

模具

## 基于 3D 偏置映射的汽车覆盖件修边模具空开面稳定生成方法

陶继坤<sup>1</sup>, 柳玉起<sup>1</sup>, 章志兵<sup>1</sup>, 王 振<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 材料科学与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉华锋惠众科技有限公司, 湖北 武汉 430073)

**摘要:** 为了快速稳定地构建汽车覆盖件修边模具中的空开面, 提出了一种基于几何偏置映射构建空开面的方法。该方法将二维曲线偏置中常用的滚圆算法扩展至三维空间, 实现了空间曲线的水平和竖直偏置, 生成的偏置曲线整体光滑, 提高了复杂空间曲线偏置的稳定性和质量。基于偏置曲线和 3D 偏置映射关系构造修边模具的空开面, 解决了空开面容易出现的褶皱、重叠等质量问题。基于 NX 平台, 将该方法集成于汽车覆盖件修边模具智能设计系统中, 并对实际汽车覆盖件修边模具进行了大量测试, 结果表明, 该方法稳定可靠, 构建的空开面形态质量好, 显著提高了修边模具的设计质量和效率。

**关键词:** 汽车覆盖件; 修边模具; 曲线偏置; 几何映射; 空开面

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.017

**中图分类号:** TG386.3; TP319

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 11-0126-09

## A stable generation method for gap surface of trimming die for automotive panels based on 3D offset mapping

Tao Jikun<sup>1</sup>, Liu Yuqi<sup>1</sup>, Zhang Zhibing<sup>1</sup>, Wang Zhen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Moduld Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Hua Feng Hui Zhong Technology Co., Ltd., Wuhan 430073, China)

**Abstract:** In order to quickly and stably construct the gap surfaces of trimming die for automotive panels, a method based on geometric offset mapping was proposed to construct the gap surface, which extended the rolling circle algorithm commonly used in 2D curve offset to 3D space to realize the horizontal and vertical offset of spatial curves, generate the overall smooth offset curve, and improve the stability and quality of complex spatial curve offset. Then, the gap surface of trimming die was constructed based on offset curve and 3D offset mapping relationship, and the quality problems such as wrinkles and overlaps that were prone to occur on the gap surface were solved. Furthermore, based on NX platform, the method was integrated into the intelligent design system of automotive panel trimming die, and a large number of tests were carried out on the actual automotive panel trimming die. The results indicate that the method is stable and reliable, and the shape quality of the constructed gap surface is good, which significantly improves the design quality and efficiency of trimming die.

**Key words:** automotive panel; trimming die; curve offset; geometric mapping; gap surface

汽车覆盖件成形过程中, 修边工序是保证其表面精度的重要一环, 这就要求修边模具具有较高的质量和精度<sup>[1-2]</sup>。为了减少模具精加工的时间和成本, 降低模具整体质量, 通常会将其设计为空开结构<sup>[3]</sup>。如图 1 所示, 修边模具空开结构的设计, 通常是基于模板实体布尔减法策略进行的, 则需要根

据修边线派生出一系列曲面, 例如图 1b 中的曲面 BF1~BF7, 这些 G0 连续的派生曲面即为模板实体的边界曲面, 再利用边界曲面生成模板实体, 与模具实体进行布尔减运算, 生成对应的空开结构<sup>[4]</sup>。由此可见, 一种稳定的修边线派生空开面的方法, 对于修边模具的设计具有重要的意义。

然而, 在实际设计过程中, 汽车覆盖件的修边线通常为形状高度复杂的空间自由曲线<sup>[5]</sup>。一般来说, 在构建空开面的过程中会存在两个主要的难点: (1) 如何保证偏置曲线的稳定性和质量, 避免偏置曲线出现尖角、回折、自相交甚至偏置失败等致命问题<sup>[6]</sup>; (2) 如何根据原始曲线和偏置曲线构建一

收稿日期: 2024-01-10; 修订日期: 2024-04-15

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (2021B0101220001)

作者简介: 陶继坤 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 524362942@qq.com

通信作者: 章志兵 (1978-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhangzb@hust.edu.cn

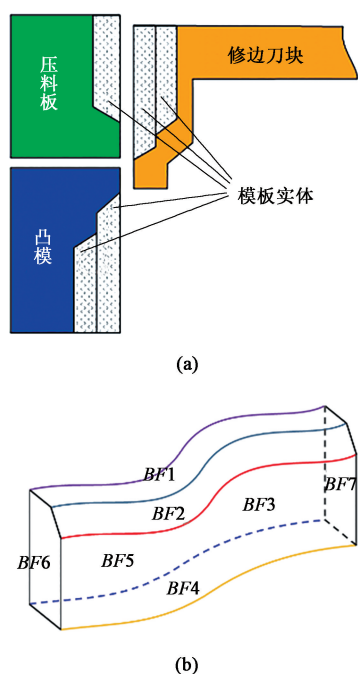


图 1 基于模板实体布尔减运算的设计方法

(a) 修边模具结构 (b) 模板实体结构

Fig. 1 Design method based on template solid Boolean subtraction operation

(a) Structure of trimming die (b) Solid structure of template

个相对合理的 3D 偏置映射关系,使得最后生成的空开面的质量和效率均有所保证<sup>[7]</sup>。

传统的空开面构建通常是依靠通用计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 平台完成的。其对形状较为简单的修边线构建空开面,能有较好的稳定性和设计效率;但是对于复杂的修边线,则存在不少问题。首先,使用通用 CAD 平台对复杂空间曲线进行偏置时,可能会存在尖点、回折、自相交等质量问题,部分场景下还会偏置失败。为保证偏置的成功率,设计人员通常需要对曲线进行大量的分割、桥接等几何操作。其次,在根据原始曲线和偏置曲线构建空开面时,为了避免曲面出现褶皱、重叠等质量问题,还需要手动调整原始曲线和偏置曲线之间的几何映射关系。上述问题的出现,使得复杂修边线空开面的构建过程极其复杂且耗时,同时严重依赖设计人员的经验,难以保证曲面质量。

