

第九章 欧几里得空间

张彪

天津师范大学

zhang@tjnu.edu.cn



Outline

- ① 欧氏空间
- ② 标准正交基的定义与求法
- ③ 欧氏空间的同构
- ④ 正交变换
- ⑤ 正交子空间
- ⑥ 实对称矩阵的标准形

- 前面主要介绍了向量的线性运算，向量组的线性相关与线性无关性，并讨论了向量空间中的基、维数以及向量的坐标等概念.
- 但在向量空间中还没有涉及度量性质，即还没有考虑向量空间中的向量的大小、向量间的夹角等问题.
- 本章将在向量空间中引入内积的概念，并赋予相应的度量性质.

- 在几何空间中两个向量 a, b 的内积 (数量积) 定义为:

$$a \cdot b = |a| \cdot |b| \cos \theta,$$

其中 $|a|, |b|$ 是向量 a, b 的长度, θ 是向量 a, b 的夹角.

- 在建立空间直角坐标系后, 有了向量的坐标表示, 即

$$a = (a_1, a_2, a_3), b = (b_1, b_2, b_3)$$

相应地, 内积的计算公式为 $a \cdot b = \sum_{i=1}^3 a_i b_i$

- 下面仿照该计算公式, 在空间 \mathbb{R}^n 引入中的内积概念.

§1 欧氏空间

定义

设 V 是实数域 \mathbb{R} 上的线性空间, 对 V 中任意两个向量 α, β 定义一个二元实函数, 记作 (α, β) , 它具有满足以下性质

- ① $(\alpha, \beta) = (\beta, \alpha)$ (对称性)
- ② $(k\alpha, \beta) = k(\alpha, \beta)$ (左数乘性)
- ③ $(\alpha + \beta, \gamma) = (\alpha, \gamma) + (\beta, \gamma)$ (左可加性)
- ④ $(\alpha, \alpha) \geq 0$, 当且仅当 $\alpha = 0$ 时 $(\alpha, \alpha) = 0$. (正定性)

这里 α, β, γ 是 V 中任意的向量, k 是任意实数, 则称 (α, β) 为 α 和 β 的**内积**, 并称这种定义了内积的实数域 R 上的线性空间 V 为**欧几里得空间**, 简称 **欧氏空间**.

例 1

在 \mathbb{R}^n 中, 对于向量 $\alpha = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $\beta = (b_1, b_2, \dots, b_n)$
定义

$$(\alpha, \beta) = a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n$$

验证 (α, β) 满足定义中的 4 个性质.

- ① $(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n a_i b_i = \sum_{i=1}^n b_i a_i = (\beta, \alpha)$
- ② $(k\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n (ka_i) b_i = \sum_{i=1}^n k(a_i b_i) = k(\alpha, \beta)$
- ③ 如果 $\gamma = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, $\alpha + \beta = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, \dots, a_n + b_n)$, 则
$$(\alpha + \beta, \gamma) = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i) c_i = \sum_{i=1}^n a_i c_i + \sum_{i=1}^n b_i c_i = (\alpha, \gamma) + (\beta, \gamma)$$
- ④ $(\alpha, \alpha) = \sum_{i=1}^n a_i a_i = \sum_{i=1}^n a_i^2 \geq 0$ 当且仅当 $a_i = 0 (i = 1, 2, \dots, n)$
时, $(\alpha, \alpha) = 0$

因此, \mathbb{R}^n 对于内积 (α, β) 就成为一个欧氏空间.

例 2

$C(a, b)$ 为闭区间 $[a, b]$ 上的所有实连续函数所成线性空间, 对于函数 $f(x), g(x)$, 定义

$$(f, g) = \int_a^b f(x)g(x)dx$$

则 $C(a, b)$ 作成一個欧氏空间.

性质

设 V 为欧氏空间, $\forall \alpha, \beta, \gamma \in V, \forall k \in \mathbb{R}$

- ① $(\alpha, k\beta) = k(\alpha, \beta),$
- ② $(\alpha, \beta + \gamma) = (\alpha, \beta) + (\alpha, \gamma)$
- ③ $(\mathbf{0}, \beta) = 0$
- ④ $\left(\sum_{i=1}^n k_i \alpha_i, \sum_{j=1}^m l_j \beta_j\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_i l_j (\alpha_i, \beta_j)$

注

- 在欧几里得空间的定义中, 对它作为线性空间的维数并无要求, 可以是有限维的, 也可以是无限维的.
- 内积满足齐次性、可加性, 这两条性质合在一起称为内积的双线性性. 即内积是实线性空间中的一个正定对称双线性函数.

二、欧氏空间中向量的长度

1. 引入长度概念的可能性

1) 在 \mathbb{R}^3 向量 α 的长度模

$$|\alpha| = \sqrt{\alpha \cdot \alpha}$$

2) 欧氏空间 V 中, 对任意的 $\alpha \in V$, $(\alpha, \alpha) \geq 0$ 使得 $\sqrt{\alpha \cdot \alpha}$ 有意义.

2. 向量长度的定义

定义

在欧氏空间 V 中, 对任意向量 $\alpha \in V$, 称

$$|\alpha| = \sqrt{(\alpha, \alpha)}$$

为向量 α 的**长度**. 特别地, 当 $|\alpha| = 1$ 时, 称 α 为**单位向量**.

向量长度的简单性质

性质

- ① $|\alpha| \geq 0$; $|\alpha| = 0 \Leftrightarrow \alpha = 0$
- ② $|k\alpha| = |k||\alpha|$
- ③ 如果 $\alpha \neq 0$, 则 $\frac{1}{|\alpha|}\alpha$ 是一个单位向量.

通常称此过程为把 α 单位化.

三、欧氏空间中向量的角度

1. 引入夹角概念的可能性与困难

1) 在 \mathbb{R}^3 中向量 α 与 β 的夹角

$$\langle \alpha, \beta \rangle = \arccos \frac{\alpha \cdot \beta}{|\alpha||\beta|}$$

2) 在一般欧氏空间中推广上面形式，首先应证明不等式:

$$\left| \frac{(\alpha, \beta)}{|\alpha||\beta|} \right| \leq 1$$

柯西-布涅柯夫斯基不等式 (又称“柯西-施瓦兹不等式”)

性质

对欧氏空间 V 中任意两个向量 α, β , 有

$$|(\alpha, \beta)| \leq |\alpha| \cdot |\beta|$$

当且仅当 α, β 线性相关时等号成立.

- 对于欧氏空间 \mathbb{R}^n

$$|a_1 b_1 + a_2 b_2 + \cdots + a_n b_n| \leq \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \cdots + a_n^2} \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + \cdots + b_n^2}.$$

- 对于欧氏空间 $C(a, b)$

$$\left| \int_a^b f(x)g(x)dx \right| \leq \sqrt{\int_a^b f^2(x)dx} \cdot \sqrt{\int_a^b g^2(x)dx}.$$

$$|(\alpha, \beta)| \leq |\alpha| \cdot |\beta|$$

证明 当 $\beta = 0$ 时, $(\alpha, 0) = 0$, $|\beta| = 0$

因此, $(\alpha, \beta) = |\alpha||\beta| = 0$. 结论成立.

