

# 线性映射

颜文斌  
清华大学

# 内容提要

- 线性映射和矩阵
- 线性映射的性质
- 换基
- 若当标准型
- 对偶空间与直和、直积
- 张量

# 映射 (mapping)

- **映射**： $S, S'$ 是两个集合，如果对于任意 $S$ 中的元素，都有一个 $S'$ 中的元素和它对应，这个对应就叫一个映射
- $S$ 叫做**定义域**， $S'$ 叫做**陪域**
- 如果我们把一个映射记做 $f: S \rightarrow S'$ 。 $u$ 是 $S$ 中的一个元素， $f(u)$ 叫做 $u$ 在映射 $f$ 下的**像** (image)。  $W$ 是 $S$ 中的一个子集， $f(W)$ 叫做 $W$ 在映射 $f$ 下的**像**。 $f(S)$ 叫做**值域**
- 映射的**复合** (composition) :  $f: U \rightarrow V, g: V \rightarrow W$ 。  
$$g \circ f: U \rightarrow W, \forall x \in U, \quad g \circ f(x) = g(f(x))$$
- 映射的复合满足**结合律** :  $g \circ f \circ h = (g \circ f) \circ h = g \circ (f \circ h)$

# 映射

- **原像**：映射  $F: S \rightarrow S'$ ， $y$  的原像  $F^{-1}(y)$  是集合  $\{x \in S \mid F(x) = y\}$
- **单射 (injection)**：映射  $F: S \rightarrow S'$  是单射，如果  $\forall x, y \in S, x \neq y, \text{ s. t. } F(x) \neq F(y)$
- **满射 (surjection)**：映射  $F: S \rightarrow S'$  是满射，如果  $F(S) = S'$
- **双射 (bijection)**：既是单射也是满射的映射
- **恒等映射 (identity map)**：  $I_S: S \rightarrow S, \text{ s. t. } \forall x \in S, I_S(x) = x$
- **逆映射 (inverse map)**：对于映射  $F: S \rightarrow S'$  如果存在一个映射  $G: S' \rightarrow S$  使得  $G \circ F = I_S$  和  $F \circ G = I_{S'}$ ，则称映射  $F: S \rightarrow S'$  **可逆**， $G$  被称作  $F$  的**逆**

# 可逆映射的性质

- **定理**：映射  $f: S \rightarrow S'$  可逆当且仅当  $f$  是双射
- **证明**：
  - 首先假设  $x, y \in S$ ,  $g: S' \rightarrow S$  是  $f$  的逆
  - 如果  $f(x) = f(y)$ , 则  $x = g(f(x)) = g(f(y)) = y$ , 所以  $f$  是单射
  - $\forall z \in S'$ , 我们有  $f(g(z)) = z$ , 所以  $\exists x = g(z)$ , s.t.  $f(x) = z$ , 所以  $f$  是满射。这样我们就从左边推出了右边
  - 接下来假设  $f: S \rightarrow S'$  是双射, 那么因为  $f$  是满射  $\forall z \in S'$ , 我们有  $x \in S$ , s.t.  $f(x) = z$ 。又因为  $f$  是单射, 所以  $x$  是唯一的。所以可以定义  $g(z) = x$ , 则  $g$  是  $f$  的逆映射。这样我们就从右边推出了左边

# 线性映射 (linear mapping)

- **定义 (线性映射)** :  $V, W$  是两个 (实) 线性空间, 映射  $T: V \rightarrow W$  是 (实) 线性映射, 如果  $T$  满足以下两个条件
  1. 对于任意的  $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in V$ , 有  $T(\mathbf{u} + \mathbf{v}) = T(\mathbf{u}) + T(\mathbf{v})$
  2. 对于任意的实数  $c$ , 有  $T(c\mathbf{u}) = cT(\mathbf{u})$
- 线性映射也被称为**线性变换** (linear transformation)
- **推论** :  $T: V \rightarrow W$  是线性映射, 则  $T(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$

# 线性映射例

- 例1： $\mathbf{a} = (1, 2, 3)$ ,  $\mathbf{v} = (x, y, z)$ 。映射 $T(\mathbf{v}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}$ 是从 $\mathbb{R}^3$ 到 $\mathbb{R}$ 的线性映射
- 例2： $T(\mathbf{v}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{v} + b$ 不是线性的，因为0没有映到0
- 例3： $T(\mathbf{v}) = \|\mathbf{v}\|$ 不是线性的，因为 $\|\mathbf{v} + \mathbf{w}\| \leq \|\mathbf{v}\| + \|\mathbf{w}\|$ ，而且 $\|-\mathbf{v}\| = \|\mathbf{v}\|$
- 例4：假设 $T(\mathbf{v})$ 是线性映射， $c_1\mathbf{v}_1 + c_2\mathbf{v}_2 + \cdots + c_r\mathbf{v}_r = \mathbf{0}$ ，则 $T(c_1\mathbf{v}_1 + c_2\mathbf{v}_2 + \cdots + c_r\mathbf{v}_r) = c_1T(\mathbf{v}_1) + \cdots + c_rT(\mathbf{v}_r) = \mathbf{0}$

# 线性映射例

- 例5：考虑所有可导函数 $f(x)$ 构成的线性空间，映射 $T(f) = \frac{df}{dx}$ 是线性的

$$\bullet \frac{d}{dx}(af(x) + bg(x)) = a \frac{df(x)}{dx} + b \frac{dg(x)}{dx}$$

- 例6（恒等映射）： $\text{id}: V \rightarrow V, \text{id}(\mathbf{u}) = \mathbf{u}$
- 例7（零映射）： $\forall \mathbf{u} \in V, T(\mathbf{u}) = 0$
- 例8：考虑 $m \times n$ 的矩阵 $A$ ，定义线性映射 $L_A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ，使得 $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, L_A(\mathbf{x}) = A\mathbf{x}$

# 怎么决定线性映射？

- **定理**： $V$ 和 $W$ 是线性空间， $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 是 $V$ 中的一组基， $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n\}$ 是 $W$ 中的任意 $n$ 个元素。则存在唯一的线性映射 $T: V \rightarrow W$ 使得

$$T(\mathbf{v}_1) = \mathbf{w}_1, \dots, T(\mathbf{v}_n) = \mathbf{w}_n$$

- **证明（存在性）**：

- $\forall \mathbf{v} \in V$ ,  $\mathbf{v}$ 可以唯一写成 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 的线性组合 $\mathbf{v} = c_1\mathbf{v}_1 + \dots + c_n\mathbf{v}_n$
- 定义映射 $T(\mathbf{v}) = c_1\mathbf{w}_1 + \dots + c_n\mathbf{w}_n$ , 下面证明 $T(\mathbf{v})$ 是线性映射
- $T(c\mathbf{v}) = T(cc_1\mathbf{v}_1 + \dots + cc_n\mathbf{v}_n) = cc_1\mathbf{w}_1 + \dots + cc_n\mathbf{w}_n = cT(\mathbf{v})$
- 假设 $\mathbf{u} = x_1\mathbf{v}_1 + \dots + x_n\mathbf{v}_n$ ,  $T(\mathbf{v} + \mathbf{u}) = T((c_1+x_1)\mathbf{v}_1 + \dots + (c_n+x_n)\mathbf{v}_n) = (c_1+x_1)\mathbf{w}_1 + \dots + (c_n+x_n)\mathbf{w}_n = T(\mathbf{v}) + T(\mathbf{u})$

# 怎么决定线性映射？

- **定理**： $V$ 和 $W$ 是线性空间， $\{\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n\}$ 是 $V$ 中的一组基， $\{\boldsymbol{w}_1, \dots, \boldsymbol{w}_n\}$ 是 $W$ 中的任意 $n$ 个元素。则存在唯一的线性映射 $T: V \rightarrow W$ 使得

$$T(\boldsymbol{v}_1) = \boldsymbol{w}_1, \dots, T(\boldsymbol{v}_n) = \boldsymbol{w}_n$$

