

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_j^i （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 $\begin{bmatrix} \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_m \end{bmatrix}$ 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

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

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:

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

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

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

以及

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

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

$$\Phi(u, v, w)$$

^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。

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

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:

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

$$\quad (1.34-b)$$

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

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

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:

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

^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：

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

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

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

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 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。

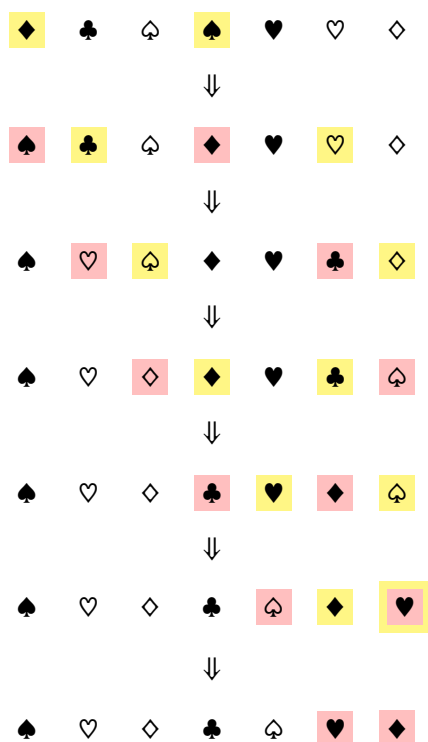
2.4.2 置换的符号

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

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

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 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

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

2.4.4 逆置换

逆置换 σ^{-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):

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

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 $\sigma^{-1} \circ \sigma = \text{Id}$.

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 $\sigma \circ \sigma^{-1}$: ^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 $\sigma \circ \sigma^{-1} = \text{Id}$.

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.

^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

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

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 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 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：

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

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 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

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

于是之前的数组元素乘积就变成了

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

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. □

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

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

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

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

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

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：

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

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

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：

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

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 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 $\sigma(i_k)$ ：

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

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：^①

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

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

^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。

2.8 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

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

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. ^①

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

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

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:

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

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,

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

^① 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.

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

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

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

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

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

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

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

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} :

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

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,

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

于是有

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

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

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

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

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

$\Phi \otimes \Psi$ 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:

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

□

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 $\sigma \in \mathcal{P}_{p+q}$:

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

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

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

因此

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

把张量展开成分量形式，可以有

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

根据式 (2.55)，可得

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

利用置换算子的表示 (2.69-b) 一式，对简单张量进行操作：

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

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

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

张量分量作为数，可交换顺序自然无需多言：

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

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。

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 的映照. 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](#).

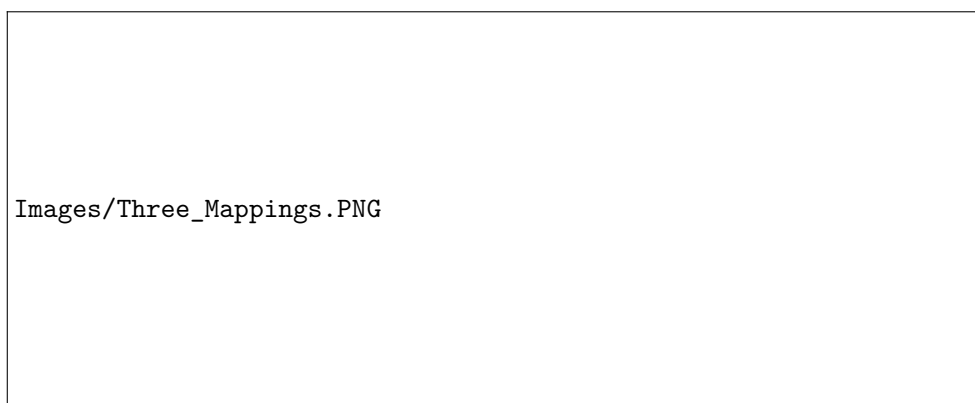


图 3.1: 单射、满射与双射

设开集 $\mathfrak{D}_X, \mathfrak{D}_x \subset \mathbb{R}^m$, 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 $\mathfrak{D}_X \subset \mathbb{R}^m$ 上^①，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