当 $\beta \neq 0$ 时, 作向量 $\gamma = \alpha + t\beta$, $t \in \mathbb{R}$

由内积的正定性, 对 $\forall t \in \mathbb{R}$, 皆有

$$(\gamma, \gamma) = (\alpha + t\beta, \alpha + t\beta) = (\alpha, \alpha) + 2(\alpha, \beta)t + (\beta, \beta)t^2 \geq 0$$

取 $t = -\frac{(\alpha, \beta)}{(\beta, \beta)}$ 代入上式, 得

$$(\alpha, \alpha) - 2(\alpha, \beta)\frac{(\alpha, \beta)}{(\beta, \beta)} + (\beta, \beta)\frac{(\alpha, \beta)^2}{(\beta, \beta)^2} \geq 0$$

即 $(\alpha, \beta)^2 \leq (\alpha, \alpha)(\beta, \beta)$ 两边开方,

即得 $|(\alpha, \beta)| \leq |\alpha| \cdot |\beta|$.

$|(\alpha, \beta)| = |\alpha||\beta|$ 当且仅当 α, β 线性相关.

- 当 α, β 线性相关时, 不妨设 $\alpha = k\beta$. 于是,

$$|(\alpha, \beta)| = |(k\beta, \beta)| = |k(\beta, \beta)| = |k||\beta|^2$$

$$|\alpha||\beta| = |k\beta||\beta| = |k||\beta|^2$$

因此 $|(\alpha, \beta)| = |\alpha||\beta|$. 等号成立.

- 反之, 若等号成立, 由以上证明过程知
或者 $\beta = \mathbf{0}$, 或者 $\alpha - \frac{(\alpha, \beta)}{(\beta, \beta)}\beta = \mathbf{0}$
也即 α, β 线性相关.



推论

对欧氏空间中的任意两个向量 α, β , 有

$$|\alpha + \beta| \leq |\alpha| + |\beta|.$$

证明

$$\begin{aligned} |\alpha + \beta|^2 &= (\alpha + \beta, \alpha + \beta) \\ &= (\alpha, \alpha) + 2(\alpha, \beta) + (\beta, \beta) \\ &\leq |\alpha|^2 + 2|\alpha||\beta| + |\beta|^2 = (|\alpha| + |\beta|)^2 \end{aligned}$$

两边开方, 证毕. ■

定义

设 V 为欧氏空间, α, β 为 V 中任意两非零向量, α, β 的夹角定义为

$$\langle \alpha, \beta \rangle = \arccos \frac{(\alpha, \beta)}{|\alpha||\beta|}, \quad (0 \leq \langle \alpha, \beta \rangle \leq \pi)$$

定义

设 α, β 为欧氏空间中两个向量, 若内积 $(\alpha, \beta) = 0$ 则称 α 与 β 正交或互相垂直, 记作 $\alpha \perp \beta$.

注

- 零向量与任意向量正交.
- $\alpha \perp \beta \iff \langle \alpha, \beta \rangle = \frac{\pi}{2}$, 即 $\cos \langle \alpha, \beta \rangle = 0$.

性质 (勾股定理)

设 V 为欧氏空间, 对任意的 $\alpha, \beta \in V$

$$\alpha \perp \beta \iff |\alpha + \beta|^2 = |\alpha|^2 + |\beta|^2.$$

证明 因为

$$\begin{aligned} |\alpha + \beta|^2 &= (\alpha + \beta, \alpha + \beta) \\ &= (\alpha, \alpha) + 2(\alpha, \beta) + (\beta, \beta) \end{aligned}$$

所以 $|\alpha + \beta|^2 = |\alpha|^2 + |\beta|^2 \iff (\alpha, \beta) = 0 \iff \alpha \perp \beta.$ ■

推论

若欧氏空间 V 中向量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 两两正交,

即 $(\alpha_i, \alpha_j) = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, 2, \dots, m,$ 有

$$|\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m|^2 = |\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2 + \dots + |\alpha_m|^2.$$

例 3

已知 $\alpha = (2, 1, 3, 2)$, $\beta = (1, 2, -2, 1)$ 在通常的内积定义下, 求 $|\alpha|, (\alpha, \beta), \langle \alpha, \beta \rangle, |\alpha - \beta|$.

例 3

已知 $\alpha = (2, 1, 3, 2)$, $\beta = (1, 2, -2, 1)$ 在通常的内积定义下, 求 $|\alpha|, (\alpha, \beta), \langle \alpha, \beta \rangle, |\alpha - \beta|$.

解

- $|\alpha| = \sqrt{(\alpha, \alpha)} = \sqrt{2^2 + 1^2 + 3^2 + 2^2} = \sqrt{18} = 3\sqrt{2}.$
- $(\alpha, \beta) = 2 \times 1 + 1 \times 2 + 3 \times (-2) + 2 \times 1 = 0.$
- $\langle \alpha, \beta \rangle = \frac{\pi}{2}.$
- 因为 $\alpha - \beta = (1, -1, 5, 1),$
所以 $|\alpha - \beta| = \sqrt{1^2 + (-1)^2 + 5^2 + 1^2} = \sqrt{28} = 2\sqrt{7}.$

在解析几何中, 两个点 α 和 β 间的距离等于向量 $\alpha - \beta$ 的长度.
在欧氏空间中我们同样可引入

定义

长度 $|\alpha - \beta|$ 称为向量 α 和 β 的距离, 记为 $d(\alpha, \beta)$.

性质

距离的三条基本性质:

- ① $d(\alpha, \beta) = d(\beta, \alpha)$
- ② $d(\alpha, \beta) \geq 0$, 并且仅当 $\alpha = \beta$ 时等号才成立
- ③ $d(\alpha, \beta) \leq d(\alpha, \gamma) + d(\gamma, \beta)$ (三角形不等式).

四、 n 维欧氏空间中内积的矩阵表示

设 V 为欧氏空间, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 为 V 的一组基, 对 V 中任意两个向量

$$\alpha = x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \cdots + x_n\varepsilon_n,$$

$$\beta = y_1\varepsilon_1 + y_2\varepsilon_2 + \cdots + y_n\varepsilon_n,$$

有

$$(\alpha, \beta) = \left(\sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_i, \sum_{j=1}^n y_j \varepsilon_j \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\varepsilon_i, \varepsilon_j) x_i y_j.$$

令 $a_{ij} = (\varepsilon_i, \varepsilon_j)$, $i, j = 1, 2, \dots, n$,

令 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)'$,

于是,

$$(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i y_j = X' A Y.$$

定义

称

$$A = \begin{pmatrix} (\varepsilon_1, \varepsilon_1) & (\varepsilon_1, \varepsilon_2) & \cdots & (\varepsilon_1, \varepsilon_n) \\ (\varepsilon_2, \varepsilon_1) & (\varepsilon_2, \varepsilon_2) & \cdots & (\varepsilon_2, \varepsilon_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\varepsilon_n, \varepsilon_1) & (\varepsilon_n, \varepsilon_2) & \cdots & (\varepsilon_n, \varepsilon_n) \end{pmatrix}$$

为基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 的度量矩阵.

$$A = \begin{pmatrix} (\varepsilon_1, \varepsilon_1) & (\varepsilon_1, \varepsilon_2) & \cdots & (\varepsilon_1, \varepsilon_n) \\ (\varepsilon_2, \varepsilon_1) & (\varepsilon_2, \varepsilon_2) & \cdots & (\varepsilon_2, \varepsilon_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\varepsilon_n, \varepsilon_1) & (\varepsilon_n, \varepsilon_2) & \cdots & (\varepsilon_n, \varepsilon_n) \end{pmatrix}$$

注

- 度量矩阵 A 是实对称矩阵.
- 度量矩阵 A 是正定矩阵.

