

# 第一章 张量的定义及表示

## 1.1 对偶基，度量

### 1.1.1 对偶基

$\mathbb{R}^m$  空间中的基可分为两类：指标写在下面的基

$$\{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^m \subset \mathbb{R}^m$$

称为协变基，指标写在上面的基

$$\{\mathbf{g}^i\}_{i=1}^m \subset \mathbb{R}^m$$

称为逆变基。它们满足对偶关系：

$$(\mathbf{g}^i, \mathbf{g}_j)_{\mathbb{R}^m} = \delta_j^i = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (1.1)$$

这里的  $\delta_j^i$  是 **Kronecker  $\delta$  函数**。

### 1.1.2 度量

下面引入度量的概念。其定义为

$$\begin{cases} g_{ij} \triangleq (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j)_{\mathbb{R}^m}, & (1.2-a) \\ g^{ij} \triangleq (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}^j)_{\mathbb{R}^m}. & (1.2-b) \end{cases}$$

下面证明

$$g_{ik} g^{kj} = \delta_i^j. \quad (1.3)$$

它也可以写成矩阵的形式：

$$[g_{ik}][g^{kj}] = [\delta_i^j] = \mathbf{I}_m, \quad (1.4)$$

其中的  $\mathbf{I}_m$  是  $m$  阶单位阵。

证明：

$$g_{ik} g^{kj} = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} g^{kj} = (\mathbf{g}_i, g^{kj} \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \quad (1.5)$$

后文将说明  $g^{kj} \mathbf{g}_k = \mathbf{g}^j$ ，因此可得

$$g_{ik} g^{kj} = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}^j)_{\mathbb{R}^m} = \delta_i^j. \quad (1.6)$$

要注意的是，这里的指标  $k$  是哑标。根据 **Einstein 求和约定**，重复指标并且一上一下时，就表示对它求和。后文除非特殊说明，也均是如此。  $\square$

现在澄清**基向量转换关系**。第  $i$  个协变基向量  $\mathbf{g}_i$  既然是向量，就必然可以用协变基或逆变基来表示。根据对偶关系式 (1.1) 和度量的定义式 (1.2-a)、(1.2-b)，可知

$$\begin{cases} \mathbf{g}_i = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^k = g_{ik} \mathbf{g}^k, \\ \mathbf{g}_i = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}^k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_k = \delta_i^k \mathbf{g}_k \end{cases} \quad \begin{matrix} (1.7-a) \\ (1.7-b) \end{matrix}$$

以及

$$\begin{cases} \mathbf{g}^i = (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^k = \delta_k^i \mathbf{g}^k, \\ \mathbf{g}^i = (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}^k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_k = g^{ik} \mathbf{g}_k. \end{cases} \quad \begin{matrix} (1.8-a) \\ (1.8-b) \end{matrix}$$

这四个式子中，式 (1.7-b) 和 (1.8-a) 是平凡的，而式 (1.7-a) 和 (1.8-b) 则通过度量建立起了协变基与逆变基之间的关系。这就称为**基向量转换关系**，也可以叫做“指标升降游戏”。

### 1.1.3 向量的分量

对于任意的向量  $\xi \in \mathbb{R}^m$ ，它可以用协变基表示：

$$\xi = (\xi, \mathbf{g}^k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_k = \xi^k \mathbf{g}_k, \quad (1.9-a)$$

也可以用逆变基表示：

$$\xi = (\xi, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^k = \xi_k \mathbf{g}^k. \quad (1.9-b)$$

式中， $\xi^k$  是  $\xi$  与第  $k$  个逆变基做内积的结果，称为  $\xi$  的第  $k$  个**逆变分量**；而  $\xi_k$  是  $\xi$  与第  $k$  个协变基做内积的结果，称为  $\xi$  的第  $k$  个**协变分量**。

以后凡是指标在下的（下标），均称为协变某某；指标在上的（上标），称为逆变某某。

## 1.2 张量的表示

### 1.2.1 张量的表示与简单张量

所谓**张量**，即**多重线性函数**。

首先用三阶张量举个例子。考虑任意的  $\Phi \in \mathcal{T}^3(\mathbb{R}^m)$ ，其中的  $\mathcal{T}^3(\mathbb{R}^m)$  表示以  $\mathbb{R}^m$  为底空间的三阶张量全体。所谓三阶（或三重）线性函数，指“吃掉”三个向量之后变成实数，并且“吃法”具有线性性。

一般地， $r$  阶张量的定义如下：

$$\Phi : \underbrace{\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m \times \cdots \times \mathbb{R}^m}_{r \text{ 个 } \mathbb{R}^m} \ni \{u_1, u_2, \dots, u_r\} \mapsto \Phi(u_1, u_2, \dots, u_r) \in \mathbb{R}, \quad (1.10)$$

式中的  $\Phi$  满足

$$\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \quad \Phi(u_1, \dots, \alpha \tilde{u}_i + \beta \hat{u}_i, \dots, u_r)$$

$$= \alpha \Phi(u_1, \dots, \tilde{u}_i, \dots, u_r) + \beta \Phi(u_1, \dots, \hat{u}_i, \dots, u_r), \quad (1.11)$$

即所谓“对第  $i$  个变元的线性性”。这里的  $i$  可取  $1, 2, \dots, r$ .

在张量空间  $\mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m)$  上，我们引入线性结构：

$$\begin{aligned} \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \Phi, \Psi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m), \quad (\alpha \Phi + \beta \Psi)(u_1, u_2, \dots, u_r) \\ \triangleq \alpha \Phi(u_1, u_2, \dots, u_r) + \beta \Psi(u_1, u_2, \dots, u_r), \end{aligned} \quad (1.12)$$

于是

$$\alpha \Phi + \beta \Psi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m). \quad (1.13)$$

下面我们要获得  $\Phi$  的表示。根据之前任意向量用协变基或逆变基的表示，有

$$\begin{aligned} \forall u, v, w \in \mathbb{R}^m, \quad \Phi(u, v, w) \\ = \Phi(u^i g_i, v_j g^j, w^k g_k) \end{aligned}$$

考虑到  $\Phi$  对第一变元的线性性，可得

$$= u^i \Phi(g_i, v_j g^j, w^k g_k)$$

同理，

$$= u^i v_j w^k \Phi(g_i, g^j, g_k). \quad (1.14)$$

注意这里自然需要满足 Einstein 求和约定。

上式中的  $\Phi(g_i, g^j, g_k)$  是一个数。它是张量  $\Phi$  “吃掉”三个基向量的结果。至于  $u^i v_j w^k$  部分，三项分别是  $u$  的第  $i$  个逆变分量、 $v$  的第  $j$  个协变分量和  $w$  的第  $k$  个逆变分量。根据向量分量的定义，可知

$$u^i v_j w^k = (u, g^i)_{\mathbb{R}^m} \cdot (v, g_j)_{\mathbb{R}^m} \cdot (w, g^k)_{\mathbb{R}^m}. \quad (1.15)$$

暂时中断一下思路，先给出简单张量的定义。

$$\forall u, v, w \in \mathbb{R}^m, \quad \xi \otimes \eta \otimes \zeta(u, v, w) \triangleq (\xi, u)_{\mathbb{R}^m} \cdot (\eta, v)_{\mathbb{R}^m} \cdot (\zeta, w)_{\mathbb{R}^m} \in \mathbb{R}, \quad (1.16)$$

式中的  $\xi, \eta, \zeta \in \mathbb{R}^m$ 。“ $\otimes$ ”的定义将在 2.1 节中给出，现在可以暂时把  $\xi \otimes \eta \otimes \zeta$  理解为一种记号。简单张量作为一个映照，组成它的三个向量分别与它们“吃掉”的第一、二、三个变元做内积并相乘，结果为一个实数。

考虑到内积的线性性，便有（以第二个变元为例）

$$\xi \otimes \eta \otimes \zeta(u, \alpha \tilde{v} + \beta \hat{v}, w) \triangleq (\xi, u)_{\mathbb{R}^m} \cdot (\eta, \alpha \tilde{v} + \beta \hat{v})_{\mathbb{R}^m} \cdot (\zeta, w)_{\mathbb{R}^m} \in \mathbb{R}$$

注意到  $(\eta, \alpha \tilde{v} + \beta \hat{v})_{\mathbb{R}^m} = \alpha(\eta, \tilde{v})_{\mathbb{R}^m} + \beta(\eta, \hat{v})_{\mathbb{R}^m}$ ，同时再次利用简单张量的定义，可得

$$= \alpha \xi \otimes \eta \otimes \zeta(u, \tilde{v}, w) + \beta \xi \otimes \eta \otimes \zeta(u, \hat{v}, w). \quad (1.17)$$

类似地，对第一变元和第三变元，同样具有线性性。因此，可以知道

$$\xi \otimes \eta \otimes \zeta \in \mathcal{T}^3(\mathbb{R}^m). \quad (1.18)$$

可见，“简单张量”的名字是名副其实的，它的确是一个特殊的张量。

回过头来看 (1.15) 式。很明显，它可以用简单张量来表示。要注意，由于内积的对称性，可以有两种<sup>①</sup>表示方法：

$$g^i \otimes g_j \otimes g^k(u, v, w) \quad (1.19-a)$$

或者

$$u \otimes v \otimes w(g^i, g_j, g^k), \quad (1.19-b)$$

我们这里取上面一种。代入式 (1.14)，得

$$\begin{aligned} & \Phi(u, v, w) \\ &= \Phi(g_i, g^j, g_k) \cdot g^i \otimes g_j \otimes g^k(u, v, w) \end{aligned}$$

由于  $\Phi(g_i, g^j, g_k) \in \mathbb{R}^m$ ，因此

$$= [\Phi(g_i, g^j, g_k) g^i \otimes g_j \otimes g^k](u, v, w). \quad (1.20)$$

方括号里的部分，就是根据 Einstein 求和约定，用  $\Phi(g_i, g^j, g_k)$  对  $g^i \otimes g_j \otimes g^k$  进行线性组合。

由于  $u, v, w$  选取的任意性，可以引入如下记号：

$$\Phi = \Phi(g_i, g^j, g_k) g^i \otimes g_j \otimes g^k =: \Phi_{i \ k}^j g^i \otimes g_j \otimes g^k, \quad (1.21)$$

即

$$\Phi_{i \ k}^j := \Phi(g_i, g^j, g_k), \quad (1.22)$$

这称为张量的分量。它说明一个张量可以用张量分量和基向量组成的简单张量来表示。

指标  $i, j, k$  的上下是任意的。这里，它有赖于式 (1.14) 中基向量的选取。实际上，对于这里的三阶张量，指标的上下一共有 8 种可能。指标全部在下面的，称为协变分量：

$$\Phi_{ijk} := \Phi(g_i, g_j, g_k); \quad (1.23)$$

指标全部在上面的，称为逆变分量：

$$\Phi^{ijk} := \Phi(g^i, g^j, g^k); \quad (1.24)$$

其余 6 种，称为混合分量。对于一个  $r$  阶张量，显然共有  $2^r$  种分量表示，其中协变分量与逆变分量各一种，混合分量  $2^r - 2$  种。

