

第一章 张量的定义及表示

1.1 对偶基，度量

1.1.1 对偶基

设 $\{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^m$ 是 \mathbb{R}^m 空间中的一组基，即极大线性无关向量组。此时， \mathbb{R}^m 中将唯一存在另一组基 $\{\mathbf{g}^i\}_{i=1}^m$ ，二者满足对偶关系：

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

式中， $(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}^j)_{\mathbb{R}^m}$ 的 δ_i^j 是 **Kronecker δ 函数**。

证明： 根据内积的定义，

$$(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}^j)_{\mathbb{R}^m} = (\mathbf{g}^j)^\top \mathbf{g}_i = \delta_i^j, \quad (1.2)$$

其中的 i, j 可取 $1, 2, \dots, m$ 。写成矩阵形式，为^①

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{g}^1)^\top \\ \vdots \\ (\mathbf{g}^m)^\top \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_m \end{bmatrix} = \mathbf{I}_m. \quad (1.3)$$

左边的第一个矩阵拆分成了 m 行，每行是一个 m 维行向量；第二个矩阵则拆分成了 m 列，每行是一个 m 维列向量。根据分块矩阵的乘法，所得结果对角元为 δ_i^i ，非对角元则为 δ_i^j （其中 $i \neq j$ ），即单位阵。

把第一个矩阵的转置挪到外面，可有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}^1, \dots, \mathbf{g}^m \end{bmatrix}^\top \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_m \end{bmatrix} = \mathbf{I}_m. \quad (1.4)$$

$\{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^m$ 作为基，必然满足 $[\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_m]$ 非奇异。因此

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}^1, \dots, \mathbf{g}^m \end{bmatrix}^\top = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_m \end{bmatrix}^{-1}, \quad (1.5)$$

即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}^1, \dots, \mathbf{g}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_m \end{bmatrix}^{-\top}. \quad (1.6)$$

逆矩阵（及其转置）是存在且唯一的，这就证明了对偶基的存在性和唯一性。□

我们把指标写在下面的基 $\{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^m$ 称为**协变基**；指标写在上面的基 $\{\mathbf{g}^i\}_{i=1}^m$ 称为**逆变基**。式 (1.6) 明确指出了逆变基与协变基的关系。

① 除非特殊说明，本文中的所有向量均取列向量。

1.1.2 度量

下面引入**度量**的概念。其定义为

$$\begin{cases} g_{ij} \triangleq (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_j)_{\mathbb{R}^m}, \\ g^{ij} \triangleq (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}^j)_{\mathbb{R}^m}. \end{cases} \quad (1.7-a)$$

$$(1.7-b)$$

这两种度量满足

$$g_{ik} g^{kj} = \delta_i^j. \quad (1.8)$$

也可以写成矩阵的形式：

$$\begin{bmatrix} g_{ik} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g^{kj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i^j \end{bmatrix} = \mathbf{I}_m, \quad (1.9)$$

其中的 \mathbf{I}_m 是 m 阶单位阵。该式的证明将在稍后给出。

由于内积具有交换律，因而度量的两个指标显然可以交换：

$$g_{ij} = g_{ji}, \quad g^{ij} = g^{ji}. \quad (1.10)$$

利用度量，可以获得**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^①。根据对偶关系式 (1.1) 和度量的定义式 (1.7-a)、(1.7-b)，可知

$$\begin{cases} \mathbf{g}_i = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^k = g_{ik} \mathbf{g}^k, \\ \mathbf{g}_i = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}^k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_k = \delta_i^k \mathbf{g}_k \end{cases} \quad (1.11-a)$$

$$(1.11-b)$$

以及

$$\begin{cases} \mathbf{g}^i = (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^k = \delta_k^i \mathbf{g}^k, \\ \mathbf{g}^i = (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}^k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_k = g^{ik} \mathbf{g}_k. \end{cases} \quad (1.12-a)$$

$$(1.12-b)$$

这四个式子中，式 (1.11-b) 和 (1.12-a) 是平凡的，而式 (1.11-a) 和 (1.12-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”。

