

线性代数-16

主讲：吴利苏

wulisu@sdust.edu.cn

2025 年 10 月 29 日

本次课内容

1. 正交向量组
2. Schmidt 正交化
3. 正交矩阵和正交变换
4. 线性变换和矩阵的相似 (补充)

正交向量组

- 内积

$$(X, Y) = X^T Y = x_1 y_1 + \cdots + x_n y_n$$

- 若 $(X, Y) = 0$, 则称向量 X, Y 正交. 零向量与任何向量都正交.
- 正交向量组: 一组两两正交的非零向量.

正交向量组

- 内积

$$(X, Y) = X^T Y = x_1 y_1 + \cdots + x_n y_n$$

- 若 $(X, Y) = 0$, 则称向量 X, Y 正交. 零向量与任何向量都正交.
- 正交向量组: 一组两两正交的非零向量.

定理 (定理 11: 正交向量组必线性无关)

若 $\alpha_1, \cdots, \alpha_r$ 是正交向量组, 则 $\alpha_1, \cdots, \alpha_r$ 线性无关.

例 (例 1)

已知

$$\alpha_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \alpha_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3,$$

求与 α_1, α_2 均正交的单位向量 β .

标准正交基的定义

定义 (标准正交基)

设 n 维向量 $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为向量空间 $V (V \subseteq \mathbb{R}^n)$ 的向量, 若

- $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为 V 的一组基 (最大无关组);
- $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 两两正交;
- $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 都为单位向量,

则称 $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为 V 的一组标准正交基.

标准正交基的定义

定义 (标准正交基)

设 n 维向量 $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为向量空间 $V (V \subseteq \mathbb{R}^n)$ 的向量, 若

- $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为 V 的一组基 (最大无关组);
- $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 两两正交;
- $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 都为单位向量,

则称 $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为 V 的一组标准正交基.

- 只满足前两个条件的向量组称为 V 的一组正交基.

例子

例

设 $\alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1, 0)^T$, $\alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -1, 0)^T$, $\alpha_3 = (0, 0, 1)^T$ 为 \mathbb{R}^3 的一组标准正交基, 求 $\beta = (1, 2, 3)^T$ 在这组基下的坐标.

例子

例

设 $\alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1, 0)^T$, $\alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -1, 0)^T$, $\alpha_3 = (0, 0, 1)^T$ 为 \mathbb{R}^3 的一组标准正交基, 求 $\beta = (1, 2, 3)^T$ 在这组基下的坐标.

- 设 $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为 V 的一组标准正交基,

$$\beta = \lambda_1 \alpha_1 + \dots + \lambda_r \alpha_r \in V$$

则 $\lambda_i = (\beta, \alpha_i)$.

例子

例

设 $\alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1, 0)^T$, $\alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -1, 0)^T$, $\alpha_3 = (0, 0, 1)^T$ 为 \mathbb{R}^3 的一组标准正交基, 求 $\beta = (1, 2, 3)^T$ 在这组基下的坐标.

- 设 $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为 V 的一组标准正交基,

$$\beta = \lambda_1 \alpha_1 + \dots + \lambda_r \alpha_r \in V$$

则 $\lambda_i = (\beta, \alpha_i)$.

- 如何获得向量空间的标准正交基?

例子

例

设 $\alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1, 0)^T$, $\alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -1, 0)^T$, $\alpha_3 = (0, 0, 1)^T$ 为 \mathbb{R}^3 的一组标准正交基, 求 $\beta = (1, 2, 3)^T$ 在这组基下的坐标.

- 设 $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为 V 的一组标准正交基,

$$\beta = \lambda_1 \alpha_1 + \dots + \lambda_r \alpha_r \in V$$

则 $\lambda_i = (\beta, \alpha_i)$.

- 如何获得向量空间的标准正交基?
—Schmidt 正交化.

Schmidt 正交化：从一般基得到正交基的算法

设 $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 为向量空间 V 的一组基,

- 正交化 (Schmidt 正交化):

$$\beta_1 = \alpha_1,$$

$$\beta_2 = \alpha_2 - \frac{(\alpha_2, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1,$$

...

$$\beta_r = \alpha_r - \frac{(\alpha_r, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1 - \frac{(\alpha_r, \beta_2)}{(\beta_2, \beta_2)} \beta_2 - \dots - \frac{(\alpha_r, \beta_{r-1})}{(\beta_{r-1}, \beta_{r-1})} \beta_{r-1},$$

- 单位化:

$$e_1 = \frac{\beta_1}{\|\beta_1\|}, e_2 = \frac{\beta_2}{\|\beta_2\|}, \dots, e_r = \frac{\beta_r}{\|\beta_r\|}.$$

$$L(\alpha_1, \dots, \alpha_r) = L(\beta_1, \dots, \beta_r)$$

性质

在 *Schmidt* 正交化过程中, 对任意 $k = 1, \dots, r$, 向量组 $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ 与 β_1, \dots, β_k 等价. 特别地, $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 与 β_1, \dots, β_r 等价.

$$L(\alpha_1, \dots, \alpha_r) = L(\beta_1, \dots, \beta_r)$$

性质

在 *Schmidt* 正交化过程中, 对任意 $k = 1, \dots, r$, 向量组 $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ 与 β_1, \dots, β_k 等价. 特别地, $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 与 β_1, \dots, β_r 等价.

