线性代数-16

主讲：吴利苏

wulisu@sdust.edu.cn

2023 年 12 月 24 日

同一个线性变换在基 $\xi_1, \cdots, \xi_n$ 和基 $\eta_1, \cdots, \eta_n$ 下的表达式为

$$Y = AX, \qquad Y' = P^{-1}APX',$$

其中可逆矩阵 P 为从基 $\xi_1, \cdots, \xi_n$ 到基 $\eta_1, \cdots, \eta_n$ 的过渡矩阵. 矩阵 A 和矩阵 $P^{-1}AP$ 是相似的.

- 相似不变量：矩阵 A 和矩阵 $P^{-1}AP$ 所具有的相同性质和相同数量特征.
- 是否存在一组基，使得线性变换的矩阵 $P^{-1}AP$ 最简单（比如为对角矩阵)?
- 是否存在一组标准正交基，使得线性变换的矩阵 $P^{-1}AP$ 最简单（比如为对角矩阵)?

引入

同一个线性变换在基 $\xi_1, \cdots, \xi_n$ 和基 $\eta_1, \cdots, \eta_n$ 下的表达式为

$$Y = AX, \qquad Y' = P^{-1}APX',$$

其中可逆矩阵 P 为从基 $\xi_1, \cdots, \xi_n$ 到基 $\eta_1, \cdots, \eta_n$ 的过渡矩阵. 矩阵 A 和矩阵 $P^{-1}AP$ 是相似的.

- 相似不变量：矩阵 A 和矩阵 $P^{-1}AP$ 所具有的相同性质和相同数量特征.
- 是否存在一组基，使得线性变换的矩阵 $P^{-1}AP$ 最简单（比如为对角矩阵）?
- 是否存在一组标准正交基，使得线性变换的矩阵 $P^{-1}AP$ 最简单（比如为对角矩阵）?

同一个线性变换在基 $\xi_1,\cdots,\xi_n$ 和基 $\eta_1,\cdots,\eta_n$ 下的表达式为

$$Y=AX,\qquad Y'=P^{-1}APX',$$

其中可逆矩阵 P 为从基 $\xi_1,\cdots,\xi_n$ 到基 $\eta_1,\cdots,\eta_n$ 的过渡矩阵. 矩阵 A 和矩阵 $P^{-1}AP$ 是相似的.

- 相似不变量：矩阵 A 和矩阵 $P^{-1}AP$ 所具有的相同性质和相同数量特征. Section-2. 特征值和特征向量
- 是否存在一组基，使得线性变换的矩阵 $P^{-1}AP$ 最简单（比如为对角矩阵）? Section-3. 相似对角化
- 是否存在一组标准正交基，使得线性变换的矩阵 $P^{-1}AP$ 最简单（比如为对角矩阵）? Section-4. 对称阵的正交相似对角化

引入

同一个线性变换在基 $\xi_1, \cdots, \xi_n$ 和基 $\eta_1, \cdots, \eta_n$ 下的表达式为

$$Y = AX, \qquad Y' = P^{-1}APX',$$

其中可逆矩阵 P 为从基 $\xi_1, \cdots, \xi_n$ 到基 $\eta_1, \cdots, \eta_n$ 的过渡矩阵. 矩阵 A 和矩阵 $P^{-1}AP$ 是相似的.

- 相似不变量：矩阵 A 和矩阵 $P^{-1}AP$ 所具有的相同性质和相同数量特征. Section-2. 特征值和特征向量
- 是否存在一组基，使得线性变换的矩阵 $P^{-1}AP$ 最简单（比如为对角矩阵）? Section-3. 相似对角化
- 是否存在一组标准正交基，使得线性变换的矩阵 $P^{-1}AP$ 最简单（比如为对角矩阵）? Section-4. 对称阵的正交相似对角化
- Section-4 的应用：Section-5，6，7. 二次型的化简

本次课内容

1. 特征值和特征向量的定义

2. 特征值和特征向量的性质

定义 (特征值和特征向量)

A 为 n 阶方阵, 若存在数 λ 和非零向量 X, 使得

$$AX = \lambda X,$$

则称 λ 为矩阵 A 的特征值(特征根), 非零向量 X 为 A 关于特征值 λ 的特征向量.