需要说明的是，根据 **Einstein 求和约定**，重复指标（即哑标，这里是 k ）且一上一下时，已经暗含了求和。后文除非特殊说明，也都是如此。

现在我们来证明式 (1.8)：

$$g_{ik} g^{kj} = \delta_i^j. \quad (1.13)$$

证明：

$$g_{ik} g^{kj} = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} g^{kj} = (\mathbf{g}_i, g^{kj} \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \quad (1.14)$$

根据式 (1.12-b)，有

$$g^{kj} \mathbf{g}_k = g^{jk} \mathbf{g}_k = \mathbf{g}^j \quad (1.15)$$

因此可得

$$g_{ik} g^{kj} = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}^j)_{\mathbb{R}^m} = \delta_i^j. \quad (1.16)$$

□

① 所谓用某组基来“表示”一个向量，就是把它朝各个基的方向做投影，然后再求和。

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：

$$\xi = (\xi, g^k)_{\mathbb{R}^m} g_k = \xi^k g_k, \quad (1.17-a)$$

也可以用逆变基表示：

$$\xi = (\xi, g_k)_{\mathbb{R}^m} g^k = \xi_k g^k. \quad (1.17-b)$$

式中， ξ^k 是 ξ 与第 k 个逆变基做内积的结果，称为 ξ 的第 k 个**逆变分量**；而 ξ_k 是 ξ 与第 k 个协变基做内积的结果，称为 ξ 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：

$$\Phi : \underbrace{\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m \times \cdots \times \mathbb{R}^m}_{r \text{ 个 } \mathbb{R}^m} \ni \{u_1, u_2, \dots, u_r\} \mapsto \Phi(u_1, u_2, \dots, u_r) \in \mathbb{R}, \quad (1.18)$$

式中的 Φ 满足

$$\begin{aligned} \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}, \quad \Phi(u_1, \dots, \alpha \tilde{u}_i + \beta \hat{u}_i, \dots, u_r) \\ = \alpha \Phi(u_1, \dots, \tilde{u}_i, \dots, u_r) + \beta \Phi(u_1, \dots, \hat{u}_i, \dots, u_r), \end{aligned} \quad (1.19)$$

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：

$$\begin{aligned} \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R} \text{ 和 } \Phi, \Psi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m), \quad (\alpha \Phi + \beta \Psi)(u_1, u_2, \dots, u_r) \\ \triangleq \alpha \Phi(u_1, u_2, \dots, u_r) + \beta \Psi(u_1, u_2, \dots, u_r), \end{aligned} \quad (1.20)$$

于是

$$\alpha \Phi + \beta \Psi \in \mathcal{T}^r(\mathbb{R}^m). \quad (1.21)$$

下面我们要获得 Φ 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 Φ 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，

$$= u^i v_j w^k \Phi(g_i, g^j, g_k). \quad (1.22)$$

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 Φ “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

$$u^i v_j w^k = (u, g^i)_{\mathbb{R}^m} \cdot (v, g_j)_{\mathbb{R}^m} \cdot (w, g^k)_{\mathbb{R}^m}. \quad (1.23)$$

暂时中断一下思路，先给出简单张量的定义。

$$\forall u, v, w \in \mathbb{R}^m, \quad \xi \otimes \eta \otimes \zeta(u, v, w) \triangleq (\xi, u)_{\mathbb{R}^m} \cdot (\eta, v)_{\mathbb{R}^m} \cdot (\zeta, w)_{\mathbb{R}^m} \in \mathbb{R}, \quad (1.24)$$

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

$$= \alpha \xi \otimes \eta \otimes \zeta(u, \tilde{v}, w) + \beta \xi \otimes \eta \otimes \zeta(u, \hat{v}, w). \quad (1.25)$$

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

$$\xi \otimes \eta \otimes \zeta \in \mathcal{T}^3(\mathbb{R}^m). \quad (1.26)$$

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 (1.23) 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^①表示方法：

$$g^i \otimes g_j \otimes g^k(u, v, w) \quad (1.27-a)$$

或者

$$u \otimes v \otimes w(g^i, g_j, g^k), \quad (1.27-b)$$

我们这里取上面一种。代入式 (1.22)，得

$$\Phi(u, v, w) = \Phi(g_i, g^j, g_k) \cdot g^i \otimes g_j \otimes g^k(u, v, w)$$