- 两个向量组 A, B 等价 $\Leftrightarrow A, B$ 可以相互线性表示.

$$L(\alpha_1, \dots, \alpha_r) = L(\beta_1, \dots, \beta_r)$$

性质

在 *Schmidt* 正交化过程中, 对任意 $k = 1, \dots, r$, 向量组 $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ 与 β_1, \dots, β_k 等价. 特别地, $\alpha_1, \dots, \alpha_r$ 与 β_1, \dots, β_r 等价.

- 两个向量组 A, B 等价 $\Leftrightarrow A, B$ 可以相互线性表示.

推论

- 正交向量组是线性无关向量组;
- 反之, 线性无关向量组可以 *Schmidt* 正交化得到正交向量组.

例 3

例

设 $\alpha_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\alpha_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\alpha_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$, 用 Schmidt 正交化把这组向量标准正交化.

正交矩阵的概念和性质

定义 (定义 21)

若 n 阶矩阵 A 满足

$$A^T A = E \quad (i.e. \ A^{-1} = A^T),$$

则称 A 为正交矩阵, 简称正交阵.

正交矩阵的概念和性质

定义 (定义 21)

若 n 阶矩阵 A 满足

$$A^T A = E \quad (i.e. \ A^{-1} = A^T),$$

则称 A 为正交矩阵, 简称正交阵.

- 矩阵 A 是正交矩阵 $\Leftrightarrow A$ 的列 (行) 向量组是 \mathbb{R}^n 的标准正交基.
- A 是正交矩阵, 则 $|A| = \pm 1$.
- A 是正交矩阵, 则 A^{-1} 和 A^T 也是正交矩阵.
- A, B 是正交矩阵, 则 AB 也是正交矩阵.

例 4

例

验证下面矩阵为正交矩阵.

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

$$R_Z(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} \cos \boldsymbol{\theta} & -\sin \boldsymbol{\theta} & 0 \\ -\sin \boldsymbol{\theta} & \cos \boldsymbol{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

例 (Lecture-5)

设 $\alpha = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T \in \mathbb{R}^n$, $\alpha^T \alpha = 1$,

$$H = E - 2\alpha\alpha^T.$$

则 H 为对称阵, 且 $HH^T = E$. 所以 H 为一个正交矩阵.

向量空间上的线性变换

例 (Lecture-5: 线性变换和矩阵)

给定一个 n 维向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 取线性变换如下,

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \\ y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \\ \dots \\ y_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n \end{cases} \quad (1)$$

则得 n 维向量 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$. 矩阵 $A = (a_{ij})$ 表示上面线性变换, 则有

$$Y = AX.$$

向量空间上的线性变换

例 (Lecture-5: 线性变换和矩阵)

给定一个 n 维向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 取线性变换如下,

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \\ y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \\ \dots \\ y_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n \end{cases} \quad (1)$$

则得 n 维向量 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$. 矩阵 $A = (a_{ij})$ 表示上面线性变换, 则有

$$Y = AX.$$

- 线性变换和 n 阶方阵一一对应.

定义 (定义 5)

若 P 为正交矩阵, 则线性变换 $Y = PX$ 称为正交变换.

正交变换

定义 (定义 5)

若 P 为正交矩阵, 则线性变换 $Y = PX$ 称为正交变换.

- 正交变换保持内积不变.

$$(PX, PY) = (PX)^T PY = X^T P^T PY = X^T Y = (X, Y).$$

- 正交变换保持长度和夹角不变.

例 (Lecture-5)

设 $\alpha = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T \in \mathbb{R}^n$, $\alpha^T \alpha = 1$,

$$H = E - 2\alpha\alpha^T.$$

则 $H^T = H$, 且 $HH^T = E$.

- 所以, H 是正交矩阵, $Y = HX$ 是一个正交变换 (称为镜面反射).

小结

- 正交向量组、标准正交基;
- Schmidt 正交化;
- 正交矩阵和正交变换;

补充：线性变换的另一种定义

定义

设 $f: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$ 为一个变换 (自身到自身的映射). 若满足

- $\forall X_1, X_2 \in \mathbb{R}^n, f(X_1 + X_2) = f(X_1) + f(X_2);$
- $\forall X \in \mathbb{R}^n, \forall k \in \mathbb{R}, f(k \cdot X) = k \cdot f(X),$

则称 f 是一个线性变换.

补充：线性变换的另一种定义

定义

设 $f: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$ 为一个变换 (自身到自身的映射). 若满足

- $\forall X_1, X_2 \in \mathbb{R}^n, f(X_1 + X_2) = f(X_1) + f(X_2);$
- $\forall X \in \mathbb{R}^n, \forall k \in \mathbb{R}, f(k \cdot X) = k \cdot f(X),$

则称 f 是一个线性变换.