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

$$(3.9-b)$$

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。

^① 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 的映照

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

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**：

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

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

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

其中的 \mathbf{I}_m 是单位阵。因此

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

用代数的方法总可以求出

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

它是通过求逆运算确定的函数，即位于矩阵 $\mathbf{D}\mathbf{x}$ 第 s 行第 α 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

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

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

这样，就把一阶和二阶偏导数项全部用关于 \mathbf{x} 的函数^①表达了出来。换句话说，我们已经把物理域中 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. $\mathfrak{D}_x, \mathfrak{D}_X \subset \mathbb{R}^m$ 均为开集^②；
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 $\mathbf{x}(X)$ 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）。

3.2 向量值映照的可微性

3.2.1 可微性的定义

设 \mathbf{x}_0 是参数域 \mathfrak{D}_x 中的一个内点。在映照 $\mathbf{X}(\mathbf{x})$ 的作用下，它对应到物理域 \mathfrak{D}_X 中的点 $\mathbf{X}(\mathbf{x}_0)$ 。参数域是一个开集。根据开集的定义，必然存在一个实数 $\lambda > 0$ ，使得以 \mathbf{x}_0 为球心、 λ 为半径的球能够完全落在定义域 \mathfrak{D}_x 内，即

$$\mathfrak{B}_\lambda(\mathbf{x}_0) \subset \mathfrak{D}_x, \quad (3.18)$$

其中的 $\mathfrak{B}_\lambda(\mathbf{x}_0)$ 表示 \mathbf{x}_0 的 λ 邻域。

如果 $\exists \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m)$ ^③，满足

$$\forall \mathbf{x}_0 + \mathbf{h} \in \mathfrak{B}_\lambda(\mathbf{x}_0), \quad \mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \mathbf{h}) - \mathbf{X}(\mathbf{x}_0) = \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{h}) + o(\|\mathbf{h}\|_{\mathbb{R}^m}) \in \mathbb{R}^m, \quad (3.19)$$

则称向量值映照 $\mathbf{X}(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}_0 点可微。其中， $\mathcal{L}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m)$ 表示从 \mathbb{R}^m 到 \mathbb{R}^m 的线性变换全体。

根据这个定义，所谓可微性，指由自变量变化所引起的因变量变化，可以用一个线性变换近似，而误差为一阶无穷小量。自变量可见到因变量空间最简单的映照形式就是线性映照（线性变换），因而具有可微性的向量值映照具有至关重要的作用。

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

② 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。

③ 正如之前已经定义的， \mathbf{DX} 已经用来表示 Jacobi 矩阵。这里还是请先暂时将它视为一种记号，其具体形式将在下一小节给出。

3.2.2 Jacobi 矩阵

下面我们研究 $\mathbf{DX}(\mathbf{x}_0) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m)$ 的表达形式. 由于 $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^m$, 所以

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h^1 \\ \vdots \\ h^m \end{bmatrix} = h^1 \mathbf{e}_1 + \cdots + h^i \mathbf{e}_i + \cdots + h^m \mathbf{e}_m. \quad (3.20)$$

另一方面, $\mathbf{DX}(\mathbf{x}_0) \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^m, \mathbb{R}^m)$ 具有线性性:

$$\forall \alpha, \beta \in \mathbb{R} \text{ 和 } \tilde{\mathbf{h}}, \hat{\mathbf{h}} \in \mathbb{R}^m, \quad \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\alpha \tilde{\mathbf{h}} + \beta \hat{\mathbf{h}}) = \alpha \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\tilde{\mathbf{h}}) + \beta \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\hat{\mathbf{h}}). \quad (3.21)$$

这样就有

$$\begin{aligned} \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{h}) &= \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(h^1 \mathbf{e}_1 + \cdots + h^i \mathbf{e}_i + \cdots + h^m \mathbf{e}_m) \\ &= h^1 \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_1) + \cdots + h^i \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_i) + \cdots + h^m \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_m) \end{aligned} \quad (3.22)$$

注意到 $h^i \in \mathbb{R}$ 以及 $\mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_i) \in \mathbb{R}^m$, 因而该式可以用矩阵形式表述:

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_1), \cdots, \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h^1 \\ \vdots \\ h^m \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

最后一步要用到分块矩阵的思想: 左侧的矩阵为 1 “行” m 列, 每一“行”是一个 m 维列向量; 右侧的矩阵 (向量) 则为 m 行 1 列. 两者相乘, 得到 1 “行” 1 列的矩阵 (当然实际为 m 行), 即之前的 (3.22) 式. 在线性代数中, $m \times m$ 的矩阵 $\begin{bmatrix} \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_1) & \cdots & \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_m) \end{bmatrix}$ 通常称为变换矩阵 (也叫过渡矩阵).

