

第三幕 曲率

Wayne Zheng

2025 年 12 月 19 日

目录

1	平面曲线的曲率	i
2	三维空间的曲线	ii
3	曲面的主曲率	ii
4	测地线和测地曲率	iii
4.1	两种曲率	iii
4.2	旋转表面上的测地线	iii
4.3	开普勒第二定律	iv
5	曲面的外在曲率	iv
6	高斯的绝妙定理	v
7	尖刺曲率	v
7.1	圆锥曲率	v
7.2	多面角曲率	v
8	形状算子	v
8.1	补充：奇异值分解的几何学	v
8.2	形状算子的矩阵表示和几何意义	vi

1 平面曲线的曲率

不存在一维的内蕴曲率概念。几何与物理的联系：如果一个单位质量的滚珠在一段无摩擦的曲线上以单位速率运动，金属丝就会有一个垂直于切向的作用力作用在滚珠上，牛顿知道，这个力 F 的大小就是曲线的曲率 κ 。

曲率最早由牛顿引入，描述曲线的“弯曲性”。更确切地说，曲率是切线关于弧长的转向率。如果 φ 是切线的变化角，则 $\kappa = d\varphi/ds$ 。设 \mathbf{T} 和 \mathbf{N} 是曲线的单位切向量和指向曲率中心的单位法向量，则我们容易得到 $\delta\mathbf{T} \propto \mathbf{N}\delta\varphi$ ，从而

$$\frac{d\mathbf{T}}{ds} \equiv \mathbf{T}' = \kappa\mathbf{N}. \tag{1}$$

也可以用法向量取代切向量，考虑法向量的转向率

$$\frac{d\mathbf{N}}{ds} \equiv \mathbf{N}' = -\kappa\mathbf{T}. \tag{2}$$

因为如果将考虑对象从曲线变成曲面，就不存在唯一的切向量了。换句话说，在平面内，切向量和法向量的转向速率都是曲率 κ ，其变化率的方向是相反的，平行于另一个向量。

一般地，牛顿发现质点在二维平面的运动曲线 $[x(t), y(t)]$ 的曲率公式

$$\kappa = \frac{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}. \tag{3}$$

上方的点是关于时间的导数。对于单位速率运动的质点， $|\mathbf{v}|^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 = 1$ 。如果质点在 δt 时刻内走过了 $\delta\varphi$ ，此时 $\delta t = \delta s$ 。则 \dot{y} 方向的增量为 $\delta\dot{y} \asymp \ddot{y}\delta t = \ddot{y}\delta s$ 。根据相似三角形，

$$\frac{\delta\varphi}{\ddot{y}\delta s} \asymp \frac{1}{\dot{x}}.$$

即

$$\kappa \equiv \frac{d\varphi}{ds} = \frac{\ddot{y}}{\dot{x}}. \quad (4)$$

利用三角形另一边的相似性质，容易得此时曲率的另一个表达式 $\kappa = -\ddot{x}/\dot{y}$ 。

2 三维空间的曲线

密切平面：在三维空间中扭曲的曲线，每个无限小的部分仍可以认为是在一个平面内的，这个平面称为密切平面（osculating plane）。密切平面可以看作是曲线在瞬时最贴合的平面。密切平面由两个（单位）向量切向量 \mathbf{T} 和主法向量 \mathbf{N} 张成。考虑沿着该曲线的质点运动，切向量 \mathbf{T} 描述的是曲线的瞬时速度方向，主法向量 \mathbf{N} 描述的是曲线的瞬时加速度方向，指向曲率中心。密切平面的法向量称为副法向量 \mathbf{B} 。($\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B}$) 组成了弗勒内（Frenet）框架。

设曲线是关于弧长 s 的函数，即 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(s)$ 。则切向量定义为

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{r}}{ds}.$$

密切平面的旋转速率称为挠率（torsion） τ ，也就是副法线绕 \mathbf{T} 的旋转速率，即

$$\mathbf{B}' = -\tau\mathbf{N}. \quad (5)$$

在三维空间中，主法线向量 \mathbf{N} 不仅在密切平面内旋转，还要沿着 \mathbf{B} 方向，绕着切向量 \mathbf{T} 旋转，因此综合起来，主法线的变化率为

$$\mathbf{N}' = -\kappa\mathbf{T} + \tau\mathbf{B}. \quad (6)$$

因此，三维空间中曲线的弗勒内-塞雷方程（Frenet-Serret formulas）总结如下：

$$\begin{pmatrix} \mathbf{T}' \\ \mathbf{N}' \\ \mathbf{B}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