- **证明（唯一性）**：

- 假设存在另一个线性映射 $F: V \rightarrow W$ 使得 $F(\boldsymbol{v}_1) = \boldsymbol{w}_1, \dots, F(\boldsymbol{v}_n) = \boldsymbol{w}_n$
- $\forall \boldsymbol{v} \in V$ ,  $\boldsymbol{v}$ 可以唯一写成 $\{\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n\}$ 的线性组合 $\boldsymbol{v} = c_1\boldsymbol{v}_1 + \dots + c_n\boldsymbol{v}_n$
- $F(\boldsymbol{v}) = c_1F(\boldsymbol{v}_1) + \dots + c_nF(\boldsymbol{v}_n) = c_1\boldsymbol{w}_1 + \dots + c_n\boldsymbol{w}_n = c_1T(\boldsymbol{v}_1) + \dots + c_nT(\boldsymbol{v}_n) = T(\boldsymbol{v})$

# 怎么决定线性映射？

- **定理**： $V$ 和 $W$ 是线性空间， $\{v_1, \dots, v_n\}$ 是 $V$ 中的一组基， $\{w_1, \dots, w_n\}$ 是 $W$ 中的任意 $n$ 个元素。则存在唯一的线性映射 $T: V \rightarrow W$ 使得

$$T(v_1) = w_1, \dots, T(v_n) = w_n$$

- 只要知道一个线性映射在基上的值，就唯一决定了整个线性映射

# 线性映射和表示矩阵

- 考虑 $m \times n$ 的矩阵，定义线性映射 $L_A: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ，使得 $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ， $L_A(\mathbf{x}) = A\mathbf{x}$
- 定理：  $m \times n$ 矩阵 $A$ 、 $B$ ，如果 $L_A = L_B$ ，则 $A = B$
- 证明：
  - 根据 $L_A, L_B$ 定义可知 $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ， $A\mathbf{x} = B\mathbf{x}$ ，所以 $(A - B)\mathbf{x} = 0$ ，也就是说 $N(A - B) = \mathbb{R}^n$
  - 又由矩阵子空间的维度关系可知 $\text{rank}(A - B) = 0$ ，所以 $A - B = 0$ ，也就是说 $A = B$

# 线性映射和表示矩阵（标准基版本）

- **定理**：设  $L: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  是线性映射，则存在唯一的矩阵  $A$  使得  $L = L_A$
- **证明**：
  - 假设  $\{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n\}$  是  $\mathbb{R}^n$  中的标准基， $\{\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_m\}$  是  $\mathbb{R}^m$  中的标准基，任何  $\mathbb{R}^n$  中的向量  $\mathbf{x} = x_1\mathbf{e}_1 + \dots + x_n\mathbf{e}_n = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$
  - $L(\mathbf{x}) = x_1L(\mathbf{e}_1) + \dots + x_nL(\mathbf{e}_n)$
  - 因为  $L(\mathbf{e}_i)$  是  $\mathbb{R}^m$  中的向量，所以可以写成  $\{\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_m\}$  的线性组合，也就是说  $L(\mathbf{e}_i) = a_{1i}\mathbf{f}_1 + \dots + a_{mi}\mathbf{f}_m$

# 线性映射和矩阵（标准基版本）

- **定理**：设  $L: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  是线性映射，则存在唯一的矩阵  $A$  使得  $L = L_A$
- **证明（续）**：
  - 因为  $L(\mathbf{e}_i)$  是  $\mathbb{R}^m$  中的向量，所以可以写成  $\{\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_m\}$  的线性组合，也就是说  $L(\mathbf{e}_i) = a_{1i}\mathbf{f}_1 + \dots + a_{mi}\mathbf{f}_m$
  - $L(\mathbf{x}) = x_1L(\mathbf{e}_1) + \dots + x_nL(\mathbf{e}_n) = x_1(a_{11}\mathbf{f}_1 + \dots + a_{m1}\mathbf{f}_m) + \dots + x_n(a_{1n}\mathbf{f}_1 + \dots + a_{mn}\mathbf{f}_m) = (a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n)\mathbf{f}_1 + \dots + (a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n)\mathbf{f}_m = \begin{bmatrix} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n \end{bmatrix}$
  - $L(\mathbf{x}) = A\mathbf{x} = L_A(\mathbf{x})$ 。我们证明了存在性，唯一性由之前定理保证

# 线性映射和矩阵（标准基版本）

• **定理**：设  $L: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  是线性映射，则存在唯一的矩阵  $A$  使得  $L = L_A$

• **说明**：  $L \left( \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \right) = A\mathbf{x} = \begin{bmatrix} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \cdots + a_{mn}x_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^m$ ，给出了矩阵和向量乘法的自然定义

# 例

- 例1:  $F(x, y, z) = (x, y)$ , 对应的矩阵为  $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
- 例2:  $\text{id}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ , 对应的矩阵为单位矩阵  $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

# 内容提要

- 线性映射和矩阵
- **线性映射的性质**
- 换基
- 若当标准型
- 对偶空间与直和、直积
- 张量

# 线性映射的加法

- $T: V \rightarrow W$ ,  $F: V \rightarrow W$  为两个线性映射, 我们定义这两个线性映射的和为一个新的线性映射  $H = T + F: V \rightarrow W$ , 满足  $\forall \mathbf{u} \in V$ ,  
 $(T + F)(\mathbf{u}) = T(\mathbf{u}) + F(\mathbf{u})$
- $T + F$  也是一个线性映射
- 例:  $L_A(\mathbf{x}) = A\mathbf{x}$ ,  $L_B(\mathbf{x}) = B\mathbf{x}$ 
  - $(L_A + L_B)(\mathbf{x}) = A\mathbf{x} + B\mathbf{x} = (A + B)\mathbf{x} = L_{A+B}(\mathbf{x})$
- 利用线性映射和矩阵的对应, 线性映射的加法等价于矩阵的加法
- 加法的零元: 零映射  $\forall \mathbf{u} \in V, T(\mathbf{u}) = 0$
- 加法的逆:  $(-T)(\mathbf{u}) = -T(\mathbf{u})$ ,  $(-T) + T$  是零映射

# 线性映射的数乘

- $T: V \rightarrow W$  为线性映射，我们定义这线性映射和  $c$  的**数乘**为一个新的线性映射  $F = cT: V \rightarrow W$ ，满足  $\forall \mathbf{u} \in V, (cT)(\mathbf{u}) = c(T(\mathbf{u}))$
- $cT$  也是一个线性映射
- 例： $L_A(\mathbf{x}) = A\mathbf{x}$ 
  - $(cL_A)(\mathbf{x}) = cA\mathbf{x} = L_{cA}(\mathbf{x})$
- 利用线性映射和矩阵的对应，线性映射的数乘等价于矩阵的数乘
- $1T = T, \quad -T = (-1)T$

# 线性映射构成线性空间

- **性质**：所有从  $V \rightarrow W$  的线性映射集合  $\{T\}$  构成一个线性空间
  - 加法和数乘按照之前的定义
  - 加法零元是零映射
  - 满足线性空间的所有8条公理（交换律、结合律、分配律等等）
- 和  $\dim W \times \dim V$  的矩阵构成的线性空间有一一对应

# 线性映射的核 (Kernel)

- **定义**：线性映射  $F: V \rightarrow W$  的核  $\text{Ker } F$  是所有满足  $F(\boldsymbol{v}) = \mathbf{0}$  的向量  $\boldsymbol{v}$  的集合
- **性质**：  $\text{Ker } F$  是  $V$  中的一个线性子空间
- **说明**：如果  $V = \mathbb{R}^n$ ，  $W = \mathbb{R}^m$ ， 矩阵  $A$  为  $F$  对应的矩阵， 则  $\text{Ker } F = N(A)$