接下来要搞清楚变换矩阵的具体形式. 取

$$\mathbf{h} = [0, \cdots, \lambda, \cdots, 0]^T = \lambda \mathbf{e}_i \in \mathbb{R}^m, \quad (3.24)$$

即除了 \mathbf{h} 的第 i 各元素为 λ 外, 其余元素均为 0 ($\lambda \neq 0$). 因而有 $\|\mathbf{h}\|_{\mathbb{R}^m} = \lambda$. 代入可微性的定义 (3.19) 式, 可得

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \mathbf{h}) - \mathbf{X}(\mathbf{x}_0) &= \mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - \mathbf{X}(\mathbf{x}_0) \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_1), \cdots, \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_i), \cdots, \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_m) \end{bmatrix} [0, \cdots, \lambda, \cdots, 0]^T + o(\lambda) \\ &= \lambda \cdot \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_i) + o(\lambda). \end{aligned} \quad (3.25)$$

由于 λ 是非零实数, 故可以在等式两边同时除以 λ 并取极限:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - \mathbf{X}(\mathbf{x}_0)}{\lambda} = \mathbf{DX}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_i), \quad (3.26)$$

这里的 $o(\lambda)$ 根据其定义自然趋于 0. 该式左侧极限中的分子部分, 是自变量 \mathbf{x} 第 i 个分量的变化所引起因变量的变化; 而分母, 则是自变量第 i 个分量的变化大小. 我们引入下面的记号:

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0) := \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - \mathbf{X}(\mathbf{x}_0)}{\lambda} \in \mathbb{R}^m, \quad (3.27)$$

它表示因变量 $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^m$ 作为一个整体, 相对于自变量 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$ 第 i 个分量 $x^i \in \mathbb{R}$ 的“变化率”, 即 \mathbf{X} 关于 x^i (在 \mathbf{x}_0 处) 的偏导数. 由于我们没有定义向量的除法, 因此自变量作为整体所引起因变量的变化, 是没有意义的. 利用偏导数的定义, 可有

$$\begin{aligned} & \left[\mathbf{D}\mathbf{X}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_1), \dots, \mathbf{D}\mathbf{X}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_i), \dots, \mathbf{D}\mathbf{X}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{e}_m) \right] \\ &= \left[\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^1}(\mathbf{x}_0), \dots, \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0), \dots, \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^m}(\mathbf{x}_0) \right] \in \mathbb{R}^{m \times m}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

下面给出 $\partial \mathbf{X} / \partial x^i (\mathbf{x}_0)$ 的计算式. 根据定义, 有

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0) &:= \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - \mathbf{X}(\mathbf{x}_0)}{\lambda} \in \mathbb{R}^m \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\begin{bmatrix} X^1 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - \begin{bmatrix} X^1 \\ \vdots \\ X^m \end{bmatrix}(\mathbf{x}_0) \right) \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow 0} \begin{bmatrix} \frac{X^1(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - X^1(\mathbf{x}_0)}{\lambda} \\ \vdots \\ \frac{X^m(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - X^m(\mathbf{x}_0)}{\lambda} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

向量极限存在的充要条件是各分量极限均存在, 即存在

$$\frac{\partial X^\alpha}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0) := \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{X^\alpha(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - X^\alpha(\mathbf{x}_0)}{\lambda} \in \mathbb{R}, \quad (3.30)$$

其中的 $\alpha = 1, \dots, m$. 这其实就是我们熟知的多元函数偏导数的定义. 用它来表示向量值映照的偏导数, 可有

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial X^1}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ \frac{\partial X^m}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix} = \sum_{\alpha=1}^m \frac{\partial X^\alpha}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0) \mathbf{e}_\alpha. \quad (3.31)$$

向量值映照 \mathbf{X} 关于 x^i 的偏导数, 从代数的角度来看, 是 Jacobi 矩阵的第 i 列; 从几何的角度来看, 则是物理域中 x^i 线的切向量; 从计算的角度来看, 又是 (该映照) 每个分量偏导数的组合.