李俊杰等<sup>[8-9]</sup>对修边镶块的设计流程和方法进行了详细的描述,并提出了一种汽车覆盖件修边镶块自动设计系统,该系统中采用渐进迭代逼近 (Progressive Iterative Approximation, PIA) 算法进行曲线偏置,将曲线的离散点按照偏置规则偏置后,对偏置点列中能表征曲线形状的特征点列应用 PIA 算法,迭代调整直至特征点列拟合的曲线收敛,该

方法的偏置方式定义灵活,算法效率高,但是通用性有所欠缺。此外,文献 [8] 和文献 [9] 中空开面是由通用 CAD 平台生成的,曲面生成的稳定性、质量以及效率均会受到通用 CAD 平台的限制。胡英柯<sup>[10]</sup>对拉延模具智能辅助设计系统进行了研究,在对拉延模的分模线进行处理时,采用了基于特征点的曲线偏置方法,利用曲线的切偏向量对曲线进行分段,针对不同分段使用不同的特征点处理方法进行偏置,保证了偏置曲线的精度和光顺性,但该方法不能覆盖复杂场景,对于局部曲率变化较大等复杂曲线的偏置效果较差,文献 [10] 也未涉及派生曲面的构建方法。梁中凯<sup>[6]</sup>和李贵等<sup>[11-12]</sup>针对修边刀块自动化设计中的难题,提出了基于全参数和草图驱动的修边刀块自动化设计方法,文献 [6]、文献 [11] 和文献 [12] 中采用了基于特征拐点的三维曲线偏置方法,该方法依据计算偏置点到原曲线的最小距离和偏置后点顺序的变化以过滤坏点,同时使用预偏置的方法处理偏置尖角,并将剩余的有效样本点划分为不同的组,在每个组内基于曲率和挠度提取特征拐点,以特征拐点作为极点来构建 B 样条偏置曲线。然而,该方法在离散距离较小或者曲线光顺性较差时可能会存在效率问题。梁中凯<sup>[6]</sup>还提出了一种三维曲面的分块构造方法,该方法在曲线平缓区域使用网格曲面,在曲率急剧变化区域使用填充曲面,保证了三维曲面的光顺性。

本文针对覆盖件修边模具中空开面的构建问题,提出了一种基于 3D 偏置映射的空开面稳定生成方法。该方法以二维曲线偏置中的滚圆算法为理论基础,实现了新的水平偏置和垂直偏置算法,保证了复杂空间曲线偏置的质量和稳定性,同时还提供了原始曲线和偏置曲线之间的几何映射关系,用于稳定地构建高质量的空开面。

## 1 算法模型

### 1.1 使用场景

本文提出的修边模具空开面生成算法可以实现水平空开面 (图 2b) 和竖直空开面 (图 2c) 的构建,也可以实现任意倾角的空开面的构建 (图 2d)。

### 1.2 修边线派生空开面的参数

图 3 为本文的算法参数模型。其输入参数包括:原始修边曲线和偏置参数。其中,对于水平偏置,偏置参数包括参考方向、水平偏置方位和水平偏置距离。通过参考方向和水平偏置方位指定原始曲线

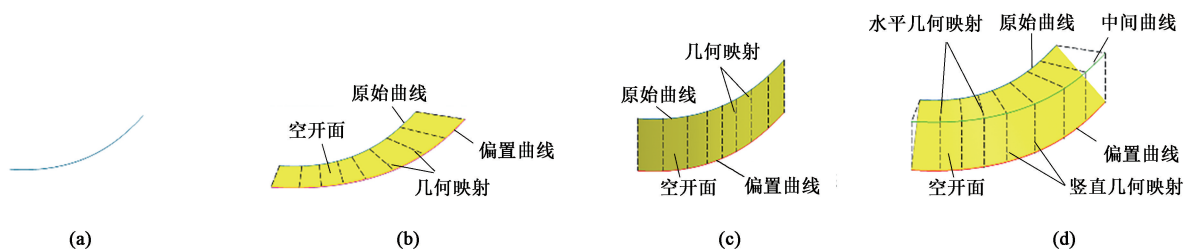


图 2 空开面场景

(a) 原始曲线 (b) 水平空开面 (c) 竖直空开面 (d) 任意倾角空开面

Fig. 2 Scenes of gap surface

(a) Origin curve (b) Horizontal gap surface (c) Vertical gap surface (d) Gap surface with arbitrary inclination