- 取定 \mathbb{R}^n 的一组基, 则存在 n 阶方阵, 使得 $f(X) = AX$ (Lec 14).

线性变换在不同基下的矩阵

例

设 $f: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$ 是一个线性变换,

- 取 ξ_1, \dots, ξ_n 是 \mathbb{R}^n 的一组基, 此时 $f(X) = AX$;
- 取 η_1, \dots, η_n 是 \mathbb{R}^n 的另外一组基, 此时 $f(Y) = BY$

问矩阵 A 和 B 的关系?

线性变换在不同基下的矩阵

例

设 $f: \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$ 是一个线性变换,

- 取 ξ_1, \dots, ξ_n 是 \mathbb{R}^n 的一组基, 此时 $f(X) = AX$;
- 取 η_1, \dots, η_n 是 \mathbb{R}^n 的另外一组基, 此时 $f(Y) = BY$

问矩阵 A 和 B 的关系?

解: 设 $(\xi_1, \dots, \xi_n)P = (\eta_1, \dots, \eta_n)$, 其中 P 为过渡矩阵. 任取

$$\alpha = (\xi_1, \dots, \xi_n)X = (\eta_1, \dots, \eta_n)Y \in \mathbb{R}^n$$

则

$$\begin{aligned} f(\alpha) &= (\xi_1, \dots, \xi_n)AX = (\eta_1, \dots, \eta_n)BY \\ &= (\xi_1, \dots, \xi_n)PBP^{-1}X. \end{aligned}$$

所以 $A = PBP^{-1}$, 即 $B = P^{-1}AP$.

第五章主题：方阵的相似

综上：方阵 A 和 $B = P^{-1}AP$ 是同一个线性变换在不同基下的矩阵.
这种矩阵之间的关系被定义为矩阵的相似关系.

定义

设 A, B 为 n 阶方阵, 若存在可逆矩阵 P 使得

$$B = P^{-1}AP,$$

则称矩阵 A, B 相似, 记为 $A \overset{\text{相似}}{\sim} B$.

- 若 A 和 B 相似, 则 A 和 B 等价.

所以, 将相似的方阵 A 和 B 记为 $A \overset{\text{相似}}{\sim} B$.

设线性变换 f 在两组基下的表达式分别为

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

其中可逆矩阵 P 为过渡矩阵. 方阵 A 和 $P^{-1}AP$ 是相似的.

设线性变换 f 在两组基下的表达式分别为

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

其中可逆矩阵 P 为过渡矩阵. 方阵 A 和 $P^{-1}AP$ 是相似的.

- 相似不变量：方阵 A 和 $P^{-1}AP$ 所具有的共性.
- 是否存在一个可逆矩阵 P , 使得 $P^{-1}AP$ 为对角矩阵?
(等价地, 是否存在一组基, 使线性变换的表示简单?)
- 是否存在一个正交矩阵 P , 使得 $P^{-1}AP = P^TAP$ 为对角矩阵?
(等价地, 是否存在一组标准正交基, 使线性变换的表示简单?)

设线性变换 f 在两组基下的表达式分别为

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

其中可逆矩阵 P 为过渡矩阵. 方阵 A 和 $P^{-1}AP$ 是相似的.

- 相似不变量: 方阵 A 和 $P^{-1}AP$ 所具有的共性.

Section-1. 特征值和特征多项式

- 是否存在一个可逆矩阵 P , 使得 $P^{-1}AP$ 为对角矩阵?
(等价地, 是否存在一组基, 使线性变换的表示简单?)

Section-2. 相似对角化

- 是否存在一个正交矩阵 P , 使得 $P^{-1}AP = P^TAP$ 为对角矩阵?
(等价地, 是否存在一组标准正交基, 使线性变换的表示简单?)

Section-3. 对称阵的正交相似对角化

设线性变换 f 在两组基下的表达式分别为

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

其中可逆矩阵 P 为过渡矩阵. 方阵 A 和 $P^{-1}AP$ 是相似的.

- 相似不变量: 方阵 A 和 $P^{-1}AP$ 所具有的共性.

Section-1. 特征值和特征多项式

- 是否存在一个可逆矩阵 P , 使得 $P^{-1}AP$ 为对角矩阵?
(等价地, 是否存在一组基, 使线性变换的表示简单?)

Section-2. 相似对角化

- 是否存在一个正交矩阵 P , 使得 $P^{-1}AP = P^TAP$ 为对角矩阵?
(等价地, 是否存在一组标准正交基, 使线性变换的表示简单?)

Section-3. 对称阵的正交相似对角化

- Section-3 的应用: 第六章. 二次型的化简

欢迎提问和讨论

吴利苏 (<http://wulisu.cn>)

Email: wulisu@sdust.edu.cn

2025 年 10 月 29 日