# 核和单射

- 性质： $F: V \rightarrow W$ 是线性映射，以下两个条件是等价的
  1.  $\text{Ker } F$ 只有零向量
  2.  $F$ 是单射，换句话说，如果 $V$ 中的元素 $v, w$ 满足 $F(v) = F(w)$ ，则 $v = w$
- 证明：
  - (矩阵版本) 对应的矩阵零空间是 $0$ ， $Av = b$ 如果有解则必有唯一解。
  - (抽象版本) 假设 $V$ 中的元素 $v, w$ 满足 $F(v) = F(w)$ ，则 $F(v - w) = F(v) - F(w) = 0$
  - 因为假设， $\text{Ker } F$ 只有零向量，则 $v - w = 0$ ，所以 $v = w$

# 核的性质

- **定理**：  $F: V \rightarrow W$  是线性映射且  $\text{Ker } F = \{\mathbf{0}\}$ 。如果  $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$  是  $V$  中的线性无关向量，则  $F(\mathbf{v}_1), \dots, F(\mathbf{v}_n)$  是  $W$  中线性无关的向量
- **证明**：
  - (矩阵版本) 对应矩阵的零空间为  $\{\mathbf{0}\}$ ，所以列满秩，列之间线性无关
  - (抽象版本) 假设  $x_1 F(\mathbf{v}_1) + \dots + x_n F(\mathbf{v}_n) = \mathbf{0}$
  - 根据线性性，  $F(x_1 \mathbf{v}_1 + \dots + x_n \mathbf{v}_n) = \mathbf{0}$
  - 又因为  $\text{Ker } F = \{\mathbf{0}\}$ ，则  $x_1 \mathbf{v}_1 + \dots + x_n \mathbf{v}_n = \mathbf{0}$
  - $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$  是线性无关的，则  $x_1 = x_2 = \dots = x_n = 0$ ，所以  $F(\mathbf{v}_1), \dots, F(\mathbf{v}_n)$  线性无关

# 线性映射的像 (image)

- **定义**：线性映射  $F: V \rightarrow W$  的像  $\text{Im}F$  是  $W$  中所有在  $V$  中有原像的向量的集合 ( $\forall \mathbf{w} \in \text{Im}F, \exists \mathbf{v} \in V, s. t. F(\mathbf{v}) = \mathbf{w}$ )
- **性质**：  $\text{Im}F$  是  $W$  中的线性子空间
- **说明**：如果  $V = \mathbb{R}^n$ ,  $W = \mathbb{R}^m$ , 矩阵  $A$  为  $F$  对应的矩阵, 则  $\text{Im}F = C(A)$

# 像和核的关系

- **定理**： $V$ 是一个线性空间， $L: V \rightarrow W$ 是一个线性映射，则
$$\dim V = \dim \text{Ker } L + \dim \text{Im } L$$
- **证明**：
  - (矩阵版本)  $\dim V = \dim N(A) + \dim C(A^T) = \dim N(A) + \dim C(A)$
  - (抽象版本) 如果 $\text{Im } L = \{0\}$ ，则 $\text{Ker } L = V$ ，则定理成立
  - 否则假设 $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_s\}$ 是 $\text{Im } L$ 的一组基。设 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s\}$ 分别是 $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_s\}$ 的一个原像，也就是说 $L(\mathbf{v}_i) = \mathbf{w}_i, i = 1, \dots, s$
  - 另，如果 $\text{Ker } L \neq \{0\}$ ，假设 $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_q\}$ 是 $\text{Ker } L$ 的一组基
  - 如果我们能证明 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_q\}$ 是 $V$ 中的一组基，则定理得证

# 像和核的关系

- **定理**： $V$ 是一个线性空间， $L:V \rightarrow W$ 是一个线性映射，则
$$\dim V = \dim \text{Ker } L + \dim \text{Im } L$$
- **证明**：
  - 如果我们能证明 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_q\}$ 是 $V$ 中的一组基，则定理得证
  - 首先要证明任何一个 $V$ 中的向量可以写成 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_q\}$ 的线性组合
  - $\forall \mathbf{v} \in V, L(\mathbf{v}) \in \text{Im } L$ ，所以 $L(\mathbf{v}) = x_1 \mathbf{w}_1 + \dots + x_s \mathbf{w}_s$
  - 因为 $L(\mathbf{v}_i) = \mathbf{w}_i$ ，所以 $L(x_1 \mathbf{v}_1 + \dots + x_s \mathbf{v}_s) = x_1 \mathbf{w}_1 + \dots + x_s \mathbf{w}_s = L(\mathbf{v})$
  - 所以 $L(\mathbf{v}) - L(x_1 \mathbf{v}_1 + \dots + x_s \mathbf{v}_s) = L(\mathbf{v} - (x_1 \mathbf{v}_1 + \dots + x_s \mathbf{v}_s)) = 0$
  - $\mathbf{v} - (x_1 \mathbf{v}_1 + \dots + x_s \mathbf{v}_s) \in \text{Ker } L$ ，可以写成 $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_q\}$ 的线性组合
  - 所以 $\mathbf{v} - (x_1 \mathbf{v}_1 + \dots + x_s \mathbf{v}_s) = y_1 \mathbf{u}_1 + \dots + y_q \mathbf{u}_q$

# 像和核的关系

- **定理**： $V$ 是一个线性空间， $L: V \rightarrow W$ 是一个线性映射，则
$$\dim V = \dim \text{Ker } L + \dim \text{Im } L$$
- **证明**：
  - 如果我们能证明 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_q\}$ 是 $V$ 中的一组基，则定理得证
  - 接下来要证明 $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_s, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_q\}$ 线性无关
  - 假设 $(x_1\mathbf{v}_1 + \dots + x_s\mathbf{v}_s) + (y_1\mathbf{u}_1 + \dots + y_q\mathbf{u}_q) = \mathbf{0}$
  - $\mathbf{0} = L\left((x_1\mathbf{v}_1 + \dots + x_s\mathbf{v}_s) + (y_1\mathbf{u}_1 + \dots + y_q\mathbf{u}_q)\right) = L(x_1\mathbf{v}_1 + \dots + x_s\mathbf{v}_s) = x_1\mathbf{w}_1 + \dots + x_s\mathbf{w}_s$ ， $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_s\}$ 线性无关，所以 $x_i = 0$
  - 所以 $y_1\mathbf{u}_1 + \dots + y_q\mathbf{u}_q = \mathbf{0}$ ，又因为 $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_q\}$ 线性无关，所以 $y_i = 0$

# 例

- 线性映射  $L: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R} : L(x, y, z) = 3x - 2y + z$
- 对应的矩阵： $A = (3 \quad -2 \quad 1)$
- 像： $\mathbb{R}$ , 一维
- 核： $C\left(\begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\right)$ , 二维

# 例

- 线性映射  $\frac{d}{dx}: P^n \rightarrow P^{n-1}$  :  $P^n$  是最高次数不超过  $n$  的多项式构成的线性空间,  $\dim P^n = n + 1$
- 像 :  $P^{n-1}$ , 维度为  $n$
- 核 : 常数  $P^0$ , 维度为  $1$

# 双射的像和核

- **定理**：  $L: V \rightarrow W$  是一个线性映射，假设  $\dim V = \dim W$ 。如果  $\text{Ker } L = \{\mathbf{0}\}$ ，或者  $\text{Im } L = W$ ，则  $L$  是双射
- **证明**：
  - 假设  $\text{Im } L = W$ ，根据定义，  $L$  是满射
  - 又由前面的定理可知  $\dim \text{Ker } L = \dim V - \dim \text{Im } L = \dim W - \dim \text{Im } L = 0$ ，所以  $\text{Ker } L = \{\mathbf{0}\}$ 。由此可知  $L$  是单射
  - 所以  $L$  是双射
  - $\text{Ker } L = \{\mathbf{0}\}$  的证明类似

# 内容提要

- 线性映射和矩阵
- 线性映射的性质
- **换基**
- 若当标准型
- 对偶空间与直和、直积
- 张量

# 基和坐标向量

- 假设  $\mathcal{B} = \{\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n\}$  是线性空间  $V$  上的一组基
- 对于  $V$  中的任意向量  $\boldsymbol{v}$ ，我们有  $\boldsymbol{v} = x_1 \boldsymbol{v}_1 + \dots + x_n \boldsymbol{v}_n$
- **坐标向量**：  $x_{\mathcal{B}}(\boldsymbol{v}) = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$  被称作向量  $\boldsymbol{v}$  在基  $\mathcal{B}$  下的坐标向量
- 通过坐标向量和基  $\mathcal{B}$ ，我们有  $V$  和  $\mathbb{R}^n$  的线性映射
  - $\boldsymbol{v} \rightarrow \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$
  - 这个映射和基的选取有关，而且是个双射