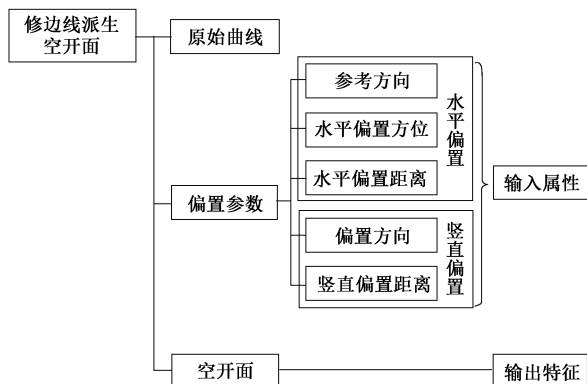


图 3 修边线派生空开面的参数模型

Fig. 3 Parametric model for gap surface derived from trimming line

的偏置方向, 即沿参考方向的指向观察, 以曲线的方向为参考, 将水平偏置方向分为曲线左侧、曲线右侧两个方向。对于竖直偏置, 偏置参数包括偏置方向和竖直偏置距离。算法的输出参数即为原始修边曲线派生出的空开面。

### 1.3 算法流程

本文算法步骤如下:

Step1: 基于水平偏置算法对输入的原始曲线  $C_0$  进行水平偏置, 得到中间曲线  $C_1$ 。

Step1.1: 以参考方向为局部坐标系的  $Z$  向, 构建局部坐标系, 将原始曲线转化至局部坐标系下;

Step1.2: 将原始曲线投影至局部坐标系的  $XOY$  平面内, 对投影后的原始曲线应用滚圆算法构建 2D 偏置;

Step1.3: 根据原始曲线的高度信息, 将 2D 偏置中得到的偏置曲线映射至 3D 空间, 得到原始曲线的 3D 偏置曲线, 并转化至全局坐标系下。

Step2: 基于竖直偏置算法对所述的中间曲线  $C_1$  进行竖直偏置, 得到偏置曲线  $C_2$ 。

Step2.1: 以偏置方向为局部坐标系的  $Z$  向,

构建局部坐标系, 将原始曲线转化至局部坐标系下;

Step2.2: 对原始曲线进行展开变换, 将原始曲线展开至基准平面;

Step2.3: 对基准平面内的 2D 曲线应用滚圆算法构建 2D 偏置;

Step2.4: 对基准平面内的偏置曲线进行曲线折叠变换, 得到原始曲线的 3D 偏置曲线, 并转化至全局坐标系下。

Step3: 基于所述的原始曲线  $C_0$  和偏置曲线  $C_2$  的对应关系, 构造截面线集合。

Step4: 基于所述的原始曲线  $C_0$ 、偏置曲线  $C_2$  和所述截面线集合, 通过放样方法完成空开面的构造。

## 2 关键技术

二维曲线的偏置可以视为圆在原始曲线上滚动的过程, 滚圆圆心的运动轨迹即为原始曲线的偏置曲线<sup>[13]</sup>, 如图 4 所示。在滚动的过程中, 滚圆的状态可以分为平移、碰撞、旋转, 分别对应曲线上平坦、内凹、外凸 3 种区域。

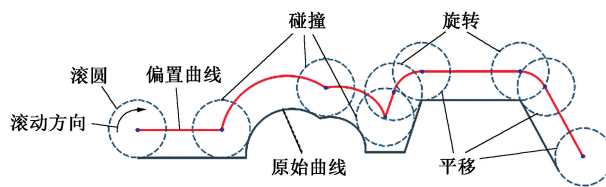


图 4 二维曲线偏置的滚圆算法原理图

Fig. 4 Principle diagram of rolling circle algorithm for 2D curve offset

利用滚圆算法进行二维曲线偏置, 可提供原始曲线和偏置曲线之间的几何映射关系。图 5 展示了一个典型的滚圆滚动过程。滚圆从线段  $L_0$  上的点

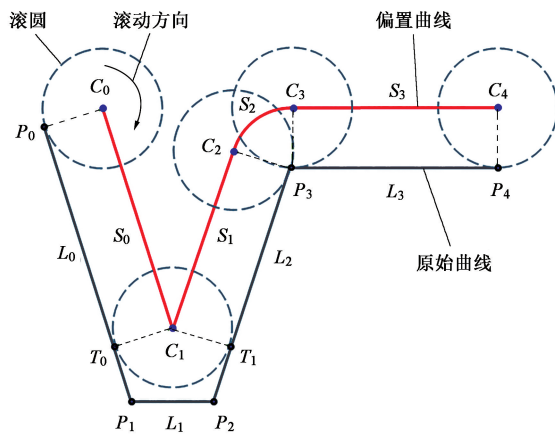


图 5 典型滚圆过程中的几何偏置映射关系

Fig. 5 Geometric offset mapping relationship in typical rolling process

$P_0$  开始滚动, 滚动到点  $T_0$  时和线段  $L_2$  发生碰撞, 这时滚圆跨越了内凹区, 直接达到了线段  $L_2$ 。然后滚圆从碰撞接触点  $T_1$  沿线段  $L_2$  滚动到点  $P_3$ , 并围绕点  $P_3$  进行旋转。最后, 再沿线段  $L_3$  滚动到达终点  $P_4$ 。从上述滚动过程中可以看出:

(1) 在平坦区域内, 原始曲线上的线段 (如线段  $L_0$ ) 与偏置曲线中平行的线段 (如线段  $S_0$ ) 对应;

(2) 在发生碰撞的内凹区域内, 原始曲线上的线段 (如线段  $T_0P_1$ 、线段  $L_1$  和线段  $P_2T_1$ ) 则收缩为偏置点 (如点  $C_1$ );