3 曲面的主曲率

p 是曲面上的一点， \mathbf{n}_p 是 p 的法向量（normal vector）， Π_θ 是法平面（normal plane）束，其与曲面的交线记作 \mathcal{C}_θ ， p 到 \mathcal{C}_θ 的曲率中心 c 的距离为 $1/\kappa_\theta$ 。如果 c 在 $+\mathbf{n}_p$ 方向上， κ_θ 为正，反之为负。□ 7

选取 p 点作为原点，法线方向为 z 轴，切平面为 x - y 平面，建立直角坐标系。可以用 $z = f(x, y)$ 来表示曲面，在原点处 $f(0, 0) = 0, \partial_x f = \partial_y f = 0$ 。当 $x, y \rightarrow 0$ 时，我们可以展开 $z \asymp ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey$ 。因为在原点 $\partial_x f = \partial_y f = 0$ ，所以 $\partial_x f = 2ax + cy + d \rightarrow 0$ 。因此 $d = e = 0$ 。我们可以用非常靠近且平行于切面面的一个平面 $z = k$ 来切开曲面，得到的截面曲线在原点附近可以表示为

$$z \asymp ax^2 + by^2 + cxy \quad (8)$$

是一个二次齐次曲线。圆锥曲线都有两个相互垂直的对称轴，如果我们选取这两个轴作为 x 轴和 y 轴，则可以消去交叉项，因为在反射变换下 $x \rightarrow -x, y \rightarrow y, f(x, y)$ 保持不变。因此，我们可以将截面曲线表示为

$$z \asymp ax^2 + by^2. \quad (9)$$

根据二维空间中的曲线，我们知道分别沿着 x 轴和 y 轴的曲线可以表示为 $z \asymp \frac{1}{2}\kappa_1 x^2$ 和 $z \asymp \frac{1}{2}\kappa_2 y^2$ ，其中我们定义了 $\kappa_1 = \kappa(0), \kappa_2 = \kappa(\pi/2)$ 。因此，

$$z \asymp \frac{1}{2}\kappa_1 x^2 + \frac{1}{2}\kappa_2 y^2. \quad (10)$$

如果考虑任意角度的截面曲线，设该截面与 x 轴的夹角为 θ ，如果在切平面内沿着 θ 方向移动一小段距离 ϵ ，则 $x = \epsilon \cos \theta, y = \epsilon \sin \theta$ ，则

$$\kappa(\theta) \asymp 2 \left(\frac{z}{\epsilon^2} \right) \asymp 2 \left[\frac{\frac{1}{2}\kappa_1(\epsilon \cos \theta)^2 + \frac{1}{2}\kappa_2(\epsilon \sin \theta)^2}{\epsilon^2} \right] = \kappa_1 \cos^2 \theta + \kappa_2 \sin^2 \theta. \quad (11)$$

这就是欧拉曲率公式。

4 测地线和测地曲率

4.1 两种曲率

三维空间中，一般曲面内的一般曲线的曲率可以分为两个分量：在曲面内（对其中的居民可见）的称为测地曲率（geodesic curvature） κ_g ，在曲面外（对其中的居民不可见）的称为法曲率（normal curvature） κ_n 。如果密切平面垂直于曲面（的法向量），那么所有曲率都是法曲率 $\kappa = \kappa_n, \kappa_g = 0$ 。地球表面的大圆就是这样。

如果质点以单位速率走过一条曲线，其加速度向量的方向指向曲率中心，长度就是曲率，因此可以将质点的加速度称为曲率向量（curvature vector） $\vec{\kappa} = \kappa \mathbf{N} \equiv \dot{\mathbf{T}}$ 。

设 \mathbf{T} 是曲线 C 在点 p 处的单位切向量， \mathbf{n} 是法向量。 T_p 是曲面在点 p 处的切平面， \mathbf{n} 与 \mathbf{T} 张成法平面 Π_T 。 Π_T 与密切平面（副法向量 \mathbf{B} ）的夹角为 γ ，则测地曲率向量 $\vec{\kappa}_g$ 和法曲率向量 $\vec{\kappa}_n$ 实际上就是 $\vec{\kappa}$ 在 T_p 和 Π_T 上的投影分量，即

$$\kappa_g = \kappa \cos \gamma, \quad \kappa_n = \kappa \sin \gamma. \quad (12)$$

