

板料成形

汽车覆盖件模面工程中复杂圆角建模算法

张阿飞, 柳玉起, 章志兵, 王 振

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 现有圆角建模算法的建模场景单一, 且在复杂区域建模时稳定性低、建模曲面质量差, 影响模面的设计效率和整体质量。因此, 有必要研究一种高效、稳定的圆角建模算法, 以提高设计质量、缩短研发周期。提出一种基于截面线倒圆的复杂圆角建模算法, 实现了自由圆角面的稳定创建和灵活编辑。此算法将复杂的面倒圆转化为截面线倒圆, 显著降低了算法的复杂度。通过截面线干涉检查算法, 对截面线自相交区域进行查找及重构, 保证了所构建圆角的稳定性及质量。基于 NX 平台的自定义对象技术, 开发了圆角建模功能, 实现了圆角曲面的高效创建和稳定更新。实际汽车覆盖件模型测试结果证明, 所提算法稳定可靠、编辑效率高、适应场景丰富, 可有效提高设计人员的效率, 缩短产品研发周期。

关键词: 汽车覆盖件; 圆角建模; 截面线倒圆; 干涉检查; 自相交处理

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.09.006

中图分类号: TG386.3; TP319 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2023) 09-0041-08

Modeling algorithm on complex fillets in die surface engineering of automobile covering panels

Zhang Afei, Liu Yuqi, Zhang Zhibing, Wang Zhen

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The existing fillet modeling algorithms are suitable for a single scene, and when modeling in complex areas, there are problems of low stability and poor modeling surface quality, which affects the design efficiency and overall quality of die surface. So it is necessary to study an efficient and stable fillet modeling algorithm to improve the design quality and shorten the development cycle. Therefore, a complex fillet modeling algorithm based on section curve rounding was proposed to achieve the stable creation and flexible editing of free fillet surface, and the algorithm converted the complex surface rounding into the section curve rounding, which significantly reduced the complexity of the algorithm. Then, through the section curve interference inspection algorithm, the self-intersection areas of section curve were searched and reconstructed to ensure the stability and quality of the constructed fillet. Furthermore, based on the custom object technology of NX platform, the fillet modeling function was developed, which realized the high efficient creation and stable updating of the fillet surface. The results of the actual automobile covering panel model test prove that the proposed algorithm is stable and reliable, with high editing efficiency and rich adaptation scenarios, which effectively improves the efficiency of designers and shortens the product development cycle.

Key words: automobile covering panel; fillet modeling; section curve rounding; interference inspection; self-intersection treatment

汽车覆盖件多为空间自由曲面, 形状复杂且尺寸结构大, 对尺寸精度和表面粗糙度要求高^[1]。在汽车覆盖件产品表面分布有大量圆角, 在工艺设计过程中, 出于成形性的考虑, 可能需要对其尺寸进

行编辑调整, 后期再整形恢复^[2-3]。除产品面上的圆角编辑外, 在工艺设计的模面设计过程中, 非产品面上也具有大量的圆角曲面创建和编辑的需求。

圆角面会显著影响冲压过程中板料的流动, 不合理的圆角设计会使得冲压成形过程中的产品出现起皱、开裂等情况^[4]。在模面设计完成后, 需要反复利用 CAE 软件进行冲压成形模拟, 并根据模拟结果对圆角的大小进行多次编辑调整。据统计, 在整个模具造型期间, 1/4~1/2 的时间会花费在圆角建模上^[5]。因此, 汽车覆盖件模面设计效率的提升, 对圆角建模的效率、质量以及稳定性提出了很高的要求。

收稿日期: 2023-03-16; 修订日期: 2023-06-27

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

作者简介: 张阿飞 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: m202070965@hust.edu.cn

通信作者: 章志兵 (1978-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhangzb@hust.edu.cn

圆角建模最初来源于曲面过渡技术,然而传统的曲面过渡算法如能量法、偏微分方程法、B 样条曲线法等^[6-7],所创建的曲面均为不规则曲面,难以准确编辑。而圆角过渡曲面由于其简单的表示形式、更灵活的编辑调整方式,在 CAD 领域中成为主流。对于圆角曲面的建模,目前国内外研究主要采用滚球法。滚球法圆角建模的思想为:模拟球在两个曲面上滚动,计算球心轨迹曲线和与两个曲面接触点所构成的曲线,由这 3 条线构造圆角面。Choi B K 等^[8]利用偏置曲面,通过偏置曲面交线 (Offset Surface Intersection Curve, OSIC) 算法追踪滚球的球心轨迹及滚球与基曲面的接触点轨迹,进行圆角建模。Farouki R 等^[9]直接使用基曲面而不再需要偏置曲面的明确表示,通过引入弧长增量并采用一种预估校正方案,实现了曲面间近似定半径的圆角曲面创建。Chuang J H 等^[10]提出为滚球半径引入一个变化函数,然后转换为一个非线性系统在高维空间进行计算,实现变半径圆角曲面的创建。然而,滚球法主要存在两方面的问题:(1)滚球法计算过程复杂,且难以处理滚球过程中自相交的情况;(2)滚球法主要用于在曲面之间进行圆角创建,难以对已存在的自由圆角曲面进行编辑,例如圆角缩小。徐伟等^[11]实现了一种基于面面创建圆角的圆角自动减小算法,可以实现自由圆角曲面的重构,但主要用于直条形圆角面,难以适用于汽车覆盖件中占大多数的复杂圆角。