^① 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。

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

$$= [\Phi(g_i, g^j, g_k) g^i \otimes g_j \otimes g^k](u, v, w). \quad (1.28)$$

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:

$$\Phi = \Phi(g_i, g^j, g_k) g^i \otimes g_j \otimes g^k =: \Phi_{i \ k}^j g^i \otimes g_j \otimes g^k, \quad (1.29)$$

即

$$\Phi_{i \ k}^j := \Phi(g_i, g^j, g_k), \quad (1.30)$$

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, 它依赖于式 (1.22) 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**:

$$\Phi_{ijk} := \Phi(g_i, g_j, g_k); \quad (1.31)$$

指标全部在上面的, 称为**逆变分量**:

$$\Phi^{ijk} := \Phi(g^i, g^j, g^k); \quad (1.32)$$

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.

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:

$$\xi = \begin{cases} \xi^i g_i, \\ \xi_i g^i. \end{cases} \quad (1.33)$$

式中, 协变分量与逆变分量满足坐标转换关系:

$$\begin{cases} \xi^i = (\xi, g^i)_{\mathbb{R}^m} = (\xi, g^{ik} g_k)_{\mathbb{R}^m} = g^{ik} (\xi, g_k)_{\mathbb{R}^m} = g^{ik} \xi_k, \\ \xi_i = (\xi, g_i)_{\mathbb{R}^m} = (\xi, g_{ik} g^k)_{\mathbb{R}^m} = g_{ik} (\xi, g^k)_{\mathbb{R}^m} = g_{ik} \xi^k. \end{cases} \quad (1.34-a)$$

$$(1.34-b)$$

每一式的第二个等号都用到了基向量转换关系, 见式 (1.11-a) 和 (1.12-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

$$\begin{aligned} &= g_{ip} g^{jq} g_{kr} \Phi(g^p, g_q, g^r) \\ &= g_{ip} g^{jq} g_{kr} \Phi_q^{p \ r}. \end{aligned} \quad (1.35)$$

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 $\Phi^{ijk} = g^{ip} \Phi_p^{j \ k}$ 、 $\Phi_j^{i \ k} = g_{jp} g^{kq} \Phi_k^{ip}$ 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 $\{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^m$ 和相应的对偶基 $\{\mathbf{g}^i\}_{i=1}^m$ 之外, 当然还可以有其他的基, 比如带括号的 $\{\mathbf{g}_{(i)}\}_{i=1}^m$ 以及对应的对偶基 $\{\mathbf{g}^{(i)}\}_{i=1}^m$. 前者对应形如 $\Phi_j^i := \Phi(\mathbf{g}^i, \mathbf{g}_j, \mathbf{g}^k)$ 的张量, 后者则对应带括号的张量, 如 $\Phi_{(q)}^{(p)(r)} := \Phi(\mathbf{g}^{(p)}, \mathbf{g}_{(q)}, \mathbf{g}^{(r)})$. 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 $\mathbf{g}_{(i)}$, 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:

$$\mathbf{g}_{(i)} = \begin{cases} (\mathbf{g}_{(i)}, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^k, \\ (\mathbf{g}_{(i)}, \mathbf{g}^k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_k. \end{cases} \quad (1.36)$$

同理, 自然还有它的对偶基:

$$\mathbf{g}^{(i)} = \begin{cases} (\mathbf{g}^{(i)}, \mathbf{g}_k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^k, \\ (\mathbf{g}^{(i)}, \mathbf{g}^k)_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_k. \end{cases} \quad (1.37)$$