# 换基时坐标向量的变换

- 假设  $B = \{\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n\}$  是线性空间  $V$  上的一组基
- 对于  $V$  中的任意向量  $\boldsymbol{v}$ , 我们有  $\boldsymbol{v} = x_1 \boldsymbol{v}_1 + \dots + x_n \boldsymbol{v}_n$
- 也可以选取线性空间  $V$  上的另一组基  $B' = \{\boldsymbol{u}_1, \dots, \boldsymbol{u}_n\}$ 
  - $\boldsymbol{v} = y_1 \boldsymbol{u}_1 + \dots + y_n \boldsymbol{u}_n$
- 向量  $\boldsymbol{v}$  在基的变化下保持**不变**
  - 基变换矩阵:  $(\boldsymbol{u}_1, \dots, \boldsymbol{u}_n) = (\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n)M$
  - $\boldsymbol{v} = (\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n)(x_1, \dots, x_n)^T = (\boldsymbol{u}_1, \dots, \boldsymbol{u}_n)(y_1, \dots, y_n)^T$
  - 可以推出:  $(x_1, \dots, x_n)^T = M(y_1, \dots, y_n)^T$ ,  $\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$

# 线性变换和矩阵

- $L: V \rightarrow W$  是一个线性映射,  $B = \{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$  是  $V$  上的一组基,  $B' = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$  是  $W$  上的一组基
- 对于  $V$  中的任意向量  $\mathbf{v}$ , 我们有  $\mathbf{v} = x_1 \mathbf{v}_1 + \dots + x_n \mathbf{v}_n$ 
  - $L(\mathbf{v}) = x_1 L(\mathbf{v}_1) + \dots + x_n L(\mathbf{v}_n)$
  - $L(\mathbf{v}_i)$  是  $W$  中的向量, 所以  $L(\mathbf{v}_i) = t_{1i} \mathbf{w}_1 + \dots + t_{mi} \mathbf{w}_m = ((\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m)T)_i$
  - $L(\mathbf{v}) = x_1(t_{11} \mathbf{w}_1 + \dots + t_{m1} \mathbf{w}_m) + \dots + x_n(t_{1n} \mathbf{w}_1 + \dots + t_{mn} \mathbf{w}_m) = (t_{11}x_1 + \dots + t_{1n}x_n) \mathbf{w}_1 + (t_{m1}x_1 + \dots + t_{mn}x_n) \mathbf{w}_m = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m)T(x_1, \dots, x_n)^T$
- $L(\mathbf{v})$  在  $B'$  上的坐标向量是  $T(x_1, \dots, x_n)^T$

# 一般线性变换的矩阵表示

- $L: V \rightarrow W$  是一个线性映射,  $B = \{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$  是  $V$  上的一组基,  $B' = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$  是  $W$  上的一组基
- **定理**: 存在唯一的  $m \times n$  矩阵  $M_{B'}^B(L)$ , 使得  $\forall \mathbf{v} \in V, x_{B'}(L(\mathbf{v})) = M_{B'}^B(L)x_B(\mathbf{v})$ 。  $x_B(\mathbf{v})$  是  $\mathbf{v}$  在  $B$  上的坐标向量,  $x_{B'}(L(\mathbf{v}))$  是  $L(\mathbf{v})$  在  $B'$  上的坐标向量
- 存在性
  - 假设  $(L(\mathbf{v}_1), \dots, L(\mathbf{v}_n)) = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m)T$
  - $\mathbf{w} = L(\mathbf{v}), \mathbf{v} = x_1\mathbf{v}_1 + \dots + x_n\mathbf{v}_n, \mathbf{w} = y_1\mathbf{w}_1 + \dots + y_m\mathbf{w}_m$
  - $\mathbf{w} = y_1\mathbf{w}_1 + \dots + y_m\mathbf{w}_m = L(\mathbf{v}) = x_1L(\mathbf{v}_1) + \dots + x_nL(\mathbf{v}_n) = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m)T(x_1, \dots, x_n)^T$

# 一般线性变换的矩阵表示

- **定理**：存在唯一的 $m \times n$ 矩阵 $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(L)$ ，使得 $\forall \mathbf{v} \in V$ ， $x_{\mathcal{B}'}(L(\mathbf{v})) = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(L)x_{\mathcal{B}}(\mathbf{v})$ 。  $x_{\mathcal{B}}(\mathbf{v})$ 是 $\mathbf{v}$ 在 $\mathcal{B}$ 上的坐标向量， $x_{\mathcal{B}'}(L(\mathbf{v}))$ 是 $L(\mathbf{v})$ 在 $\mathcal{B}'$ 上的坐标向量
- $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(L)$ 的第 $j$ 列就是 $L(\mathbf{v}_j)$ 在 $\mathcal{B}'$ 上的坐标向量，换句话说 $L(\mathbf{v}_j) = \sum_i \mathbf{w}_i (M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(L))_{ij}$
- **注**：线性映射对应的矩阵跟基的选取有关，之前 $\mathbb{R}^n$ 的结果是两组基都取标准基的特殊情形 ( $M_{e_m}^{e_n}(L_A) = A$ )

# 例

- 例1 :  $L: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ , 我们之前学习了怎么构造  $M_{e_m}^{e_n}(L)$
- 例2 :  $L: V \rightarrow W$ ,  $\mathcal{B} = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2\}$ ,  $\mathcal{B}' = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \mathbf{w}_3\}$ 
  - $L(\mathbf{v}_1) = 3\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_2 + 17\mathbf{w}_3$ ,  $L(\mathbf{v}_2) = \mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2 - \mathbf{w}_3$
  - $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(L) = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ -1 & 1 \\ 17 & -1 \end{bmatrix}$

# 例

- 例3

**Example 3** The input basis of  $v$ 's is  $1, x, x^2, x^3$ . The output basis of  $w$ 's is  $1, x, x^2$ .

Then  $T$  takes the derivative:  $T(v) = \frac{dv}{dx}$  and  $A =$  “derivative matrix”.

$$\text{If } v = c_1 + c_2x + c_3x^2 + c_4x^3 \\ \text{then } \frac{dv}{dx} = \mathbf{1}c_2 + \mathbf{2}c_3x + \mathbf{3}c_4x^2$$

$$Ac = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2 \\ 2c_3 \\ 3c_4 \end{bmatrix}$$

# $M_{B'}^B$ 的性质

- $M_{B'}^B$  是所有  $L: V \rightarrow W$  线性变换到  $\dim W \times \dim V$  矩阵的映射
- $M_{B'}^B$  是一个线性映射
  - $M_{B'}^B(f + g) = M_{B'}^B(f) + M_{B'}^B(g)$
  - $M_{B'}^B(cf) = cM_{B'}^B(f)$
- $M_{B'}^B$  是一个双射

# 线性变换的复合与矩阵乘法

- 考虑两个线性映射  $L_1: U \rightarrow V$ ,  $L_2: V \rightarrow W$ 。  $B = \{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_l\}$  是  $U$  上的一组基,  $B' = \{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$  是  $V$  上的一组基,  $B'' = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$  是  $W$  上的一组基
- $M_{B''}^B(L_2 \circ L_1) = M_{B''}^{B'}(L_2)M_{B'}^B(L_1)$
- 线性映射的**复合**等价于对应矩阵的**乘法**
  - 同一个线性空间  $V$ : 前一个矩阵的列数=后一个矩阵的行数
  - 可以自然得到矩阵乘法的规则