证明 由内积的正定性, 对 $\forall \alpha \in V, \alpha \neq 0$, 即 $X \neq 0$ 有 $(\alpha, \alpha) = X'AX > 0$. 因此, A 为正定矩阵. ■

注

- 在基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 下, 向量的内积由度量矩阵 A 完全确定.
- 给定一个 n 级正定矩阵 A 及 n 维实线性空间 V 的一组基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$. 可以规定 V 上内积, 使它成为欧几里得空间, 并且基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 的度量矩阵为 A .
- 欧几里得空间的子空间在所定义的内积之下也是一个欧几里得空间.

注

- 对同一内积而言, 不同基的度量矩阵是合同的.

证明 设 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n; \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 为欧氏空间 V 的两组基, 它们的度量矩阵分别为 A, B , 且

$$(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) C,$$

其中 $C = (c_{ij})_{n \times n} = (C_1, C_2, \dots, C_n)$.

于是, $\eta_i = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) C_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$.

因此, $(\eta_i, \eta_j) = C_i' A C_j$.

$$\text{所以, } B = ((\eta_i, \eta_j))_{ij} = (C_i' A C_j)_{ij} = \begin{pmatrix} C_1' \\ C_2' \\ \vdots \\ C_n' \end{pmatrix} A (C_1, C_2, \dots, C_n) = C' A C.$$

§2 标准正交基的定义与求法

定义 (正交向量组)

设 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ 是一组非零向量, 如果它们两两正交, 则称为**正交向量组**.

性质

正交向量组是线性无关的.

证明 设正交向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 有一线性关系

$$k_1\alpha_1 + k_2\alpha_2 + \dots + k_m\alpha_m = 0$$

用 α_i 与等式两边作内积, 即得 $k_i(\alpha_i, \alpha_i) = 0$

由 $\alpha_i \neq 0$, 有 $(\alpha_i, \alpha_i) > 0$, 从而 $k_i = 0 (i = 1, 2, \dots, m)$.

这就证明了 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 是线性无关的. ■

推论

n 维欧氏空间 V 中, 两两正交的非零向量的个数不会超过 n .

这个事实的几何意义是清楚的. 例如, 在平面上找不到三个两两垂直的非零向量; 在空间中, 找不到四个两两垂直的非零向量.

定义 (正交基)

在 n 维欧氏空间中, 由 n 个两两正交的非零向量构成的向量组称为 **正交基**. 由单位向量组成的正交基称为 **标准正交基**.

性质

- 向量组 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ 是一个标准正交向量组 \iff

$$(\alpha_i, \alpha_j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

- 一组基是标准正交基 \iff 它的度量矩阵是单位矩阵.

性质

设 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 是 n 维欧氏空间 V 的一组标准正交基, 对 $\alpha, \beta \in V$, 设向量 α, β 的坐标分别是 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)'$, 则

- $x_i = (\alpha, \varepsilon_i) \quad i = 1, 2, \dots, n.$
- $(\alpha, \beta) = X'Y = x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n$

证明

- 由题设可知

$$\alpha = x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \dots + x_n\varepsilon_n.$$

用 ε_i 与等式两边作内积, 即得

$$\begin{aligned}(\alpha, \varepsilon_i) &= (x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \dots + x_n\varepsilon_n, \varepsilon_i) \\&= x_i(\varepsilon_i, \varepsilon_i) = x_i \quad i = 1, 2, \dots, n.\end{aligned}$$

- 因为 $\alpha = x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \dots + x_n\varepsilon_n, \quad \beta = y_1\varepsilon_1 + y_2\varepsilon_2 + \dots + y_n\varepsilon_n,$
所以 $(\alpha, \beta) = x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n = X'Y.$ ■

三. 求标准正交基的办法—Schmidt 正交化方法

定理 1

n 维欧氏空间中任一个正交向量组都能扩充成一组正交基.

证明 设 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 是一正交向量组, 我们对 $n - m$ 作数学归纳法.

- 当 $n - m = 0$ 时, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 就是一组正交基了.
- 假设 $n - m = k$ 时定理成立, 也就是说, 可以找到向量 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$, 使得

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$$

成为一组正交基.

- 现在来看 $n - m = k + 1$ 的情形. 因为 $m < n$, 所以一定有向量不能被 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 线性表出, 作向量

$$\alpha_{m+1} = \beta - k_1\alpha_1 - k_2\alpha_2 - \dots - k_m\alpha_m$$

这里 k_1, k_2, \dots, k_m 是待定的系数.

用 α_i 与 α_{m+1} 作内积, 得

$$(\alpha_i, \alpha_{m+1}) = (\beta, \alpha_i) - k_i(\alpha_i, \alpha_i) \quad (i = 1, 2, \cdots, m)$$

取

$$k_i = \frac{(\beta, \alpha_i)}{(\alpha_i, \alpha_i)} \quad (i = 1, 2, \cdots, m)$$

有

$$(\alpha_i, \alpha_{m+1}) = 0 \quad (i = 1, 2, \cdots, m)$$

由 β 的选择可知, $\alpha_{m+1} \neq 0$. 因此 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_m, \alpha_{m+1}$ 是一正交向量组, 根据归纳法假定, $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_m, \alpha_{m+1}$ 可以扩充成一正交基. 于是定理得证. ■

在求欧氏空间的正交基时，常常是已经有了空间的一组基. 对于这种情形，有下面的结果：

定理 2

对于 n 维欧氏空间中任意一组基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ ，都可以找到一组标准正交基 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ ，使

$$L(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i) = L(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i), i = 1, 2, \dots, n$$

证明 设 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 是一组基，我们来逐个地求出向量 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$.

- 首先，可取 $\eta_1 = \frac{1}{|\varepsilon_1|} \varepsilon_1$.
- 一般地，假定已经求出 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m$ ，它们是单位正交的，具有性质

$$L(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i) = L(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i), i = 1, 2, \dots, m$$

- 下一步求 η_{m+1} . 因为 $L(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m) = L(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m)$ ，所以 ε_{m+1} 不能被 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m$ 线性表出.