特征值和特征向量

定义 (特征值和特征向量)

A 为 n 阶方阵, 若存在数 λ 和非零向量 X, 使得

$$AX = \lambda X,$$

则称 λ 为矩阵 A 的特征值(特征根), 非零向量 X 为 A 关于特征值 λ 的特征向量.

- 有非零向量 X 满足 $AX = \lambda X$,

$\Leftrightarrow$ $(\lambda E - A)X = 0$ 有非零解 X,

$\Leftrightarrow$ $|\lambda E - A| = 0$

$\Rightarrow$ 特征值都为 $|\lambda E - A| = 0$ 的解.

定义 (特征值和特征向量)

A 为 n 阶方阵, 若存在数 λ 和非零向量 X, 使得

$$AX = \lambda X,$$

则称 λ 为矩阵 A 的特征值(特征根), 非零向量 X 为 A 关于特征值 λ 的特征向量.

- 有非零向量 X 满足 $AX = \lambda X$,

$\Leftrightarrow$ $(\lambda E - A)X = 0$ 有非零解 X,

$\Leftrightarrow$ $|\lambda E - A| = 0$ (特征方程)

$\Rightarrow$ 特征值都为 $|\lambda E - A| = 0$ 的解.

定义 (特征值和特征向量)

A 为 n 阶方阵, 若存在数 λ 和非零向量 X, 使得

$$AX = \lambda X,$$

则称 λ 为矩阵 A 的特征值(特征根), 非零向量 X 为 A 关于特征值 λ 的特征向量.

- 有非零向量 X 满足 $AX = \lambda X$,

$\Leftrightarrow$ $(\lambda E - A)X = 0$ 有非零解 X,

$\Leftrightarrow$ $|\lambda E - A| = 0$ (特征方程)

$\Rightarrow$ 特征值都为 $|\lambda E - A| = 0$ 的解.

- 特征多项式: $f(\lambda) = |\lambda E - A|$.

特征值

- 代数基本定理：一元 n 次方程
$$x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 = 0$$
在复数域内有 n 个解 (重根按重数计算).
- 设 $\lambda_1, \cdots, \lambda_n$ 为特征方程 $|\lambda E - A| = 0$ 的 n 个解，则
$$|\lambda E - A| = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)\cdots(\lambda - \lambda_n)$$
- n 阶方阵 A 有 n 个特征值 (计重数).

- 代数基本定理：一元 n 次方程

$$x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \cdots + a_1 x + a_0 = 0$$

在复数域内有 n 个解 (重根按重数计算).

- 设 $\lambda_1, \cdots, \lambda_n$ 为特征方程 $|\lambda E - A| = 0$ 的 n 个解，则

$$|\lambda E - A| = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)\cdots(\lambda - \lambda_n)$$

- n 阶方阵 A 有 n 个特征值 (计重数).

性质

(i) $tr(A) = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n$;

(ii) $|A| = \lambda_1\lambda_2\cdots\lambda_n$;

(iii) A 可逆 $\Leftrightarrow$ A 无零特征值.

相似不变量：相似矩阵具有相同的特征多项式和特征值

定理 (定理 3)

若 n 阶矩阵 A 和 B 相似，则 A, B 的特征多项式相同，从而特征值也相同.

相似不变量：相似矩阵具有相同的特征多项式和特征值

定理 (定理 3)

若 n 阶矩阵 A 和 B 相似，则 A, B 的特征多项式相同，从而特征值也相同.

推论

若 n 阶矩阵 A 和对角矩阵 $\Lambda = diag(\lambda_1, \cdots, \lambda_n)$ 相似，则 $\lambda_1, \cdots, \lambda_n$ 为 A 的特征值.

相似不变量：相似矩阵具有相同的特征多项式和特征值

定理 (定理 3)

若 n 阶矩阵 A 和 B 相似，则 A, B 的特征多项式相同，从而特征值也相同.

推论

若 n 阶矩阵 A 和对角矩阵 $\Lambda = diag(\lambda_1, \cdots, \lambda_n)$ 相似，则 $\lambda_1, \cdots, \lambda_n$ 为 A 的特征值.