<sup>①</sup> 这里只考虑把  $u, v, w$  和  $g^i, g_j, g^k$  分别放在一起的情况。

### 1.2.2 张量分量之间的关系

我们已经知道，对于任意一个向量  $\xi \in \mathbb{R}^m$ ，它可以用协变基或逆变基表示：

$$\xi = \begin{cases} \xi^i g_i, \\ \xi_i g^i. \end{cases} \quad (1.25)$$

式中，协变分量与逆变分量满足坐标转换关系：

$$\begin{cases} \xi^i = (\xi, g^i)_{\mathbb{R}^m} = (\xi, g^{ik} g_k)_{\mathbb{R}^m} = g^{ik} (\xi, g_k)_{\mathbb{R}^m} = g^{ik} \xi_k, \\ \xi_i = (\xi, g_i)_{\mathbb{R}^m} = (\xi, g_{ik} g^k)_{\mathbb{R}^m} = g_{ik} (\xi, g^k)_{\mathbb{R}^m} = g_{ik} \xi^k. \end{cases} \quad (1.26-a)$$

$$(1.26-b)$$

每一式的第二个等号都用到了基向量转换关系，见式 (1.7-a) 和 (1.8-b)。

现在再来考虑张量的分量。仍以上文中的张量  $\Phi_{i\ k}^j := \Phi(g_i, g^j, g_k)$  为例，我们想要知道它与张量  $\Phi_q^{p\ r} := \Phi(g^p, g_q, g^r)$  之间的关系。利用基向量转换关系，可有

$$\begin{aligned} \Phi_{i\ k}^j &:= \Phi(g_i, g^j, g_k) \\ &= \Phi(g_{ip} g^p, g^{jq} g_q, g_{kr} g^r) \end{aligned}$$

又利用张量的线性性，得

$$\begin{aligned} &= g_{ip} g^{jq} g_{kr} \Phi(g^p, g_q, g^r) \\ &= g_{ip} g^{jq} g_{kr} \Phi_q^{p\ r}. \end{aligned} \quad (1.27)$$

可见，张量的分量与向量的分量类似，其指标升降可通过度量来实现。用同样的手法，还可以得到诸如  $\Phi^{ijk} = g^{jp} \Phi_p^{i\ k}$ 、 $\Phi_j^{i\ k} = g_{jp} g^{kq} \Phi_q^{ip}$  这样的关系式。

### 1.2.3 相对不同基的张量分量之间的关系

$\mathbb{R}^m$  空间中，除了  $\{g_i\}_{i=1}^m$  和相应的对偶基  $\{g^i\}_{i=1}^m$  之外，当然还可以有其他的基，比如带括号的  $\{g_{(i)}\}_{i=1}^m$  以及对应的对偶基  $\{g^{(i)}\}_{i=1}^m$ 。前者对应形如  $\Phi_j^{i\ k} := \Phi(g^i, g_j, g^k)$  的张量，后者则对应带括号的张量，如  $\Phi_{(q)}^{(p)\ (r)} := \Phi(g^{(p)}, g_{(q)}, g^{(r)})$ 。下面我们来探讨这两个张量的关系。

首先来建立基之间的关系。带括号的第  $i$  个基向量  $g_{(i)}$ ，作为  $\mathbb{R}^m$  空间中的一个向量，自然可以用另一组基来表示：

$$g_{(i)} = \begin{cases} (g_{(i)}, g_k)_{\mathbb{R}^m} g^k, \\ (g_{(i)}, g^k)_{\mathbb{R}^m} g_k. \end{cases} \quad (1.28)$$

同理，自然还有它的对偶基：

$$g^{(i)} = \begin{cases} (g^{(i)}, g_k)_{\mathbb{R}^m} g^k, \\ (g^{(i)}, g^k)_{\mathbb{R}^m} g_k. \end{cases} \quad (1.29)$$

引入记号  $c_{(i)}^k := (g_{(i)}, g^k)_{\mathbb{R}^m}$  和  $c_k^{(i)} := (g^{(i)}, g_k)_{\mathbb{R}^m}$ ，那么有

$$\begin{cases} g_{(i)} = c_{(i)}^k g_k, \\ g^{(i)} = c_k^{(i)} g^k. \end{cases} \quad (1.30-a)$$

$$(1.30-b)$$

容易看出，这两个系数具有如下性质：

$$c_k^{(i)} c_{(j)}^k = \delta_j^i. \quad (1.31)$$

写成矩阵形式<sup>①</sup>，为

$$\begin{bmatrix} c_k^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{(j)}^k \end{bmatrix} = [\delta_i^j] = \mathbf{I}_m. \quad (1.32)$$

换句话说，两个系数矩阵是互逆的。

证明：

$$c_k^{(i)} c_{(j)}^k = (\mathbf{g}^{(i)}, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} c_{(j)}^k$$

利用内积的线性性，有

$$= (\mathbf{g}^{(i)}, c_{(j)}^k \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m}$$

根据  $c_{(j)}^k$  的定义，得到

$$= (\mathbf{g}^{(i)}, \mathbf{g}_{(j)})_{\mathbb{R}^m}. \quad (1.33)$$

带括号的基同样满足对偶关系 (1.1) 式，于是得证。  $\square$

上面我们用不带括号的基表示了带括号的基。反之也是可以的：

$$\begin{cases} \mathbf{g}_i = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}^{(k)})_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_{(k)} = c_i^{(k)} \mathbf{g}_{(k)}, \\ \mathbf{g}^i = (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}_{(k)})_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^{(k)} = c_{(k)}^i \mathbf{g}^{(k)}. \end{cases} \quad (1.34\text{-a})$$

$$(1.34\text{-b})$$

这样一来，就建立起了不同基之间的转换关系。

现在我们回到张量。根据张量分量的定义，

$$\Phi_j^{i \ k} := \Phi(\mathbf{g}^i, \mathbf{g}_j, \mathbf{g}^k)$$

利用之前推导的不同基向量之间的转换关系，得

$$= \Phi(c_{(p)}^i \mathbf{g}^{(p)}, c_j^{(q)} \mathbf{g}_{(q)}, c_{(r)}^k \mathbf{g}^{(r)})$$

由张量的线性性，提出系数：

$$\begin{aligned} &= c_{(p)}^i c_j^{(q)} c_{(r)}^k \Phi(\mathbf{g}^{(p)}, \mathbf{g}_{(q)}, \mathbf{g}^{(r)}) \\ &= c_{(p)}^i c_j^{(q)} c_{(r)}^k \Phi_{(q)}^{(p) \ (r)}. \end{aligned} \quad (1.35)$$

完全类似，还可以有

$$\Phi_{(j)}^{(i) \ (k)} = c_p^{(i)} c_{(j)}^g c_r^{(k)} \Phi_{q \ r}^{p \ r}. \quad (1.36)$$

总结一下这两小节得到的结果。对于同一组基下的张量分量，其指标升降通过度量来实现；对于不同基下的张量分量，其指标转换则通过不同基之间的转换系数来完成。

<sup>①</sup> 通常我们约定上面的标号作为行号，下面的标号作为列号。

## 第二章 张量的运算性质

### 2.1 张量积

张量积也叫张量并，用符号“ $\otimes$ ”表示。在 1.2.1 小节给出简单张量的定义时，实际上就用到了张量积。张量积的定义为：

$$\begin{aligned} \forall \Phi \in \mathcal{T}^p(\mathbb{R}^m), \Psi \in \mathcal{T}^q(\mathbb{R}^m), \quad \Phi \otimes \Psi &\in \mathcal{T}^{p+q}(\mathbb{R}^m) \\ &= \left( \Phi^{i_1 \dots i_p} g_{i_1} \otimes \dots \otimes g_{i_p} \right) \otimes \left( \Psi^{j_1 \dots j_q} g^{j_1} \otimes \dots \otimes g^{j_q} \right) \\ &\triangleq \Phi^{i_1 \dots i_p} \Psi^{j_1 \dots j_q} \left( g_{i_1} \otimes \dots \otimes g_{i_p} \right) \otimes \left( g^{j_1} \otimes \dots \otimes g^{j_q} \right). \end{aligned} \quad (2.1)$$

由该定义可以知道，关于简单张量  $\left( g_{i_1} \otimes \dots \otimes g_{i_p} \right) \otimes \left( g^{j_1} \otimes \dots \otimes g^{j_q} \right)$ ，相应的张量分量为

$$(\Phi \otimes \Psi)^{i_1 \dots i_p}_{j_1 \dots j_q}. \quad (2.2)$$

### 2.2 $e$ 点积

张量的  $e$  点积可以用符号“ $\binom{e}{\cdot}$ ”表示。从这个符号可以看出  $e$  点积的作用：前  $e$  个指标缩并，后面的点乘。

对于任意的  $\Phi \in \mathcal{T}^p(\mathbb{R}^m), \Psi \in \mathcal{T}^q(\mathbb{R}^m), e \leq \min\{p, q\} \in \mathbb{N}^*$ ， $e$  点积是这样定义的：

$$\begin{aligned} &\Phi \binom{e}{\cdot} \Psi \\ &= \left( \Phi^{i_1 \dots i_{p-e} i_{p-e+1} \dots i_p} g_{i_1} \otimes \dots \otimes g_{i_{p-e}} \otimes g_{i_{p-e+1}} \otimes \dots \otimes g_{i_p} \right) \\ &\quad \binom{e}{\cdot} \left( \Psi^{j_1 \dots j_e j_{e+1} \dots j_q} g_{j_1} \otimes \dots \otimes g_{j_e} \otimes g_{j_{e+1}} \otimes \dots \otimes g_{j_q} \right) \end{aligned}$$

把高亮的部分做内积，得到度量：

$$\begin{aligned} &\triangleq \Phi^{i_1 \dots i_{p-e} i_{p-e+1} \dots i_p} \Psi^{j_1 \dots j_e j_{e+1} \dots j_q} \\ &\quad g_{i_{p-e+1} j_1} \dots g_{i_p j_e} \left( g_{i_1} \otimes \dots \otimes g_{i_{p-e}} \right) \otimes \left( g_{j_{e+1}} \otimes \dots \otimes g_{j_q} \right) \end{aligned}$$

玩一下“指标升降游戏”（注意有两种结合方式：与  $\Phi$  或  $\Psi$ ），可得

$$= \left\{ \begin{array}{l} \Phi^{i_1 \dots i_{p-e}} \Psi^{j_1 \dots j_e j_{e+1} \dots j_q} \\ \Phi^{i_1 \dots i_{p-e} i_{p-e+1} \dots i_p} \Psi^{j_1 \dots j_e j_{e+1} \dots j_q} \end{array} \right\} \left( g_{i_1} \otimes \dots \otimes g_{i_{p-e}} \right) \otimes \left( g_{j_{e+1}} \otimes \dots \otimes g_{j_q} \right). \quad (2.3)$$