按定理 1 证明中的方法，作向量

$$\xi_{m+1} = \varepsilon_{m+1} - \sum_{i=1}^m (\varepsilon_{m+1}, \eta_i) \eta_i$$

显然

$$\xi_{m+1} \neq 0, \text{ 且 } (\xi_{m+1}, \eta_i) = 0, i = 1, 2, \cdots, m$$

令

$$\eta_{m+1} = \frac{\xi_{m+1}}{|\xi_{m+1}|}$$

$\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_m, \eta_{m+1}$ 就是一单位正交向量组. 同时

$$L(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_{m+1}) = L(\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_{m+1})$$

由归纳法原理, 定理得证. ■

注

- 定理中的要求

$$L(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i) = L(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i), i = 1, 2, \dots, n$$

就相当于由基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 到基 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 的过渡矩阵是上三角矩阵.

施密特 (Schmidt) 正交化过程

n 维欧氏空间 V 必存在正交基与标准正交基.

- 对 n 维欧氏空间 V 的任一组基 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, 都可以用施密特 (Schmidt) 正交化过程化为正交基 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$.

$$\begin{cases} \beta_1 = \alpha_1 \\ \beta_2 = \alpha_2 - \frac{(\alpha_2, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1 \\ \dots\dots\dots \\ \beta_n = \alpha_n - \frac{(\alpha_n, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1 - \frac{(\alpha_n, \beta_2)}{(\beta_2, \beta_2)} \beta_2 - \dots\dots\dots - \frac{(\alpha_n, \beta_{n-1})}{(\beta_{n-1}, \beta_{n-1})} \beta_{n-1} \end{cases}$$

- 如果再把每个 β_i 单位化, 即得到 V 的一组标准正交基.

例 1

在 \mathbb{R}^4 中把 $\alpha_1 = (1, 1, 0, 0)$, $\alpha_2 = (-1, 0, 0, 1)$, $\alpha_3 = (1, 0, 1, 0)$, $\alpha_4 = (1, -1, -1, 1)$ 变成单位正交的向量组.

例 1

在 \mathbb{R}^4 中把 $\alpha_1 = (1, 1, 0, 0)$, $\alpha_2 = (-1, 0, 0, 1)$, $\alpha_3 = (1, 0, 1, 0)$, $\alpha_4 = (1, -1, -1, 1)$ 变成单位正交的向量组.

解 把它们正交化, 得

$$\beta_1 = \alpha_1 = (1, 1, 0, 0)$$

$$\beta_2 = \alpha_2 - \frac{(\alpha_2, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1 = \alpha_2 + \frac{1}{2} \beta_1 = \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, 1\right)$$

$$\beta_3 = \alpha_3 - \frac{(\alpha_3, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1 - \frac{(\alpha_3, \beta_2)}{(\beta_2, \beta_2)} \beta_2 = \alpha_3 - \frac{1}{2} \beta_1 + \frac{1}{3} \beta_2 = \left(\frac{1}{3}, -\frac{1}{3}, 1, \frac{1}{3}\right)$$

$$\beta_4 = \alpha_4 - \frac{(\alpha_4, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1 - \frac{(\alpha_4, \beta_2)}{(\beta_2, \beta_2)} \beta_2 - \frac{(\alpha_4, \beta_3)}{(\beta_3, \beta_3)} \beta_3 = (1, -1, -1, 1)$$

再单位化, 得

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0, 0\right) \\ \eta_2 &= \left(-\frac{\sqrt{6}}{6}, \frac{\sqrt{6}}{6}, 0, \frac{2\sqrt{6}}{6}\right) \\ \eta_3 &= \left(\frac{\sqrt{3}}{6}, -\frac{\sqrt{3}}{6}, \frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{\sqrt{3}}{6}\right) \\ \eta_4 &= \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)\end{aligned}$$

例 2

设 $\alpha_1 = (1, 2, -1)$, $\alpha_2 = (-1, 3, 1)$, $\alpha_3 = (4, -1, 0)$. 把这组向量变成单位正交的向量组.

例 2

设 $\alpha_1 = (1, 2, -1)$, $\alpha_2 = (-1, 3, 1)$, $\alpha_3 = (4, -1, 0)$. 把这组向量变成单位正交的向量组.

解 第一步正交化, 取

$$\beta_1 = \alpha_1,$$

$$\beta_2 = \alpha_2 - \frac{(\alpha_2, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1 = (-1, 3, 1) - \frac{4}{6} (1, 2, -1) = \frac{5}{3} (-1, 1, 1),$$

$$\begin{aligned} \beta_3 &= \alpha_3 - \frac{(\alpha_3, \beta_1)}{(\beta_1, \beta_1)} \beta_1 - \frac{(\alpha_3, \beta_2)}{(\beta_2, \beta_2)} \beta_2 = (4, -1, 0) - \frac{1}{3} (1, 2, -1) + \frac{5}{3} (-1, 1, 1) \\ &= 2(1, 0, 1), \end{aligned}$$

第二步单位化, 令

$$\gamma_1 = \frac{1}{|\beta_1|} \beta_1 = \frac{1}{\sqrt{6}} (1, 2, -1),$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{|\beta_2|} \beta_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (-1, 1, 1),$$

$$\gamma_3 = \frac{1}{|\beta_3|} \beta_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (1, 0, 1).$$

例 3

已知 $\alpha_1 = (1, 1, 1)$, 试求非零向量 α_2, α_3 , 使 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 两两正交.

解 若 $\alpha_1 \perp \alpha_2, \alpha_1 \perp \alpha_3$, 则

$$(\alpha_1, \alpha_2) = x_1 + x_2 + x_3 = 0$$

$$(\alpha_1, \alpha_3) = x_1 + x_2 + x_3 = 0$$

即 α_2, α_3 , 应满足方程 $x_1 + x_2 + x_3 = 0$ 基础解系为

$$\xi_1 = (1, 0, -1), \xi_2 = (0, 1, -1).$$

把基础解系正交化 (以保证 $\alpha_2 \perp \alpha_3$ 成立)

$$\alpha_2 = (1, 0, -1), \alpha_3 = \frac{1}{2}(-1, 2, -1)$$

即为所求.

设 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 与 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 是欧氏空间 V 中的两组标准正交基, 它们之间的过渡矩阵 $A = (a_{ij})$, 即

$$(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

因为 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 是标准正交基, 所以

$$(\eta_i, \eta_j) = \begin{cases} 1, & \text{当 } i = j \\ 0, & \text{当 } i \neq j \end{cases}$$

矩阵 A 的各列就是 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ 在标准正交基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 下的坐标. 上式可以表示为

$$a_{1i}a_{1j} + a_{2i}a_{2j} + \cdots + a_{ni}a_{nj} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i = j \\ 0, & \text{当 } i \neq j \end{cases}$$

也就是说, 矩阵 A 的列向量组是 \mathbb{R}^n 的一组标准正交基.

