Chapter 1

Manifold

1.1 Foundation

(1.1.1) 一个局部 n 维欧几里得空间是一个 Hausdorff 空间 M 满足，对每一个点 $p \in M$，存在一个 p 的邻域 $U \underset{\text{open}}{\subset} M$ 和一个同胚 $\varphi : U \to V$, 其中 V 是一个 $\mathbb{R}^n$ 中的开集。这个同胚有时候被称为一个坐标、坐标映射等，而资料 (U, φ) 被称为一个坐标卡。

坐标 φ 经常写成分量形式，$\varphi = (x^1, \cdots, x^n)$，其中 $x^i : U \to \mathbb{R}$.

(1.1.2) 局部欧几里得空间 M 上的一个光滑微分结构 $\mathscr{F}$ 是这样一族坐标卡 $(U_\alpha, \varphi_\alpha)$，满足：$\{U_\alpha\}$ 构成 M 的开覆盖，$\varphi_\alpha \circ \varphi_\beta^{-1}|_{U_\alpha \cap U_\beta}$ 是光滑映射，后者被称为坐标卡的相容性条件。此外，如果有一个坐标卡 (U, φ) 和每一个坐标卡都相容，那么可以推断出他在 $\mathscr{F}$ 中，这样的微分结构被称为极大微分结构。极大微分结构当然不一定是唯一的，不过我们不担心这个，因为我们往往是固定一个微分结构来研究流形的，下面假设出现的微分结构总是极大的。

(1.1.3) 一个 n 维光滑流形 $(M, \mathscr{F})$ 是一个赋予了光滑微分结构 $\mathscr{F}$ 的第二可数的局部欧几里得空间 M.

我们想要做一个范畴，现在已经有了对象，那么自然需要态射，态射被如下定义：

(1.1.4) 设 $(M, \mathscr{F})$ 和 $(N, \mathscr{G})$ 是两个光滑流形，连续函数 $f : M \to N$ 被称为一个光滑映射，如果 $\psi \circ f \circ \varphi^{-1}$ 是一个光滑函数对任意的 $\mathscr{F}$ 中的坐标卡 (U, φ) 和 $\mathscr{G}$ 中的坐标卡 (V, ψ) 成立。

这样，光滑流形就构成了一个范畴，其中态射是流形间的光滑映射。他是拓扑空间范畴的子范畴。

从此以后，我们对一个固定的流形 $(M, \mathscr{F})$，常常会略去他的微分结构，只写作 M。对于一个光滑流形 M 的非空开子集 U，显然，他有继承自 M 的一个拓扑结构和微分结构，所以 U 也是一个光滑流形。很容易看到，$\mathbb{R}^n$ 是一个光滑流形，按照上面的结论，我们可以得到一类光滑流形，$\mathbb{R}^n$ 的开子集。比如把 $n \times n$ 矩阵放入 $\mathbb{R}^{n^2}$ 内，那么行列式不为零的那些矩阵就构成一个光滑流形，记作 $\mathrm{GL}(n, \mathbb{R})$，称作一般线性群。

特别地，$\mathbb{R}$ 也是一个光滑流形。我们称光滑映射 $f : M \to \mathbb{R}$ 是一个 M 上的光滑函数。光滑函数 f 限制在 $U \underset{\text{open}}{\subset} M$ 上也是一个光滑函数 $f|_U$.

(1.1.5) 设 M 是一个光滑流形，$U \underset{\text{open}}{\subset} M$ 上的光滑函数的集合记作 $\mathcal{F}(U)$，$\mathcal{F}$ 被称为 M 上的光滑函数层。由于可以逐点定义加法和乘法，所以 $\mathcal{F}(U)$ 拥有 $\mathbb{R}$-代数结构。设 $p \in M$，我们定义如下等价关系：设 U 和 V 都是 p 的邻域，以及 $f \in \mathcal{F}(U)$ 和 $g \in \mathcal{F}(V)$，如果在一个 $W \underset{\text{open}}{\subset} U \cap V$ 上，$f|_W = g|_W$，则 $f \sim g$. 所有这样的等价类记作 $\mathcal{F}_p$，称为 p 处的光滑函数茎，他的代表元素可以写成 $f_p = \langle U, f \rangle$，称为芽.

显然 $\mathcal{F}_p$ 有继承自 $\mathcal{F}(U)$ 的自然的 $\mathbb{R}$-代数结构。

设 $p\in M$，茎 $\mathcal{F}_p$ 是一个局部环。实际上，$\langle U,f\rangle\in\mathcal{F}_p$ 且 $f(p)=0$ 的元素构成了 $\mathcal{F}_p$ 的一个理想。不在这个理想内的 $\langle U,f\rangle$，由于 $f(p)\neq 0$，那么适当缩小 U 到 V，由 f 的连续性，总可以找到 V 使得 $f|_V$ 处处不为零，这样 $\langle V,1/f|_V\rangle$ 便是 $\langle U,f\rangle$ 的一个逆。因此上面这个理想即 $\mathcal{F}_p$ 唯一的极大理想，我们其记作 $\mathfrak{m}_p$。容易看到 $\mathcal{F}_p/\mathfrak{m}_p\cong\mathbb{R}$，实际上，对每一个芽 $f_p\in\mathcal{F}_p$，都成立 $f_p=f_p-f(p)+f(p)$，在 $\mathcal{F}_p/\mathfrak{m}_p$ 中看，他和 $f(p)\in\mathbb{R}$ 也就没区别了。

Lemma (1.1.6) 设 $f:\mathbb{R}^n\to\mathbb{R}$ 光滑，则

$$f(x)=f(0)+\partial_i f(0)x^i+\frac{1}{2}g_{ij}(x)x^ix^j,$$

其中 g_{ij} 光滑。

Proof: 利用微积分基本定理

$$f(x)-f(0)=\int_0^1 f'(tx)\mathrm{d}t=\int_0^1\partial_i f(tx)x^i\mathrm{d}t=h_i(x)x^i,$$

可以得到 $h_i(0)=\partial_i f(0)$，然后再对 h_i 使用上面的步骤即可得到我们想要的表达式。 □

(1.1.7) 使用一个局部坐标 $\varphi=(x^1,\cdots,x^n)$ 且 $\varphi(p)=0$，可以将上面的引理翻译到流形上。设设 $f:U\to\mathbb{R}$ 光滑，则在 p 的一个邻域 V 上对任意的 $q\in V$ 成立

$$f(q)=f(p)+\frac{\partial f\circ\varphi^{-1}}{\partial x^i}(p)x^i(q)+\frac{1}{2}g_{ij}(q)x^i(q)x^j(q),$$

其中 g_{ij} 在 V 上光滑，以后我们就将那个偏微分记作 $\partial_i f(p)$.

(1.1.8) 设 $p\in M$，p 处的茎为 $\mathcal{F}_p$，他的极大理想为 $\mathfrak{m}_p$，此时 p 处的余切空间被定义为自然的矢量空间 $T_p^*M:=\mathfrak{m}_p/\mathfrak{m}_p^2$。余切空间的元素被称为余切矢量。

$\mathfrak{m}_p/\mathfrak{m}_p^2$ 确实是一个矢量空间。首先它显然是一个 $\mathcal{F}_p$-模，然后任取 $a\in\mathfrak{m}_p$，由于 $a\mathfrak{m}_p/\mathfrak{m}_p^2=0$，所以 $\mathfrak{m}_p/\mathfrak{m}_p^2$ 是一个 $\mathcal{F}_p/\mathfrak{m}_p$-模，即 $\mathbb{R}$-矢量空间。这样定义的余切空间，可以看到，是所有的那些一阶小量构成的集合，即其中的元素为“微分”。

(1.1.9) 设 $p\in M$，M 是一个 n 维流形，则 $T_p^*M:=\mathfrak{m}_p/\mathfrak{m}_p^2$ 是 n 维的。

我们可以选取一组局部坐标来算维数，由于选取不同的局部坐标都是通过同胚联系的，所以不同的选取对维数没什么影响。由上面的引理，设 $f_p\in\mathfrak{m}_p$，则他可以写作

$$f_p=\partial_i f(p)x_p^i+\frac{1}{2}g_{ij}(q)x_p^ix_p^j$$

考虑一个局部坐标 $\varphi=(x^1,\cdots,x^n)$，设自然同态 $\mathrm{d}_p:\mathfrak{m}_p\to\mathfrak{m}_p/\mathfrak{m}_p^2$，很简单就可以看到 $\mathrm{d}_p(x_p^i)\neq 0$. 实际上，如果 $x_p^i\in\mathfrak{m}_p^2$，那么 $x_p^i=rs$，其中 $r,s\in\mathfrak{m}_p$，然后根据上面的引理 $r=a_ix_p^i+\cdots$ 以及 $s=b_ix_p^i+\cdots$，于是 $x^i=rs=a_jb_kx_p^jx_p^k+\cdots$，但显然这是不可能的。