最后一步的花括号中，高亮的  $j_1 \cdots j_e$  和  $i_{p-e+1} \cdots i_p$  都是哑标，可以通过求和求掉。因此有

$$\Phi \left( \begin{smallmatrix} e \\ \cdot \end{smallmatrix} \right) \Psi \in \mathcal{T}^{p+q-2e}(\mathbb{R}^m). \quad (2.4)$$

换句话说， $e$  点积的作用就是将指标哑标化。

作为一个特殊的应用，接下来我们介绍全点积，用符号 “ $\odot$ ” 表示。对于任意的  $\Phi, \Psi \in \mathcal{T}^p(\mathbb{R}^m)$ ，有

$$\begin{aligned} \Phi \odot \Psi &\triangleq \Phi \left( \begin{smallmatrix} p \\ \cdot \end{smallmatrix} \right) \Psi \\ &= \left( \Phi^{i_1 \cdots i_p} g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_p} \right) \left( \begin{smallmatrix} p \\ \cdot \end{smallmatrix} \right) \left( \Psi^{j_1 \cdots j_p} g_{j_1} \otimes \cdots \otimes g_{j_p} \right) \\ &= \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_p} g_{i_1 j_1} \cdots g_{i_p j_p} \\ &= \begin{cases} \Phi_{j_1 \cdots j_p} \Psi^{j_1 \cdots j_p} \\ \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi_{i_1 \cdots i_p} \end{cases} \in \mathbb{R}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

可见，全点积将全部指标哑标化。

张量自身和自身的全点积，定义为它的范数：

$$\Phi \odot \Phi = \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Phi_{i_1 \cdots i_p} =: |\Phi|_{\mathcal{T}^p(\mathbb{R}^m)}^2. \quad (2.6)$$

## 2.3 叉乘

张量的叉乘要求底空间为  $\mathbb{R}^3$ 。对于任意的  $\Phi \in \mathcal{T}^p(\mathbb{R}^3)$ ,  $\Psi \in \mathcal{T}^q(\mathbb{R}^3)$ ，叉乘的定义如下：

$$\begin{aligned} \Phi \times \Psi &= \left( \Phi^{i_1 \cdots i_{p-1} i_p} g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_{p-1}} \otimes g_{i_p} \right) \times \left( \Psi^{j_1 j_2 \cdots j_q} g^{j_1} \otimes g^{j_2} \cdots \otimes g^{j_q} \right) \\ &\triangleq \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi_{j_1 \cdots j_p} g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_{p-1}} \otimes \left( g_{i_p} \times g^{j_1} \right) \otimes g^{j_2} \cdots \otimes g^{j_q} \in \mathcal{T}^{p+q-1}(\mathbb{R}^3). \end{aligned} \quad (2.7)$$

注意到，此时简单张量的维数已经降了一阶。

利用 Levi-Civita 记号，可以进一步展开上式。

$$g_{i_p} \times g^{j_1} = \epsilon_{i_p}^{j_1} g^s, \quad (2.8)$$

式中的

$$\epsilon_{i_p}^{j_1} = \det \left[ g_{i_p}, g^{j_1}, g_s \right]. \quad (2.9)$$

于是

$$\Phi \times \Psi = \epsilon_{i_p}^{j_1} \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi_{j_1 \cdots j_p} g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_{p-1}} \otimes g^s \otimes g^{j_2} \cdots \otimes g^{j_q}. \quad (2.10)$$

下面我们再来类比地定义一种混合积 “ $\left( \begin{smallmatrix} \times \\ \cdot \end{smallmatrix} \right)$ ”。对于任意的  $\Phi, \Psi \in \mathcal{T}^3(\mathbb{R}^m)$ ，定义

$$\begin{aligned} \Phi \left( \begin{smallmatrix} \times \\ \cdot \end{smallmatrix} \right) \Psi &= \left( \Phi^{ijk} g_i \otimes g_j \otimes g_k \right) \left( \begin{smallmatrix} \times \\ \cdot \end{smallmatrix} \right) \left( \Psi_{pqr} g^p \otimes g^q \otimes g^r \right) \\ &\triangleq \Phi^{ijk} \Psi_{pqr} \delta_j^q g_i \otimes (g_k \times g^p) \otimes g^r \end{aligned}$$



缩并掉 Kronecker  $\delta$ ，同时利用 Levi-Civita 记号展开叉乘项，可有

$$= \epsilon_{k\ s}^p \Phi^{ijk} \Psi_{pjr} g_i \otimes g^s \otimes g^r, \quad (2.11)$$

式中的

$$\epsilon_{k\ s}^p = \det[g_k, g^p, g_s]. \quad (2.12)$$

对于这种混合积，并没有一般的约定。不同的研究者往往会采用不同的写法及表示。

## 2.4 置换（一）

本节主要介绍**置换运算**的定义及相关概念，这将使我们暂时离开张量运算的主线。

置换运算实际上是一种交换位置或者改变次序的运算。之后我们还将引入针对张量的置换算子，它是外积运算和外微分运算的基础。这些运算是现代张量分析与微分几何的支柱。

### 2.4.1 置换的定义

我们从一个例子开始。下面是一个  $2 \times 7$  的“矩阵”：

$$\sigma = \begin{bmatrix} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} & \textcircled{6} & \textcircled{7} \\ \textcircled{7} & \textcircled{4} & \textcircled{5} & \textcircled{1} & \textcircled{6} & \textcircled{2} & \textcircled{3} \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

矩阵里面的每一个数字表示一个位置。可以想象成 7 把椅子，先是按第一行的顺序依次排列，再按照第二行的顺序打乱，重新排列。于是这就成为一个 **7 阶置换**。这个定义等价于

$$\sigma = \begin{pmatrix} 4 & 9 & 2 & 7 & 5 & 8 & 3 \\ 3 & 7 & 5 & 4 & 8 & 9 & 2 \end{pmatrix}, \quad (2.14-a)$$

自然也等价于

$$\sigma = \begin{pmatrix} \spadesuit & \heartsuit & \diamondsuit & \clubsuit & \spadesuit & \heartsuit & \diamondsuit \\ \diamondsuit & \clubsuit & \spadesuit & \spadesuit & \heartsuit & \heartsuit & \diamondsuit \end{pmatrix}, \quad (2.14-b)$$

当然，换用任何元素也都是可以的。

通常我们用方括号表示置换的**序号定义**，即标号的排列轮换；用圆括号表示**元素定义**，即标号对应元素的轮换。

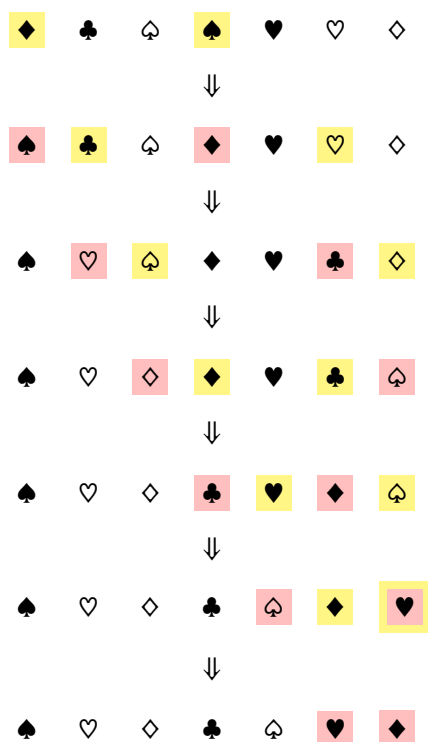
### 2.4.2 置换的符号

接着来定义置换的符号  $\text{sgn } \sigma$ 。这里我们把每次交换两个数字称为一次“操作”。如果经过偶数次“操作”，可以把经置换后的序列恢复为原来的顺序，那么该置换的符号  $\text{sgn } \sigma = 1$ ；而如果经过奇数次“操作”才可以复原，则  $\text{sgn } \sigma = -1$ 。若用一个式子表示，则为

$$\text{sgn } \sigma = (-1)^n, \quad (2.15)$$

其中的  $n$  是恢复原本顺序所需“操作”的次數。

下面我们式 (2.13) 所定义的  $\sigma$  为例，演示求置换符号的过程。这里的关键是通过两两交换，按如下步骤把式 (2.14-b) 的第二行变换成第一行：



一共进行了 6 次两两交换，因此  $\text{sgn } \sigma = 1$ 。

### 2.4.3 置换的复合

再定义一个置换

$$\tau = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 5 & 1 & 7 & 3 & 6 & 4 & 2 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

注意这里用了方括号，因此它是一个序号定义。方便起见，以后的序号我们都只用不带圈的普通数字表示。考虑之前定义的置换

$$\sigma = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 7 & 4 & 5 & 1 & 6 & 2 & 3 \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

则  $\tau$  与  $\sigma$  的复合

$$\tau \circ \sigma = \left( \begin{array}{ccccccc} \square & \square & \square & \square & \square & \square & \odot \\ \odot & \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \odot & \square & \square & \square & \square & \square \end{array} \right) \begin{array}{l} \leftarrow \sigma \\ \leftarrow \tau \end{array} \quad (2.18)$$

与函数、线性变换等的复合类似，这里也用小圆圈“ $\circ$ ”表示置换的复合。

假设经过置换  $\sigma$ 、 $\tau$  作用后得到的序列，分别需要  $p$  次和  $q$  次两两交换才能复原为原来的序列。那么很显然，经过复合置换  $\tau \circ \sigma$  作用后的序列，经过  $q + p$  次两两交换也一定可以复原。因此，复合置换的符号

$$\text{sgn } (\tau \circ \sigma) = (-1)^{q+p} = (-1)^q \cdot (-1)^p = \text{sgn } \tau \cdot \text{sgn } \sigma. \quad (2.19)$$

## 2.4.4 逆置换

逆置换  $\sigma^{-1}$  的定义为

$$\sigma^{-1} \circ \sigma = \text{Id}, \quad (2.20)$$

其中的“**Id**”是恒等映照.

仍然使用式 (2.14-b):

$$\sigma = \begin{pmatrix} \spadesuit & \heartsuit & \diamondsuit & \clubsuit & \spadesuit & \heartsuit & \diamondsuit \\ \clubsuit & \clubsuit & \spadesuit & \spadesuit & \heartsuit & \heartsuit & \diamondsuit \end{pmatrix}, \quad (2.21)$$

那么自然有

$$\sigma^{-1} = \begin{pmatrix} \clubsuit & \clubsuit & \spadesuit & \spadesuit & \heartsuit & \heartsuit & \diamondsuit \\ \spadesuit & \heartsuit & \diamondsuit & \clubsuit & \spadesuit & \heartsuit & \diamondsuit \end{pmatrix}. \quad (2.22)$$

显然, 我们有  $\sigma^{-1} \circ \sigma = \text{Id}$ .