相当于一个矩阵的等式

$$A'A = E$$

或者

$$A^{-1} = A'$$

我们引入：

定义

n 级实数矩阵 A 称为**正交矩阵**, 如果 $A'A = E$

因此, 以上分析表明,

- 由标准正交基到标准正交基的过渡矩阵是正交矩阵;
- 如果第一组基是标准正交基, 同时过渡矩阵是正交矩阵, 那么第二组基一定也是标准正交基.

注

根据逆矩阵的性质，由

$$A'A = E$$

即得

$$AA' = E$$

写出来就是 A 的各行满足

$$a_{i1}a_{j1} + a_{i2}a_{j2} + \cdots + a_{in}a_{jn} = \delta_{ij},$$

其中

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i = j \\ 0, & \text{当 } i \neq j \end{cases}$$

正交矩阵之等价定义

实矩阵 $A = (a_{ij})_{nn}$ 为正交矩阵

$$\Leftrightarrow A'A = E \Leftrightarrow \sum_{k=1}^n a_{ki}a_{kj} = \delta_{ij}$$

$\Leftrightarrow A$ 的列向量组是 \mathbb{R}^n 的一组标准正交基

$$\Leftrightarrow A^{-1} = A'$$

$$\Leftrightarrow AA' = E \Leftrightarrow \sum_{k=1}^n a_{ik}a_{jk} = \delta_{ij}$$

$\Leftrightarrow A$ 的行向量组是 \mathbb{R}^n 的一组标准正交基

正交矩阵之性质

- 如果 A 是正交矩阵, 则 $|A| = \pm 1$.
- 如果 A 是正交矩阵, 则 A', A^{-1}, A^*, A^k 均是正交矩阵.
- 如果 A, B 是 n 级正交矩阵, 则 AB 也是正交矩阵.

标准正交基的有关结果**总结**如下:

设 V 是 n 维欧氏空间, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 是 V 的一组标准正交基, 则

1) 标准正交基的度量矩阵是单位矩阵.

2) V 中任一元素 α 在基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 下的坐标为

$$((\alpha, \varepsilon_1), (\alpha, \varepsilon_2), \dots, (\alpha, \varepsilon_n))'.$$

3) 设 $\alpha, \beta \in V$, 且 α, β 在基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 下的坐标分别为

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)', \quad Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)'$$

则

$$(\alpha, \beta) = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n = X' Y.$$

4) 由标准正交基到标准正交基的过渡矩阵是正交矩阵. 又若两组基之间的过渡矩阵是正交矩阵, 且其中一组基是标准正交基, 则另一组基也是标准正交基.

§3 欧氏空间的同构

我们来建立欧氏空间同构的概念.

定义

实数域 \mathbb{R} 上欧氏空间 V_1 与 V_2 称为同构的, 如果由 V_1 到 V_2 有一个双射 σ , 满足

- ① $\sigma(\alpha + \beta) = \sigma(\alpha) + \sigma(\beta)$
- ② $\sigma(k\alpha) = k\sigma(\alpha)$
- ③ $(\sigma(\alpha), \sigma(\beta)) = (\alpha, \beta)$

这里 $\alpha, \beta \in V_1, k \in \mathbb{R}$, 这样的映射 σ 称为 V_1 到 V_2 的同构映射.

由定义可知, 如果 σ 是欧氏空间 V_1 到 V_2 的一个同构映射, 那么 σ 也是 V_1 到 V_2 作为线性空间的同构映射. 因此, 同构的欧氏空间必有相同的维数.

设 V 是一个 n 维欧氏空间, 在 V 中取一组标准正交基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$. 在这组基下, V 的每个向量 α 都可表成

$$\alpha = x_1\varepsilon_1 + x_2\varepsilon_2 + \dots + x_n\varepsilon_n$$

令

$$\sigma(a) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$$

这是 V 到 \mathbb{R}^n 的一个双射, 并且适合定义中条件 1), 2).

上一节可知, σ 也适合定义中条件 3).

因而 σ 是 V 到 \mathbb{R}^n 的一个同构映射.

由此可知, 每个 n 维的欧氏空间都与 \mathbb{R}^n 同构.

同构作为欧氏空间之间的关系具有反身性、对称性与传递性.

- 首先, 每个欧氏空间到自身的恒等映射显然是一同构映射. 这就是说, 同构关系是反身的.
- 其次, 设 σ 是 V_1 到 V_2 的一同构映射, 我们知道, 逆映射 σ^{-1} 也适合定义中 1) 与 2), 而且对于 $\alpha, \beta \in V_2$, 有

$$\begin{aligned}(\alpha, \beta) &= (\sigma(\sigma^{-1}(\alpha)), \sigma(\sigma^{-1}(\beta))) \\ &= (\sigma^{-1}(\alpha), \sigma^{-1}(\beta))\end{aligned}$$

这就是说, σ^{-1} 是 V_2 到 V_1 的一同构映射, 因而同构关系是对称的.

- 第三, 设 σ, τ 分别是 V_1 到 V_2 , V_2 到 V_3 的同构映射. 不难证明 $\tau\sigma$ 是 V_1 到 V_3 的同构映射, 因而同构关系是传递的.

既然每个 n 维欧氏空间都与 \mathbb{R}^n 同构, 按对称性与传递性即得, 任意两个 n 维欧氏空间都同构. 综上所述, 就有

定理 3

两个有限维欧氏空间同构 \iff 它们的维数相同.

这个定理说明, 抽象的观点看, 欧氏空间的结构完全被它的维数决定.

§4 正交变换

在解析几何中, 我们有正交变换的概念. 正交变换就是保持点之间的距离不变的变换.

在一般的欧氏空间中, 我们有

定义

欧氏空间 V 的线性变换 \mathcal{A} 称为**正交变换**, 如果它保持向量的内积不变, 即对于任意的 $\alpha, \beta \in V$ 都有

$$(\mathcal{A}\alpha, \mathcal{A}\beta) = (\alpha, \beta)$$

正交变换可以从几个不同的方面来加以刻画.

定理 4

设 \mathcal{A} 是 n 维欧氏空间 V 的一个线性变换, 于是下面四个命题是相互等价的:

- ① \mathcal{A} 是正交变换.
- ② \mathcal{A} 保持向量的长度不变, 即对于 $\alpha \in V$, $|\mathcal{A}\alpha| = |\alpha|$.
- ③ 如果 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 是标准正交基, 那么 $\mathcal{A}\varepsilon_1, \mathcal{A}\varepsilon_2, \dots, \mathcal{A}\varepsilon_n$ 也是标准正交基.
- ④ \mathcal{A} 在任一组标准正交基下的矩阵是正交矩阵.

因为正交矩阵是可逆的, 所以正交变换是可逆的.

由定义不难看出, 正交变换实际上就是一个欧氏空间到它自身的同构映射, 因而

性质

正交变换的乘积与正交变换的逆变换还是正交变换.

在标准正交基下, 正交变换与正交矩阵对应, 因此,

性质

正交矩阵的乘积与正交矩阵的逆矩阵也是正交矩阵.