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

$$\begin{cases} \mathbf{g}_{(i)} = c_{(i)}^k \mathbf{g}_k, \\ \mathbf{g}^{(i)} = c_k^{(i)} \mathbf{g}^k. \end{cases} \quad (1.38-a)$$

$$\mathbf{g}^{(i)} = c_k^{(i)} \mathbf{g}^k. \quad (1.38-b)$$

容易看出, 这两个系数具有如下性质:

$$c_k^{(i)} c_{(j)}^k = \delta_j^i. \quad (1.39)$$

写成矩阵形式^①, 为

$$\begin{bmatrix} c_k^{(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{(j)}^k \end{bmatrix} = [\delta_j^i] = \mathbf{I}_m. \quad (1.40)$$

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

$$= (\mathbf{g}^{(i)}, \mathbf{g}_{(j)})_{\mathbb{R}^m}. \quad (1.41)$$

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:

$$\begin{cases} \mathbf{g}_i = (\mathbf{g}_i, \mathbf{g}^{(k)})_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}_{(k)} = c_i^{(k)} \mathbf{g}_{(k)}, \\ \mathbf{g}^i = (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}_{(k)})_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^{(k)} = c_{(k)}^i \mathbf{g}^{(k)}. \end{cases} \quad (1.42-a)$$

$$\mathbf{g}^i = (\mathbf{g}^i, \mathbf{g}_{(k)})_{\mathbb{R}^m} \mathbf{g}^{(k)} = c_{(k)}^i \mathbf{g}^{(k)}. \quad (1.42-b)$$

^① 通常我们约定上面的标号作为行号, 下面的标号作为列号.

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，

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

利用之前推导的不同基向量之间的转换关系，得

$$= \Phi\left(c_{(p)}^i g^{(p)}, c_j^{(q)} g_{(q)}, c_{(r)}^k g^{(r)}\right)$$

由张量的线性性，提出系数：

$$\begin{aligned} &= c_{(p)}^i c_j^{(q)} c_{(r)}^k \Phi(g^{(p)}, g_{(q)}, g^{(r)}) \\ &= c_{(p)}^i c_j^{(q)} c_{(r)}^k \Phi_{(q)}^{(p) \ (r)}. \end{aligned} \quad (1.43)$$

完全类似，还可以有

$$\Phi_{(j)}^{(i) \ (k)} = c_p^{(i)} c_{(j)}^g c_r^{(k)} \Phi_q^{p \ r}. \quad (1.44)$$

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.

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：

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

玩一下“指标升降游戏”（注意有两种结合方式：与 Φ 或 Ψ ），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

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

换句话说， e 点积的作用就是将指标哑标化。

作为一个特例，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

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

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。

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

式中的

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

于是

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

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

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

缩并掉 Kronecker δ ，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 2×7 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。

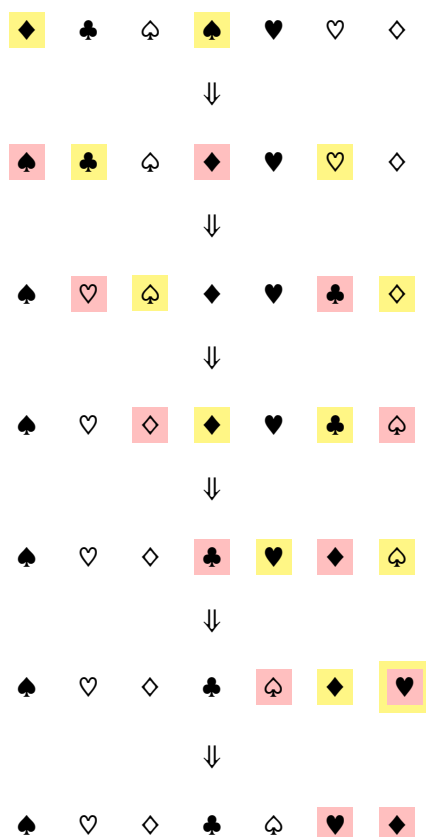
2.4.2 置换的符号

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。

下面我们以后式 (2.13) 所定义的 σ 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 τ 与 σ 的复合

$$\tau \circ \sigma = \begin{pmatrix} \begin{matrix} \square & \square & \square & \square & \square & \square & \odot \end{matrix} \\ \begin{matrix} \odot & \square & \square & \square & \square & \square & \square \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} \square & \odot & \square & \square & \square & \square & \square \end{matrix} \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \sigma \\ \leftarrow \tau \end{matrix} \quad (2.18)$$

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 σ 、 τ 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

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

2.4.4 逆置换

逆置换 σ^{-1} 的定义为

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

其中的“ \mathbf{Id} ”是恒等映照.