回忆一下逆矩阵的定义. 矩阵  $A$  的逆  $A^{-1}$  既要满足  $A^{-1}A = I$ , 又要满足  $AA^{-1} = I$ . 对于置换也是如此, 因此我们需要检查  $\sigma \circ \sigma^{-1}$ : <sup>①</sup>

$$\sigma \circ \sigma^{-1} = \begin{pmatrix} \clubsuit & \clubsuit & \spadesuit & \spadesuit & \heartsuit & \heartsuit & \diamondsuit \\ \spadesuit_1 & \heartsuit_2 & \diamondsuit_3 & \clubsuit_4 & \spadesuit_5 & \heartsuit_6 & \diamondsuit_7 \\ \diamondsuit_7 & \clubsuit_4 & \spadesuit_5 & \spadesuit_1 & \heartsuit_6 & \heartsuit_2 & \diamondsuit_3 \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \sigma^{-1} \\ \\ \leftarrow \sigma \end{matrix} \quad (2.23)$$

可见的确有  $\sigma \circ \sigma^{-1} = \text{Id}$ .

另外, 由于恒等映照 **Id** 作用后序列不发生变化, 复原所需的交换次数为 0, 因此

$$\text{sgn } \text{Id} = (-1)^0 = 1. \quad (2.24)$$

而根据定义,

$$\text{Id} = \sigma^{-1} \circ \sigma, \quad (2.25)$$

故有

$$\text{sgn } \sigma \cdot \text{sgn } \sigma^{-1} = 1. \quad (2.26)$$

由此, 可以推知

$$\text{sgn } \sigma = \text{sgn } \sigma^{-1}, \quad (2.27)$$

即置换与它的逆具有相同的符号.

## 2.5 置换 (二)

本节将介绍置换运算的基本性质.

<sup>①</sup> 该式中的数字角标用来澄清原始序号.

### 2.5.1 置换的穷尽

先要做一点铺垫. 设有序数组

$$\{i_1, i_2, \dots, i_r\}$$

经置换  $\sigma$  作用后成为

$$\{\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)\},$$

则根据之前的元素定义 (圆括号), 可以把  $\sigma$  记为

$$\sigma = \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \dots & i_r \\ \sigma(i_1) & \sigma(i_2) & \dots & \sigma(i_r) \end{pmatrix}. \quad (2.28)$$

每次置换都将得到一个有序数组. 把它们组合到一起, 就可以得到集合

$$\{(\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)) \mid \forall \sigma \in \mathcal{P}_r\}. \quad (2.29)$$

其中的  $\mathcal{P}_r$  表示  $r$  阶置换的全体. 根据排列组合原理,  $r$  阶置换的总数等于  $r$  个元素的全排列数. 即该集合共有  $r!$  个元素.

下面我们要证明

$$\begin{aligned} & \{(\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)) \mid \forall \sigma \in \mathcal{P}_r\} \\ &= \{(\tau \circ \sigma(i_1), \tau \circ \sigma(i_2), \dots, \tau \circ \sigma(i_r)) \mid \forall \sigma, \tau \in \mathcal{P}_r\} \end{aligned} \quad (2.30-a)$$

$$= \{(\sigma \circ \tau(i_1), \sigma \circ \tau(i_2), \dots, \sigma \circ \tau(i_r)) \mid \forall \sigma, \tau \in \mathcal{P}_r\} \quad (2.30-b)$$

$$= \{(\sigma^{-1}(i_1), \sigma^{-1}(i_2), \dots, \sigma^{-1}(i_r)) \mid \forall \sigma \in \mathcal{P}_r\}. \quad (2.30-c)$$

所谓“穷尽”, 就是将  $\mathcal{P}_r$  中的所有置换  $\sigma$  全部枚举出来. 关于  $\sigma$  的求和就是一个例子. 以上这条性质说明, 置换  $\sigma$  如果作为一个广义上的“哑标”, 那么穷尽的结果与用  $\tau \circ \sigma$ 、 $\sigma \circ \tau$  或  $\sigma^{-1}$  代替该“哑标”的结果是一样的.

这说明置换构成了置换群.?

**证明:** 证明的思路是说明集合互相包含.

对于式 (2.30-a), 右边的  $\tau \circ \sigma$  也是一个  $r$  阶置换, 自然符合左边集合的定义, 因此 右边  $\subset$  左边. 由于这一步是相当显然的, 以下的几个证明我们将略去该步. 另一方面, 左边的  $\sigma$  可以表示成

$$\sigma = \text{Id} \circ \sigma = (\tau \circ \tau^{-1}) \circ \sigma = \tau \circ (\tau^{-1} \circ \sigma), \quad (2.31)$$

这就是右边集合的定义, 因此 左边  $\subset$  右边. 故可证得等式成立.

对于式 (2.30-b), 我们有

$$\sigma = \sigma \circ \text{Id} = \sigma \circ (\tau^{-1} \circ \tau) = (\sigma \circ \tau^{-1}) \circ \tau, \quad (2.32)$$

它符合了右边集合的定义, 因此 左边  $\subset$  右边. 于是等式成立.

对于式 (2.30-c), 我们有

$$\sigma = (\sigma^{-1})^{-1}, \quad (2.33)$$

它符合了右边集合的定义, 因此 左边  $\subset$  右边. 于是等式成立.  $\square$

### 2.5.2 数组元素的乘积

设有序数组  $\{i_1, i_2, \dots, i_r\}$ 、 $\{j_1, j_2, \dots, j_r\}$  和  $\{k_1, k_2, \dots, k_r\}$  经  $r$  阶置换  $\sigma$  作用后分别成为  $\{\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)\}$ 、 $\{\sigma(j_1), \sigma(j_2), \dots, \sigma(j_r)\}$  和  $\{\sigma(k_1), \sigma(k_2), \dots, \sigma(k_r)\}$ ，也就是说

$$\sigma = \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \dots & i_r \\ \sigma(i_1) & \sigma(i_2) & \dots & \sigma(i_r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & \dots & j_r \\ \sigma(j_1) & \sigma(j_2) & \dots & \sigma(j_r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & \dots & k_r \\ \sigma(k_1) & \sigma(k_2) & \dots & \sigma(k_r) \end{pmatrix}. \quad (2.34)$$

我们有如下结论：

$$\forall \sigma \in \mathcal{P}_r, \quad A_{i_1 j_1 k_1} A_{i_2 j_2 k_2} \dots A_{i_r j_r k_r} = A_{\sigma(i_1) \sigma(j_1) \sigma(k_1)} A_{\sigma(i_2) \sigma(j_2) \sigma(k_2)} \dots A_{\sigma(i_r) \sigma(j_r) \sigma(k_r)}, \quad (2.35)$$

式中的  $A_{ijk}$  表示三维数组  $\mathbf{A}$  的一个元素，其指标为  $ijk$ 。

下面通过一个例子来说明这一条性质。还是用式 (2.14-a) 和 (2.14-b) 所定义的置换  $\sigma$ ：

$$\sigma = \begin{pmatrix} 4 & 9 & 2 & 7 & 5 & 8 & 3 \\ 3 & 7 & 5 & 4 & 8 & 9 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \spadesuit & \heartsuit & \diamond & \clubsuit & \spadesuit & \heartsuit & \diamond \\ \diamond & \clubsuit & \spadesuit & \heartsuit & \heartsuit & \heartsuit & \diamond \end{pmatrix}. \quad (2.36)$$

随意写出一个数组元素乘积：

$$A_{379} A_{264} A_{157} A_{483} A_{698} A_{\diamond \spadesuit \heartsuit} A_{\spadesuit \heartsuit \diamond}. \quad (2.37)$$

三组下标分别为

$$\begin{cases} 3, 2, 1, 4, 6, \diamond, \diamond; \\ 7, 6, 5, 8, 9, \clubsuit, \spadesuit; \\ 9, 4, 7, 3, 8, \heartsuit, \heartsuit. \end{cases} \quad (2.38)$$

考虑  $\sigma$  的序号定义式 (2.13)：

$$\sigma = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 7 & 4 & 5 & 1 & 6 & 2 & 3 \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

所谓序号只是位置的抽象表示，而不代表任何真实的元素。请记住：置换始终是位置的变换，而非元素的变换，不要被式 (2.36) 给迷惑了。把  $\sigma$  作用在这三组下标上，可得

$$\begin{cases} \diamond, 4, 6, 3, \diamond, 2, 1; \\ \spadesuit, 8, 9, 7, \clubsuit, 6, 5; \\ \heartsuit, 3, 8, 9, \heartsuit, 4, 7. \end{cases} \quad (2.40)$$

于是之前的数组元素乘积就变成了

$$A_{\spadesuit \heartsuit \diamond} A_{483} A_{698} A_{379} A_{\diamond \spadesuit \heartsuit} A_{264} A_{157}. \quad (2.41)$$

比对一下各元素，可见与式 (2.37) 的确是完全一样的。

### 2.5.3 哑标的穷尽

考虑如下集合：

$$\left\{ (i_1, i_2, \dots, i_r) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\}. \quad (2.42)$$

每个  $i_k$  都有  $m$  种取法, 而  $i_k$  又有  $r$  个, 因此该集合一共有  $m^r$  元素. 我们有

$$\begin{aligned} \forall \sigma \in \mathcal{P}_r, \quad & \left\{ (i_1, i_2, \dots, i_r) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\} \\ &= \left\{ (\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\} \end{aligned} \quad (2.43-a)$$

$$= \left\{ (\sigma^{-1}(i_1), \sigma^{-1}(i_2), \dots, \sigma^{-1}(i_r)) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\}. \quad (2.43-b)$$

这里,  $i_k$  起的就是哑标的作用.

**证明:** 无论怎样置换,  $\sigma(i_k)$  都是  $1, 2, \dots, m$  中的数. 因此, 对于  $\forall \sigma \in \mathcal{P}_r$ ,

$$(\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)) \in \left\{ (i_1, i_2, \dots, i_r) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\}, \quad (2.44)$$

即

$$\begin{aligned} & \left\{ (\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\} \\ & \subset \left\{ (i_1, i_2, \dots, i_r) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\}. \end{aligned} \quad (2.45)$$

另一方面, 由于  $\mathbf{Id} = \sigma^{-1} \circ \sigma$ , 即

$$(i_1, i_2, \dots, i_r) = (\sigma^{-1} \circ \sigma(i_1), \sigma^{-1} \circ \sigma(i_2), \dots, \sigma^{-1} \circ \sigma(i_r)), \quad (2.46)$$

而进行一次逆置换仍然使得元素不离开原有的范围, 也就是说

$$(i_1, i_2, \dots, i_r) \in \left\{ (\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\}, \quad (2.47)$$

即

$$\begin{aligned} & \left\{ (i_1, i_2, \dots, i_r) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\} \\ & \subset \left\{ (\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

两个集合互相包含, 也就证得了式 (2.43-a).

用相同的方法也可证得关于逆置换的 (2.43-b) 式, 此处从略.  $\square$

## 2.6 置换 (三)

本节将给出置换运算在线性代数中的一些应用.