所以，如果 $f_p\in\mathfrak{m}_p$，则

$$\mathrm{d}_p(f_p)=\partial_i f(p)\mathrm{d}_p(x_p^i).\tag{1.1}$$

这样所有的 $T_p^*M=\mathfrak{m}_p/\mathfrak{m}_p^2$ 中的元素都可以由 $\mathrm{d}_p(x_p^i)$ 展开，他们都是非零的，而且容易证明是线性无关的，所以这是 T_p^*M 的一组基，余切空间的维数计算完毕。

以后我们用 $\mathrm{d}_p(f)$ 乃至 d_pf 来记 $\mathrm{d}_p(f_p)$。实际上，我们可以将 d_p 定义在 $\mathcal{F}_p$ 上，设 a 是一个常值芽，补充定义 $\mathrm{d}_pa=0$，可以看到，此时式(1.1)依旧满足。以后我们就这样来看 $\mathrm{d}_p:\mathcal{F}_p\to T_p^*M$，他被称为外微分算子。

(1.1.10) 此时

$$\mathrm{d}_p(fg)=\mathrm{d}_p\big(\big(f-f(p)\big)\big(g-g(p)\big)+f(p)\big(g-g(p)\big)+\big(f-f(p)\big)g(p)\big)=f(p)\mathrm{d}_pg+\mathrm{d}_pfg(p).$$

(1.1.11) 设 $f: M\to N$ 是一个光滑映射，上面的光滑函数层分别为 $\mathcal{F}$ 和 $\mathcal{G}$。任取 $\varphi\in\mathcal{G}(V)$，可以通过 $f^*\varphi=\varphi\circ f$ 定义 $f^*\varphi\in\mathcal{F}(f^{-1}(V))$.

下面我们考虑两个流形余切空间之间的映射。设 $\langle V,\varphi\rangle\in\mathcal{G}_{f(p)}$，于是 $\langle f^{-1}(V),\varphi\circ f\rangle\in\mathcal{F}_p$，所以 f^* 诱导了一个 $\mathbb{R}$-代数同态 $f_p^*:\mathcal{G}_{f(p)}\to\mathcal{F}_p$，特别地，可以看到 $f_p^*:\mathfrak{m}_{f(p)}\to\mathfrak{m}_p$，于是 $f_p^*:\mathfrak{m}^2_{f(p)}\to\mathfrak{m}^2_p$.

(1.1.12) 设 $f: M\to N$ 是一个光滑映射，他诱导了一个线性映射[1] $f_p^*:T^*_{f(p)}N\to T_p^*M$.

(1.1.13) 对于复合，$(f\circ g)_p^*=g_p^*\circ f^*_{g(p)}$. 很容易看到 $\mathrm{id}_p^*=\mathrm{id}_{T_p^*M}$，所以如果 $f:M\to N$ 是同胚，则 $f_p^*:T^*_{f(p)}N\to T_p^*M$ 是同构。

(1.1.14) 利用复合公式，设 $f:M\to N$ 是光滑映射，则 $f_p^*\big(\mathrm{d}_{f(p)}g\big)=\mathrm{d}_p(f^*g)=\mathrm{d}_p(g\circ f)$.

(1.1.15) 设 $p\in M$，M 是 n 维光滑流形，则*切空间*T_pM 被定义为余切空间 T_p^*M 的对偶空间。切空间的元素被称为*切矢量*。由于余切空间是有限维的，他的对偶空间也和他有着相同的维度，即 n 维。

(1.1.16) 由于切空间是余切空间的对偶空间，所以他是余切空间上的线性函数构成的空间，反过来，由于是有限维的，所以可以认为对偶空间的对偶空间就是原本的空间，这就是说可以将余切空间的矢量看成切空间矢量的线性函数：设 $\mathrm{d}_pf\in T_p^*M$ 和 $v\in T_pM$，定义 $\mathrm{d}_pf(v):=v(\mathrm{d}_pf)$.

虽然上面这些个定义都很短也很清楚，不过操作上却没有那么简单。下面，我们将一个切矢量扩张到 $\mathcal{F}_p^*$ 上面去。

(1.1.17) 设 f 是在 p 附近的光滑函数，而 $v\in T_pM$，可以通过 $D_v(f_p):=v(f_p-f(p))$ 定义线性映射 $i_p: v\mapsto i_p(v)=D_v\in\mathcal{F}_p^*$，他是一个单射。

注意到 $(fg)_p=f_pg_p$，所以

$$\begin{aligned}D_v(f_pg_p)&=v(f_pg_p-f(p)g(p))\\&=v\big((f_p-f(p))(g_p-g(p))+f(p)(g_p-g(p))+(f_p-f(p))g(p)\big)\\&=f(p)D_v(g_p)+D_v(f_p)g(p),\end{aligned}$$

我们将满足这条性质的线性映射 $D_v\in\mathcal{F}_p^*$ 称为 p 处的导子，所有 p 处的导子构成的空间暂时记作 V_p，而他其实和 T_pM 是同构的。

为了证明这点，任取导子 $D\in V_p$，由于 $D(1)=D(1\times 1)=2D(1)$，所以 $D(1)=0$，继而靠着 D 的线性性，对于常值函数的芽 a 来说，$D(a)=aD(1)=0$。因为每一个 $\mathcal{F}_p$ 中的元素 f_p 都可以写成 $f_p-f(p)+f(p)$ 的形式，所以 $D(f_p)=D(f_p-f(p))$，这就是说，一个导子的性质完全由他在 $\mathfrak{m}_p$ 上的值决定，这种关系是一对一的。即 $\pi_p:D\mapsto D|_{\mathfrak{m}_p}$ 是一个线性同构。

同时，设 $f_p,g_p\in\mathfrak{m}_p$，则 $\pi_p(D)(f_pg_p)=f(p)\pi_p(D)(g_p)+g(p)\pi_p(D)(f_p)=0$，于是 $\pi_p(D)(\mathfrak{m}_p^2)=0$，所以，$\pi_p(D)\in T_pM$，即 $D|_{\mathfrak{m}_p}$ 是一个切矢量，因此导子 D 完全由一个切矢量 $D|_{\mathfrak{m}_p}=\pi_p(D)$ 决定。这样，$i_p:T_pM\to V_p$ 也是一个满射，所以他是一个同构。当然我们也可以直接计算验证 $\pi_p\circ i_p=\mathrm{id}_{T_pM}$ 以及 $i_p\circ\pi_p=\mathrm{id}_{V_p}$。

因为有这个同构，所以以后我们用 T_pM 来标记导子构成的矢量空间，一个导子才是一个切矢量。这样的好处是，我们在具体计算的时候，可以直接在 $\mathcal{F}_p$ 上进行而非 $\mathfrak{m}_p$ 上，特别地，现在对于一个切向量 v 来说，成立 $\mathrm{d}_pf(v)=v(f_p)$，这是因为对一个导子 v 来说 $v(f_p)=v(\mathrm{d}_pf)$.

(1.1.18) 设 $f:M\to N$ 是一个光滑映射，定义它在 $p\in M$ 处的导数为 $T_pf=f_{*p}:T_pM\to T_{f(p)}N$ 使得对任意的 $v\in T_pM$ 和任意的 $g_{f(p)}\in\mathfrak{m}_{f(p)}$ 成立 $(f_{*p}v)(g_{f(p)})=v(f_p^*g_{f(p)})$.

[1] 这里我们滥用一下记号。

为以后的处理方便，不妨通过等同 ∂_i 和标准基 e_i 来等同 $T_p\mathbb{R}^n$ 和 $\mathbb{R}^n$。此外，通过坐标卡上的同胚 φ，我们用 ∂_i 来标记 $\varphi_{*p}^{-1}(e_i)$，这显然是 T_pM 处的一组基。

(1.1.19) 设 f 是在 p 附近的光滑函数，任取 $v \in T_pM$. 因为 $f_{*p} : T_pM \to T_{f(p)}\mathbb{R} = \mathbb{R}$，所以 $f_{*p}(v)$ 是一个数，故而

$$f_{*p}(v) = f_{*p}(v)(\mathrm{id}_{\mathbb{R}}) = v\big((\mathrm{id}_{\mathbb{R}} \circ f)_p\big) = v(f_p) = \mathrm{d}_p f(v).$$

因为对所有的切矢量 v 都成立上式，所以 $f_{*p} = \mathrm{d}_p f$.