如果 A 是正交矩阵, 那么由 $AA' = E$ 可知 $|A|^2 = 1$ 或者 $|A| = \pm 1$ 因此,

性质

正交变换的行列式等于 $+1$ 或者 -1 .

- 行列式等于 $+1$ 的正交变换通常称为旋转, 或者称为第一类的;
- 行列式等于 -1 的正交变换称为第二类的.

例如, 在欧氏空间中任取一组标准正交基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, 定义线性变换 \mathcal{A} 为:

$$\mathcal{A}\varepsilon_1 = -\varepsilon_1, \mathcal{A}\varepsilon_i = \varepsilon_i, i = 2, \dots, n$$

那么, \mathcal{A} 就是一个第二类的正交变换. 从几何上看, 这是一个镜面反射 (参看本章习题 15).

§5 正交子空间

我们来讨论欧氏空间中子空间的正交关系.

定义

- 设 V_1, V_2 是欧氏空间 V 中两个子空间. 如果对于任意的 $\alpha \in V_1, \beta \in V_2$, 恒有

$$(\alpha, \beta) = 0$$

则称 V_1, V_2 为**正交**的, 记为 $V_1 \perp V_2$.

- 一个向量 α , 如果对于任意的 $\beta \in V_1$, 恒有

$$(\alpha, \beta) = 0$$

则称 α 与子空间 V_1 **正交**, 记为 $\alpha \perp V_1$.

注

- 因为只有零向量与它自身正交, 所以由 $V_1 \perp V_2$ 可知 $V_1 \cap V_2 = \{\mathbf{0}\}$;
- 由 $\alpha \perp V_1, \alpha \in V_1$ 可知 $\alpha = \mathbf{0}$.

关于正交的子空间, 我们有:

定理 5

如果子空间 V_1, V_2, \dots, V_s 两两正交, 那么和 $V_1 + V_2 + \dots + V_s$ 是直和.

证明 设 $\alpha_i \in V_i, i = 1, 2, \dots, s$, 且

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_s = \mathbf{0}$$

我们来证明 $\alpha_i = \mathbf{0}$. 事实上, 用 α_i 与等式两边作内积, 利用正交性, 得

$$(\alpha_i, \alpha_i) = 0$$

从而 $\alpha_i = \mathbf{0} (i = 1, 2, \dots, s)$. 这就是说, 和 $V_1 + V_2 + \dots + V_s$ 是直和. ■

定义

子空间 V_2 称为子空间 V_1 的一个正交补, 如果 $V_1 \perp V_2$, 并且 $V_1 + V_2 = V$

注

如果 V_2 是 V_1 的正交补, 那么 V_1 也是 V_2 的正交补.

定理 6

n 维欧氏空间 V 的每一个子空间 V_1 都有唯一的正交补.

证明

- 如果 $V_1 = \{0\}$, 那么它的正交补就是 V , 唯一性是显然的.
- 设 $V_1 \neq \{0\}$. 先证明存在性.

欧氏空间的子空间在所定义的内积之下也是一个欧氏空间.

在 V_1 中取一组正交基 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$, 由定理 1, 它可以补充成 V 的一组正交基

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m, \varepsilon_{m+1}, \dots, \varepsilon_n.$$

子空间 $L(\varepsilon_{m+1}, \dots, \varepsilon_n)$ 就是 V_1 的正交补.

再来证唯一性. 设 V_2, V_3 都是 V_1 的正交补, 于是

$$V = V_1 \oplus V_2,$$

$$V = V_1 \oplus V_3.$$

令 $\alpha \in V_2$, 由第二式即有

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_3$$

其中 $\alpha_1 \in V_1, \alpha_3 \in V_3$. 因为 $\alpha \perp \alpha_1$ 所以

$$\begin{aligned}(\alpha, \alpha_1) &= (\alpha_1 + \alpha_3, \alpha_1) = (\alpha_1, \alpha_1) + (\alpha_3, \alpha_1) \\ &= (\alpha_1, \alpha_1) = 0\end{aligned}$$

即 $\alpha_1 = \mathbf{0}$. 由此得知 $\alpha \in V_3$, 即 $V_2 \subset V_3$.

同理可证 $V_3 \subset V_2$. 因此 $V_2 = V_3$, 唯一性得证. ■

注

- V_1 的正交补记为 V_1^\perp .
- 由定义可知

$$\dim(V_1) + \dim(V_1^\perp) = n$$

- V_1^\perp 恰由所有与 V_1 正交的向量组成.
- 由分解式

$$V = V_1 \oplus V_1^\perp$$

可知, V 中任一向量 α 都可以唯一地分解成

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

其中 $\alpha_1 \in V_1, \alpha_2 \in V_1^\perp$.

我们称 α_1 为向量 α 在子空间 V_1 上的内射影.

§6 实对称矩阵的标准形

- 在第五章我们得到, 任意一个对称矩阵都合同于一个对角矩阵, 换句话说, 都有一个可逆矩阵 C 使 $C'AC$ 成对角形. 现在利用欧氏空间的理论, 第五章中关于实对称矩阵的结果可以加强.
- 这一节的主要结果: 对于任意一个 n 级实对称矩阵 A , 都存在一个 n 级正交矩 T , 使

$$T'AT = T^{-1}AT$$

成对角形.

- 先讨论对称矩阵的一些性质, 它们本身在今后也是非常有用的. 我们把它们归纳成下面几个引理.

引理 1

设 A 是实对称矩阵, 则 A 的特征值皆为实数.

证明 设 λ_0 是 A 的特征值, 于是有非零向量 $\xi = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$ 满足 $A\xi = \lambda_0\xi$, 令 $\bar{\xi} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)'$ 其中 \bar{x}_i 是 x_i 的共轭复数, 则 $\overline{A\xi} = \bar{\lambda}_0\bar{\xi}$ 考察等式

$$\bar{\xi}'(A\xi) = \bar{\xi}'A'\xi = (A\bar{\xi})'\xi = (\overline{A\xi})'\xi$$

其左边为 $\lambda_0\bar{\xi}'\xi$, 右边为 $\bar{\lambda}_0\bar{\xi}'\xi$. 故

$$\lambda_0\bar{\xi}'\xi = \bar{\lambda}_0\bar{\xi}'\xi$$

又因 ξ 是非零向量,

$$\bar{\xi}'\xi = \bar{x}_1x_1 + \bar{x}_2x_2 + \cdots + \bar{x}_nx_n \neq 0$$

故 $\lambda_0 = \bar{\lambda}_0$, 即 λ_0 是一个实数.

对应于实对称矩阵 A ，在 n 维欧氏空间 \mathbb{R}^n 上定义一个线性变换 \mathcal{A} 如下：

$$\mathcal{A} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

于是， \mathcal{A} 在标准正交基

$$\varepsilon_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \varepsilon_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \cdots, \varepsilon_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

下的矩阵就是 A .