### 2.6.1 行列式

## 2.7 置换 (四)

本节将重回张量运算的主线, 引入置换算子.

### 2.7.1 置换算子；对称张量与反对称张量

对于任意的置换  $\sigma \in \mathcal{P}_r$ ，定义置换算子

$$I_\sigma : \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m) \ni \Phi \mapsto I_\sigma(\Phi) \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m), \quad (2.49)$$

式中

$$I_\sigma(\Phi)(u_1, u_2, \dots, u_r) \triangleq \Phi(u_{\sigma(1)}, u_{\sigma(2)}, \dots, u_{\sigma(r)}) \in \mathbb{R}. \quad (2.50)$$

这里的“ $\dots \in \mathbb{R}$ ”是根据张量的定义：多重线性函数。

如果我们的置换

$$\sigma = \begin{pmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_r \\ \sigma(i_1) & \sigma(i_2) & \cdots & \sigma(i_r) \end{pmatrix}, \quad (2.51)$$

那么对应的置换算子将满足

$$I_\sigma(\Phi)(u_{i_1}, u_{i_2}, \dots, u_{i_r}) \triangleq \Phi(u_{\sigma(i_1)}, u_{\sigma(i_2)}, \dots, u_{\sigma(i_r)}). \quad (2.52)$$

根据张量的线性性，容易知道置换算子也具有线性性：

$$\forall \Phi, \Psi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m) \text{ 以及 } \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \quad I_\sigma(\alpha\Phi + \beta\Psi) = \alpha I_\sigma(\Phi) + \beta I_\sigma(\Psi). \quad (2.53)$$

证明：

$$\begin{aligned} I_\sigma(\alpha\Phi + \beta\Psi)(u_1, \dots, u_r) &= (\alpha\Phi + \beta\Psi)(u_{\sigma(1)}, \dots, u_{\sigma(r)}) \\ &= \alpha\Phi(u_{\sigma(1)}, \dots, u_{\sigma(r)}) + \beta\Psi(u_{\sigma(1)}, \dots, u_{\sigma(r)}) \\ &= \alpha I_\sigma(\Phi)(u_1, \dots, u_r) + \beta I_\sigma(\Psi)(u_1, \dots, u_r) \\ &= [\alpha I_\sigma(\Phi) + \beta I_\sigma(\Psi)](u_1, \dots, u_r). \end{aligned} \quad (2.54)$$

□

两个置换算子复合的结果也是很显然的：

$$\forall \sigma, \tau \in \mathcal{P}_r, \quad I_\sigma \circ I_\tau = I_{\sigma \circ \tau}. \quad (2.55)$$

证明：

$$\begin{aligned} I_\sigma \circ I_\tau(\Phi)(u_{i_1}, \dots, u_{i_r}) &= I_\sigma(\Phi)(u_{\tau(1)}, \dots, u_{\tau(r)}) \\ &= \Phi(u_{\sigma \circ \tau(1)}, \dots, u_{\sigma \circ \tau(r)}) \\ &= I_{\sigma \circ \tau}(\Phi)(u_{i_1}, \dots, u_{i_r}). \end{aligned} \quad (2.56)$$

□

有了置换算子，我们就可以来定义**对称张量**和**反对称张量**。对称张量的全体记为  $\text{Sym}$ ，反对称张量的全体记为  $\text{Skw}$ 。如果以  $\mathbb{R}^m$  为底空间，又分别可以记为  $\mathcal{S}^r(\mathbb{R}^m)$  和  $\mathcal{A}^r(\mathbb{R}^m)$ 。

对于任意的  $\Phi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m)$ ，如果

$$I_\sigma(\Phi) = \Phi, \quad (2.57)$$

则称  $\Phi$  为对称张量，即  $\Phi \in \text{Sym}$  或  $\mathcal{S}^r(\mathbb{R}^m)$ ；如果

$$I_\sigma(\Phi) = \text{sgn } \sigma \cdot \Phi, \quad (2.58)$$

则称  $\Phi$  为反对称张量，即  $\Phi \in \text{Skw}$  或  $\Lambda^r(\mathbb{R}^m)$ 。

有些书中采用分量形式来定义（反）对称张量。这与此处的定义是等价的：

$$I_\sigma(\Phi) = \Phi \iff \Phi_{\sigma(i_1)\dots\sigma(i_p)} = \Phi_{i_1\dots i_p}, \quad (2.59\text{-a})$$

$$I_\sigma(\Phi) = \text{sgn } \sigma \cdot \Phi \iff \Phi_{\sigma(i_1)\dots\sigma(i_p)} = \text{sgn } \sigma \cdot \Phi_{i_1\dots i_p}. \quad (2.59\text{-b})$$

反对称张量与我们熟知的行列式有些类似：交换两列（对于张量就是两个分量），符号相反。全部分量两两交换一遍，前面的系数自然是置换的符号。而如果无论怎么交换分量（当然需要全部两两交换一遍），符号都不变，那这样的张量就是对称张量。

一个二阶张量的协变（或逆变）分量，可以用一个矩阵表示。如果这个张量是一个反对称张量，交换任意两个分量要添加负号；对于矩阵而言，这就意味着交换两行（或两列）……

## 2.7.2 置换算子的表示

根据上文给出的定义，我们有

$$I_\sigma(\Phi)(u_{i_1}, \dots, u_{i_r}) \triangleq \Phi(u_{\sigma(i_1)}, \dots, u_{\sigma(i_r)}). \quad (2.60)$$

首先回忆一下 1.2.1 小节中张量的表示：选一组基（协变、逆变均可），然后把张量用这组基表示。于是

$$I_\sigma(\Phi)(u_{i_1}, \dots, u_{i_r}) = \Phi(u_{\sigma(i_1)}, \dots, u_{\sigma(i_r)})$$

把向量用协变基表示：

$$= \Phi(u_{\sigma(i_1)}^{i_1} g_{i_1}, \dots, u_{\sigma(i_r)}^{i_r} g_{i_r})$$

根据张量的线性性，提出系数：

$$= \Phi(g_{i_1}, \dots, g_{i_r}) \cdot (u_{\sigma(i_1)}^{i_1} \dots u_{\sigma(i_r)}^{i_r})$$

前半部分可以用张量分量表示；而后半部分是一组逆变分量，可以写成内积的形式

$$= \Phi_{i_1\dots i_p} \left[ (u_{\sigma(i_1)}^{i_1} g_{i_1})_{\mathbb{R}^m} \dots (u_{\sigma(i_r)}^{i_r} g_{i_r})_{\mathbb{R}^m} \right] \quad (2.61^*)$$

注意到方括号中的其实是简单张量的定义，这就有

$$= \Phi_{i_1\dots i_p} g^{i_1} \otimes \dots \otimes g^{i_r} (u_{\sigma(i_1)}, \dots, u_{\sigma(i_r)}). \quad (2.61)$$

最后一步仍然没能回到  $(u_{i_1}, \dots, u_{i_r})$ ，因此以上推导只是简单地展开了  $\Phi$ ，并没有获得实质性的结果。

然而，只要稍作改动，情况就会大不相同。考虑一下 2.5.2 小节中置换运算有关数组元素乘积的性质：

$$\forall \tau \in \mathcal{P}_r, \quad A_{i_1 j_1} \dots A_{i_r j_r} = A_{\tau(i_1) \tau(j_1)} \dots A_{\tau(i_r) \tau(j_r)}, \quad (2.62)$$

式中

$$\tau = \begin{pmatrix} i_1 & \dots & i_r \\ \tau(i_1) & \dots & \tau(i_r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j_1 & \dots & j_r \\ \tau(j_1) & \dots & \tau(j_r) \end{pmatrix}. \quad (2.63)$$



由此可以看出，式 (2.61\*) 方括号中的部分其实是由  $\sigma(i_k)$  和  $i_k$  两套指标确定的一组数：

$$A_{\sigma(i_k)i_k} = (u_{\sigma(i_k)}, g^{i_k})_{\mathbb{R}^m}; \quad (2.64)$$

另一方面，显然有  $\sigma^{-1} \in \mathcal{P}_r$ . 于是

$$\begin{aligned} I_\sigma(\Phi)(u_{i_1}, \dots, u_{i_r}) \\ = \Phi_{i_1 \dots i_r} \left[ (u_{\sigma(i_1)}, g^{i_1})_{\mathbb{R}^m} \dots (u_{\sigma(i_r)}, g^{i_r})_{\mathbb{R}^m} \right] \end{aligned}$$

应用置换的性质 (2.62) 式：

$$\begin{aligned} &= \Phi_{i_1 \dots i_r} \left[ (u_{\sigma^{-1} \circ \sigma(i_1)}, g^{\sigma^{-1}(i_1)})_{\mathbb{R}^m} \dots (u_{\sigma^{-1} \circ \sigma(i_r)}, g^{\sigma^{-1}(i_r)})_{\mathbb{R}^m} \right] \\ &= \Phi_{i_1 \dots i_r} \left[ (u_{i_1}, g^{\sigma^{-1}(i_1)})_{\mathbb{R}^m} \dots (u_{i_r}, g^{\sigma^{-1}(i_r)})_{\mathbb{R}^m} \right] \end{aligned}$$

同样，用简单张量表示，可得

$$= \Phi_{i_1 \dots i_r} g^{\sigma^{-1}(i_1)} \otimes \dots \otimes g^{\sigma^{-1}(i_r)} (u_{i_1}, \dots, u_{i_r}). \quad (2.65)$$

这样，我们就得到了置换算子的一种表示：

$$\begin{aligned} I_\sigma(\Phi) &= I_\sigma(\Phi_{i_1 \dots i_r} g^{i_1} \otimes \dots \otimes g^{i_r}) \\ &= \Phi_{i_1 \dots i_r} g^{\sigma^{-1}(i_1)} \otimes \dots \otimes g^{\sigma^{-1}(i_r)}. \end{aligned} \quad (2.66)$$

在式 (2.66) 中， $i_1, \dots, i_r$  都是哑标，要被求和求掉。张量  $\Phi$  的底空间是  $\mathbb{R}^m$ ，所以每个  $i_k$  都有  $m$  个取值。考虑一下 2.5.3 小节中置换运算有关哑标穷尽的性质，有

$$\begin{aligned} \forall \sigma \in \mathcal{P}_r, \quad &\left\{ (i_1, i_2, \dots, i_r) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\} \\ &= \left\{ (\sigma(i_1), \sigma(i_2), \dots, \sigma(i_r)) \mid \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \text{ 可取 } 1, 2, \dots, m \right\}. \end{aligned} \quad (2.67)$$