(3) 在发生旋转的外凸区域内, 原始曲线上的外凸点 (如点  $P_3$ ) 则扩展为偏置曲线上的附加圆弧段 (如圆弧  $S_2$ )。

因此, 偏置曲线的线段与原始曲线的线段表现出一一对应的关系。将这种对应关系作为构建放样曲面的映射关系, 能很大程度上提升生成的空开面的质量。

## 2.1 3D 曲线的水平偏置

### 2.1.1 水平偏置过程

对于平面曲线  $C(t)$ , 其水平偏置曲线  $C_0(t)$  可以定义为:

$$C_0(t) = C(t) \pm d \cdot \mathbf{W}'(t) \quad (1)$$

式中:  $d$  为水平偏置距离;  $\mathbf{W}'(t)$  为参数  $t$  处的偏置向量, 其值等于平面曲线在参数  $t$  处的单位法向量。

本文实现 3D 曲线水平偏置算法的主要思路如图 6 所示: (1) 在局部坐标系下将 3D 原始曲线投影至  $XOY$  平面; (2) 在  $XOY$  平面内对 2D 投影曲线执行二维滚圆算法, 构造二维偏置; (3) 根据 3D 原始曲线的高度信息, 将 2D 偏置曲线变换至 3D 空

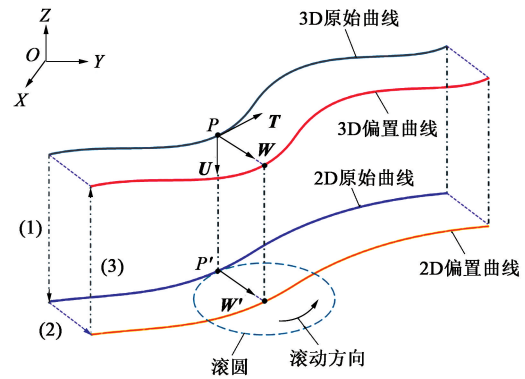


图 6 3D 曲线水平偏置的过程

Fig. 6 Horizontal offset process for 3D curve

间, 点  $P$  在 2D 原始曲线上的投影为点  $P'$ , 其 2D 偏置向量为  $\mathbf{W}'$ 。

图 6 中 3D 原始曲线上的点  $P$  的偏置向量  $\mathbf{W}$  定义为:

$$\mathbf{W} = \mathbf{U} \times \mathbf{T} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{U} = -\mathbf{Z}$ ;  $\mathbf{T}$  为 3D 原始曲线在点  $P$  处的单位切向量。

易知  $\mathbf{W} // \mathbf{W}'$ , 基于此结论本文提出了水平高度继承规则, 3D 偏置点的  $Z$  坐标直接继承对应接触点的  $Z$  坐标。

### 2.1.2 非平坦区域光滑处理

水平高度继承规则在平坦区域能够取得不错的效果, 因为滚圆圆心正好对应于原始曲线上的一个点。但是对于非平坦区域, 滚圆圆心并非严格与原始曲线上的接触点一一对应, 那么这种情况下使用高度继承原则就可能会对偏置曲线的质量带来严重损害。

当碰撞发生时, 滚圆的圆心对应着原始曲线上的两个碰撞点, 这两个碰撞点的  $Z$  坐标可能不同, 如图 7 所示。那么这种情况下 3D 偏置曲线在内凹区域就可能会发生抖动, 影响曲线质量。

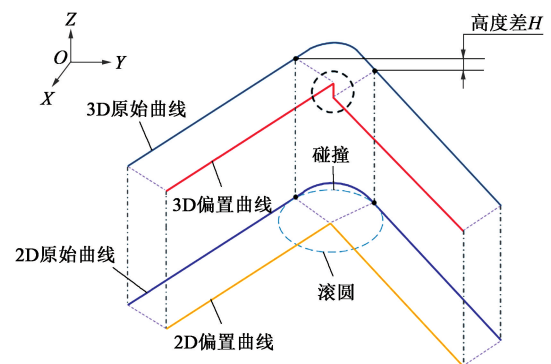


图 7 内凹区域的高度差问题

Fig. 7 Problem of height difference in concave region



为解决上述问题,本文提出了平均高度继承规则。对于发生碰撞的区域,偏置点的  $Z$  坐标调整为两个碰撞点  $Z$  坐标的平均值,即偏置点的  $Z$  坐标  $Z_0$  可表示为:

$$Z_0 = \begin{cases} Z_T, & \text{非内凹区域} \\ (Z_{T_1} + Z_{T_2})/2, & \text{内凹区域} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $Z_T$  为非内凹区域的接触点的  $Z$  坐标;  $Z_{T_1}$  和  $Z_{T_2}$  分别为内凹区域的两个碰撞点的  $Z$  坐标。

为了进一步保证偏置曲线在内凹区域的光顺性,本文采用了线性插值的方法得到偏置点。其主要思想如图 8 所示:按一定的比例放大滚圆的半径,然后对滚圆圆心和原始曲线上的接触点进行线性插值得到偏置点。

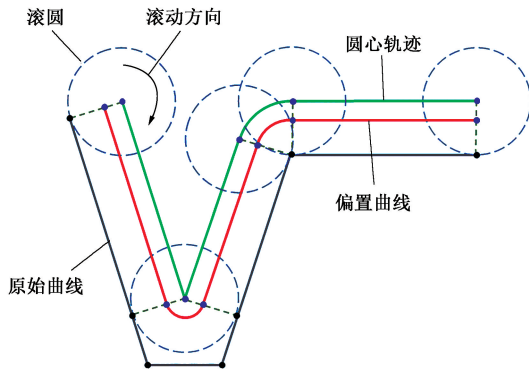


图 8 偏置点的线性插值

Fig. 8 Linear interpolation of offset points

经上述处理后,内凹区域中原本对应两个碰撞点的圆心优化为两个偏置点。偏置点的坐标  $P_0$  可表示为:

$$P_0 = P_T + \frac{1}{\alpha} \cdot (P_C - P_T) \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为滚圆半径放大的倍数;  $P_T$  为接触点的坐标;  $P_C$  为滚圆圆心的坐标,内凹区域的滚圆圆心的  $Z$  坐标按照式 (3) 计算。