引理 2

设 A 是实对称矩阵, \mathcal{A} 的定义如上, 则对任意 $\alpha, \beta \in \mathbb{R}^n$, 有

$$(\mathcal{A}\alpha, \beta) = (\alpha, \mathcal{A}\beta) \quad (2)$$

或

$$\beta'(A\alpha) = \alpha'A\beta$$

证明 只要证明后一等式就行了. 实际上

$$\beta'(A\alpha) = \beta'A'\alpha = (A\beta)'\alpha = \alpha'(A\beta).$$

等式(2)把实对称矩阵的特性反映到线性变换上. 我们引入

定义

欧氏空间中满足等式 $(\mathcal{A}\alpha, \beta) = (\alpha, \mathcal{A}\beta)$ 的线性变换称为**对称变换**.

对称变换在标准正交基下的矩阵是实对称矩阵.

用对称变换来反映实对称矩阵, 一些性质可以看得更清楚.

引理 3

设 \mathcal{A} 是对称变换, V_1 是 \mathcal{A} -子空间, 则 V_1^\perp 也是 \mathcal{A} -子空间.

证明 设 $\alpha \in V_1^\perp$, 要证 $\mathcal{A}\alpha \in V_1^\perp$, 即 $\mathcal{A}\alpha \perp V_1$. 任取 $\beta \in V_1$, 都有 $\mathcal{A}\beta \in V_1$. 因 $\alpha \perp V_1$, 故 $(\alpha, \mathcal{A}\beta) = 0$ 因此

$$(\mathcal{A}\alpha, \beta) = (\alpha, \mathcal{A}\beta) = 0$$

即 $\mathcal{A}\alpha \perp V_1, \mathcal{A}\alpha \in V_1^\perp, V_1^\perp$ 也是 \mathcal{A} -子空间. ■

引理 4

设 A 是实对称矩阵, 则 \mathbb{R}^n 中属于 A 的不同特征值的特征向量必正交.

证明 设 λ, μ 是矩阵 A 的两个不同的特征值, α, β 分别是属于 λ, μ 的特征向量 $A\alpha = \lambda\alpha, A\beta = \mu\beta$. 定义 \mathbb{R}^n 上的线性变换 \mathcal{A} 如下:

$$\mathcal{A}X = AX,$$

其中 $X \in \mathbb{R}^n$. 于是, $\mathcal{A}\alpha = \lambda\alpha, \mathcal{A}\beta = \mu\beta$. 由 $(\mathcal{A}\alpha, \beta) = (\alpha, \mathcal{A}\beta)$, 有

$$\lambda(\alpha, \beta) = \mu(\alpha, \beta).$$

因为 $\lambda \neq \mu$, 所以 $(\alpha, \beta) = 0$, 即 α, β 正交. ■

现在来证明主要定理.

定理 7

对于任意一个 n 级实对称矩阵 A , 都存在一个 n 级正交矩阵 T , 使 $T'AT = T^{-1}AT$ 成对角形.

证明 由于实对称矩阵和对称变换的关系, 只要证明对称变换 \mathcal{A} 有 n 个特征向量做成标准正交基就行了. 我们对空间的维数 n 作归纳法.

- $n = 1$, 显然定理的结论成立.
- 设 $n - 1$ 时定理的结论成立.
- 对 n 维欧氏空间 \mathbb{R}^n , 线性变换 \mathcal{A} 有一特征向量 α_1 , 其特征值为实数 λ_1 . 把 α_1 单位化, 还用 α_1 代表它. 作 $L(\alpha_1)$ 的正交补, 设为 V_1 .

由引理 3, V_1 是 \mathcal{A} 的不变子空间, 其维数为 $n - 1$.

因为

$$(\mathcal{A}|_{V_1}\alpha, \beta) = (\mathcal{A}\alpha, \beta) = (\alpha, \mathcal{A}\beta) = (\alpha, \mathcal{A}|_{V_1}\beta),$$

其中 $\alpha, \beta \in V_1$, 所以 $\mathcal{A}|_{V_1}$ 仍是对称变换.

据归纳法假设, $\mathcal{A}|_{V_1}$ 有 $n - 1$ 个特征向量 $\alpha_2, \dots, \alpha_n$ 作成 V_1 的标准正交基. 从而由引理 4, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 是 \mathbb{R}^n 的标准正交基, 又是 \mathcal{A} 有 n 个特征向量. 定理得证. ■

- 下面来看看在给定了一个实对称矩阵 \mathcal{A} 之后, 按什么办法求正交矩阵 T 使 $T'AT$ 成对角形.
- 在定理的证明中我们看到, 矩阵 A 在 \mathbb{R}^n 中定义了一个线性变换.
- 求正交矩阵 T 的问题就相当于在 \mathbb{R}^n 中求一组由 A 的特征向量构成的标准正交基.

事实上, 设

$$\eta_1 = \begin{pmatrix} t_{11} \\ t_{21} \\ \vdots \\ t_{n1} \end{pmatrix}, \eta_2 = \begin{pmatrix} t_{12} \\ t_{22} \\ \vdots \\ t_{n2} \end{pmatrix}, \cdots, \eta_n = \begin{pmatrix} t_{1n} \\ t_{2n} \\ \vdots \\ t_{nn} \end{pmatrix}$$

是 \mathbb{R}^n 的一组标准正交基, 它们都是 A 的特征向量. 显然, 由 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_n$ 到 $\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_n$ 的过渡矩阵就是

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & t_{nn} \end{pmatrix}$$

T 是一个正交矩阵, 而

$$T^{-1}AT = T'AT$$

就是对角形.

正交矩阵 T 的求法可以按以下步骤进行:

- ① 求出 A 的**特征值**. 设 $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ 是 A 的全部不同的特征值.
- ② 求出每个 λ_i 对应的**特征向量**. 解齐次线性方程组 $(\lambda_i E - A)X = 0$ 求出一个基础解系, 这就是 A 的特征子空间 V_{λ_i} 的一组基.
- ③ 由这组基出发, 按定理 2 的方法 (**施密特正交化**、单位化) 求出 V_{λ_i} 的一组标准正交基 $\eta_{i1}, \dots, \eta_{ik}$.

因为 $\lambda_1, \dots, \lambda_r$ 两两不同, 所以根据这一节引理 4, 向量组

$$\eta_{11}, \dots, \eta_{1k_1}, \dots, \eta_{r1}, \dots, \eta_{rk_r}$$

还是两两正交的. 又根据定理 7 以及第七章 §5 的讨论, 它们的个数就等于空间的维数.

因此, 它们就构成 \mathbb{R}^n 的一组**标准正交基**, 并且也都是 A 的特征向量. 这样, 正交矩阵 T 也就求出了.

例 1

求正交矩阵 U , 使 $U^T A U$ 成对角形, 其中 $A = \begin{pmatrix} 2 & -2 & 0 \\ -2 & 1 & -2 \\ 0 & -2 & 0 \end{pmatrix}$

例 1

求正交矩阵 U , 使 $U^T A U$ 成对角形, 其中 $A = \begin{pmatrix} 2 & -2 & 0 \\ -2 & 1 & -2 \\ 0 & -2 & 0 \end{pmatrix}$

解 因为 A 的特征多项式 $|\lambda E - A| = (\lambda - 1)(\lambda - 4)(\lambda + 2)$,
所以 A 的特征值为 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 4, \lambda_3 = -2$.