因此，我们可以把式 (2.66) 中的指标  $i_k$  换成  $\sigma(i_k)$ ：

$$\begin{aligned} I_\sigma(\Phi) &= \Phi_{i_1 \dots i_r} g^{\sigma^{-1}(i_1)} \otimes \dots \otimes g^{\sigma^{-1}(i_r)} \\ &= \Phi_{\sigma(i_1) \dots \sigma(i_r)} g^{\sigma^{-1} \circ \sigma(i_1)} \otimes \dots \otimes g^{\sigma^{-1} \circ \sigma(i_r)} \\ &= \Phi_{\sigma(i_1) \dots \sigma(i_r)} g^{i_1} \otimes \dots \otimes g^{i_r}. \end{aligned} \quad (2.68)$$

这是置换算子的另一种表示。

综上，要获得置换算子的表示，若是对张量分量进行操作，就直接使用对分量指标使用置换；若是对简单张量进行操作，则要对其指标使用逆置换：<sup>①</sup>

$$\begin{aligned} I_\sigma(\Phi) &= I_\sigma(\Phi^{i_1 \dots i_r} g_{i_1} \otimes \dots \otimes g_{i_r}) \\ &= \Phi^{\sigma(i_1) \dots \sigma(i_r)} g_{i_1} \otimes \dots \otimes g_{i_r} \end{aligned} \quad (2.69-a)$$

$$= \Phi^{i_1 \dots i_r} g_{\sigma^{-1}(i_1)} \otimes \dots \otimes g_{\sigma^{-1}(i_r)}. \quad (2.69-b)$$

<sup>①</sup> 这里稍有改动，用了张量的逆变分量，不过实质都是一样的。使用协变分量还是逆变分量，这个嘛，悉听尊便。

## 2.8 对称化算子与反对称化算子

### 2.8.1 定义

对称化算子  $\mathcal{S}$  和反对称化算子  $\mathcal{A}$  的定义分别为

$$\mathcal{S}(\Phi) \triangleq \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} I_\sigma(\Phi) \quad (2.70)$$

和

$$\mathcal{A}(\Phi) \triangleq \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot I_\sigma(\Phi), \quad (2.71)$$

式中,  $\Phi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m)$ . 根据置换算子的线性性, 很容易知道对称化算子与反对称化算子也具有线性性.

对于任意的  $\Phi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m)$ , 我们有

$$\begin{cases} \mathcal{S}(\Phi) \in \text{Sym}, \\ \mathcal{A}(\Phi) \in \text{Skw}. \end{cases} \quad \begin{matrix} (2.72\text{-a}) \\ (2.72\text{-b}) \end{matrix}$$

这说明任意一个张量, 对它作用对称化算子之后, 将变为对称张量; 反之, 作用反对称算子之后, 将变为反对称张量. <sup>①</sup>

**证明:** 要判断  $\mathcal{S}(\Phi)$  是不是对称张量, 首先需要在其上作用一个置换算子  $I_\tau$ :

$$I_\tau[\mathcal{S}(\Phi)] = I_\tau \left[ \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} I_\sigma(\Phi) \right]$$

根据置换算子的线性性 (2.53) 式, 可有

$$= \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} I_\tau \circ I_\sigma(\Phi)$$

再用一下 (2.55) 式, 得到

$$= \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} I_{\tau \circ \sigma}(\Phi)$$

这里求和的作用就是把置换  $\sigma$  穷尽了. 根据 2.5.1 小节中的内容, 再在  $\sigma$  上复合一个置换  $\tau$ , 结果将保持不变:

$$= \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} I_\sigma(\Phi) = \mathcal{S}(\Phi). \quad (2.73)$$

对照一下对称张量的定义 (2.57) 式, 可见的确有  $\mathcal{S}(\Phi) \in \text{Sym}$ .

类似地,

$$I_\tau[\mathcal{A}(\Phi)] = I_\tau \left[ \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot I_\sigma(\Phi) \right]$$

<sup>①</sup> 换一个角度, (反)对称张量实际上可以用(反)对称化算子来定义.

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot \left[ I_{\tau} \circ I_{\sigma}(\Phi) \right] \\
&= \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\tau \circ \sigma}(\Phi)
\end{aligned}$$

根据式 (2.19),  $\text{sgn } \tau \cdot \text{sgn } \sigma = \text{sgn}(\tau \circ \sigma)$ , 于是

$$= \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \frac{\text{sgn}(\tau \circ \sigma)}{\text{sgn } \tau} \cdot I_{\tau \circ \sigma}(\Phi)$$

注意到始终成立  $\text{sgn } \tau \cdot \text{sgn } \tau = 1$  (因为  $\text{sgn } \tau = \pm 1$ ), 又有

$$= \frac{\text{sgn } \tau}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn}(\tau \circ \sigma) \cdot I_{\tau \circ \sigma}(\Phi)$$

利用置换的穷尽,  $\tau \circ \sigma$  与  $\sigma$  相比, 结果将保持不变:

$$= \text{sgn } \tau \cdot \left[ \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\sigma}(\Phi) \right] = \text{sgn } \tau \cdot \mathcal{A}(\Phi). \quad (2.74)$$

与反对称张量的定义 (2.58) 式相比, 可见的确有  $\mathcal{S}(\Phi) \in \text{Skw}$ .

这里的操作直接对张量本身进行, 没有采用涉及到张量“自变量”(向量)的繁琐计算, 因而显得更加干净利落.  $\square$

## 2.8.2 反对称化算子的性质

上文已经定义了反对称化算子  $\mathcal{A}$ :

$$\forall \Phi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m), \quad \mathcal{A}(\Phi) \triangleq \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\sigma}(\Phi) \in \text{Skw 或 } \Lambda^r(\mathbb{R}^m). \quad (2.75)$$

即任意一个  $r$  阶张量, 作用反对称化算子后就变成了  $r$  阶反对称张量.  $r$  阶反对称张量也称为  **$r$ -form** ( $r$ -形式).

下面列出反对称化算子的几条性质.

1. 反对称化算子若重复作用, 仅相当于一次作用:

$$\mathcal{A}^2 := \mathcal{A} \circ \mathcal{A} = \mathcal{A}. \quad (2.76)$$

根据数学归纳法, 显然有

$$\forall p \in \mathbb{N}^*, \quad \mathcal{A}^p := \underbrace{\mathcal{A} \circ \dots \circ \mathcal{A}}_{p \text{ 个 } \mathcal{A}} = \mathcal{A}. \quad (2.77)$$

证明:

$$\begin{aligned}
\mathcal{A}^2 &= \mathcal{A}[\mathcal{A}(\Phi)] \\
&\triangleq \mathcal{A} \left[ \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\sigma}(\Phi) \right] \\
&\triangleq \frac{1}{r!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \tau \cdot I_{\tau} \left[ \frac{1}{r!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\sigma}(\Phi) \right]
\end{aligned}$$

根据线性性，可有

$$= \frac{1}{(r!)^2} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_r} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \tau \text{sgn } \sigma \cdot I_\tau \circ I_\sigma(\Phi)$$

根据式 (2.19) 和式 (2.55)，有

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{(r!)^2} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_r} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn}(\tau \circ \sigma) \cdot I_{\tau \circ \sigma}(\Phi) \\ &= \frac{1}{(r!)^2} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_r} \left[ \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn}(\tau \circ \sigma) \cdot I_{\tau \circ \sigma}(\Phi) \right] \end{aligned}$$

注意到方括号中的部分穷尽了置换  $\sigma$ ，因此可以用  $\sigma$  取代“指标”  $\tau \circ \sigma$ ：

$$= \frac{1}{(r!)^2} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_r} \left[ \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_r} \text{sgn } \sigma \cdot I_\sigma(\Phi) \right]$$

回到定义，有

$$= \frac{1}{r!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_r} \mathcal{A}(\Phi) = \frac{1}{r!} \cdot r! \mathcal{A}(\Phi) = \mathcal{A}(\Phi). \quad (2.78)$$

□

2. 对任意两个张量  $\Phi \in \mathcal{T}^p(\mathbb{R}^m)$  和  $\Psi \in \mathcal{T}^q(\mathbb{R}^m)$  的并施加反对称化算子，可以得到如下结果：

$$\mathcal{A}(\Phi \otimes \Psi) = \mathcal{A}[\mathcal{A}(\Phi) \otimes \Psi] \quad (2.79-a)$$

$$= \mathcal{A}[\Phi \otimes \mathcal{A}(\Psi)] \quad (2.79-b)$$

$$= \mathcal{A}[\mathcal{A}(\Phi) \otimes \mathcal{A}(\Psi)]. \quad (2.79-c)$$

证明： 这里只给出式 (2.79-b) 的证明。另外两式的证明是类似的。

$$\mathcal{A}[\Phi \otimes \mathcal{A}(\Psi)] = \mathcal{A} \left[ \Phi \otimes \left( \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \tau \cdot I_\tau(\Psi) \right) \right]$$

根据张量积的线性性提出系数：

$$= \mathcal{A} \left[ \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \tau \cdot \Phi \otimes I_\tau(\Psi) \right]$$

利用置换的穷尽，可以把  $\tau$  换作  $\tau^{-1}$ ：

$$= \mathcal{A} \left[ \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \tau^{-1} \cdot \Phi \otimes I_{\tau^{-1}}(\Psi) \right]$$

注意到  $\text{sgn } \tau = \text{sgn } \tau^{-1}$ ，于是

$$= \mathcal{A} \left[ \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \tau \cdot \Phi \otimes I_{\tau^{-1}}(\Psi) \right], \quad (2.80)$$

式中,

$$I_{\tau^{-1}}(\Psi) = \Psi^{j_1 \cdots j_q} g_{\tau(j_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\tau(j_q)}. \quad (2.81)$$

于是有

$$\Phi \otimes I_{\tau^{-1}}(\Psi) = \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} (g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_p}) \otimes (g_{\tau(j_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\tau(j_q)}). \quad (2.82)$$

置换  $\tau \in \mathcal{P}_q$  的元素定义为

$$\tau = \begin{pmatrix} j_1 & \cdots & j_q \\ \tau(j_1) & \cdots & \tau(j_q) \end{pmatrix}. \quad (2.83)$$

引入它的“延拓”(或曰“增广”)置换  $\hat{\tau} \in \mathcal{P}_{p+q}$ , 其定义为

$$\hat{\tau} = \begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_p & j_1 & \cdots & j_q \\ i_1 & \cdots & i_p & \tau(j_1) & \cdots & \tau(j_q) \end{pmatrix}. \quad (2.84)$$

这样一来, 就有

$$\begin{aligned} \Phi \otimes I_{\tau^{-1}}(\Psi) &= \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} (g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_p}) \otimes (g_{\tau(j_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\tau(j_q)}) \\ &= \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} (g_{\hat{\tau}(i_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\hat{\tau}(i_p)}) \otimes (g_{\hat{\tau}(j_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\hat{\tau}(j_q)}) \\ &= I_{\hat{\tau}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi). \end{aligned} \quad (2.85)$$

