量的延拓)

设 n 阶分块对角矩阵 $A = \text{diag}\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, 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}, \dots, A_{i_r} 的特征值, 但不是其他 A_j ($1 \leq j \leq m, j \neq i_1, \dots, i_r$) 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 $\tilde{x}_i = (0, \dots, 0, x_i, 0, \dots, 0)'$, 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 0.1(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 $f(\lambda) = \lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda + a_n$ 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 ω_i ($1 \leq i \leq n$), 则

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

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

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

命题 0.3

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

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 0.3 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 0.4 (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 0.5 (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)

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

(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 0.3 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 0.6

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 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 $g(\lambda_0) = 0$.

命题 0.7 (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 0.6 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 $\eta(X_0) = PX'_0P = \pm X_0$, 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 $PX_0 = E_{ii} + E_{ji}$ (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.

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.

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 $\bar{\lambda}_i$ 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 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 0.8 (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 $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}, \dots, \lambda_n^{-1}$.

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 0.9 (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 0.4 (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 , 可取到一系列有理数 $t_k \rightarrow 0$, 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。

证明 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

证明

例题 0.11

证明

例题 0.12

证明

例题 0.13

证明

例题 0.14

证明

例题 0.15

证明

例题 0.16

证明

例题 0.17

证明

例题 0.18

证明

例题 0.19

证明

例题 0.20

证明

例题 0.21

证明

例题 0.22

证明