选定一个局部坐标，因为 $\mathrm{d}_p x^i(\partial_j) = \partial_j x^i(p) = \delta^i_j$，所以 $\mathrm{d}_p x^i$ 就是 ∂_i 的对偶基。下面我们来计算一个特别的例子，设 $f : M \to \mathbb{R}^n$ 是一个流形 M 上的矢量值光滑函数，则 $f^i : M \to \mathbb{R}$ 是一个光滑函数，那么 $f_{*p} = \mathrm{d}_p f^i e_i$，其中 e_i 是 $\mathbb{R}^n$ 的标准基。再设 $f : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^n$，则 $\mathrm{d}_p f^i = \partial_j f^i(p)\mathrm{d}x^j = \partial_j f^i(p)e^j$. 写成矩阵即

$$(f_{*p})^i{}_j = \partial_j f^i(p),$$

此即 f 的 Jacobian.

(1.1.20) 复合函数求导法则：$(f \circ g)_{*p} = f_{*g(p)} \circ g_{*p}$. 抽象表现出来是线性映射复合，表现在矩阵（即 Jacobian）上就是两个矩阵相乘。

(1.1.21) 设 U 上光滑曲线 $\sigma : (-\epsilon, \epsilon) \to U$，在时间为零的时候经过点 p，即 $\sigma(0) = p$，于是 $\sigma_{*0} = \dot{\sigma}(0) \in T_pM$. 局部来说，他可以写作

$$\dot{\sigma}(0) = \frac{\mathrm{d}x^i \circ \sigma}{\mathrm{d}t}(0)\partial_i = \dot{\sigma}^i(0)\partial_i,$$

当他作用在一个光滑函数上时，写作

$$\dot{\sigma}(0)(f) = \dot{\sigma}^i(0)\partial_i f(p).$$

对于固定的 f，$\dot{\sigma}(0)(f)$ 可以看做 f 沿着 σ 在点 p 切矢量的方向导数，实际上，在 $\mathbb{R}^n$ 中，我们通常将上式写作 $\dot{\sigma}(0)(f) = v \cdot \nabla f$，其中 $v = \dot{\sigma}^i(0)e_i$.

(1.1.22) 反过来，给定一个点 p 处的切矢量 v，我们可以找到一个光滑曲线 σ 使得在他点 p 的切矢量就是 v。这是局部结论，在欧式空间里去证明就可以了。在欧式空间中，$\sigma(t) = p + vt$ 就是我们需要的光滑曲线。

(1.1.23) 由于 $v(f_p)$ 可以看做 f 沿着 v 方向在 p 点的方向导数，以及等式 $\mathrm{d}_p f(v) = v(f_p)$，所以 $\mathrm{d}_p f(v)$ 也理解为 f 沿着 v 方向在 p 点的方向导数。

1.2 Submanifold

(1.2.1)$\varphi : M \to N$ 是一个光滑映射，(a). 称 φ 是一个浸入，如果 φ_{*p} 处处非退化。(b). 称 (M, φ) 是一个子流形，如果 φ 是单的。不是所有浸入都是子流形，比如圆周的参数表示 $(\cos t, \sin t)$ 是一个浸入，但不是单的。

显然，对于光滑流形的一个开子集，他可以继承大流形的流形结构而形成一个新的流形，他是一个子流形，被称为开子流形。

后面我们经常会说“设流形 M 上有某某”这样的话，但一般来说，某某在流形上的整体存在性是很难保证的，往往他只是局部存在，即可以在流形 M 的某个开集上存在。但是注意到 M 的开集现在也有流形结构，即开子流形结构，于是我们的命题就可以在这个新的流形上正常工作了。所以经常为了方便，对于不少命题的陈述，我们会把对象直接定义到整个流形上。

(1.2.2) 设 $\varphi : M \to N$，如果 M 微分同胚于 N 的开子流形 $\varphi(M)$，则称子流形 (M, φ) 是一个嵌入。

浸入子流形不一定是嵌入子流形，比如秩为 1 的单的光滑曲线 $f(t) = ((t^3+t)/(t^4+1), (t^3-t)/(t^4+1))$，在 $\mathbb{R}^2$ 中他的图像看起来是可以有自交点的。

(1.2.3) 设 U 是 M 的一个子集，但 U 本身有一个流形的结构，如果此时 $i: U \hookrightarrow M$ 是一个嵌入，则称 U 是 M 的一个正则子流形。

所谓的正则子流形就是说，它本身的流形结构和从大的流形那里继承来的流形结构是相同的的。

(1.2.4) 设 M 和 N 是光滑流形，$f: M \to N$ 是一个单浸入。我们可以赋予 $f(M)$ 一个微分结构通过把 $f: M \to f(M)$ 做成一个微分同胚。此时，$f(M)$ 是 N 的正则子流形当且仅当 f 是一个嵌入。

(1.2.5) 反函数定理：设 $U \subset \mathbb{R}^n$ 是一个开集，映射 $f: U \to \mathbb{R}^n$ 光滑，如果 Jacobian 在 p 处非奇异，即 f_{*p} 可逆，则存在 p 的一个邻域 $V \underset{\text{open}}{\subset} U$，使得 $f|_V: V \to f(V)$ 是一个（光滑）同胚。

证明见微积分教材，常见的证明有比如压缩映像定理。该定理说明，如果函数局部线性化后性质不错，那么在那点附近性质也不错。由于是局部性质，所以可以直接翻译到流形上没什么改变。

Theorem (1.2.6) 流形上的反函数定理：设 M 和 N 的维度相同，映射 $f: M \to N$ 光滑，如果 f_{*p} 可逆，则存在 p 的一个邻域 U，使得 $f|_U: U \to f(U) \subset N$ 是一个（光滑）同胚。换句话说，浸入局部是嵌入。

(1.2.7) 称一族 M 上的光滑函数 $\{f_i\}_{1\le i\le n}$ 在点 p 相互无关,即指 $\{\mathrm{d}_p(f_i) = (f_i)_{*p} \in T_p^*M \ 1 \le i \le n\}$ 们线性无关。

如果 $\{f_i\}_{1\le i\le n}$ 相互无关，则函数 $f = (f_1, \cdots, f_n): M \to \mathbb{R}^n$ 在点 p 上的导数 f_{*p} 可逆，所以按照反函数定理，可以在 p 附近找一个领域，使得 $f|_V$ 是一个 V 到 $\mathbb{R}^n$ 中开集的同胚，这样 $(V, f|_V)$ 就是一张坐标卡。如果 $\{f_i\}$ 个数不到 n，那么补几个进去，照样可以找到一张坐标卡，其中前几个分量是 $\{f_i\}$.

Lemma (1.2.8) 设 $f_*: V \to W$ 是一个有限维矢量空间间的线性映射以及他的对偶映射是 $f^*: W^* \to V^*$，则 $\mathrm{rank}(f_*) = \mathrm{rank}(f^*)$. 特别地，当 f_* 是单（满）的时候，f^* 是满（单）的。

(1.2.9) 设 $\varphi: M \to N$ 光滑，且 φ_{*p} 是单射。令 $(x_1, \cdots, x_n)$ 是 $\varphi(p)$ 附近的一个坐标，那么 $x_i \circ \varphi$ 是 p 附近的一个坐标。特别地，φ 在 p 附近是一个单射。如果 φ_{*p} 是满射，则 $x_i \circ \varphi$ 是 p 附近的一个坐标中的一部分。

若 φ_{*p} 是单射，他的对偶映射 φ_p^* 就是满射，于是 $\varphi_p^*(x_i)_{*\varphi(p)} = (x_i \circ \varphi)_{*p} = \mathrm{d}_p(x_i \circ \varphi)$ 张成了 T_p^*M，在其中选出一组极大线性无关组（不妨设为前 m 个），这就构成了 p 附近的一组坐标。而 $(x_1, \cdots, x_m) \circ \varphi$ 局部是同胚，所以 φ 局部是单射。

若 φ_{*p} 是满射，他的对偶映射 φ_p^* 就是单射，于是 $\varphi_p^* \mathrm{d}_{\varphi(p)} x_i = \mathrm{d}_p(x_i \circ \varphi)$ 相互独立，一般来说，他数量不够构成坐标，但是却可以构成坐标中的一部分。

(1.2.10) 设 $f: M \to N$ 是一个光滑映射，则 $\mathrm{rank}_p f$ 被定义为 $\mathrm{rank}_p f_{*p}$. 取 p 和 $f(p)$ 附近的坐标 φ 和 ψ 且使得 $\varphi(p) = 0$，则 f 在点 p 的秩就是 Jacobian 矩阵 $(\psi \circ f \circ \varphi^{-1})_{*0}$ 的秩。

选取 $f(p)$ 附近的坐标 ψ,则 $\psi \circ f: M \to \mathbb{R}^n$,不妨将其写作 $(f_1, \cdots, f_n)$,则 $\mathrm{rank}_p f$ 就是 $\mathrm{d}_p f_1, \cdots, \mathrm{d}_p f_n$ 张成的线性空间的维度。实际上,因为这是局部结果,所以可以直接假设 $N = \mathbb{R}^n$,而此时 $f_{*p} = (\mathrm{d}_p f_1, \cdots, \mathrm{d}_p f_n)$。