另一方面, 参与轮换的元素只有后面的  $q$  个, 因此  $\hat{\tau}$  起到的作用实际上等同于  $\tau$  (当然两者作用范围不同). 所以可知

$$\text{sgn } \hat{\tau} = \text{sgn } \tau. \quad (2.86)$$

把以上这两点代入式 (2.80) 的推导, 有

$$\begin{aligned} \mathcal{A}[\Phi \otimes \mathcal{A}(\Psi)] &= \mathcal{A} \left[ \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \tau \cdot \Phi \otimes I_{\tau^{-1}}(\Psi) \right] \\ &= \mathcal{A} \left[ \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \hat{\tau} \cdot I_{\hat{\tau}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \right] \end{aligned}$$

再用一次线性性, 可得

$$= \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \hat{\tau} \cdot \mathcal{A} \left[ I_{\hat{\tau}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \right]. \quad (2.87)$$

$\Phi \otimes \Psi$  是一个  $p+q$  阶张量, 它作用置换算子后阶数当然保持不变. 根据反对称化算子的定义, 可有

$$\begin{aligned} \mathcal{A} \left[ I_{\hat{\sigma}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \right] &= \frac{1}{(p+q)!} \sum_{\hat{\sigma} \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn } \hat{\sigma} \cdot \left[ I_{\hat{\sigma}} \circ I_{\hat{\tau}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \right] \\ &= \frac{1}{(p+q)!} \sum_{\hat{\sigma} \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn } \hat{\sigma} \cdot \left[ I_{\hat{\sigma} \circ \hat{\tau}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \right], \end{aligned} \quad (2.88)$$

式中的  $\hat{\sigma}$  和之前定义的  $\hat{\tau}$  含义相同, 只是为了确保哑标不重复, 我们采用了不同的字母来表示. 该式 (2.88) 中的  $\text{sgn } \hat{\sigma}$  可以写成

$$\text{sgn } \hat{\sigma} = \frac{\text{sgn } (\hat{\sigma} \circ \hat{\tau}^{-1})}{\text{sgn } \hat{\tau}^{-1}} = \frac{\text{sgn } (\hat{\sigma} \circ \hat{\tau}^{-1})}{\text{sgn } \hat{\tau}}. \quad (2.89)$$

第二个等号是根据式 (2.27).

注意到 (2.87) 式中也有一个  $\text{sgn } \hat{\tau}$ , 因此

$$\begin{aligned}\mathcal{A}[\Phi \otimes \mathcal{A}(\Psi)] &= \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \hat{\tau} \cdot \mathcal{A}\left[I_{\hat{\tau}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi)\right] \\ &= \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \text{sgn } \hat{\tau} \cdot \left[ \frac{1}{(p+q)!} \sum_{\hat{\sigma} \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn } \hat{\sigma} \cdot \left( I_{\hat{\sigma} \circ \hat{\tau}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \right) \right]\end{aligned}$$

用式 (2.89) 合并掉  $\text{sgn } \hat{\tau}$  和  $\text{sgn } \hat{\sigma}$ :

$$= \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \frac{1}{(p+q)!} \sum_{\hat{\sigma} \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn}(\hat{\sigma} \circ \hat{\tau}^{-1}) \cdot \left[ I_{\hat{\sigma} \circ \hat{\tau}^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \right]$$

再次利用置换穷尽的性质改变“哑标”置换:

$$= \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \frac{1}{(p+q)!} \sum_{\hat{\sigma} \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn } \hat{\sigma} \cdot \left[ I_{\hat{\sigma}}(\Phi \otimes \Psi) \right]$$

终于拨开云雾见青天, 看到了似曾相识的定义:

$$\begin{aligned}&= \frac{1}{q!} \sum_{\tau \in \mathcal{P}_q} \mathcal{A}(\Phi \otimes \Psi) \\ &= \frac{1}{q!} \cdot q! \mathcal{A}(\Phi \otimes \Psi) = \mathcal{A}(\Phi \otimes \Psi).\end{aligned}\tag{2.90}$$

□

3. 反对称化算子具有所谓反导性:

$$\forall \Phi \in \mathcal{T}^p(\mathbb{R}^m), \Psi \in \mathcal{T}^q(\mathbb{R}^m), \quad \mathcal{A}(\Phi \otimes \Psi) = (-1)^{pq} \cdot \mathcal{A}(\Psi \otimes \Phi).\tag{2.91}$$

证明: 首先单独把反对称算子展开. 它所作用的张量为  $p+q$  阶, 因而相应的置换  $\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}$ :

$$\begin{aligned}\mathcal{A} &= \frac{1}{(p+q)!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\sigma} \\ &= \frac{1}{(p+q)!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn}(\sigma \circ \tau^{-1}) \cdot I_{\sigma \circ \tau^{-1}}.\end{aligned}\tag{2.92}$$

第二的等号与之前一样, 利用了置换的穷尽. 这里的  $\tau$  是  $\mathcal{P}_{p+q}$  中一个任意的置换. 利用置换符号的性质, 有

$$\text{sgn}(\sigma \circ \tau^{-1}) = \text{sgn } \sigma \cdot \text{sgn } \tau^{-1} = \text{sgn } \sigma \cdot \text{sgn } \tau.\tag{2.93}$$

因此

$$\begin{aligned}\mathcal{A}(\Phi \otimes \Psi) &= \frac{1}{(p+q)!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn}(\sigma \circ \tau^{-1}) \cdot I_{\sigma \circ \tau^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \\ &= \frac{\text{sgn } \tau}{(p+q)!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\sigma \circ \tau^{-1}}(\Phi \otimes \Psi).\end{aligned}\tag{2.94}$$

把张量展开成分量形式，可以有

$$I_{\sigma \circ \tau^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) = I_{\sigma \circ \tau^{-1}} \left[ \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} (g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_p}) \otimes (g_{j_1} \otimes \cdots \otimes g_{j_q}) \right]$$

根据式 (2.55)，可得

$$= I_{\sigma} \circ I_{\tau^{-1}} \left[ \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} (g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_p}) \otimes (g_{j_1} \otimes \cdots \otimes g_{j_q}) \right]$$

利用置换算子的表示 (2.69-b) 一式，对简单张量进行操作：

$$= I_{\sigma} \left[ \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} (g_{\tau(i_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\tau(i_p)}) \otimes (g_{\tau(j_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\tau(j_q)}) \right]. \quad (2.95)$$

根据  $\tau$  的任意性，不妨取<sup>①</sup>

$$\tau = \begin{pmatrix} i_1 & \cdots & i_p & j_1 & \cdots & j_q \\ j_1 & \cdots & j_q & i_1 & \cdots & i_p \end{pmatrix}. \quad (2.96)$$

这种取法恰好可以使指标为  $i$  和  $j$  的向量交换一下位置。于是

$$\begin{aligned} I_{\sigma \circ \tau^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) &= I_{\sigma} \left[ \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} (g_{\tau(i_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\tau(i_p)}) \otimes (g_{\tau(j_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\tau(j_q)}) \right] \\ &= I_{\sigma} \left[ \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} (g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_p}) \otimes (g_{j_1} \otimes \cdots \otimes g_{j_q}) \right] \end{aligned}$$

张量分量作为数，可交换顺序自然无需多言：

$$\begin{aligned} &= I_{\sigma} \left[ \Psi^{j_1 \cdots j_q} \Phi^{i_1 \cdots i_p} (g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_p}) \otimes (g_{j_1} \otimes \cdots \otimes g_{j_q}) \right] \\ &= I_{\sigma}(\Psi \otimes \Phi). \end{aligned} \quad (2.97)$$

下面再考虑一下  $\tau$  的符号： $j_1$  先和  $i_p$  交换，再和  $i_{p-1}$  交换，以此类推，直到移动至  $i_1$  的位置，一共交换了  $p$  次。而  $j_2, \dots, j_q$  也是同理，各需进行  $p$  次交换。所以总共是  $p \cdot q$  次两两交换。因此，

$$\text{sgn } \tau = (-1)^{pq}. \quad (2.98)$$

回到式 (2.94) 的推导，有

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(\Phi \otimes \Psi) &= \frac{\text{sgn } \tau}{(p+q)!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\sigma \circ \tau^{-1}}(\Phi \otimes \Psi) \\ &= \frac{(-1)^{pq}}{(p+q)!} \sum_{\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}} \text{sgn } \sigma \cdot I_{\sigma}(\Psi \otimes \Phi) \\ &= (-1)^{pq} \cdot \mathcal{A}(\Psi \otimes \Phi). \end{aligned} \quad (2.99)$$

□

① 矩阵中的  $i_p$  和  $j_q$  等未必是对齐的，这里的写法只是为了表示方便。

## 第三章 微分同胚

### 3.1 微分同胚

#### 3.1.1 双射

设  $f$  是集合  $A$  到  $B$  的映射. 如果  $A$  中不同的元素有不同的像, 则称  $f$  为**单射** (也叫 “一对一”); 如果  $B$  中每个元素都是  $A$  中元素的像, 则称  $f$  为**满射**; 如果  $f$  既是单射又是满射, 则称  $f$  为**双射** (也叫 “一一对应”). 三种情况的示意图见 [图 3.1](#).

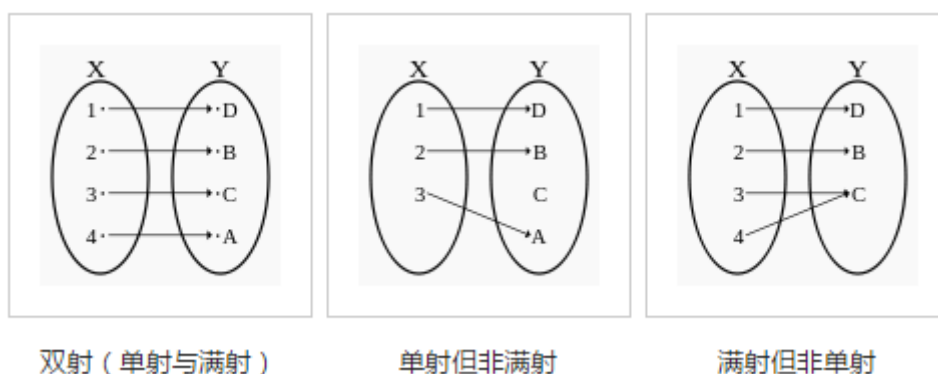


图 3.1: 单射、满射与双射

设开集  $\mathfrak{D}_X, \mathfrak{D}_x \in \mathbb{R}^m$ , 它们之间存在双射, 即一一对应关系:

$$X(x) : \mathfrak{D}_x \ni x = \begin{bmatrix} x^1 \\ \vdots \\ x^m \end{bmatrix} \mapsto X(x) = \begin{bmatrix} X^1 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix} (x) \in \mathfrak{D}_X. \quad (3.1)$$

由于该映照实现了  $\mathfrak{D}_x$  到  $\mathfrak{D}_X$  之间的双射, 因此它存在逆映照:

$$x(X) : \mathfrak{D}_X \ni X = \begin{bmatrix} X^1 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix} \mapsto x(X) = \begin{bmatrix} x^1 \\ \vdots \\ x^m \end{bmatrix} (X) \in \mathfrak{D}_x. \quad (3.2)$$

我们把  $\mathfrak{D}_X$  称为**物理域**, 它是实际物理事件发生的区域;  $\mathfrak{D}_x$  则称为**参数域**. 由于物理域通常较为复杂, 因此我们常把参数域取为规整的形状, 以便之后的处理.