当滚动过程中遇到外凸区域时,滚圆会发生旋转,形成一个附加圆弧段,因此原始曲线上的接触点会对应多个滚圆圆心。根据高度继承规则,这段圆弧的水平高度均为接触点的  $Z$  坐标,那么就可能会导致偏置曲线产生波浪,如图 9 所示。

为了解决这个问题,本文提出了外凸区域圆弧的轴向旋转光顺规则。其主要思想为:以接触点和两偏置点的中点为轴,将外凸区域的附加圆弧绕该轴旋转一定的角度,以消除圆弧平台带来的波浪。假设此类外凸区域的局部为三维圆柱螺旋线特征,其参数方程为:

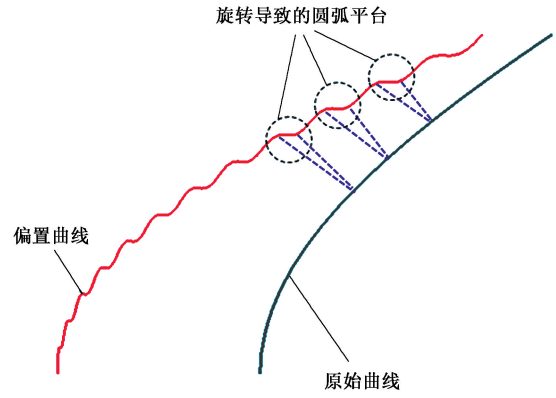


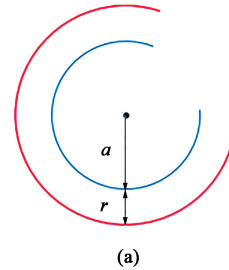
图 9 外凸区域的波浪问题

Fig. 9 Wave problem in convex region

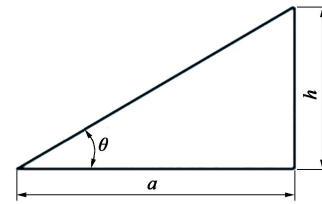
$$\begin{cases} x = a \cdot \cos(\tau) \\ y = a \cdot \sin(\tau) \\ z = h \cdot \tau \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的坐标值;  $a$  为圆柱螺旋线的半径;  $h$  为螺距;  $\tau$  为旋转角度。

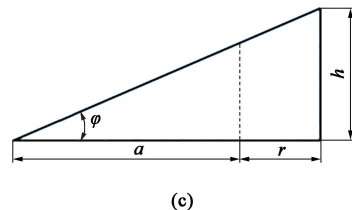
在使用滚圆算法进行偏置后,原始曲线和偏置曲线在  $XOY$  平面内呈同心圆关系,如图 10a 所示。给定接触点的近似曲率半径为  $a$ ,近似斜率为  $\tan\theta$ ,则有:



(a)



(b)



(c)

图 10 附加圆弧轴向旋转规则

(a) 同心圆关系 (b) 偏置前 (c) 偏置后

Fig. 10 Axial rotation rule of additional arc

(a) Concentric circle relationship (b) Before offset (c) After offset

$$\tan\theta = \frac{h}{a} \quad (6)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{a \cdot \tan\theta}{a + r}\right) \quad (8)$$

曲线偏置时的偏置距离为  $r$ ，为了保持偏置曲线局部也同样为圆柱螺旋线特征，且螺距  $h$  相同，则需满足：

$$\tan\varphi = \frac{h}{a + r} \quad (7)$$

式中： $\tan\varphi$  为偏置曲线上偏置点处的近似斜率，即  $\varphi$  为附加圆弧需要绕轴旋转的角度。

联立式 (6) 和式 (7)，可得到  $\varphi$  的值为：

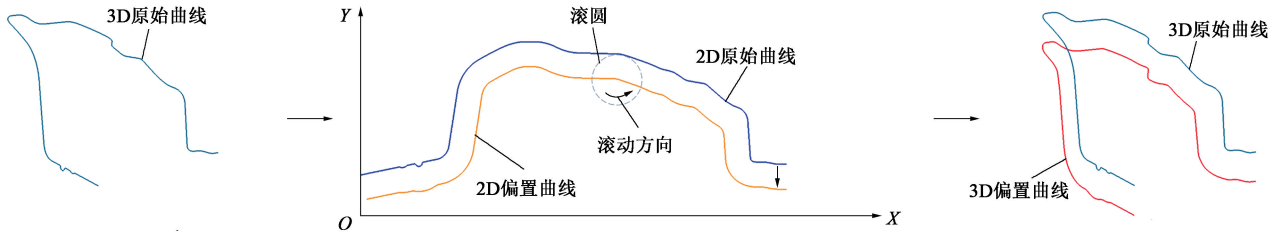


图 11 3D 曲线竖直偏置的过程

Fig. 11 Vertical offset process for 3D curve

### 2.2.2 曲线的展开变换及折叠变换

本文定义了曲线的展开变换，将 3D 原始曲线上的点转换至 2D 基准平面。首先，要将局部坐标系下的 3D 原始曲线投影至  $XOY$  平面上。如图 12 所示，对于 3D 原始曲线上的点  $P$ ，在投影曲线上的对应点为点  $P_{proj}$ ，点  $P$  在基准平面内的横坐标  $x'$  的值为点  $P_{proj}$  到投影曲线起点的弧长，纵坐标  $y'$  的值为点  $P$  到点  $P_{proj}$  的高度。