- 若存在可逆矩阵 P，使得 $P^{-1}AP$ 为对角阵，则称 A 可以相似对角化(或对角化).

注： 不是所有的 n 阶矩阵都可以相似对角化，比如

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

求特征向量

设 $\lambda = \lambda_i$ 为矩阵 A 的一个特征值，则

$$(A - \lambda_i E)X = 0$$

的任意非零解 $X = P_i$ 都为矩阵 A 关于特征值 λ_i 的特征向量.

设 $\lambda = \lambda_i$ 为矩阵 A 的一个特征值，则

$$(A - \lambda_i E)X = 0$$

的任意非零解 $X = P_i$ 都为矩阵 A 关于特征值 λ_i 的特征向量.

例 (例 5)

求矩阵 $A = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ -1 & 3 \end{pmatrix}$ 的特征值和特征向量.

设 $\lambda = \lambda_i$ 为矩阵 A 的一个特征值，则

$$(A - \lambda_i E)X = 0$$

的任意非零解 $X = P_i$ 都为矩阵 A 关于特征值 λ_i 的特征向量.

例 (例 5)

求矩阵 $A = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ -1 & 3 \end{pmatrix}$ 的特征值和特征向量.

解法：1. 求特征多项式 $f(\lambda) = |\lambda E - A|$, 解特征方程 $f(\lambda) = 0$ 得特征值;

2. 依次解齐次线性方程组 $(A - \lambda_i E)X = 0$ 得特征值 λ_i 对应的特征向量 ($(A - \lambda_i E)X = 0$ 的一个基础解系).

例 (例 6)

求矩阵 $A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -4 & 3 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{pmatrix}$ 的特征值和特征向量.

例子

例 (例 6)

求矩阵 $A=\begin{pmatrix}-1 & 1 & 0\\ -4 & 3 & 0\\ 1 & 0 & 2\end{pmatrix}$ 的特征值和特征向量.

- λ_i 是 A 的一个特征值，则齐次线性方程组 $(\lambda_i E-A)X=0$ 的基础解系就是矩阵 A 关于特征值 λ_i 的全体特征向量的一个最大无关组.

例 (例 7)

设 λ 为方阵 A 的特征值，证明：

(1) $c\lambda$ 为 cA 的特征值;

(2) λ^k 为 A^k 的特征值;

(3) 设 $\phi(x) = a_n x^n + \cdots + a_1 x + a_0$，则 $\phi(\lambda)$ 为 $\phi(A)$ 的特征值;

(4) 当 A 可逆时，$\frac{1}{\lambda}$ 为 A^{-1} 的特征值. $\frac{|A|}{\lambda}$ 为 A^* 的特征值.

例 (例 8)

设 3 阶矩阵 A 的特征值为 $1, -1, 2$, 求 $A^* + 3A - 2E$ 的特征值和行列式.

定理 (定理 2)

设 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m$ 为方阵 A 的 m 个特征值，$P_1, P_2, \cdots, P_m$ 依次为与之对应的特征向量. 若 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m$ 互不相同，则 $P_1, P_2, \cdots, P_m$ 线性无关.

推论

设 λ_1, λ_2 为方阵 A 的两个不同特征值，$\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_s$ 和 $\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_t$ 分别是关于 λ_1 和 λ_2 的线性无关的特征向量，则
$\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_s, \eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_t$ 线性无关.

例 (例 9)

设 λ_1, λ_2 为方阵 A 的两个不同特征值, 对应的特征向量分别为 P_1, P_2，证明 $P_1 + P_2$ 不是 A 的特征向量.

小结

- 相似不变量：特征多项式、特征值、行列式、迹、阶次、秩；
- 相似不变性：可逆.
- 计算特征值和特征向量，计算特征多项式.
- 下次课：方阵的相似对角化和对称阵的正交相似对角化.

例

求矩阵

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

的特征值和特征向量.

作业

- 思考题：特征向量是矩阵的相似不变量吗？换句话，两个相似矩阵的特征向量一定一样吗？为什么？
- Page139：6-(1)、8、9、13.

欢迎提问和讨论

吴利苏（http://wulisu.cn）

Email: wulisu@sdust.edu.cn

2023 年 12 月 24 日