Theorem (1.2.11) 设 M 是一个 m 维流形且 $f: M \to N$ 是一个光滑映射，如果存在常数 l 使得 $\mathrm{rank}_p f$ 处处等于 l，那么对于 $q \in N$，$f^{-1}(q)$ 要么是空集，要么是 M 的一个正则子流形，维度为 $m - l$。

这个定理我们就不证明了。特别当 $N = \mathbb{R}$ 的时候，f 如果是一个秩处处为 1 的光滑函数（即 $\mathrm{d}_p f$ 处处不为零），则 $f^{-1}(a)$ 或者是一个空集，或者是一个 $m-1$ 维正则子流形。这就是所谓的等能面，或等势面。

1.3 Vector Field

和我们以前的直观一样，所谓的矢量场就是每一点赋予一个矢量。

(1.3.1) 设 $U \underset{\text{open}}{\subset} M$，$U$ 上的映射 $X : p \mapsto X(p) \in T_pM$ 被称为 U 上的（切）矢量场。因为在 U 的每一个局部 V（至少一个坐标卡内），矢量场 X 都可以写作 $X = X^i\partial_i$，其中 X^i 是 V 上的实值函数，而 ∂_i 在不同的点分属不同的切空间。如果 $\{X^i\}$ 在点 p 是光滑函数，则称 X 在 p 处光滑。如果 X 在 U 处处光滑，则称 X 是 U 上的一个光滑矢量场。

对矢量场而言，他可以作用在光滑函数上得到一个函数，在局部的作用效果即 $Xf = X^i\partial_i f$. 显然，如果 X 是要给光滑矢量场，则 Xf 是一个光滑函数。反过来，如果 $X^i\partial_i f$ 对任意的光滑函数都光滑，则 X^i 自然也是光滑的，所以有下面一个结论。

(1.3.2) 设 X 是一个 U 上的矢量场，如果 Xf 对任意的光滑函数 f 也是光滑的，那么 X 是一个光滑矢量场。

这个命题可以看作矢量场光滑性的一个坐标无关的定义。

(1.3.3) 设 $f : M \to N$ 是一个光滑单射，而 X 是 M 上的一个光滑矢量场，则 $f_*X : p \mapsto f_{*f^{-1}(p)}X_{f^{-1}(p)}$ 是 N 上的一个矢量场。因为 $(f_*X)g = X(g \circ f)$ 成立，所以这也是一个光滑矢量场。

(1.3.4) 设 X 是一个 U 上的光滑矢量场，如果一条光滑曲线 $\sigma : (-\epsilon, \epsilon) \to U$ 且 $\sigma(0) = p$，满足 $X(\sigma(t)) = \dot\sigma(t)$，则称 σ 是 X 在 p 附近的一条积分曲线。

将矢量场局部写出来，$X(\sigma(t)) = X^i(\sigma(t))\partial_t$，所以问题归结到了求解微分方程

$$\frac{\mathrm{d}x^i \circ \sigma}{\mathrm{d}t}(t) = X^i(\sigma(t)),$$

他的初值为 $\sigma(0) = p$。微分方程的（光滑）解在局部存在且唯一，所以我们得到了：

(1.3.5) 在 p 附近，对 X 存在唯一的积分曲线 $\sigma : (-\epsilon, \epsilon) \to U$.

设 X 是 U 上的光滑矢量场，对 U 上的每一点 p，都可以在 p 附近找到他的一条光滑积分曲线 σ_p，上面的点 $\sigma_p(t)$ 我们也记作 $\sigma_t(p)$，这样我们就得到了一个新的一族映射 $\{\sigma_t : U \to U\}$，当 $t = 0$ 的时候，$\sigma_0 = \mathrm{id}$. 这样的一族映射 $\{\sigma_t\}$ 被称为矢量场 X 的流。如果需要明确是那个矢量场的时候写作 $\{\sigma_t^X\}$. 由微分方程解的唯一性可以发现 $\sigma_t \circ \sigma_s = \sigma_{s+t}$.

对于一个矢量场，整体流的存在性是不能保证的，比如对 $t = 1$ 的时候，是否对每一个 p 变换 σ_1 都有意义？但是，至少在局部，我们可以保证在一定范围内的参数都是有意义的，对于局部的问题，这个存在性已经基本够使了。

(1.3.6) 光滑流形 M 上的光滑矢量场 X 的支集被定义那些使 X 不为 0 的点集的闭包。如果 X 有紧支集，则 X 的流的参数可以全局定义到 $\mathbb{R}$ 上面去。特别地，如果流形是紧的，则对每一个光滑矢量场都成立。

设支集为 K，找一个他的开覆盖，使得每一个开覆盖内 σ_t 都对某一个小区间 $t \in (-\epsilon, \epsilon)$ 上有定义，由于紧，所以可以找到有限的子覆盖，所以在这些子覆盖里面，把最小的 $\epsilon_{\min}$ 挑出来，则在 K 上，对 $t \in (-\epsilon_{\min}, \epsilon_{\min})$，$\sigma_t$ 都有定义。现在对 $p \notin K$ 定义 $\sigma_t(p) = p$，容易检验 ϵ_t 定义良好且还是光滑映射。最后，对 $t > \epsilon_{\min}$，我们可以从某个 $t_0 \in (-\epsilon_{\min}, \epsilon_{\min})$ 反复复合 $\sigma_{\epsilon_{\min}/2}$，反之对 $t < -\epsilon$ 亦然。

现在我们将积分曲线的问题稍稍拓展一下，比如我们现在有两个矢量场 X 和 Y，他们在每一点张成一个平面，类比于积分曲线，我们要问是否存在一个光滑曲面，使得这个曲面在每一点的切空间都是这俩矢量场张成的平面？

可以直接想象一下怎么处理这样的问题，直观来看，积分曲面可以由积分曲线拼成，即在 p 附近，X 的一条一条积分曲线和 Y 的一条积分曲线编成一张网，这张网其实应该就在积分曲面上。因此积分曲面存在与否当且仅当这张网足够光滑，不能突然错开。此时的错开，就是说，从网格的一个端点处，沿着两条路径走到的终点处于积分曲面的两侧。

为简单见，我们看看这样一个曲边四边形。从 p 出发，沿着 X 的积分曲线走 s，走到了 $\sigma_s^X(p)$，再从这点出发，沿着 Y 的积分曲线走 t，走到 $\sigma_t^Y\circ\sigma_s^X(p)$. 同样，从 p 出发，沿着 Y 的积分曲线走 t，走到了 $\sigma_t^Y(p)$，再从这点出发，沿着 X 的积分曲线走 s，走到 $\sigma_s^X\circ\sigma_t^Y(p)$。

这样我们就得到了弯曲的四边形，p 是其中一个端点，但是一般来说，沿着两条路径并不会有相同的终点，即 p 的对角线方向的另一端点不存在，此时两条路径并不能闭合成一个弯曲的四边形。甚至，即使积分曲面存在，我们也不能得到一个闭合的四边形（网格），但是，如果沿着两条路径的终点是错开的，则积分曲面依然不存在。

实际上，因为 X 和 Y 的光滑，我们可以适当延长（或缩短）相比 s 和 t 小量的在一条路径上走的时间使得弯曲的四边形变成一个网格（此时局部积分曲面存在），或者，永远是错开的（此时局部积分曲面不存在）。

我们现在需要比较两条路径两个终点的差，在欧式空间里面，我们可以比较这两个点的距离。但是在流形上这样做是不方便的，我们可能连一个很直接的计算两个点距离的手段都没有。为了克服这个困难，我们可以采用“表示”的手段，取一个 U 上的光滑函数 f，比较 $f(\sigma_t^Y\circ\sigma_s^X(p))$ 和 $f(\sigma_s^X\circ\sigma_t^Y(p))$。但光取一个 f 肯定是不够的，取而代之，我们可以取遍 U 上所有的光滑函数，如果我们关于所有的光滑函数都计算出了 $f(\sigma_t^Y\circ\sigma_s^X(p))-f(\sigma_s^X\circ\sigma_t^Y(p))$（在 s,t 都很小时），那么就可以确认这两个坐标相差很小的程度。所以现在就是要计算在 s,t 都很小时的

$$g(s,t)=f(\sigma_t^Y\circ\sigma_s^X(p))-f(\sigma_s^X\circ\sigma_t^Y(p)).$$

因为 g 是光滑函数，我们在 $(0,0)$ 局部展开他，求导就可以得到系数。显然，他到二阶为止的导数都为 0，并且 $\partial_s^2 g(0,0)=\partial_t^2 g(0,0)=0$，所以他最低阶不为零的只可能是 $\partial_s\partial_t g(0,0)$，这就是说，我们要求 $\lim_{s,t\to 0} g(s,t)/st$.