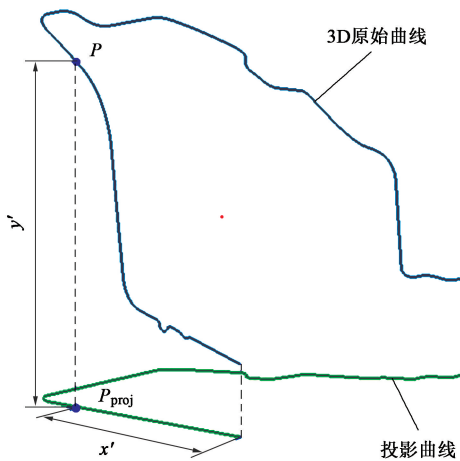


图 12 曲线展开变换计算方法

Fig. 12 Calculation method for curve expansion transformation

相应地，曲线的折叠变换是曲线展开变换的逆变换。对于 2D 偏置曲线上的点  $P'_0$ ，其坐标为  $(x'_0, y'_0)$ ，那么可以从投影曲线的起点开始移动弧长为

### 2.2 3D 曲线的竖直偏置

#### 2.2.1 竖直偏置过程

本文实现 3D 曲线竖直偏置算法的主要思路如图 11 所示：(1) 给定一个基准平面，根据 3D 原始曲线的几何关系将其展开至该基准平面内；(2) 在基准平面内对 2D 展开曲线执行二维滚圆算法，构造二维偏置；(3) 对 2D 偏置曲线执行展开变换的逆变换，折叠至 3D 空间。

$x'_0$  的距离，得到投影曲线上的点  $P'_{proj}$ ，然后将投影点  $P'_{proj}$  沿投影方向移动高度  $y'_0$ ，即可得到 3D 偏置曲线上的点。

### 2.3 倾角偏置的映射计算

在实现任意倾角的曲线偏置时，会组合使用水平偏置算法和竖直偏置算法，其流程为：首先使用水平偏置算法，得到中间曲线；再对中间曲线使用竖直偏置算法，得到结果曲线，如图 2d 所示。但是由于进行了两次偏置，所以两次偏置的几何映射关系可能并非严格对应，如图 13 所示。

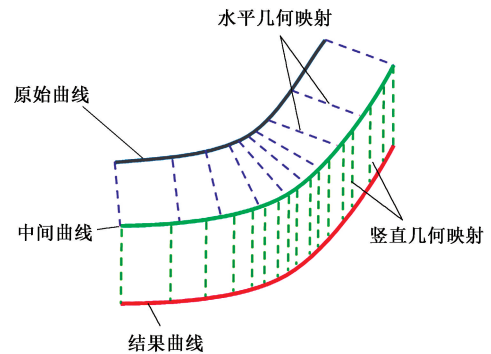


图 13 两次偏置的映射关系的不对应问题

Fig. 13 Non-correspondence problem of mapping relationship for two times of offset

上述问题的出现导致几何映射不能直接用于构建空开面，因此，需要进行特殊处理。本文的处理方式为：舍弃竖直偏置时得到的竖直几何偏置映射，

同时复用竖直偏置时的曲线展开变换,将水平几何偏置映射中位于中间曲线上的点展开至基准平面上,展开点理论上处于 2D 中间曲线上,然后可以得到其在 2D 结果曲线上的偏置点,再经折叠变换映射回三维空间即可。处理结果如图 14 所示。

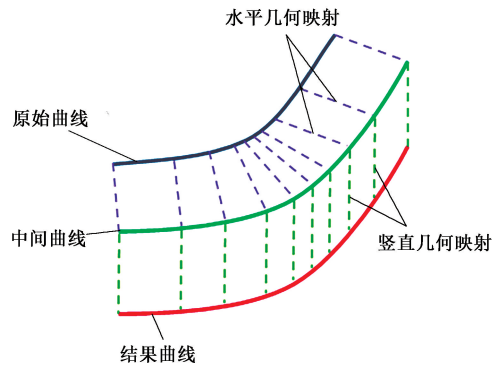


图 14 倾角偏置几何映射关系的特殊处理  
Fig. 14 Special treatment of geometric mapping relationship for inclination offset

3 应用实例

针对本文提出的覆盖件修边模具空开面生成算法,基于 NX 平台开发了修边线派生空开面模块,实现快速稳定地构建基于几何偏置映射的高质量空开面。

使用本模块对典型的汽车覆盖件修边模具中的修边线进行了测试,以图 15 中的汽车翼子板修边线中的 3 段复杂空间曲线为例,展示偏置倾角分为为 0°、45°和 90°时的效果,结果如表 1 所示。

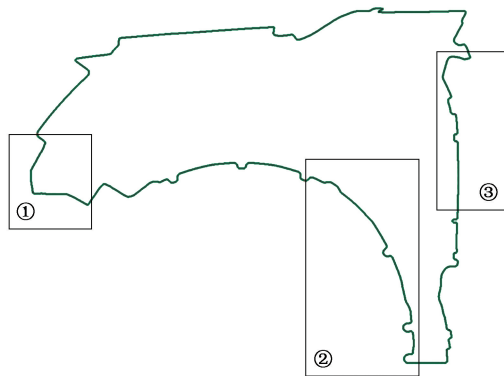


图 15 汽车翼子板修边线  
Fig. 15 Trimming lines of automotive fender

测试结果表明,本文提出的算法对于复杂空间曲线的偏置曲线均能稳定生成,且偏置曲线形状光顺,不存在尖点、回折、自相交等缺陷。使用偏置过程中的几何偏置映射关系构建放样曲面,曲面形