默尼耶（Jean Baptiste Meusnier, 法国数学家、物理学家和工程师）在 1776 年就注意到：曲面迫使其上面的所有曲线沿着法方向弯曲同等的量，从而给出默尼耶定理：

曲面上经过点 p 、指向同一方向 \mathbf{T} 的所有曲线都具有相同的法曲率 $\kappa_n(\mathbf{T})$ ，即曲面在 \mathbf{T} 方向的法截线曲率。如果曲线在 p 点密切平面与曲面在 p 点的切平面成夹角 γ ，曲线在 p 点的曲率为 κ_γ ，则 $\kappa_\gamma \sin \gamma = \kappa_n(\mathbf{T})$ 。

测地线是内蕴的“直线”，其上每一点 $\kappa_g = 0$ 。也就是说：对于测地线上的每一点，曲面在该点的法向量 \mathbf{n}_p 一定位于该点的密切平面 Π_p 之内。换句话说，这些线对于曲面内的居民而言是真正的直线，因为他们无法得知法曲率 κ_n 的存在；对于曲面外的观察者而言，就是测地线。

4.2 旋转表面上的测地线

下面我们考虑旋转曲面。一般旋转曲面的子午线一定是测地线。

我们先考虑球面，设半径为 R ，假设一质点以单位速率沿着球面上的一大圆运动，大圆与赤道平面 Π 的夹角为 γ 。不妨设大圆平面与 Π 的交线是 y 轴，因为大圆过球心，所以大圆的平面方程为 $Ax + Bz = 0$ 。又因为大圆过 $(0, R, 0)$ 和 $(R \cos \gamma, 0, R \sin \gamma)$ 点，从而得到平面方程为 $z = x \tan \gamma$ 。带入到球面方程 $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$ 中，得到大圆的方程，也就是球与该平面的交线方程：

$$\frac{x^2}{R^2 \cos^2 \gamma} + \frac{y^2}{R^2} = 1,$$

用 (x, y) 坐标描述，即在 Π 上的投影。这是一个椭圆。

下面我们具体考虑从 $z = x \tan \gamma$ 到 Π 的投影 \mathcal{P} . 容易看出, 这是一个带有缩放性质的线性变换。我们首先要在 $z = x \tan \gamma$ 上来表示一个点, 即一个向量。容易看出, 可以选取两个正交归一的基向量 $\mathbf{e}_1 = (0, 1, 0), \mathbf{e}_2 = (\cos \gamma, 0, \sin \gamma)$. \mathbf{r} 在该平面上的坐标为 (u, v) , 即

$$\mathbf{r} = u\mathbf{e}_1 + v\mathbf{e}_2 = (v \cos \gamma, u, v \sin \gamma) \mapsto (v \cos \gamma, u) \equiv (x, y).$$

则 \mathcal{P} 的表示矩阵 (雅可比矩阵) 是

$$P = \begin{pmatrix} 0 & \cos \gamma \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

注意, $\det(P) = \cos \gamma$ 代表了面积微元的缩放比例系数, 即 $d\mathcal{A} = \cos \gamma \cdot dA$.

当一个质点以单位速率在 $z = x \tan \gamma$ 平面内的大圆上运动时, 在 Δt 时间内其扫过的角度为 $\Delta \theta = 1 \cdot \Delta t / R$, 面积为 $A = \frac{1}{2} R^2 \Delta \theta = \frac{1}{2} R \Delta t$, 即相等时间内扫过的面积相等。其在 Π 上的投影也是如此, 即 $d\mathcal{A}/dt = \frac{1}{2} R \cos \gamma$. 由于是椭圆, 因此要满足此条件只能在距离焦点较近时速度较快, 远离焦点时速度较慢。

设质点在大圆测地线上运动到了点 p , 其与经线 (子午线) 的夹角为 ψ . 则质点的单位速率在点 p 处的切平面 T_p 内可以分解为纬线分量 $\sin \psi$ 和经线分量 $\cos \psi$. 设投影半径为 ρ , 则容易得到

$$\frac{1}{2} \rho \sin \psi = \frac{1}{2} R \cos \gamma$$

是一个常数。推广到任意旋转曲面即为克莱罗定理 (Clairaut's Theorem):