# 同一个线性空间，不同的基

- 线性空间 $V$ 上有两组基， $\mathcal{B} = \{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ ， $\mathcal{B}' = \{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n\}$ 。同一个向量 $\mathbf{v}$ 在不同的基上有不同的坐标向量 $x_{\mathcal{B}}(\mathbf{v})$ ， $x_{\mathcal{B}'}(\mathbf{v})$ 。我们可以用线性映射的表示矩阵理解坐标向量在换基时的变换
- **推论**： $x_{\mathcal{B}'}(\mathbf{v}) = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{id})x_{\mathcal{B}}(\mathbf{v})$ ，或者说 $\mathbf{v}_j = \sum_i \mathbf{w}_i \left( M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{id}) \right)_{ij}$
- **注意**：一般 $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{id})$ 不是单位矩阵，但是 $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(\text{id}) = I$
- 利用线性变换复合和矩阵乘法的对应，我们有
- **定理**： $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{id})M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{id}) = I = M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{id})M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{id})$ ，也就是说 $M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{id})$ 可逆，而且逆是 $M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{id})$

# 表示矩阵在换基时的变换

- **定理**：线性映射  $L: V \rightarrow W$ ， $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$  是  $V$  上两组基， $\mathcal{C}, \mathcal{C}'$  是  $W$  上的两组基。则

$$M_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{B}'}(L) = M_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{C}}(\text{id}) M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(L) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{id}) = \left( M_{\mathcal{C}'}^{\mathcal{C}}(\text{id}) \right)^{-1} M_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(L) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{id})$$

- **证明**：用线性映射的复合  $L = \text{id}_W \circ L \circ \text{id}_V$  和矩阵乘法的对应

- **推论**：线性映射  $L: V \rightarrow V$ ， $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$  是  $V$  上两组基，则

$$M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}'}(L) = M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{id}) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(L) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{id}) = \left( M_{\mathcal{B}'}^{\mathcal{B}}(\text{id}) \right)^{-1} M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}}(L) M_{\mathcal{B}}^{\mathcal{B}'}(\text{id})$$

- 所以矩阵相似变换就是换基，矩阵对角化就是找到描述同一个线性变换的最好的基

# 矩阵分解和换基

- LU分解： $A = LDU$ ， $L^{-1}AU^{-1} = D$ ， $D$ 相抵标准型
- QR分解： $A = QR$ ， $Q^{-1}A = R$ ，正交变换变成上三角
- 对角化： $\Lambda = Q^{-1}AQ$ ， $\Lambda$ 相似标准型
  - 对称矩阵可以正交对角化：正交变换
- 奇异值分解： $A = U\Sigma V$ ， $\Sigma = U^T AV^T$

# 内容提要

- 线性映射和矩阵
- 线性映射的性质
- 换基
- **若当标准型**
- 对偶空间与直和、直积
- 张量

# 矩阵对角化

- 不是所有方阵都可以对角化
- $n \times n$  矩阵  $A$  可以对角化
  - 有  $n$  个线性独立的特征向量
  - 所有特征值的几何重数 = 代数重数
- 如果  $n \times n$  矩阵  $A$  只有  $s < n$  个线性独立的特征向量，怎么把  $A$  变成最接近对角矩阵的形式？

# 若当标准型 (Jordan normal form)

- **定理**： $n \times n$  矩阵  $A$  有  $s$  个线性独立的特征向量，则存在可逆矩阵  $B$ ，使得  $B^{-1}AB = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_s \end{bmatrix}$ ，其中  $J_i = \begin{bmatrix} \lambda_i & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_i & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_i \end{bmatrix}$ ，其中  $\lambda_i$  是第  $i$  个线性独立的特征向量的特征值

# 内容提要

- 线性映射和矩阵
- 线性映射的性质
- 换基
- 若当标准型
- **对偶空间与直和、直积**
- 张量

# 构造新的线性空间

- 问题：怎么从已知的线性空间构造新的线性空间

# 对偶空间(dual vector space, dual space)

- 线性空间 $V$ 中的基 $\{\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n\}$
- **对偶空间** $V^*$  : 所有线性函数 $L: V \rightarrow \mathbb{R}$ 构成的线性空间
- 通过 $V$ 中基 $\{\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n\}$ 构造对偶空间 $V^*$ 的基:  $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$ 
  - $v^{*i}: V \rightarrow \mathbb{R}$ 是线性映射, 且 $v^{*i}(\boldsymbol{v}_j) = \delta_j^i$ , ( $\delta_j^i$  当 $i=j$ 时为1, 其它情况为0)
  - **完备**: 任何线性映射 $L: V \rightarrow \mathbb{R}$ 由 $\{L(\boldsymbol{v}_1), \dots, L(\boldsymbol{v}_n)\}$ 唯一决定。利用线性映射的加法,  $L = L(\boldsymbol{v}_1)v^{*1} + \dots + L(\boldsymbol{v}_n)v^{*n}$
  - **线性无关**: 考虑映射 $L = x_1 v^{*1} + \dots + x_n v^{*n} =$  零映射, 也就是说 $L(\boldsymbol{v}) = 0, \forall \boldsymbol{v} \in V$ , 特别的 $L(\boldsymbol{v}_i) = 0$
  - $L(\boldsymbol{v}_i) = x_1 v^{*1}(\boldsymbol{v}_i) + \dots + x_n v^{*n}(\boldsymbol{v}_i) = x_i = 0$

# 例

- $\mathbb{R}^*$ 
  - $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 的线性函数 $f(x) = ax$ 。  $\mathbf{e}$ 是 $\mathbb{R}$ 上的基，实际上 $\mathbf{e} = 1$
  - $e^*(\mathbf{e}) = e^*(1) = 1$ ，所以 $e^*(x) = x$
  - $f(x) = ax = ae^*(x)$ ，所以 $\mathbb{R}^*$ 是一维的，系数 $a$ 就是 $f$ 在 $\mathbb{R}^*$ 中的坐标
- $(\mathbb{R}^n)^*$ 
  - $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 的线性函数 $f_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n a_i x_i$
  - $e^{*i}(\mathbf{x})$ 相当于 $\mathbf{a}$ 取 $\mathbf{e}_i$ ，  $e^{*i}(\mathbf{x}) = f_{\mathbf{e}_i}(\mathbf{x})$

# 例

- 平面波的相位

- 平面波： $A(\mathbf{x}, t) = A_1 e^{i(k_x x + k_y y + k_z z + \omega t)} + A_2 e^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega t)}$ ,  $\omega \geq 0$
- 相位： $\phi(\mathbf{x}, t) = -\omega t + k_x x + k_y y + k_z z \in (\mathbb{R}^{3,1})^*$ ,  $\omega$ 任意
- 相位是从 $\mathbb{R}^{3,1} \rightarrow \mathbb{R}$ 的函数,  $(\omega, \mathbf{k})$ 决定波的传播方向
- $(\mathbb{R}^{3,1})^*$ 和平面波一一对应

- 傅立叶变换

- $f(\mathbf{k}) = \int d^3x f(\mathbf{x}) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}}$
- 将 $\mathbb{R}^3$ 的函数变换成 $(\mathbb{R}^3)^*$ 的函数

# 对偶的对偶

- 线性空间 $V$ 中的基 $\{\boldsymbol{v}_1, \dots, \boldsymbol{v}_n\}$
- **对偶空间 $V^*$**  : 所有线性映射 (函数)  $L: V \rightarrow \mathbb{R}$  构成的线性空间
- 对偶空间 $V^*$ 的一组基 :  $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$ 
  - $v^{*i}: V \rightarrow \mathbb{R}$  是线性映射, 且  $v^{*i}(\boldsymbol{v}_j) = \delta_j^i$
- $V^*$ 的对偶 $(V^*)^*$ 
  - $v_i^{**}: V^* \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $v_i^{**}(v^{*j}) \equiv v^{*j}(\boldsymbol{v}_i) = \delta_i^j$
  - $\mathbb{R}^n$ 和 $(\mathbb{R}^n)^*$ :  $f_{\boldsymbol{a}}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{x} = \sum_{i=1}^n a_i x_i = \sum_{i=1}^n x_i a_i = f_{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{a})$ ,