表 1 本文算法结果  
Table 1 Results of presented algorithm

曲线编号	偏置倾角/(°)	偏置曲线	几何映射	空开面
①	0			
	45			
	90			
②	0			
	45			
	90			
③	0			
	45			
	90			

态正常、外表光顺,不存在扭曲、褶皱、重叠等质量问题。

图 16、图 17 展示了使用本文算法和使用 NX 平台进行空开面设计的效果对比。使用 NX 平台对曲线②进行竖直偏置时,出现多处尖点、回折缺陷,水平偏置时因为线串对象不共面而导致偏置失败,而本文算法则无上述问题,曲线质量更高。此外,使用原始曲线和本文算法偏置得到的曲线进行构面时, NX 平台的扫掠命令构建的曲面存在扭曲、褶皱等不光顺问题,而本文基于 3D 偏置映射构建的放样曲面外表光顺,有效地避免了曲面质量缺陷。

为了进一步验证本文提出的空开面生成算法在修边模具设计过程中的高可用性,将上述修边线派生空开面模块集成于修边模具智能化设计系统中,并对多个汽车覆盖件修边模具进行了修边刃口空开设计。图 18 展示了翼子板修边模具凹模中一个修边刀块的设计效果,图 18 中的刃口面、空开面均由本文算法生成。直接使用 NX 平台内置命令生成该修

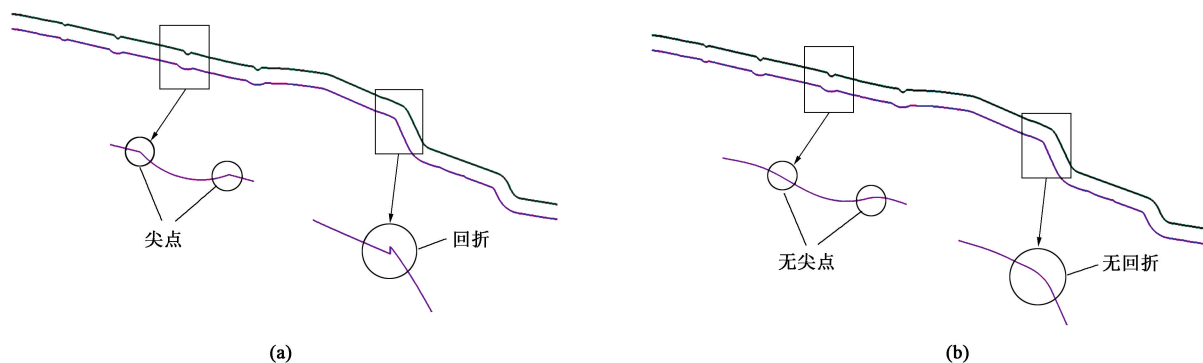


图 16 曲线②偏置效果对比

(a) NX 平台 (b) 本文算法

Fig. 16 Comparison of offset effect for curve ②

(a) NX platform (b) Presented algorithm

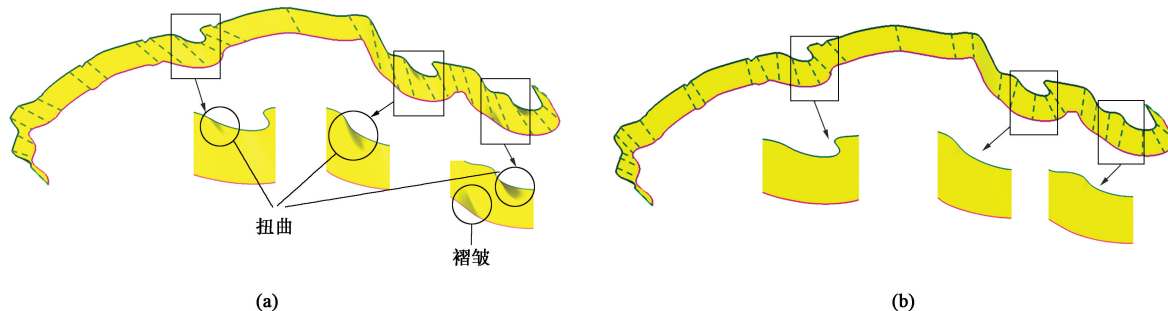


图 17 曲线②构建空开面效果对比

(a) NX 平台 (b) 本文算法

Fig. 17 Comparison of gap surface construction effect for curve ②

(a) NX platform (b) Presented algorithm

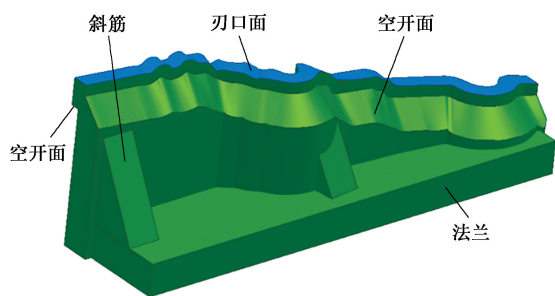


图 18 翼子板修边模具凹模修边刀块设计结果

Fig. 18 Design result of die trimming inserts in trimming die for fender

边刀块的刃口面、空开面均会失败，需要设计人员手工处理，此过程耗时且易出错。对比使用通用 CAD 平台进行修边模具设计，平均能节省 74% 左右的设计时间。上述结果表明，将该方法集成到系统中，依旧能够快速稳定地构建基于几何偏移映射的高质量空开面，将这些空开面作为边界曲面，能稳定生成模板实体，显著提升了修边模具的设计质量和效率。