设 S 是曲线 C 绕轴 L 形成的旋转曲面, 如果 ρ 是测地线 g 上的点 q 到 L 的距离, ψ 是经过点 q 的子午线与测地线之间的夹角。当 q 沿着 g 移动时, $\rho \sin \psi$ 保持不变。而且, 如果当 q 沿着曲线 g' (任意一段都不是 S 的平行线) 移动时, 如果 $\rho \sin \psi$ 保持不变, 则 g' 是测地线。

该定理是克莱罗 1733 年研究旋转曲面时得到的。

4.3 开普勒第二定律

在相等的时间内扫过相等的面积, 是所有中心力场的普遍性质。牛顿能够使用几何方法分析动力学问题, 关键正是将时间几何化, 面积就是时钟。开普勒第一定律指出: 行星的轨道是一个椭圆, 这与力随距离线性变化有关。

牛顿对开普勒第二定律给出了一个几何证明。

5 曲面的外在曲率

主曲率 (principal curvature):

$$H = \bar{\kappa} = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2}. \quad (13)$$

极小曲面 (minimal surface) 在每一个点都满足 $H = 0$, 因此极小曲面一定是鞍型或者平坦的。

设曲面上有一点 p , 其法向量为 \mathbf{n}_p . 球面映射, 也叫高斯映射 (Gauss map) 是选取曲面上包含点 p 的面积为 $\delta\mathcal{A}$ 的一小片, $n: \mathcal{S} \mapsto \mathbb{S}^2$. 在 \mathbb{S}^2 的面积我们记作 $\delta\tilde{\mathcal{A}}$.

曲面的外在曲率被定义成球面映射下的局部面积的放大系数:

$$\mathcal{K}_{\text{ext}} \asymp \frac{\delta\tilde{\mathcal{A}}}{\delta\mathcal{A}} = \kappa_1 \kappa_2.$$

6 高斯的绝妙定理

高斯绝妙定理告诉我们：虽然 $\mathcal{K}_{\text{ext}} = \kappa_1 \kappa_2$ 是通过外蕴的 $\kappa_{1,2}$ 定义的（ $\kappa_{1,2}$ 依赖于曲面如何嵌入三维空间），当时 \mathcal{K}_{ext} 却是内蕴的，在 \mathcal{S} 的等距变换下保持不变。用外在方式定义的曲率 \mathcal{K}_{ext} 与通过内蕴角盈定义的高斯曲率是相等的，即 $\mathcal{K}_{\text{ext}} = \mathcal{K}$ 。

例子：将一张白纸卷成圆筒，这是一个等距变换。

7 尖刺曲率

7.1 圆锥曲率

广义球面映射：想象将一个平面附着在圆锥顶端，并且有一个单位法向量 \mathbf{n} 。这个平面可以朝任意方向晃动，直到它碰到圆锥的侧面，当平面走过所有可能的位置时，单位法向量 \mathbf{n} 扫过了一个球冠，其面积为 $2\pi(1 - \sin \alpha)$ ，其中 α 是圆锥到对称轴的内角。这个球冠的面积就被定义为尖刺曲率（conical curvature） $\mathcal{K}_{\text{spike}}$ 。

在 $\alpha = \pi/2$ 时，圆锥退化成平面， $\mathcal{K}_{\text{spike}} = 0$ 。

另外我们还可以将单位圆锥剪开，展开成一个单位半径的扇形，记展开后的缺口角度为 β 。这个扇型的周长为 $2\pi \sin \alpha = 2\pi - \beta$ ，因此 $\beta = 2\pi(1 - \sin \alpha)$ 。因此，尖刺曲率也可以定义为扇形的缺口角度 β 。

7.2 多面角曲率

类似地，我们可以定义多面角的内在和外在曲率。 \mathcal{K}_{int} 被定义为尖刺展开后的分割角 β 。 \mathcal{K}_{ext} 被定义为 \mathbb{S}^2 上连接多面角各个面的单位法向量所形成的 m 边形的面积。

多面体的绝妙定理： $\mathcal{K}_{\text{int}} = \mathcal{K}_{\text{ext}}$ 。

8 形状算子

在曲面 p 点处的形状算符（shape operator, 又名 Weingarten 映射）告诉我们的是从 p 点出发沿着任意切向量 \mathbf{v} 移动时，法向量 \mathbf{n} 的变化率。

$$S(\mathbf{v}) \equiv -\nabla_{\mathbf{v}} \mathbf{n}.$$

S 也可以被看成一个从切空间到切空间的线性映射。主方向（principal direction）上的单位向量是形状导数的本征向量，主曲率是对应的本征值，即 $S(\mathbf{e}_i) = \kappa_i \mathbf{e}_i$ 。从而， \mathcal{K}_{ext} 是形状导数的面积扩张系数，即 $\det(S) = \kappa_1 \kappa_2$ 。