解线性方程组, 求得对应的特征向量为

$$\alpha_1 = (-2, -1, 2)^T, \alpha_2 = (2, -2, 1)^T, \alpha_3 = (1, 2, 2)^T$$

它们是两两正交的向量组 (因为特征值互不相同).

将它们单位化, 可得

$$\eta_1 = (-2/3, -1/3, 2/3)^T, \eta_2 = (2/3, -2/3, 1/3)^T, \eta_3 = (1/3, 2/3, 2/3)^T$$

故得正交矩阵

$$U = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -2 & 2 & 1 \\ -1 & -2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

使得 $U^T A U = \text{diag}(1, 4, -2)$. ■

例 2

求正交矩阵 U , 使 $U^T A U$ 成对角形, 其中

$$\begin{pmatrix} 2 & 2 & -2 \\ 2 & 5 & -4 \\ -2 & -4 & 5 \end{pmatrix}$$

例 2

求正交矩阵 U , 使 $U^T A U$ 成对角形, 其中

$$\begin{pmatrix} 2 & 2 & -2 \\ 2 & 5 & -4 \\ -2 & -4 & 5 \end{pmatrix}$$

解 因为

$$|\lambda E - A| = \begin{vmatrix} \lambda - 2 & -2 & 2 \\ -2 & \lambda - 5 & 4 \\ 2 & 4 & \lambda - 5 \end{vmatrix} = (\lambda - 1)^2(\lambda - 10)$$

所以 A 的特征值为 $\lambda_1 = 10, \lambda_2 = \lambda_3 = 1$.

- 对 $\lambda_1 = 10$, 求解齐次线性方程组

$$\begin{cases} 8x_1 - 2x_2 + 2x_3 = 0 \\ -2x_1 + 5x_2 + 4x_3 = 0 \\ 2x_1 + 4x_2 + 5x_3 = 0 \end{cases}$$

得一个特征向量 $\alpha_1 = (1, 2, -2)^T$. 单位化, 得 $\gamma_1 = \frac{1}{3}(1, 2, -2)^T$.

- 对于 $\lambda_2 = \lambda_3 = 1$, 求解齐次线性方程组

$$\begin{cases} -x_1 - 2x_2 + 2x_3 = 0 \\ -2x_1 - 4x_2 + 4x_3 = 0 \\ 2x_1 + 4x_2 - 4x_3 = 0 \end{cases}$$

得一个基础解系 $\alpha_2 = (2, -1, 0)^T, \alpha_3 = (2, 0, 1)^T$, 它们就是属于特征值 1 的线性无关的特征向量.

将它们正交化:

$$\beta_2 = \alpha_2 = (2, -1, 0)^T$$

$$\beta_3 = \alpha_3 - \frac{(\alpha_3, \beta_2)}{(\beta_2, \beta_2)} \beta_1 = \alpha_3 - \frac{4}{5} \beta_2 = \frac{1}{5}(2, 4, 5)^T$$

再单位化:

$$\gamma_2 = \frac{\sqrt{5}}{5}(2, -1, 0)^T,$$

$$\gamma_3 = \frac{\sqrt{5}}{15}(2, 4, 5)^T.$$

因此, 以 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 作为列构造矩阵 U , 就得到正交矩阵

$$U = \begin{pmatrix} -1/3 & -2\sqrt{5}/5 & 2\sqrt{5}/15 \\ -2/3 & \sqrt{5}/5 & 4\sqrt{5}/15 \\ 2/3 & 0 & \sqrt{5}/3 \end{pmatrix}$$

使得 $U^T A U = \text{diag}(10, 1, 1)$.



如果线性替换

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

的矩阵 $C = (c_{ij})$ 是正交的, 那么它就称为正交的线性替换. 正交的线性替换当然是非退化的.

用二次型的语言, 定理 7 可以叙述为:

定理 8

任意一个实二次型

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}x_i x_j, \quad a_{ij} = a_{ji}$$

都可以经过正交的线性替换变成平方和

$$\lambda_1 y_1^2 + \lambda_2 y_2^2 + \cdots + \lambda_n y_n^2$$

其中平方项的系数 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ 就是矩阵 A 的特征多项式全部的根.

例 3

用正交线性替换化下列二次型为标准形: $x_1^2 + 2x_2^2 + 3x_3^2 - 4x_1x_2 - 4x_2x_3$.

解 写出二次型的矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 \\ -2 & 2 & -2 \\ 0 & -2 & 3 \end{pmatrix}$$

解特征方程 $|\lambda E - A| = (\lambda - 2)(\lambda + 1)(\lambda - 5) = 0$,

求得 A 的特征值 $\lambda_1 = 2, \lambda_2 = -1, \lambda_3 = 5$.

解线性方程组, 求得对应的特征向量为

$$\alpha_1 = (2, -1, 2)^T, \alpha_2 = (2, 2, 1)^T, \alpha_3 = (1, -2, 2)^T$$

它们是两两正交的向量组 (因为特征值互不相同).

将它们单位化, 可得

$$\eta_1 = (2/3, -1/3, 2/3)^T, \eta_2 = (2/3, 2/3, 1/3)^T, \eta_3 = (1/3, -2/3, 2/3)^T$$

令

$$X = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & 2 & 1 \\ -1 & 2 & -2 \\ -2 & 1 & 2 \end{pmatrix} Y$$

则它是一个正交线性替换, 且将二次型化为 $2y_1^2 - y_2^2 + 5y_3^2$. ■

例 1

设 $A = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}$.

(1) 求 A 的特征值和对应的特征向量.

(2) 求正交阵 Q , 使得 $Q^T A Q$ 是对角阵.

例 2

用正交线性替换化实二次型为标准形

$$f(x_1, x_2, x_3) = 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2 - 2x_1x_2 - 2x_1x_3 - 2x_2x_3.$$

例 3

设 $1, 1, -3$ 是 3 阶实对称矩阵 A 的特征值, $(1, -1, 0)'$ 是 A 属于 -3 的特征向量, 求 A .

例 4

设 A, B 都是 n 阶实对称阵, 证明: 存在正交阵 Q , 使得 $Q^{-1}AQ = B$ 当且仅当 A, B 有相同的特征值.

证明 必要性. 因为存在正交阵 Q , 使得 $Q^{-1}AQ = B$, 所以

$$|\lambda E - B| = |\lambda E - Q^{-1}AQ| = |Q^{-1}||\lambda E - A||Q| = |\lambda E - A|.$$

因此, A, B 有相同的特征值.

充分性. 设 n 阶实对称矩阵 A, B 的特征多项式的根都是 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 则存在正交矩阵 U_1, U_2 , 使得

$$U_1'AU_1 = U_2'BU_2 = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

令 $U = U_1U_2'$, 则 $U'AU = B$, 且 U 是一个正交矩阵. ■