# 对偶空间和换基

- 线性空间 $V$ 中的基:  $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ ,  $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n\}$
- 对偶空间 $V^*$ 中的基:  $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$ ,  $\{u^{*1}, \dots, u^{*n}\}$ , 满足 $v^{*i}(\mathbf{v}_j) = \delta_j^i$ ,  
 $v^{*i}(\mathbf{u}_j) = \delta_j^i$
- 如果 $\mathbf{v}_i = \sum_j \mathbf{u}_j a_j^i$ , 那么 $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$ 和 $\{u^{*1}, \dots, u^{*n}\}$ 之间的关系?
  - 假设 $v^{*i} = \sum_j b_j^i u^{*j}$
  - $\delta_j^i = v^{*i}(\mathbf{v}_j) = \sum_k b_k^i u^{*k}(\sum_l \mathbf{u}_l a_l^j) = \sum_{k,l} b_k^i a_l^j u^{*k}(\mathbf{u}_l) = \sum_{k,l} b_k^i a_l^j \delta_l^k = \sum_k b_k^i a_k^j$ , 所以 $b_i^j = (a^{-1})_i^j$ ,  $(a^{-1})_i^j$ 代表 $a_j^i$ 对应矩阵的逆的 $ji$ 分量
  - $v^{*i} = \sum_j (a^{-1})_i^j u^{*j}$

# 线性空间的和(sum)与直和(direct sum)

- 线性空间 $V$ 有两个子空间 $U$ 和 $W$ ， $U$ 和 $W$ 的**和** $U + W$ 定义为所有形如 $\mathbf{u} + \mathbf{w}$ ,  $\forall \mathbf{u} \in U, \mathbf{w} \in W$ 的元素构成的集合
- $U + W$ 是 $V$ 的线性子空间
- **直和**：线性空间 $V$ 是 $U$ 和 $W$ 的直和，如果对于任意 $V$ 中的元素 $\mathbf{v}$ ，存在唯一的 $\mathbf{u} \in U, \mathbf{w} \in W$ 使得 $\mathbf{v} = \mathbf{u} + \mathbf{w}$ ，记为 $V = U \oplus W$

# 直和的性质

- **定理**：线性空间 $V$ 有两个子空间 $U$ 和 $W$ 。如果 $V = U + W$ ，且 $U \cap W = \{\mathbf{0}\}$ ，则 $V = U \oplus W$
- **证明**：
  - 因为 $V = U + W$ ，假设 $v \in V$ 可以写成 $v = u + w = u' + w'$
  - 所以 $u - u' = w' - w$
  - 但是 $u - u' \in U$ ， $w' - w \in W$ ，而且 $U \cap W = \{\mathbf{0}\}$ 。所以 $u - u' = w' - w = \mathbf{0}$
  - 所以 $v$ 的分解是唯一的，所以 $V = U \oplus W$

# 直和的性质

- **定理**： $V$ 是个有限维线性空间， $U$ 是 $V$ 的子空间，则存在的 $V$ 子空间 $W$ 使得 $V = U \oplus W$
- **证明**：
  - 假设 $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_r\}$ 是 $U$ 的一组基，将它扩张成 $V$ 的一组基 $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_r, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$ ，则 $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$ 张成的线性子空间就是我们需要的 $W$
- **推论**： $\dim U \oplus W = \dim U + \dim W$
- $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_r\}$ 是 $U$ 的一组基， $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$ 是 $W$ 的一组基，则 $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_r, \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m\}$ 是 $U \oplus W$ 的一组基

# 直积(direct product)

- 直和是由两个向量相加构造的，要求两个子空间的向量之间可以相加
- 如果两个线性空间不是某个大线性空间的子空间怎么办？
- **直积**：  $U$ 和 $W$ 是任意的两个线性空间，  $U$ 和 $W$ 的直积 $U \times W$ 是所有形如 $(\mathbf{u}, \mathbf{w}), \forall \mathbf{u} \in U, \forall \mathbf{w} \in W$ 的元素的集合。且 $U \times W$ 是个线性空间
  - 加法： $(\mathbf{u}_1, \mathbf{w}_1) + (\mathbf{u}_2, \mathbf{w}_2) = (\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2, \mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2)$
  - 数乘： $c(\mathbf{u}, \mathbf{w}) = (c\mathbf{u}, c\mathbf{w})$
- 性质： $\dim U \times W = \dim U + \dim W$
- 直和有时候也叫做**内直积**

# 例

- $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_m\}$ 是 $U$ 的一组基,  $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n\}$ 是 $W$ 的一组基, 则  $\{(\mathbf{u}_1, \mathbf{0}), \dots, (\mathbf{u}_m, \mathbf{0}), (\mathbf{0}, \mathbf{w}_1), \dots, (\mathbf{0}, \mathbf{w}_n)\}$ 是  $U \times W$ 的一组基
- $\mathbb{R} \times \mathbb{R} = \mathbb{R}^2$
- $\prod_{i=1}^n \mathbb{R} = \mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R} = \mathbb{R}^n$

# 内容提要

- 线性映射和矩阵
- 线性映射的性质
- 换基
- 若当标准型
- 对偶空间与直和、直积
- **张量**

# 多（重）线性映射

- 考虑映射  $L: V_1 \times V_2 \cdots \times V_r \rightarrow W$
- 这个映射的自变量是  $r$  个向量，分别属于  $\{V_1, V_2 \cdots, V_r\}$
- 映射  $L$  被称为**多线性的**，如果它对于每一个变量都是线性的，也就是说
$$L(\mathbf{v}_1, \cdots, \mathbf{v}_{i-1}, a\mathbf{u} + b\mathbf{w}, \mathbf{v}_{i+1}, \cdots, \mathbf{v}_r)$$
$$= aL(\mathbf{v}_1, \cdots, \mathbf{v}_{i-1}, \mathbf{u}, \mathbf{v}_{i+1}, \cdots, \mathbf{v}_r) + bL(\mathbf{v}_1, \cdots, \mathbf{v}_{i-1}, \mathbf{w}, \mathbf{v}_{i+1}, \cdots, \mathbf{v}_r)$$
- 如果  $W$  是  $\mathbb{R}$ ，则称  $L$  是个**多（重）线性函数**
  - 例：行列式就是一个多（重）线性函数

# 张量空间 $V^* \otimes V^*$

- 考虑所有  $V \times V \rightarrow \mathbb{R}$  的多重线性函数的集合  $\{L: V \times V \rightarrow \mathbb{R}\}$ , 我们同样可以在这个集合上定义加法和数乘
  - 加法:  $(L_1 + L_2)(u, v) = L_1(u, v) + L_2(u, v)$
  - 数乘:  $(cL_1)(u, v) = cL_1(u, v)$
  - 零元: 零函数
- 所有  $V \times V \rightarrow \mathbb{R}$  的多重线性函数构成一个线性空间, 我们把这个空间叫做  $V^*$  和  $V^*$  的张量积 (记做  $V^* \otimes V^*$ )
  - $V^* \otimes V^*$  中的每一个元素 (向量) 叫做一个二阶协变张量 ((0,2)张量)
  - $V$  中基  $\{v_1, \dots, v_n\}$ ,  $L(u, v) = L(\sum_i a_i v_i, \sum_j b_j v_j) = \sum_{i,j} a_i b_j L(v_i, v_j)$
  - $n^2$  个函数值  $L(v_i, v_j)$  唯一决定了函数  $L$

# 张量空间 $V^* \otimes V^*$ 的一组基

- $V$  中基  $\{v_1, \dots, v_n\}$ 。对偶空间  $V^*$  的基： $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$ 
  - $v^{*i}(v_j) = \delta_j^i$
- 定义张量  $v^{*i} \otimes v^{*j}$  满足  $v^{*i} \otimes v^{*j}(u, v) = v^{*i}(u)v^{*j}(v)$ 
  - $v^{*i} \otimes v^{*j}(v_k, v_l) = v^{*i}(v_k)v^{*j}(v_l) = \delta_k^i \delta_l^j$
  - $n^2$  个张量  $v^{*i} \otimes v^{*j}$  构成  $V^* \otimes V^*$  的一组基
- $w \in V^* \otimes V^*$ ,  $w = \sum_{\{i,j\}} w_{ij} v^{*i} \otimes v^{*j}$ ,  $w_{ij} = w(v_i, v_j)$ 
  - $\{w_{ij}\}$  是  $w$  在  $\{v^{*i} \otimes v^{*j}\}$  这组基上的分量，物理文献中有时候也把  $\{w_{ij}\}$  叫做张量
  - 在基的变换下  $w$  不变，分量  $\{w_{ij}\}$  会变