8.1 补充：奇异值分解的几何学

奇异值分解（singular value decomposition, SVD）：平面上的每一个线性变换等价于两个正交方向的拉伸，拉伸系数为 σ_1 和 σ_2 ，称之为奇异值。再接一个角度为 τ 的旋转。

$$M = R_{\varphi} \Sigma R_{-\theta}.$$

$\tau = \varphi - \theta$ 。我们注意到： $M^{-1} = R_{\theta} \Sigma^{-1} R_{-\varphi}$ 以及 $M^T = R_{-\theta} \Sigma R_{\varphi}$ 。说明 M^T 和 M^{-1} 类似，是做一个反向的扭转，再像 M 一样沿着两个正交方向做拉伸。

如果 $M^T = M$ ，则 $M = R_{\theta} \Sigma R_{-\theta}$ 。这时候 M 的两个正交本征向量正好是奇异值分解中的两个拉伸方向， M 被称为自伴算子（self-adjoint operator）。这时候奇异值分解即为谱分解，这个结果也被称为谱定理， M 的本征值一定为实数。自伴算符有重要性质：对于线性空间的任意向量 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} ，都有

$$\langle M\mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle = \langle \mathbf{u}, M\mathbf{v} \rangle.$$

在实空间里, $\langle M\mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle = (M\mathbf{u})^T \mathbf{v} = \mathbf{u}^T M^T \mathbf{v} = \mathbf{u}^T (M\mathbf{v}) \equiv \langle \mathbf{u}, M\mathbf{v} \rangle$. 这也被在代数层面被用作自伴算子的定义。

8.2 形状算子的矩阵表示和几何意义

形状算子是一个自伴算子, 因此其奇异值分解即为谱分解。假设任意的正交坐标系 $\{\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2\}$, 其与主方向 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2\}$ 的夹角为 θ . 则形状算子的矩阵表示为 $[S] = R_{-\theta} \cdot \text{diag}(\kappa_1, \kappa_2) \cdot R_\theta$, 即

$$\begin{aligned} [S] &= \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_1 & 0 \\ 0 & \kappa_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \kappa_1 \cos^2 \theta + \kappa_2 \sin^2 \theta & (\kappa_1 - \kappa_2) \sin \theta \cos \theta \\ (\kappa_1 - \kappa_2) \sin \theta \cos \theta & \kappa_1 \sin^2 \theta + \kappa_2 \cos^2 \theta \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

根据欧拉曲率公式, 我们看到形状算子的对角线元素正好是 $\kappa(\mathbf{E}_1)$ 和 $\kappa(\mathbf{E}_2)$. 从而,

$$[S] = \begin{bmatrix} \kappa(\mathbf{E}_1) & \frac{\Delta\kappa}{2} \sin 2\theta \\ \frac{\Delta\kappa}{2} \sin 2\theta & \kappa(\mathbf{E}_2) \end{bmatrix}.$$

实际上, 形状算子的意义还有:

任意切方向的单位向量 $\hat{\mathbf{E}}$ 的法截痕曲率都可以表示为 $\kappa(\mathbf{E}) = \langle \hat{\mathbf{E}}, S(\hat{\mathbf{E}}) \rangle$.

根据线性代数的知识,

$$[S] = \begin{bmatrix} \langle \mathbf{E}_1, S(\mathbf{E}_1) \rangle & \langle \mathbf{E}_1, S(\mathbf{E}_2) \rangle \\ \langle \mathbf{E}_2, S(\mathbf{E}_1) \rangle & \langle \mathbf{E}_2, S(\mathbf{E}_2) \rangle \end{bmatrix}.$$

以 $[S]$ 的第一列为例, 其几何意义: $\langle \mathbf{E}_1, S(\mathbf{E}_1) \rangle$ 表示的是 \mathbf{E}_1 方向的法平面 Π_1 内部法向量 \mathbf{n} 旋转的快慢; $\langle \mathbf{E}_2, S(\mathbf{E}_1) \rangle$ 表示 \mathbf{n} 在垂直于法平面的方向旋转的快慢。当选定主方向时, \mathbf{n} 只会在法平面内运动, 因此形状算子的矩阵表示为对角矩阵。