(1.3.7) 在 t 很小的时候，$f(\sigma_t^X p)=f(p)+tXf(p)+o(t^2)$. 为了证明他，只要求 p 处的导数就行了，设 $\sigma^X(t)$ 是 $\sigma^X(0)=p$ 的 X 的积分曲线，则

$$\left.\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0} f(\sigma_t^X p)=\left.\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right|_{t=0} f\circ\sigma^X(t)=f_{*p}X=Xf(p).$$

所以（暂时在记号上略去高阶项）

$$f(\sigma_t^Y\circ\sigma_s^X(p))=f(\sigma_s^X(p))+tYf(\sigma_s^X(p))=f(p)+sXf(p)+tY(\sigma_s^X\circ f(p)),$$

以及

$$g(s,t)=sXf(p)+tY(\sigma_s^X\circ f(p))-tYf(p)-sX(\sigma_t^Y\circ f(p)),$$

其中

$$Y(\sigma_s^X\circ f(p))-Yf(p)=sX(Y(f))(p),$$

所以

$$g(s,t)=st\big(X(Y(f))(p)-Y(X(f))(p)\big),$$

这就是说 $\partial_s\partial_t g(0,0) = X(Y(f))(p) - Y(X(f))(p)$.

(1.3.8) 定义两个矢量场 X, Y 的 Lie 括号为 $[X,Y]$，他满足 $[X,Y](f) = X(Y(f)) - Y(X(f))$。

如果采用局部表示 $X = X^i\partial_i$ 和 $X = Y^i\partial_j$，则我们可以计算出

$$\begin{aligned}[X,Y](f) &= X^i\partial_i(Y^j\partial_j f) - Y^i\partial_i(X^j\partial_j f)\\ &= X^i\partial_i Y^j\partial_j f - Y^i\partial_i X^j\partial_j f\\ &= (X^i\partial_i Y^j - Y^i\partial_i X^j)\partial_j f.\end{aligned}$$

因此，尽管形式上是二阶的，但 $[X,Y]$ 还是一个切矢量场，局部写作 $[X,Y] = (X^i\partial_i Y^j - Y^i\partial_i X^j)\partial_j = (X(Y^j) - Y(X^j))\partial_j$.

(1.3.9) 设 $X_1, \cdots, X_k$ 是一族切矢量场，记

$$D = \{f_1X_1 + \cdots + f_kX_k : \forall 1 \le i \le k,\ f_i \in \mathcal{F}(M)\},$$

称他为流形 M 上的一个被 $\{X_i\}$ 张成的分布。

(1.3.10) 设 X 和 Y 张成一个分布 D，则局部积分曲面存在当且仅当在 $[X,Y] \in D$.

如果局部积分曲面存在，那么曲边四边形完全处于积分曲面上面，尽管沿着两条路径得到的终点可能不同，但是这两个点的连线（或者他的切矢量）应该在 $s \to 0, t \to 0$ 的时候确定了一个切矢量（由于 X 和 Y 的光滑性，所以这个切矢量并不依赖于连线的选取），他处于积分曲面的切子空间（由 X_p 和 Y_p 张成）里面，且正比于 $[X,Y]_p$，所以 $[X,Y]_p = a(p)X_p + b(p)Y_p$. 而 a 和 b 的光滑性是显然的。

如果不存在，就是说两个端点分处 X_p 和 Y_p 张成的切子空间两侧，所以两个点的连线确定的那个切矢量应该不在和 X_p 和 Y_p 张成的切子空间里，即 $[X,Y]_p \ne aX_p + bY_p$.

(1.3.11) 问题可以问得更广一点，设 $X_1, \cdots, X_k$ 是一族切矢量场，他们是否（至少在局部）有积分“曲面”存在？回答是 Frobenius 定理：设 $X_1, \cdots, X_k$ 在点 p 张成的分布为 D，则局部存在积分“曲面”当且仅当对任意的 i 和 j 成立 $[X_i, X_j] \in D$。

当然，这个结论可以更加形式地证明他，如果不信任上面的直观想法，则可以参看任何一本微分流形的教材，我这里就略去了。

(1.3.12) 令 φ 是流形 M 上的光滑可逆变换，设矢量场 X 的流为 σ_t，则 φ_*X 的流为 $\varphi\circ\sigma_t\circ\varphi$.

设在 p 处的切矢量为 X_p，经过 p 的 X 的积分曲线为 $\sigma(t)$，使用变换 φ，变成了 $q = \varphi(p)$，q 处的切矢量 $\varphi_{*p}X_p = (\varphi_*X)_q$ 以及积分曲线 $\varphi(\sigma(t)) = \varphi(\sigma_t q) = \varphi\circ\sigma_t\circ\varphi^{-1}(p)$. 此即结论。

(1.3.13) 所以，$\varphi_*X = X$ 当且仅当 $\varphi\circ\sigma_t^X = \sigma_t^X\circ\varphi$ 成立。

(1.3.14) 直接的计算，我们有：

$$[X,Y] = \lim_{t\to 0}\frac{1}{t}\big(Y - (\sigma_t^X)_*Y\big).$$

所以，如果 σ_t^X 和 σ_s^Y 可交换，即 $\sigma_t^X\circ\sigma_s^Y = \sigma_s^Y\circ\sigma_t^X$，则 $(\sigma_t^X)_*Y = Y$ 以及 $[X,Y] = 0$.

设 $\varphi : M \to N$ 是一个光滑映射，X 和 Y 分布是 M 和 N 上的光滑函数，称他们是 φ 相关的，如果 $\varphi_*X(f) = Y(f)\circ\varphi$ 对任意光滑函数 f 成立。局部来看，$X_p(f\circ\varphi) = Y_{\varphi(p)}(f)$.

若 X_1 与 Y_1 是 φ 相关的，X_2 与 Y_2 是 φ 相关的，则 $[X_1, X_2]$ 和 $[Y_1, Y_2]$ 是 φ 相关的，因为

$$\begin{aligned}\varphi_*[X_1, X_2](f) &= X_1(X_2(f \circ \varphi)) - [1 \leftrightarrow 2] \\ &= X_1(Y_2(f) \circ \varphi) - [1 \leftrightarrow 2] \\ &= Y_1(Y_2(f)) \circ \varphi - [1 \leftrightarrow 2] \\ &= [Y_1, Y_2](f) \circ \varphi.\end{aligned}$$

因为对于一个同胚而言，$\varphi_*(X)$ 被定义为 $p \mapsto \varphi_{*\varphi^{-1}(p)} X_{\varphi^{-1}(p)}$，或者 $\varphi(p) \mapsto \varphi_{*p} X_p$，这就是说

$$X_p(f) = \varphi_*(X)_{\varphi(p)}(f),$$

因此 X 与 $\varphi_* X$ 是 φ 相关的。

(1.3.15) 令 φ 是 U 上的光滑同胚 $\varphi : U \to \varphi(U)$，$X$ 和 Y 是 U 上的矢量场，则在 U 上 $\varphi_*[X, Y] = [\varphi_* X, \varphi_* Y]$.

因此，作为局部的同胚，σ_s^X 可以适用

$$(\sigma_s^X)_*[X, Y] = [X, (\sigma_s^X)_* Y] = \lim_{t \to 0} \frac{1}{t}\big((\sigma_s^X)_* Y - (\sigma_{s+t}^X)_* Y\big) = \left.\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right|_{t=s} (\sigma_t^X)_* Y.$$

如果 $[X, Y] = 0$，则 $(\sigma_t^X)_* Y$ 是一个常矢量（局部来看，系数为常数），因此 Y 在 $(\sigma_t^X)_*$ 作用下不变，这就是说 $Y = (\sigma_t^X)_* Y$，于是 σ_t^X 和 σ_s^Y 可交换.

(1.3.16)$[X, Y] = 0$ 当且仅当 σ_t^X 和 σ_s^Y 可交换。

既然流是可交换的，那么以前我们谈的那个曲边四边形总是可以闭合的，所以这种情况下积分流形局部肯定存在，因为在局部我们可以一块一块曲边四边形拼起来。由于显然的 $[\partial_i, \partial_j] = 0$，如果我们能够选取局部坐标使得一族矢量场 $\{X_i : 1 \le i \le k\}$ 变成 $\{\partial_i : 1 \le i \le k\}$，则积分曲面存在。那么什么时候 $\{X_i\}$ 是可以变成 $\{\partial_i\}$ 呢？答案前面已经有了，$[X_i, X_j] \in D$，分布 D 由 $\{X_i\}$ 生成。当然，这可以直接证明，所以这也是证明积分曲面存在性的一种思路。

最后给个例子，n 维欧式空间，$\{\partial_i : 1 \le i \le k\}$ 的可能的积分曲面 $\{x_i = c_i : k+1 \le i \le n\}$，其中 c_i 是常数。如果这个积分曲面还是连通的，设 π 是往最后 $n-k$ 个坐标的投影，则 $\pi_* \partial_i = 0$，其中 $1 \le i \le k$，因此 $(\pi \circ i)_* = 0$，其中 i 是积分流形往欧式空间的嵌入，此时由积分流形的连通性，$\pi \circ i$ 是常值映射。此时的积分流形就是上面的 $\{x_i = c_i : k+1 \le i \le n\}$.