现在我们重新回到 Jacobi 矩阵. 情况已经十分明了: 只需把之前获得的各列并起来, 就可以得到完整的 Jacobi 矩阵. 于是

$$\begin{aligned} \mathbf{D}\mathbf{X}(\mathbf{x}_0)(\mathbf{h}) &= \left[\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^1}, \dots, \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^m} \right](\mathbf{x}_0)(\mathbf{h}) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial X^1}{\partial x^1} & \dots & \frac{\partial X^1}{\partial x^m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial X^m}{\partial x^1} & \dots & \frac{\partial X^m}{\partial x^m} \end{bmatrix}(\mathbf{x}_0) \cdot \begin{bmatrix} h^1 \\ \vdots \\ h^m \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

这与 3.1.2 小节中 (3.11) 式给出的定义是完全一致的.

3.2.3 偏导数的几何意义

这一小节中, 我们要回过头来, 澄清向量值映照偏导数的几何意义.

如图 3.2, $\mathbf{X}(\mathbf{x})$ 是定义域空间 $\mathfrak{D}_{\mathbf{x}} \subset \mathbb{R}^m$ 到值域空间 $\mathfrak{D}_{\mathbf{X}} \subset \mathbb{R}^m$ 的向量值映照. 在定义域空间 $\mathfrak{D}_{\mathbf{x}}$ 中, 过点 \mathbf{x}_0 作一条平行于 x^i 轴的直线, 称为 x^i -线. x^i 轴定义了向量 \mathbf{e}_i , 因而 x^i -线上的任意一点均可表示为 $\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i$, 其中 $\lambda \in \mathbb{R}$.



图 3.2: 向量值映照偏导数的几何意义

在 $\mathbf{X}(\mathbf{x})$ 的作用下, 点 \mathbf{x}_0 被映照到 $\mathbf{X}(\mathbf{x}_0)$, 而 $\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i$ 则被映照到了 $\mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i)$. 这样一来, x^i -线也就被映照到了值域空间 $\mathfrak{D}_{\mathbf{X}}$ 中, 成为一条曲线.

根据前面的定义, 当 $\lambda \rightarrow 0$ 时,

$$\frac{\mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_i) - \mathbf{X}(\mathbf{x}_0)}{\lambda} \rightarrow \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^i}(\mathbf{x}_0). \quad (3.33)$$

对应到图 3.2 中, 就是 x^i -线 (值域空间中) 在 $\mathbf{X}(\mathbf{x}_0)$ 处的切向量.

完全类似, 在定义域空间 $\mathfrak{D}_{\mathbf{x}}$ 中, 过点 \mathbf{x}_0 作出 x^j -线 (自然是平行于 x^j 轴), 其上的点可以表示为 $\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_j$. 映射到值域空间 $\mathfrak{D}_{\mathbf{X}}$ 上, 则成为 $\mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_j)$. 很显然,

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^j}(\mathbf{x}_0) = \frac{\mathbf{X}(\mathbf{x}_0 + \lambda \mathbf{e}_j) - \mathbf{X}(\mathbf{x}_0)}{\lambda} \quad (3.34)$$

就是 x^j -线在 $\mathbf{X}(\mathbf{x}_0)$ 处的切向量. 在定义域空间中, x^i -线作为直线共有 m 条, 它们之间互相垂直. 作用到值域空间后, 这样的 x^i -线尽管变为了曲线, 但仍为 m 条. 相应的切向量, 自然也有 m 个.

3.3 局部基

这里的讨论基于曲线坐标系 (即微分同胚) $\mathbf{X}(\mathbf{x}) \in \mathcal{C}^p(\mathfrak{D}_{\mathbf{x}}; \mathfrak{D}_{\mathbf{X}})$.