设物理量  $f(\mathbf{X})$  定义在物理域  $\mathfrak{D}_X \in \mathbb{R}^m$  上<sup>①</sup>，则  $f$  就定义了一个场：

$$f : \mathfrak{D}_X \ni \mathbf{X} \mapsto f(\mathbf{X}). \quad (3.3)$$

所谓的“场”，就是自变量用位置刻画的映照。它可以是**标量场**，如温度、压强、密度等，此时  $f(\mathbf{X}) \in \mathbb{R}$ ；也可以是**向量场**，如速度、加速度、力等，此时  $f(\mathbf{X}) \in \mathbb{R}^m$ ；对于更深入的物理、力学研究，往往还需引入**张量场**，此时  $f(\mathbf{X}) \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m)$ 。

$\mathbf{X}$  存在于物理域  $\mathfrak{D}_X$  中，我们称它为**物理坐标**。由于上文已经定义了  $\mathfrak{D}_x$  到  $\mathfrak{D}_X$  之间的双射（不是  $f$ ！），因此  $\mathfrak{D}_x$  中就有唯一的  $\mathbf{x}$  与  $\mathbf{X}$  相对应，它称为**参数坐标**（也叫**曲线坐标**）。又因为物理域  $\mathfrak{D}_X$  上已经定义了场  $f(\mathbf{X})$ ，参数域中必然唯一存在场  $\tilde{f}(\mathbf{x})$  与之对应：

$$\tilde{f} : \mathfrak{D}_x \ni \mathbf{x} \mapsto \tilde{f}(\mathbf{x}) = f \circ \mathbf{X}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{X}(\mathbf{x})). \quad (3.4)$$

$\mathbf{x}$  与  $\mathbf{X}$  是完全等价的，因而  $\tilde{f}$  与  $f$  也是完全等价的，所以同样有

$$f(\mathbf{X}) = \tilde{f}(\mathbf{x}(\mathbf{X})). \quad (3.5)$$

物理域中的场要满足守恒定律，如质量守恒、动量守恒、能量守恒等。从数学上看，这些守恒定律就是  $f(\mathbf{X})$  需要满足的一系列偏微分方程。将场变换到参数域后，它仍要满足这些方程。但我们已经设法将参数域取得较为规整，故在其上进行数值求解就会相当方便。

### 3.1.2 参数域方程

上文已经提到，物理域中的场  $f(\mathbf{X})$  需满足守恒定律，这等价于一系列偏微分方程（PDE）。在物理学和力学中，用到的 PDE 通常是二阶的，它们可以写成

$$\forall \mathbf{X} \in \mathfrak{D}_X, \quad \sum_{\alpha=1}^m A_{\alpha}(\mathbf{X}) \frac{\partial f}{\partial X^{\alpha}}(\mathbf{X}) + \sum_{\alpha=1}^m \sum_{\beta=1}^m B_{\alpha\beta}(\mathbf{X}) \frac{\partial^2 f}{\partial X^{\beta} \partial X^{\alpha}}(\mathbf{X}) = 0 \quad (3.6)$$

的形式。我们的目标是把该物理域方程转化为参数域方程，即关于  $\tilde{f}(\mathbf{x})$  的 PDE。多元微积分中已经提供了解决方案：**链式求导法则**。

考虑到

$$f(\mathbf{X}) = \tilde{f}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) = \tilde{f}(x^1(\mathbf{X}), \dots, x^m(\mathbf{X})), \quad (3.7)$$

于是有

$$\frac{\partial f}{\partial X^{\alpha}}(\mathbf{X}) = \sum_{s=1}^m \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x^s}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \frac{\partial x^s}{\partial X^{\alpha}}(\mathbf{X}). \quad (3.8)$$

这里用到的链式法则，由复合映照可微性定理驱动，它要求  $\tilde{f}$  关于  $\mathbf{x}$  可微，同时  $\mathbf{x}$  关于  $\mathbf{X}$  可微。

对于更高阶的项，往往需要更强的条件。一般地，我们要求

$$\begin{cases} \mathbf{X}(\mathbf{x}) \in \mathcal{C}^p(\mathfrak{D}_x; \mathbb{R}^m); \\ \mathbf{x}(\mathbf{X}) \in \mathcal{C}^p(\mathfrak{D}_X; \mathbb{R}^m). \end{cases} \quad (3.9-a) \quad (3.9-b)$$

这里的  $\mathcal{C}^p$  指直至  $p$  阶偏导数（存在且）连续的映照全体； $p=1$  时，它就等价于可微。至于  $p$  的具体取值，则由 PDE 的阶数所决定。

<sup>①</sup> 实际的物理事件当然只会发生在三维 Euclid 空间中（只就“空间”而言），但在数学上也可以推广到  $m$  维。

通常情况下，已知条件所给定的往往都是  $\mathfrak{D}_x$  到  $\mathfrak{D}_X$  的映射

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}) : \mathfrak{D}_x \ni \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x^1 \\ \vdots \\ x^m \end{bmatrix} \mapsto \mathbf{X}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} X^1 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix} (\mathbf{x}) \in \mathfrak{D}_X, \quad (3.10)$$

用它不好直接得到式 (3.8) 中的  $\partial x^s / \partial X^\alpha$  项，但获得它的“倒数”  $\partial X^\alpha / \partial x^s$  却很容易，只需利用 **Jacobi** 矩阵：

$$D\mathbf{X}(\mathbf{x}) \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\partial X^1}{\partial x^1} & \cdots & \frac{\partial X^1}{\partial x^m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial X^m}{\partial x^1} & \cdots & \frac{\partial X^m}{\partial x^m} \end{bmatrix} (\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{m \times m}, \quad (3.11)$$

它是一个方阵。

有了 **Jacobi** 矩阵，施加一些手法就可以得到所需要的  $\partial x^s / \partial X^\alpha$  项。考虑到

$$\forall \mathbf{X} \in \mathfrak{D}_X, \quad \mathbf{X}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) = \mathbf{X}, \quad (3.12)$$

并且其中的  $\mathbf{X}(\mathbf{x})$  和  $\mathbf{x}(\mathbf{X})$  均可微，可以得到

$$D\mathbf{X}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot D\mathbf{x}(\mathbf{X}) = \mathbf{I}_{m \times m}, \quad (3.13)$$

其中的  $\mathbf{I}_{m \times m}$  是单位阵。因此

$$D\mathbf{x}(\mathbf{X}) \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\partial x^1}{\partial X^1} & \cdots & \frac{\partial x^1}{\partial X^m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x^m}{\partial X^1} & \cdots & \frac{\partial x^m}{\partial X^m} \end{bmatrix} (\mathbf{X}) = (D\mathbf{X})^{-1}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial X^1}{\partial x^1} & \cdots & \frac{\partial X^1}{\partial x^m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial X^m}{\partial x^1} & \cdots & \frac{\partial X^m}{\partial x^m} \end{bmatrix}^{-1} (\mathbf{x}). \quad (3.14)$$

用代数的方法总可以求出

$$\frac{\partial x^s}{\partial X^\alpha} =: \varphi_\alpha^s, \quad (3.15)$$

它是通过求逆运算确定的函数，即位于矩阵  $D\mathbf{x}$  第  $s$  行第  $\alpha$  列的元素。这样就有

$$\frac{\partial f}{\partial X^\alpha}(\mathbf{X}) = \sum_{s=1}^m \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x^s}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \varphi_\alpha^s(\mathbf{x}(\mathbf{X})). \quad (3.16)$$

接下来处理二阶偏导数。由上式，

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f}{\partial X^\beta \partial X^\alpha}(\mathbf{X}) &= \sum_{s=1}^m \left[ \left( \sum_{k=1}^m \frac{\partial^2 \tilde{f}}{\partial x^k \partial x^s}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \frac{\partial x^s}{\partial X^\beta}(\mathbf{X}) \right) \cdot \varphi_\alpha^s(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x^s}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \left( \sum_{k=1}^m \frac{\partial \varphi_\alpha^s}{\partial x^k}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \frac{\partial x^k}{\partial X^\beta}(\mathbf{X}) \right) \right] \end{aligned}$$

继续利用式 (3.15)，有

$$\begin{aligned} &= \sum_{s=1}^m \left[ \left( \sum_{k=1}^m \frac{\partial^2 \tilde{f}}{\partial x^k \partial x^s}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \varphi_\beta^s(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \right) \cdot \varphi_\alpha^s(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x^s}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \left( \sum_{k=1}^m \frac{\partial \varphi_\alpha^s}{\partial x^k}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \varphi_\beta^k(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \right) \right]. \quad (3.17) \end{aligned}$$

这样，就把一阶和二阶偏导数项全部用关于  $\mathbf{x}$  的函数<sup>①</sup>表达了出来。换句话说，我们已经把物理域

<sup>①</sup> 当然它仍然是  $\mathbf{X}$  的隐函数： $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X})$ 。

中  $f$  关于  $\mathbf{X}$  的 PDE，转化成了参数域中  $\tilde{f}$  关于  $\mathbf{x}$  的 PDE。这就是上文要实现的目标。

### 3.1.3 微分同胚的定义

上文已经指出了  $\mathfrak{D}_x$  到  $\mathfrak{D}_X$  的映照  $\mathbf{X}(\mathbf{x})$  所需满足的一些条件。这里再次罗列如下：

1.  $\mathfrak{D}_X, \mathfrak{D}_x \in \mathbb{R}^m$  均为开集<sup>①</sup>；
2. 存在  $\mathfrak{D}_x$  同  $\mathfrak{D}_X$  之间的双射  $\mathbf{X}(\mathbf{x})$ ，即存在一一对应关系；
3.  $\mathbf{X}(\mathbf{x})$  和它的逆映照  $\mathbf{x}(\mathbf{X})$  满足一定的正则性要求。

对第 3 点要稍作说明。

如果满足这三点，则称  $\mathbf{X}(\mathbf{x})$  为  $\mathfrak{D}_x$  与  $\mathfrak{D}_X$  之间的  $\mathcal{C}^p$ -微分同胚，记为  $\mathbf{X}(\mathbf{x}) \in \mathcal{C}^p(\mathfrak{D}_x; \mathfrak{D}_X)$ 。把物理域中的一个部分对应到参数域上的一个部分，需要的仅仅是双射这一条件；而要使得物理域中所满足的 PDE 能够转换到参数域上，就需要“过去”和“回来”都满足  $p$  阶偏导数连续的条件（即正则性要求）。

---

<sup>①</sup> 用形象化的语言来说，如果在区域中的任意一点都可以吹出一个球，并能使球上的每个点都落在区域内，那么这个区域就是开集。这是复合映照可微性定理的一个要求。