1.4 Cotangent Vector Field

(1.4.1) 设 $U \underset{\text{open}}{\subset} M$，$U$ 上的映射 $\omega : p \mapsto \omega(p) \in T_p^* M$ 被称为 U 上的余切矢量场。因为在 U 的每一个局部 V（至少一个坐标卡内），余切矢量场 ω 都可以写作 $\omega = a_i \mathrm{d}x^i$，其中 a_i 是 V 上的实值函数，而 $\mathrm{d}x^i$ 在不同的点分属不同的余切空间。如果 $\{a_i\}$ 在点 p 是光滑函数，则称 ω 在 p 处光滑。如果 ω 在 U 处处光滑，则称 ω 是 U 上的一个光滑余切矢量场（或者叫做一个 1-形式场）。

一个余切矢量场和一个切矢量场之间存在作用 $\omega(X) = X(\omega)$ 可以得到一个光滑函数，具体来说就是在每一点 p，$\omega_p(X_p) \in \mathbb{R}$.

(1.4.2) 正如切矢量场，对余切矢量场 ω，光滑性也有如下判据：ω 是光滑的，当且仅当 $\omega(X)$ 是光滑的对 U 上的任意光滑切矢量场 X 成立。

(1.4.3) 设 f 是 U 上的光滑函数，显然 $\mathrm{d}f$ 是一个 U 上的光滑余切矢量场。记 U 上的光滑函数的集合为 $\Omega^0(U)$，记 U 上的光滑余切矢量场的集合为 $\Omega^1(U)$，则 $\mathrm{d} : \Omega^0(U) \to \Omega^1(U)$.

下面我们要把 Frobenius 定理改写成余切矢量场的形式，这就变成了经典的 Pfaff 方程，正是当年关于 Pfaff 方程的研究，Cartran 第一次提出了（高阶）外微分和微分形式的概念（我们现在只谈了一阶的情况），在他那里，1-形式之间的乘法被定义成反对称的。从前一节谈论 Frobenius 定理来看，Pfaff 方程是一个关于积分曲面的问题，所以从这个角度来看，反对称的来由归根结底是为了积分。

(1.4.4) 称一个 1-形式 ω 是完全可积的，如果存在两个光滑函数 f 和 g 使得 $\omega = f\mathrm{d}g$，此时 f 被称为 ω 的积分因子。

1-形式的完全可积性联系着所谓的首次积分问题。设 f 是一个光滑函数且 $\mathrm{d}_p f$ 处处不为零，则 $f(p) = a$（如果解存在）决定了 M 中的一个正则子流形 N_a（有时候叫做一个曲面）。再设 X 是 M 内的光滑矢量场，则 $\mathrm{d}f(X) = 0$ 恒成立当且仅当处处成立 $X_p \in T_p N_{f(p)}$。

实际上，任取一点 $p \in M$，只要检验 $X_p(f) = 0$ 即可，选一条 $N_{f(p)}$ 上的一条光滑曲线 c，使得 $c(0) = p$ 且 $c'(0) = X_p \in T_p N_{f(p)}$，由于 $f(c(t)) = f(p)$ 恒成立，对其在 $t = 0$ 处求导就得到了 $\mathrm{d}_p f(X_p) = X_p(f) = 0$. 反过来，如果在一点处 $X_p \notin T_p N_{f(p)}$，则 $X_p(f) \neq 0$。

固定 f，将所有 $\mathrm{d}f(X) = 0$ 的 X 拿出来，他组成一个 $n-1$ 维的分布，$\{N_a\}$ 就是这个分布的一族积分流形，因为 X 在每一点都完全位于经过那一点的某个 N_a 的切空间内。我们称 $N_a = \{p \in M : f(p) = a\}$ 是 Paffa 方程 $\mathrm{d}f = 0$ 的解。从上面来看，一个 Paffa 方程要有解，那么解应该是一个积分曲面才是，即，Paffa 方程 $\omega = 0$ 的解是使得 $\omega(X) = 0$ 的所有的 X 的积分曲面。

现在假设一个 1-形式 ω 是完全可积的，即他可以写作 $\omega = f\mathrm{d}g$，那么 Paffa 方程 $\omega = 0$ 等价于 $\mathrm{d}g = 0$，这就确定了一个积分曲面。

(1.4.5) 设 ω 是一个 1-形式，记分布 $\ker\omega$ 是由满足 $\omega(X) = 0$ 的所有 X 张成的一个分布。记 $\ker(\omega_1, \cdots, \omega_r) = \cap_{i=1}^r \ker\omega_i$.

(1.4.6) 在局部，对任意一个分布 L，存在一族余切矢量场 $\{\omega_i : 1 \le i \le r\}$ 使得 $L = \ker(\omega_1, \cdots, \omega_r)$.

实际上，一个分布在局部，和他在流形一点处（一个矢量空间内）是很相似的。设 L 是一个分布，由 r 个光滑的切矢量场 $\{X_i : 1 \le i \le r\}$ 张成，则在局部，我们可以找到 $n-r$ 个光滑矢量场 $\{X_i : r+1 \le i \le n\}$，使得 $\{X_i : 1 \le i \le n\}$ 处处线线性无关。依然在局部，我们可以找到与其对偶[2]的 1-形式 $\{\omega_i : 1 \le i \le n\}$，那么那些使得 $\omega(X)$ 对 $X \in L$ 成立的 1-形式局部由 $\{\omega_i : r+1 \le i \le n\}$ 张成。因此，局部上，一个分布 L 可以写作 $L = \ker(\omega_{r+1}, \cdots, \omega_n)$，等价地，可以写作一个 Paffa 方程组 $\{\omega_i = 0 : r+1 \le i \le n\}$.

因为局部存在积分曲面的充要条件是任取 $X, Y \in D$ 满足 $[X, Y] \in D$，所以如果 $L = \ker(\omega_{r+1}, \cdots, \omega_n)$ 存在积分曲面，应该有 $\omega_i([X, Y]) = 0$。

(1.4.7) 设 $\omega = f\mathrm{d}g$，其中 f 和 g 是光滑函数，则对一般的光滑矢量场 X, Y 成立。

$$\begin{aligned}\omega([X,Y]) = f\mathrm{d}g([X,Y]) &= f[X,Y](g) \\ &= fX(Y(g)) - fY(X(g)) \\ &= X(fY(g)) - X(f)Y(g) - Y(fX(g)) + Y(f)X(g) \\ &= X(\omega(Y)) - Y(\omega(X)) - \big(X(f)Y(g) - Y(f)X(g)\big).\end{aligned} \tag{1.2}$$

对于 $X(f)Y(g) - Y(f)X(g)$，我们可以将其改写为 $\mathrm{d}f(X)\mathrm{d}g(Y) - \mathrm{d}g(X)\mathrm{d}f(Y)$，因为这是关于 X 和 Y 的双线性函数，我们可以引入一个张量 $\mathrm{d}f \otimes \mathrm{d}g$ 使得 $\mathrm{d}f \otimes \mathrm{d}g(X, Y) = \mathrm{d}f(X)\mathrm{d}g(Y)$，则

$$\mathrm{d}f(X)\mathrm{d}g(Y) - \mathrm{d}f(Y)\mathrm{d}g(X) = \mathrm{d}f \otimes \mathrm{d}g(X,Y) - \mathrm{d}g \otimes \mathrm{d}f(X,Y) = (\mathrm{d}f \otimes \mathrm{d}g - \mathrm{d}g \otimes \mathrm{d}f)(X,Y).$$

[2] 即满足 $\omega_i(X_j) = \delta_{ij}$.