# $V^* \otimes V^*$ 的张量分量 $w_{ij}$ 随基的变换

- $V$  中基  $\{v_1, \dots, v_n\}$ 。对偶空间  $V^*$  的基： $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$ 
  - $u_i = \sum_j v_j a^j_i, \quad u^{*i} = \sum_j v^{*j} (a^{-1})_j^i$
- 张量  $w$  在基  $\{u^{*i} \otimes u^{*j}\}$  下的分量  $w'_{ij} = w(u_i, u_j)$ 
  - $w'_{ij} = w(u_i, u_j) = w(\sum_k v_k a^k_i, \sum_l v_l a^l_j) = \sum_{kl} w(v_k, v_l) a^k_i a^l_j = \sum_{kl} w_{kl} a^k_i a^l_j$
  - 当  $V$  的基从  $\{v_1, \dots, v_n\}$  变成  $\{u_1, \dots, u_n\}$  时，分量  $w'_{ij} = \sum_{kl} w_{kl} a^k_i a^l_j$  (二阶协变张量：分量同基的变换规律一致)

# 张量积(tensor product)

- 定义基 $\{v^{*i} \otimes v^{*j}\}$ 的时候我们用到了一个新的运算
- **张量积**：  $U$ 和 $W$ 是任意的两个线性空间，  $u \in U$ ，  $v \in W$ 。定义 $u$ 和 $v$ 的张量积为一个新的元素 $u \otimes v$ ， 且满足下面的性质
  - 结合律： $u \otimes v \otimes w = (u \otimes v) \otimes w = u \otimes (v \otimes w)$
  - 加法左分配： $(u_1 + u_2) \otimes v = u_1 \otimes v + u_2 \otimes v$
  - 加法右分配： $u \otimes (v_1 + v_2) = u \otimes v_1 + u \otimes v_2$
  - 数乘： $(au) \otimes v = u \otimes (av) = a(u \otimes v)$
- 张量积运算的结果不在 $U$ 或 $W$ 中， 也不**交换**
  - $v^{*i} \otimes v^{*j}$ 就是  $v^{*i}$  和  $v^{*j}$  的张量积， 结果是 $V^* \otimes V^*$ 中的一个张量

# 线性空间的张量积

- **线性空间张量积**：  $U$ 和 $W$ 是任意的两个线性空间，  $\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_m\}$ 是  $U$ 的一组基，  $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n\}$ 是 $W$ 的一组基。定义新的基为 $\{\mathbf{u}_i \otimes \mathbf{w}_j, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n\}$ ，  $\{\mathbf{u}_i \otimes \mathbf{w}_j\}$ 张成的线性空间被称为 $U$ 和 $W$ 的张量积，记为 $U \otimes W$
- $U \otimes W$ 中的元素： $\mathbf{x} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x^{ij} \mathbf{u}_i \otimes \mathbf{w}_j$
- $U \otimes W$ 中的加法和数乘： $a\mathbf{x} + b\mathbf{y} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (ax^{ij} + by^{ij}) \mathbf{u}_i \otimes \mathbf{w}_j$
- $\dim U \otimes W = \dim U \times \dim W$

# 张量积(tensor product)

- $U$ 和 $V$ 是任意的两个线性空间,  $\mathbf{u} = x_1\mathbf{u}_1 + \cdots + x_n\mathbf{u}_n \in U$ ,  $\mathbf{v} = y_1\mathbf{v}_1 + \cdots + y_m\mathbf{v}_m \in V$ 
  - $\mathbf{u} \otimes \mathbf{v} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_i y_j \mathbf{u}_i \otimes \mathbf{v}_j$
  - $\mathbf{u} \otimes \mathbf{v} \in U \otimes V$
- 但是并不是所有 $U \otimes V$ 中的元素都能写成 $\mathbf{u} \otimes \mathbf{v}$ 的形式
  - 例:  $\mathbf{u}_1 \otimes \mathbf{v}_2 + \mathbf{u}_2 \otimes \mathbf{v}_1$
  - 类比:  $f(x)g(y)$ 是一个自变量为 $x, y$ 的二元函数, 但任意二元函数 $h(x, y)$ 一般不能写成 $f(x)g(y)$ 的形式

# 例

- 例1： $\mathbb{R} \otimes \mathbb{R}$ ，基是 $e_1 \otimes e_1$
- 例2： $\mathbb{R}^2 \otimes \mathbb{R}^2$ ，基是 $e_1 \otimes e_1, e_1 \otimes e_2, e_2 \otimes e_1, e_2 \otimes e_2$ 
  - 注意 $\mathbb{R}^2 \otimes \mathbb{R}^2$ 和 $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2$ 的区别
- 例3： $\mathbb{R}^n \otimes \mathbb{R}^n$ ，基是 $\{e_i \otimes e_j\}$ 
  - 基的另一种写法：对称部分 $\{\frac{1}{2}(e_i \otimes e_j + e_j \otimes e_i)\}$ ，反对称部分 $\{\frac{1}{2}(e_i \otimes e_j - e_j \otimes e_i)\}$

# 用张量积定义 $V \otimes V$

- $V \otimes V$  是所有  $V^* \times V^* \rightarrow \mathbb{R}$  的双线性函数构成的线性空间。但是我们可以用张量积的方法定义
- $V$  中的基  $\{v_1, \dots, v_n\}$
- $V \otimes V$  中的基  $\{v_i \otimes v_j\}, 1 \leq i, j \leq n, n^2$  个
- $V \otimes V$  中的元素  $v = \sum_{i,j=1}^n v^{ij} v_i \otimes v_j$ , 二阶逆变张量 ((2,0)张量)
  - $v$  是线性空间  $V \otimes V$  中的一个向量
  - $\{v_{ij}\}$  是  $v$  在基  $\{v_i \otimes v_j\}$  上的分量, 有2个指标,  $n^2$  个数
- 思考: 这两种定义是等价的?

# 换基时 $V \otimes V$ 张量分量的变换

- $V$  中的基  $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 
  - $\mathbf{u}_i = \sum_j \mathbf{v}_j a_i^j$
- $V \otimes V$  中的元素  $\mathbf{v} = \sum_{i,j=1}^n v^{ij} \mathbf{v}_i \otimes \mathbf{v}_j$ 
  - $\mathbf{v} = \sum_{ij} v^{ij} \mathbf{u}_i \otimes \mathbf{u}_j = \sum_{ij} v^{ij} (\sum_k \mathbf{v}_k a_i^k) \otimes (\sum_l \mathbf{v}_l a_j^l) = \sum_{kl} (\sum_{ij} a_i^k a_j^l v^{ij}) \mathbf{v}_k \otimes \mathbf{v}_l = \sum_{kl} v^{kl} \mathbf{v}_k \otimes \mathbf{v}_l$
  - $v^{kl} = \sum_{ij} a_i^k a_j^l v^{ij}$
  - 或者  $v^{ij} = \sum_{kl} (a^{-1})^i_k (a^{-1})^j_l v^{kl}$  (逆变: 分量每个指标对应的变换矩阵是基的变换矩阵的逆矩阵)

# 混合张量 $V \otimes V^*$

- $V \otimes V^*$  是所有  $V^* \times V \rightarrow \mathbb{R}$  的双线性函数构成的线性空间。也可以用张量积的方法定义  $V \otimes V^*$
- $V$  中的基  $\{v_1, \dots, v_n\}$ 。对偶空间  $V^*$  的基： $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$
- $V \otimes V^*$  中的基  $\{v_i \otimes v^{*j}\}, 1 \leq i, j \leq n$
- $V \otimes V^*$  中的元素  $v = \sum_{i,j=1}^n v_j^i v_i \otimes v^{*j}$  ((1,1)张量)
- 思考：在换基时  $v_j^i$  怎么变？

$$V \otimes \cdots \otimes V \otimes V^* \otimes V^* = V^{\otimes k} \otimes V^{*\otimes l}$$