我们已经知道, $\mathbf{X}(\mathbf{x})$ 的 Jacobi 矩阵可以表示为

$$\mathbf{DX}(\mathbf{x}) = \left[\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^1}, \dots, \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^i}, \dots, \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^m} \right](\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{m \times m}, \quad (3.35)$$

式中的

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^i}(\mathbf{x}) = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\mathbf{X}(\mathbf{x} + \lambda \mathbf{e}_i) - \mathbf{X}(\mathbf{x})}{\lambda}. \quad (3.36)$$

在参数域 $\mathfrak{D}_{\mathbf{x}}$ 中作出 x^i -线. 映照到物理域后, 它变成一条曲线, 我们仍称之为 x^i -线. 3.2.3 小节已经说明, (3.36) 式表示物理域中 x^i -线的切向量. 在张量分析中, 我们通常把它记作 $\mathbf{g}_i(\mathbf{x})$.

由于微分同胚要求是双射, 因而 Jacobi 矩阵

$$\mathbf{DX}(\mathbf{x}) = \left[\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_i, \dots, \mathbf{g}_m \right](\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{m \times m} \quad (3.37)$$

必须是非奇异的. 这等价于

$$\left\{ \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial x^i}(\mathbf{x}) \right\}_{i=1}^m \subset \mathbb{R}^m \quad (3.38)$$

线性无关. 由此, 它们可以构成 \mathbb{R}^m 上的一组基.

用任意的 $\mathbf{x} \in \mathfrak{D}_{\mathbf{x}}$ 均可构建一组基. 但选取不同的 \mathbf{x} , 将会使所得基的取向有所不同. 因而这种基称为局部协变基. 和之前一样, 我们用“协变”表示指标在下方.

有了局部协变基 $\{\mathbf{g}_i(\mathbf{x})\}_{i=1}^m$, 根据 1.1.1 小节中的讨论, 必然唯一存在与之对应的局部逆变基 $\{\mathbf{g}^i(\mathbf{x})\}_{i=1}^m$, 满足

$$\left[\mathbf{g}^1(\mathbf{x}), \dots, \mathbf{g}^m(\mathbf{x}) \right]^T \left[\mathbf{g}_1(\mathbf{x}), \dots, \mathbf{g}_m(\mathbf{x}) \right] = \begin{bmatrix} (\mathbf{g}^1)^T \\ \vdots \\ (\mathbf{g}^m)^T \end{bmatrix}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{DX}(\mathbf{x}) = \mathbf{I}_m. \quad (3.39)$$

下面我们来寻找逆变基 $\{\mathbf{g}^i(\mathbf{x})\}_{i=1}^m$ 的具体表示. 考虑到^①

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) = \mathbf{X} \in \mathbb{R}^m, \quad (3.40)$$

并利用复合映照可微性定理, 可知

$$\mathbf{DX}(\mathbf{x}(\mathbf{X})) \cdot \mathbf{Dx}(\mathbf{X}) = \mathbf{I}_m, \quad (3.41)$$

即有

$$\mathbf{Dx}(\mathbf{X}) = (\mathbf{DX})^{-1}(\mathbf{x}(\mathbf{X})). \quad (3.42)$$

于是

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{g}^1)^T \\ \vdots \\ (\mathbf{g}^m)^T \end{bmatrix}(\mathbf{x}) = (\mathbf{DX})^{-1}(\mathbf{x}) = \mathbf{Dx}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x^1}{\partial X^1} & \dots & \frac{\partial x^1}{\partial X^m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x^m}{\partial X^1} & \dots & \frac{\partial x^m}{\partial X^m} \end{bmatrix}(\mathbf{X}). \quad (3.43)$$

^① 这里的几步推导在 3.1.2 小节中也有所涉及.

这样我们就得到了局部逆变基的具体表示（注意转置）：

$$\mathbf{g}^i(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x^i}{\partial X^1} \\ \vdots \\ \frac{\partial x^i}{\partial X^m} \end{bmatrix}(\mathbf{X}) = \sum_{\alpha=1}^m \frac{\partial x^i}{\partial X^\alpha}(\mathbf{X}) \mathbf{e}_\alpha. \quad (3.44)$$

定义标量场 $f(\mathbf{x})$ 的**梯度**为

$$\nabla f(\mathbf{x}) \triangleq \sum_{\alpha=1}^m \frac{\partial f}{\partial x^\alpha}(\mathbf{x}) \mathbf{e}_\alpha, \quad (3.45)$$

则局部逆变基又可以表示成

$$\mathbf{g}^i(\mathbf{x}) = \nabla x^i(\mathbf{X}). \quad (3.46)$$

这里的梯度实际上就是我们熟知的三维情况在 m 维下的推广.