记 $\mathrm{d}f\wedge\mathrm{d}g=\mathrm{d}f\otimes\mathrm{d}g-\mathrm{d}g\otimes\mathrm{d}f$，其中的 $\wedge$ 被称为楔积，记 $D(f\mathrm{d}g)=\mathrm{d}f\wedge\mathrm{d}g$，则式 (1.2) 变成了

$$D(f\mathrm{d}g)(X,Y)=X(\omega(Y))-Y(\omega(X))-\omega([X,Y]).$$

从式子右端来看，$\mathrm{d}f\wedge\mathrm{d}g(X,Y)$ 并不依赖于 ω 的具体形式 $\omega=f\mathrm{d}g$。实际上，任意一个 1-形式 ω 可以写作 $\omega=\sum_i f_i\mathrm{d}g_i$，所以对于一般的情况，式 (1.2) 应该写作

$$\sum_i D(f_i\mathrm{d}g_i)(X,Y)=X(\omega(Y))-Y(\omega(X))-\omega([X,Y]).$$

如果我们把 D 看做线性算子，则对于任意一个 1-形式，我们都定义了一个线性算子，满足

$$D(\omega)(X,Y)=X(\omega(Y))-Y(\omega(X))-\omega([X,Y]). \tag{1.3}$$

(1.4.8) 当然，我们也可以反过来通过式 (1.3) 来定义 $D(\omega)$，顺序在这里不是紧要的。紧要的是，$D(\omega)$ 决定了 $\ker\omega$ 是否容许一个积分曲面。这是因为，如果 $X,Y\in\ker\omega$，则式 (1.3) 变成了

$$D(\omega)(X,Y)=-\omega([X,Y]),$$

所以 $D(\omega)(X,Y)=0$ 当且仅当 $[X,Y]\in\ker\omega$.

这正是 Cartan 当年提出微分形式时候的处境，那时候，他从 Frobenius 和 Darboux 那里知道了，不同的 Pfaff 形式的等价条件就联系在一个 bilinear covariant 上面，而这个 bilinear covariant 就是我们这里的 $D(\omega)$.

从这个角度来看，正因为有 Frobenius 定理，或者更本质一点，我们需要把积分曲线拼成积分曲面，我们需要考察两个矢量场 X 和 Y 的 Lie 括号 $[X,Y]$，而这个 Lie 括号的反对称性来自于我们比较两条路径。现在，这种反对称性反应在了 1-形式之间的楔积，使得他构成了一个（吃掉两个矢量场的）反对称函数。所以，从 Cartan 这里，反对称性的来源应该是为了处理积分曲面的存在性，而由 $[X,Y]$ 自然诱导出来的。

(1.4.9) 外代数的复习在附录，对于矢量空间 V 的 k-次外代数记做 $\Omega^k(V)$。在流形上的一点 p 处，记 $\Omega_p^k=\Omega^k(T_pM)$，则 $\Omega_p^1=T_p^*M$.

(1.4.10) 设 $U\underset{\text{open}}{\subset}M$，$U$ 上的映射 $\omega:p\mapsto\omega(p)\in\Omega_p^k$ 被称为 U 上的一个 k-形式。称他是光滑的，如果他吃下任意 k 个光滑矢量场会得到一个光滑函数。所有 U 上的光滑 k-形式的集合记做 $\Omega^k(U)$. 显然，U 上的光滑函数可以看成一个光滑 0-形式，一个光滑余切矢量场是一个光滑 1-形式。如果 ω 是一个光滑 1-形式，则 $D(\omega)$ 是一个光滑 2-形式。下面我们所称的形式都是光滑的，我们将省略光滑二字。

(1.4.11) 设分布 L 由 $\{X_i:1\le i\le r\}$ 张成，且 $L=\ker(\omega_{r+1},\cdots,\omega_n)$，如果 $D(\omega)(X_i,X_j)=0$ 成立，则 $D(\omega)$ 可以写作

$$D(\omega)=\sum_{i=r+1}^n\psi_i\wedge\omega_i,$$

其中 ψ_i 是一次微分式.

实际上，局部地 $\{\omega_i:1\le i\le n\}$ 构成一组基，则

$$\mathrm{d}\omega=\sum_{i=r+1}^n\psi_i\wedge w_i+\sum_{i,j=1}^r a_{ij}\omega_i\wedge\omega_j,$$

其中 ψ_i 是一次微分式，而 a_{ij} 是光滑函数，且关于指标是反对称的。因为 $\omega_i(X_j)=\delta_{ij}$，所以

$$0=\mathrm{d}\omega(X_i,X_j)=\sum_{p,q=1}^r a_{pq}\omega_p\wedge\omega_q(X_i,X_j)=\sum_{p,q=1}^r a_{pq}(\delta_{ip}\delta_{jq}-\delta_{jp}\delta_{iq})=2a_{ij}.$$

(1.4.12) 设分布 L 由 $\{X_i : 1 \leq i \leq r\}$ 张成，且 $L = \ker(\omega_{r+1}, \cdots, \omega_n)$，则 L 存在积分曲面当且仅当，

$$D(\omega_i) = \sum_{j=r+1}^{n} \psi_{ij} \wedge \omega_i$$

对每一个 i 都成立。

(1.4.13) 在很久很久以前，对 U 上的一个光滑函数 f，我们定义了外微分 d，使得 df 是一个 1-形式，而刚刚，我们对 U 上的一个 1-形式 ω，定义了 D 使得 $D(\omega)$ 是一个 2-形式。更一般地，我们想要去定义如下一个算符

$$\mathrm{d}_k : \Omega^k(U) \to \Omega^{k+1}(U),$$

使得 $\mathrm{d}_0 = \mathrm{d}$，$\mathrm{d}_1 = D$。我们将 $\{\mathrm{d}_k\}$ 统称为外微分算符，统一记做 d，他完成了一个 k-形式到一个 $(k+1)$-形式的转变。

1.5 Integration

(1.5.1) 对于 $p \geq 0$，以及 $\mathbb{R}^{p+1}$ 中的 $p+1$ 个矢量 $\{v_i : 0 \leq i \leq p\}$ 满足 $\{v_i - v_0 : 1 \leq i \leq p\}$ 是一个线性无关组，我们定义仿射 p-单形为

$$\Delta^p = \left\{ \sum_{i=0}^{p} a_i v_i \in \mathbb{R}^{p+1} : \sum_{i=1}^{p} a_i = 1, \text{and each } a_i \leq 0 \right\},$$

而流形 M 上的一个（光滑）p-单形是指一个（光滑）映射 $\sigma : \Delta^p \to M$。

一个标准 0-单形是一个点 1，一个标准 1-单形是一个线段 $(t, 1-t)$，端点为 $(0,1)$ 和 $(1,0)$，一个标准 2-单形是一个三角形 $(s, t, 1-s-t)$，他的三个顶点位于 $(0,0,1)$, $(0,1,0)$ 和 $(1,0,0)$。记 M 上全部 p-单形生成的自由 Abel 群为 $C_p(M)$。

(1.5.2) 一个标准 p-单形的某个 $(p-1)$-边界是指某个 $a_i = 0$ 的情况，一个 $(p-1)$ 边界是自然的 $(p-1)$-单形。一个 p-单形 σ 的某个 $(p-1)$-边界是指某个 $a_i = 0$ 的情况。

Chapter 2

Appendix: Exterior Algebra

(2.0.1) 这里复习一下外代数的内容。设 V 是一个 n 维矢量空间，记 $\Omega^k(V)$ 为所有反对称线性函数

$$f : \underbrace{V \times \cdots \times V}_{k\text{个}} \to \mathbb{R}$$

的集合。这个集合有一个显然的线性结构。此外再约定 $\Omega^1(V) = V^*$ 和 $\Omega^0(V) = \mathbb{R}$. 我们将 $\Omega^k(V)$ 称为 V 的 k-次外代数。

(2.0.2) 设 $\xi \in \Omega^m(V)$ 和 $\eta \in \Omega^n(V)$，定义 ξ 和 η 的外积 $\xi \wedge \eta \in \Omega^{m+n}(V)$ 为

$$\xi \wedge \eta = \frac{1}{m!n!} \sum_{\sigma \in S^{m+n}} (-1)^{\mathrm{sign}(\sigma)} \sigma(\xi \otimes \eta).$$

其中 σ 属于 $m+n$ 阶置换群且 $\sigma(\xi \otimes \eta)$ 被定义为

$$\sigma(\xi \otimes \eta)(v_1, \ldots, v_{m+n}) = (\xi \otimes \eta)(v_{\sigma(1)}, \ldots, v_{\sigma(m+n)}).$$

而 $\xi \otimes \eta$（称为张量积）被定义为双线性的运算

$$\xi \otimes \eta(v_1, \ldots, v_m, v_{m+1}, \ldots, v_{m+n}) = \xi(v_1, \ldots, v_m)\eta(v_{m+1}, \ldots, v_{m+n}).$$

容易验证张量积满足结合律。

Proposition (2.0.3) 设 $\xi, \xi_1, \xi_2 \in \Omega^m(V)$ 和 $\eta, \eta_1, \eta_2 \in \Omega^n(V)$ 还有一个 $\zeta \in \Omega^h(V)$，有

(1) 分配律：

$$(\xi_1 + \xi_2) \wedge \eta = \xi_1 \wedge \eta + \xi_2 \wedge \eta,$$
$$\xi \wedge (\eta_1 + \eta_2) = \xi \wedge \eta_1 + \xi \wedge \eta_2.$$

(2) 反变换律：$\xi \wedge \eta = (-1)^{mn} \eta \wedge \xi$.