## 4 结论

(1) 本文提出了新的曲线水平偏置和竖直偏置算法，将二维偏置中的滚圆算法扩展至三维空间，适用于复杂的空间曲线的偏置，解决了通用 CAD 平台偏置工具不稳定的问题。

(2) 该方法将偏置过程中得到的几何偏置映射关系作为构建空开面时的截面线，显著提升了空开面的质量。

(3) 将该方法用于修边刀口空开设计模块中模板实体边界曲面的生成，并对实际的修边模具进行了大量测试。测试结果表明，本文提出的复杂空间曲线偏置算法的稳定性较好，根据几何偏置映射关系生成的放样曲面形态质量佳，边界曲面能稳定高效生成模板实体，可以显著提升修边模具的设计质量和效率。

### 参考文献：

[1] 崔令江. 汽车覆盖件冲压成型技术 [M]. 北京：机械工业出



- 版社, 2003.
- Cui L J. Stamping and Forming Technology of Automobile Covering Parts [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [2] 张紫阳, 章志兵, 柳玉起. 一种基于 CATIA 平台的修边镶件刃口面拟合方法 [J]. 模具工业, 2017, 43 (8): 1-4, 9.
- Zhang Z Y, Zhang Z B, Liu Y Q. A method of cutting surface fitting for trimming insert based on CATIA platform [J]. Die & Mould Industry, 2017, 43 (8): 1-4, 9.
- [3] 周泽明. 基于 CATIA 平台的智能符形空开设计系统开发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- Zhou Z M. Intelligentized Shape-conforming and Opening Design System Based on CATIA [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [4] 张虎, 杨海龙, 陈永飞, 等. 基于 NX 的覆盖件修边模工作部件模块化设计 [J]. 模具制造, 2014, 14 (3): 5-8.
- Zhang H, Yang H L, Chen Y F, et al. Modular design of working parts of trimming die for automobile panel based on NX [J]. Die & Mould Manufacture, 2014, 14 (3): 5-8.
- [5] 黄辉. 基于 NX 平台的覆盖件修边冲孔镶块自动化设计关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- Huang H. Research on Automatic Design of Trimming and Punching Insert Based on NX Platform [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [6] 梁中凯. 参数和草图驱动的汽车覆盖件修边刀块自动化设计研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.
- Liang Z K. Research on Automated Design of Trimming Block for Automotive Panels Driven by Parameters and Sketch [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
- [7] Piegl L, Tiller W. The NURBS Book [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 1996.
- [8] Li J J, Kong C P, Zhou X H. Automatic design for trimming die insert of automotive panel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106 (9-10), 4451-4465.
- [9] 李俊杰. 曲线曲面偏置理论研究及其在模具智能设计中的应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- Li J J. Research on the Offset Theory of Curve/Surface and Its Application in the Intelligent Design of Die and Mould [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [10] 胡英柯. 基于特征工程的预批量拉延模具智能辅助设计系统研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
- Hu Y K. Research on Intelligent Aided Design System of Soft Tooling Drawing Die for Body Panels [D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [11] Li G, Liang Z K. Onesided offsetting and smoothing algorithm for complex 3D trimming curve of trimming insert steel for automotive panels [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020, 33 (12): 1356-1370.
- [12] Li G, Liang Z K. Intelligent design method and system of trimming block for stamping dies of complex automotive panels [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109 (9-12): 2855-2879.
- [13] 张阿飞, 柳玉起, 章志兵, 等. 汽车覆盖件模面工程中复杂圆角建模算法 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (9): 41-48.
- Zhang A F, Liu Y Q, Zhang Z B, et al. Modeling algorithm on complex fillets in die surface engineering of automobile covering panels [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (9): 41-48.

## 关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程(锻压)分会成立于1963年,是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体。经本会理事会研究决定:凡承认本会章程并符合条件者,可申请为本会会员。

**会员的权利与义务:** 1. 颁发个人/单位会员证书及铜牌,铜牌由秘书处统一制作并颁发,可申请定制; 2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠; 3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动; 4. 优先获得本会的有关学术资料,免费获赠会刊《锻压技术》杂志(个人会员6期/年,单位会员12期/年); 5. 在学会网站首页进行企业宣传、logo链接; 6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权(学生会员除外); 7. 接受本会委托,进行论证、评议、咨询等工作; 8. 享有入会、退会的自由。

**申请手续:** 1. 通过学会官网([www.cstp-cmes.org.cn](http://www.cstp-cmes.org.cn))点击立即注册在线提交入会申请; 2. 经审批通过后,将邮件通知申请单位或个人进行会费缴纳; 3. 会员缴纳会费后正式登记,自行登录个人中心首页-我的证书预览或下载会员证书。

**地 址:** 北京市海淀区学清路18号711室塑性工程分会

**电 话:** 010-62920654

**网 址:** [www.cstp-cmes.org.cn](http://www.cstp-cmes.org.cn)

**联系人:** 李世龙

**邮 箱:** [duanya@cmes.org](mailto:duanya@cmes.org)

中国机械工程学会塑性工程分会