- 所有  $V^* \times \cdots \times V^* \times V \times \cdots \times V \rightarrow \mathbb{R}$  的多线性函数构成的线性空间

- 用张量积定义

- $V$  中的基  $\{v_1, \dots, v_n\}$ , 对偶空间  $V^*$  中的基  $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$

- $V^{\otimes k} \otimes V^{*\otimes l}$  中的基  $\{v_{i_1} \otimes \cdots \otimes v_{i_k} \otimes v^{*j_1} \otimes \cdots \otimes v^{*j_l}\}, 1 \leq i_1, \dots, i_k, j_1, \dots, j_l \leq n$

- $V^{\otimes k} \otimes V^{*\otimes l}$  中的元素  $v = \sum_{i_1, \dots, i_k, j_1, \dots, j_l=1}^n (v^{i_1 \dots i_k}_{j_1 \dots j_l}) v_{i_1} \otimes \cdots \otimes v_{i_k} \otimes v^{*j_1} \otimes \cdots \otimes v^{*j_l}$

- $v$  的分量  $v^{i_1 \dots i_k}_{j_1 \dots j_l}$  有  $k+l$  个指标, 一共是  $n^{k+l}$  个数

- $v$  是一个  $(k, l)$  阶张量

# 附录：上下指标

# 上下指标

- 前面的例子中可以看到， $V$ 和 $V^*$ 在换基下的变换是有联系但又有区别的。实际应用中我们通常用上下指标区分 $V$ 和 $V^*$
- 一般规定基向量的指标为下指标，换基的时候，新的基向量可以写成老基向量的如下线性组合

$$\mathbf{e}'_i = \sum_j \mathbf{e}_j A^j_i$$

- $A^j_i$ 数值上等于之前的矩阵的分量，只是为了方便将一个指标移到上面。在这个记号下，所有求和都是一上一下两个指标的求和
- 指标升降（用 $\delta^{jk}$ ）： $A^j_i = \sum_k \delta^{jk} A_{ki}$ ， $x_j = \sum_i \delta_{ji} x^i$ ，等等

# 协变和逆变

- 协变：基向量的变换， $\mathbf{e}'_i = \sum_j \mathbf{e}_j A^j_i$
- 考虑线性空间 $V$ 中的某个向量 $\mathbf{v} = \sum_i v^i \mathbf{e}_i = \sum_i v'^i \mathbf{e}'_i$
- 换基的时候， $\mathbf{v}$ 不变，相应的坐标向量 $v^i$ 的变换关系为

$$x'^i = \sum_j (A^{-1})^i_j x^j$$

- 因为变换矩阵是基向量变换矩阵的逆，所以被称作**逆变**的
- **协变**：同基向量变换规律一致
- **逆变**：同坐标向量变换规律一致

# 对偶空间中的基

- 基向量的变换,  $\mathbf{e}'_i = \sum_j \mathbf{e}_j A^j_i$
- 对偶空间 $V^*$ 中的基的一种选取是 $e^{*i}(\mathbf{e}_j) = \delta^i_j$
- 在换基下, 这组基的变换关系为

$$e'^{*i} = \sum_j (A^{-1})^i_j e'^{*j}$$

- 在推导中我们利用了性质:  $e^{*i}(\mathbf{e}_j) = \delta^i_j = e'^{*i}(\mathbf{e}'_j)$
- 对偶空间中的基是**逆变**的

# 张量的指标和变换

- 基向量的变换,  $\mathbf{e}'_i = \sum_j \mathbf{e}_j A^j_i$
- $V \otimes V$  中的元素  $\mathbf{v} = \sum_{i,j} v^{ij} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j$ 
  - 在换基下:  $v'^{ij} = \sum_{k,l} (A^{-1})^i_k (A^{-1})^j_l v^{kl}$
  - 二阶有两个逆变指标的张量
- $V^* \otimes V^*$  中的元素  $\mathbf{w} = \sum_{i,j} w_{ij} \mathbf{e}^{*i} \otimes \mathbf{e}^{*j}$ 
  - 在换基下:  $w'_{ij} = \sum_{k,l} w_{kl} A^k_i A^l_j$
  - 二阶有两个协变指标的张量

# 张量的指标和变换

- 基向量的变换,  $\mathbf{e}'_i = \sum_j \mathbf{e}_j A^j_i$
- $V \otimes V^*$  中的元素  $\mathbf{w} = \sum_{i,j} w^i_j \mathbf{e}_i \otimes e^{*j}$ 
  - 在换基下:  $w'^i_j = \sum_{k,l} (A^{-1})^i_k w^k_l A^l_j$
  - 一个逆变一个协变指标的张量
- 这些变换关系的推倒都利用了张量本身在换基下不变的性质

# 张量的指标和变换

- 基向量的变换,  $\mathbf{e}'_i = \sum_j \mathbf{e}_j A^j_i$
- 一般  $V \otimes \dots \otimes V \otimes V^* \otimes \dots \otimes V^*$  中的元素

$$\mathbf{w} = \sum_{i_1, \dots, i_r, j_1, \dots, j_s} w_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r} \mathbf{e}_{i_1} \otimes \dots \otimes \mathbf{e}_{i_r} \otimes \mathbf{e}^{*j_1} \otimes \dots \otimes \mathbf{e}^{*j_s}$$

- 变换

$$w'_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r} = \sum_{k_1, \dots, k_r, l_1, \dots, l_s} (A^{-1})^{i_1}_{k_1} \dots (A^{-1})^{i_r}_{k_r} w_{l_1 \dots l_s}^{k_1 \dots k_r} A^{l_1}_{j_1} \dots A^{l_s}_{j_s}$$

# 张量指标的缩并

- 考虑一般张量  $w_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r}$
- 我们定义任意一个上指标和任意一个下指标的缩并为

$$v_{j_1 \dots i_{q-1} i_{q+1} \dots j_s}^{i_1 \dots i_{p-1} i_{p+1} \dots i_r} = \sum_i v_{j_1 \dots i_{q-1} i i_{q+1} \dots j_s}^{i_1 \dots i_{p-1} i i_{p+1} \dots i_r}$$

- 新的张量比原来的张量各少了一个上指标和一个下指标
- 特别的只有一个上指标和一个下指标的张量  $w_j^i$  缩并以后  $w = \sum_i w_i^i$ , 在换基下  $w$  不变

# $V^* \otimes V^*$ 的张量分量随基的变换

- $V$  中基  $\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n\}$ 。对偶空间  $V^*$  的基： $\{v^{*1}, \dots, v^{*n}\}$ 
  - $\mathbf{u}_i = \sum_j \mathbf{v}_j a_{ji}, \quad u^{*i} = \sum_j (a^{-1})_{ij} v^{*j}$
- 张量  $w = \sum_{\{i,j\}} w_{ij} v^{*i} \otimes v^{*j}$  在基的变换下不变
  - $w = \sum_{ij} w'_{ij} u^{*i} \otimes u^{*j} = \sum_{ij} w'_{ij} (\sum_k (a^{-1})_{ik} v^{*k}) \otimes (\sum_l (a^{-1})_{jl} v^{*l}) = \sum_{kl} (\sum_{ij} w'_{ij} (a^{-1})_{ik} (a^{-1})_{jl}) v^{*k} \otimes v^{*l}$
  - 所以  $w$  在  $\{v^{*k} \otimes v^{*l}\}$  下的分量  $w_{kl} = \sum_{ij} w'_{ij} (a^{-1})_{ik} (a^{-1})_{jl}$ , 或者说
  - $w'_{ij} = \sum_{kl} w_{kl} a_{ki} a_{lj}$  (协变: 分量同基的变换规律一致)