(3) 结合律：$(\xi \wedge \eta) \wedge \zeta = \xi \wedge (\eta \wedge \zeta)$.

Proof: (1) 由 σ 线性和张量积线性显然。

(2) 设置换

$$\tau = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & m & m+1 & \cdots & m+n \\ 1+n & \cdots & m+n & 1 & \cdots & n \end{pmatrix},$$

容易证明 $(-1)^{\mathrm{sign}(\tau)} = (-1)^{mn}$.

由线性性，我们只要对一个分量证明就可以了。按基打开直接写出

$$\xi \wedge \eta = \frac{\xi^{i_1 \ldots i_m} \eta^{j_1 \ldots j_n}}{m!n!} \sum_{\sigma \in S^{m+n}} (-1)^{\mathrm{sign}(\sigma)} \sigma(v_{i_1} \otimes \cdots \otimes v_{i_m} \otimes v_{j_1} \otimes \cdots \otimes v_{j_n})$$

$$\eta \wedge \xi = \frac{\xi^{i_1 \ldots i_m} \eta^{j_1 \ldots j_n}}{m!n!} \sum_{\sigma \in S^{m+n}} (-1)^{\mathrm{sign}(\sigma)} \sigma(v_{j_1} \otimes \cdots \otimes v_{j_n} \otimes v_{i_1} \otimes \cdots \otimes v_{i_m})$$

注意到 σ 跑遍所有置换,那么 σ 和 τ 的复合 $\sigma' = \sigma \circ \tau$ 也跑遍所有置换,且 $(-1)^{\mathrm{sign}(\sigma')} = (-1)^{\mathrm{sign}(\sigma)}(-1)^{\mathrm{sign}(\tau)}$, 所以

$$\begin{aligned}
\eta \wedge \xi &= \frac{\xi^{i_1 \cdots i_m} \eta^{j_1 \cdots j_n}}{m!n!} \sum_{\sigma' \in S^{m+n}} (-1)^{\mathrm{sign}(\sigma')} \sigma'(v_{j_1} \otimes \cdots \otimes v_{j_n} \otimes v_{i_1} \otimes \cdots \otimes v_{i_m}) \\
&= \frac{\xi^{i_1 \cdots i_m} \eta^{j_1 \cdots j_n}}{m!n!} \sum_{\sigma \in S^{m+n}} (-1)^{\mathrm{sign}(\sigma)} (-1)^{\mathrm{sign}(\tau)} \sigma(v_{i_1} \otimes \cdots \otimes v_{i_m} \otimes v_{j_1} \otimes \cdots \otimes v_{j_n}) \\
&= (-1)^{\mathrm{sign}(\tau)} \frac{\xi^{i_1 \cdots i_m} \eta^{j_1 \cdots j_n}}{m!n!} \sum_{\sigma \in S^{m+n}} (-1)^{\mathrm{sign}(\sigma)} \sigma(v_{i_1} \otimes \cdots \otimes v_{i_m} \otimes v_{j_1} \otimes \cdots \otimes v_{j_n}) \\
&= (-1)^{\mathrm{sign}(\tau)} \xi \wedge \eta.
\end{aligned}$$

代入 $(-1)^{\mathrm{sign}(\tau)} = (-1)^{mn}$ 即得证(2).

第三个性质，也就是结合律的证明就是死算，略去计算最后得到：

$$(\xi \wedge \eta) \wedge \zeta = \frac{1}{m!n!h!} \sum_{\sigma \in S^{m+n+h}} (-1)^{\mathrm{sign}(\sigma)} \sigma(\xi \otimes \eta \otimes \zeta) = \xi \wedge (\eta \wedge \zeta).$$

□

(2.0.4) 留意 $v, w \in \Omega^1(V) = V^*$ 的外积 $v \wedge w$ 是有趣的。首先，显然地，$\omega \wedge \omega = 0$。然后容易证明对 $a, b \in V$

$$v \wedge w(a, b) = v(a)w(b) - w(a)v(b) = \begin{vmatrix} v(a) & v(b) \\ w(a) & w(b) \end{vmatrix}.$$

对于多个 $\omega_i \in \Omega^1(V)$ 的外积，我们可以用归纳法证明

$$\omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p(v_1, \ldots, v_p) = \begin{vmatrix} \omega_1(v_1) & \cdots & \omega_p(v_p) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_p(v_1) & \cdots & \omega_p(v_p) \end{vmatrix}.$$

(2.0.5) 还有一个很类似的结论，对于多个 $\omega_i \in \Omega^1(V)$ 的外积来说我们有 $\omega_i \wedge \omega_j = -\omega_j \wedge \omega_i$，而且是线性的。我们考虑 p 个 $\omega_i \in \Omega^1(V)$ 之间的外积 $F(\omega_1, \ldots, \omega_n) = \omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p$，如果矢量空间 V^* 的基是 $\{v_i\}$，由于 F 是反对称线性映射，我们有熟知的分解：

$$F(\omega_1, \ldots, \omega_p) = \det(\omega_1, \ldots, \omega_p) F(v_1, \ldots, v_p),$$

或者写作

$$\omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p = \begin{vmatrix} \omega_{11} & \cdots & \omega_{p1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{1p} & \cdots & \omega_{pp} \end{vmatrix} v_1 \wedge \cdots \wedge v_p.$$

其中 ω_{ij} 值的是 ω_i 在 v_j 方向的分量值。从这里可以看到，若 ω_i 们线性相关的，则 $\omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p = 0$. 若 V^* 的维度是 n，而 $p > n$，则 ω_i 必然线性相关，则 $\omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p = 0$.

(2.0.6) 特别地，如果 $\omega' = \mathrm{d}x'$ 和 $\eta' = \mathrm{d}y'$，且 x' 和 y' 可以看做 x 和 y 的函数，而

$$\mathrm{d}x' = \partial_x x' \mathrm{d}x + \partial_y x' \mathrm{d}y, \quad \mathrm{d}y' = \partial_x y' \mathrm{d}x + \partial_y y' \mathrm{d}y,$$

因此

$$\mathrm{d}x' \wedge \mathrm{d}y' = \det \left(\frac{\partial(x', y')}{\partial(x, y)} \right) \mathrm{d}x \wedge \mathrm{d}y,$$

其中 $\partial(x', y')/\partial(x, y)$ 是 (x', y') 关于 (x, y) 的 Jacobian. 如果还记得积分学的一些基本事实，会发现这就是和重积分变量替换公式是如此的相似。实际上，对于二个变量的重积分变换公式，他写作

$$\int_S \mathrm{d}x'\mathrm{d}y' = \int_S \left| \det \left(\frac{\partial(x', y')}{\partial(x, y)} \right) \right| \mathrm{d}x\mathrm{d}y,$$

其中绝对值的引入是因为换变量可能会改变积分区域的定向。

所以，从这个角度来看，正如我们对于 $\mathrm{d}x$ 是无穷小距离的直观一样，我们可以认为 $\mathrm{d}x \wedge \mathrm{d}y$ 是无穷小面积。

(2.0.7) 设 $\{e^i : 1 \leq i \leq n\}$ 是 V^* 的一组基，则 $\{e^{i_1} \wedge \cdots \wedge e^{i_k}\}$ 是 $\Omega^k(V)$ 的一组基。于是当 $k > n$ 时 $\Omega^k(V) = 0$，当 $0 \leq k \leq n$ 时，$\dim \Omega^k(V) = \binom{n}{k}$.

Lemma (2.0.8)（Cartan 引理）设 $\{v_i : 1 \leq i \leq r\}$ 和 $\{w_i : 1 \leq i \leq r\}$ 是 V^* 中的两组矢量，且 $\sum_{i=1}^r v_i \wedge w_i = 0$。如果 $\{v_i\}$ 线性无关，则每个 w_i 可以由 $\{v_i\}$ 线性组合而成 $w_i = \sum_{i=1}^r \alpha_{ij} v_j$，且 $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$.

Proof: 将 $\{v_i\}$ 扩充为一组基，则 $w_i = \sum_{i=1}^r \alpha_{ij} v_j$，将其代入条件 $\sum_{i=1}^r v_i \wedge w_i = 0$ 有

$$0 = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^r \alpha_{ij} v_i \wedge v_j = \sum_{1 \leq i < j \leq n} (\alpha_{ij} - \alpha_{ji}) v_i \wedge v_j + \sum_{j=r+1}^n \sum_{i=1}^r \alpha_{ij} v_i \wedge v_j,$$

由于 $v_i \wedge v_j$ 是 $\Omega^2(V)$ 的一组基，所以 $\alpha_{ij} = 0$ 当 $j > r$，且 $\alpha_{ij} = \alpha_{ji}$ 当 $j \leq r$. □