仍然使用式 (2.14-b):

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

那么自然有

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

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

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 $\sigma \circ \sigma^{-1}$: ^①

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

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

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

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

而根据定义,

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

故有

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

由此, 可以推知

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

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.

^① 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 σ 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 σ 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

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

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

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

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

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

所谓“穷尽”, 就是将 \mathcal{P}_r 中的所有置换 σ 全部枚举出来. 关于 σ 的求和就是一个例子. 以上这条性质说明, 置换 σ 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 σ^{-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 σ 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 σ 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 σ ：

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

随意写出一个数组元素乘积：

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

三组下标分别为

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

考虑 σ 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 σ 作用在这三组下标上，可得

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

于是之前的数组元素乘积就变成了

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

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 Sym ，反对称张量的全体记为 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 $\Phi \in \mathcal{S}^r(\mathbb{R}^m)$ ，如果

$$\mathbf{I}_\sigma(\Phi) = \Phi, \quad (2.57)$$

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

$$\mathbf{I}_\sigma(\Phi) = \text{sgn } \sigma \cdot \Phi, \quad (2.58)$$

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

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：

$$\mathbf{I}_\sigma(\Phi) = \Phi \iff \Phi_{\sigma(i_1)\dots\sigma(i_p)} = \Phi_{i_1\dots i_p}, \quad (2.59-a)$$

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

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

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

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

$$\mathbf{I}_\sigma(\Phi)(u_{i_1}, \dots, u_{i_r}) = \Phi(u_{\sigma(i_1)}, \dots, u_{\sigma(i_r)})$$

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 Φ ，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：

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

式中

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

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

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

应用置换的性质 (2.62) 式：

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

同样，用简单张量表示，可得

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

这样，我们就得到了置换算子的一种表示：

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

在式 (2.66) 中， i_1, \dots, i_r 都是哑标，要被求和求掉。张量 Φ 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 $\sigma(i_k)$ ：

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

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:^①

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

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

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

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

和

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

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

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

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.^②

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 \mathbf{I}_τ :

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

根据置换算子的线性性 (2.53) 式, 可有

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

再用一下 (2.55) 式, 得到

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

① 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 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.

这里求和的作用就是把置换 σ 穷尽了. 根据 2.5.1 小节中的内容, 再在 σ 上复合一个置换 τ , 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,

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

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 σ 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：

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

根据线性性，可有

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

根据式 (2.19) 和式 (2.55)，有

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

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

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

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。

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

根据张量积的线性性提出系数：

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

利用置换的穷尽，可以把 τ 换作 τ^{-1} ：

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

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

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

式中，

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

于是有

$$\Phi \otimes \mathbf{I}_{\tau^{-1}}(\Psi) = \Phi^{i_1 \cdots i_p} \Psi^{j_1 \cdots j_q} \left(g_{i_1} \otimes \cdots \otimes g_{i_p} \right) \otimes \left(g_{\tau(j_1)} \otimes \cdots \otimes g_{\tau(j_q)} \right). \quad (2.82)$$

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

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

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 τ （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

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

再用一次线性性，可得

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

$\Phi \otimes \Psi$ 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

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

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

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

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

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

再次利用置换穷尽的性质改变“哑标”置换：

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

终于拨开云雾见青天，看到了似曾相识的定义：

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

□

3. 反对称化算子具有所谓反导性：

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

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 $\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}$ ：

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

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

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

因此

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

把张量展开成分量形式，可以有

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

根据式 (2.55)，可得

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

利用置换算子的表示 (2.69-b) 一式，对简单张量进行操作：

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

根据 τ 的任意性，不妨取^①

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

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

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

张量分量作为数，可交换顺序自然无需多言：

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

下面再考虑一下 τ 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

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

□

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。