CAD 建模软件如 NX、CATIA 也均具有圆角建模功能,然而在实际使用过程中,其主要用于规则模型如模具结构的设计^[12],对于复杂曲面,圆角建模稳定性不高。这是因为复杂曲面之间往往存在缝隙、重叠等质量问题,并且建模时极易出现输入半径超过局部区域理论最大半径的情形;此外,其圆角编辑功能也是针对基本命令所创建的参数圆角面,缺少对自由曲面的编辑功能。除此之外,在更新时,由于场景的复杂性,无法保证更新的成功率。当出现上述问题时,往往需要设计人员利用建模软件的基本命令逐步修改,不仅严重依赖设计人员的经验,而且会耗费大量的时间和精力。

本文提出一种基于截面线倒圆的圆角建模算法,不仅可以实现初始圆角面的创建,还可以对已存在的自由圆角曲面进行扩大或者缩小。与传统滚球法不同,该方法通过截面线倒圆的方式进行圆角面的建模。同时,算法利用截面线干涉检查算法对干涉区域进行检测,显著地提高了算法的稳定性和曲面

质量。经实际模型测试,该算法具有稳定可靠、编辑效率高、适应场景丰富等优点,可有效缩短圆角建模的时间,从而缩短整个产品的设计周期。

1 建模算法的模型

1.1 使用场景

本文提出的圆角建模算法可以实现 3 个功能,分别为创建圆角 (图 1b)、扩大圆角 (图 1c) 以及缩小圆角 (图 1d)。

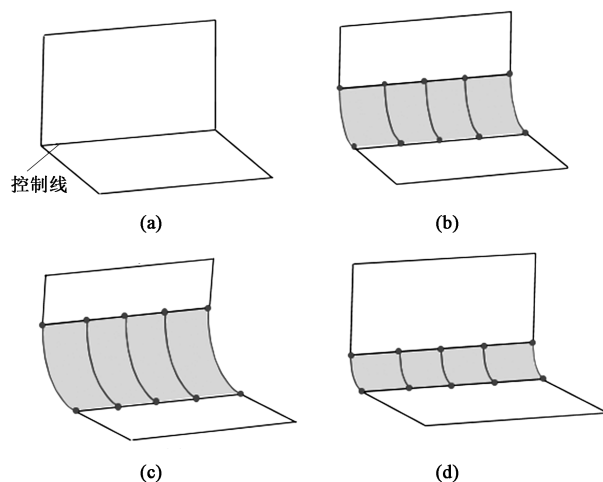


图 1 圆角建模场景

(a) 原始曲面 (b) 创建 (c) 扩大 (d) 缩小

Fig. 1 Scenes of fillet modeling

(a) Original surface (b) Creating (c) Expanding (d) Reducing

1.2 圆角建模参数

图 2 为本文算法的参数模型,其输入参数包括:圆角面、产品面、控制线、控制点信息。在曲面交线处创建圆角时,由于不存在圆角面,此时不需要第 1 项参数。控制线用于标记圆角的位置,对于编辑圆角,其为圆角面上的曲线,对于创建圆角,其一般为待创建圆角处的曲面交线。控制点记录圆角建模时在指定位置的目标半径。算法输出参数即为圆角面。

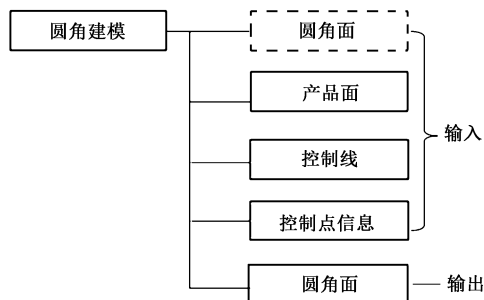


图 2 圆角建模参数模型

Fig. 2 Parametric model for fillet modeling

1.3 算法流程

本文提出的圆角建模算法，具体流程如下：

- (1) 根据输入的圆角面，查找周围相邻产品面；
- (2) 将圆角面及相邻产品面离散，得到离散网格；
- (3) 根据控制线及其相邻曲面的弯曲程度，自适应布置插值点；
- (4) 在插值点处构造平面，与离散网格求交，获得原始截面线；
- (5) 确定截面线上的圆弧位置，并根据半径构建新的截面线圆弧；
- (6) 调用截面线圆弧干涉检查算法，对截面线的相交情况进行检测并处理；
- (7) 通过截面线圆弧首尾端点，分别构造两条引导线；
- (8) 通过截面线圆弧，沿两条引导线创建蒙皮曲面，得到新圆角曲面。

2 关键技术点

2.1 截面线倒圆

本文采用离散网格与平面求交的方式获取原始截面线（图3）。该方法将离散网格曲面存储于八叉树，利用八叉树对空间对象的筛选作用，实现了交线的快速计算。在求得原始截面线后，主要通过以下4个步骤计算截面线上的新圆弧。

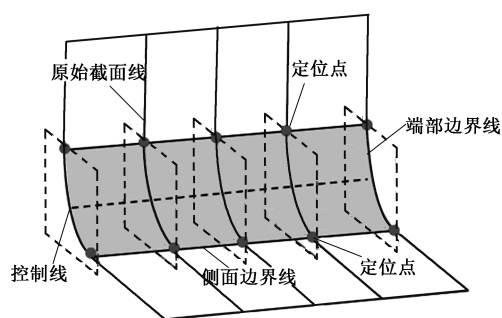


图3 截面线求取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of obtaining section curve

(1) 截面线处理

对于汽车覆盖件这类复杂曲面模型，曲面之间往往存在缝隙、重叠等问题，导致圆角建模稳定性不高，而本文算法基于截面线创建圆角面，将曲面的问题转换至二维截面线上进行处理，提高了建模的稳定性。

如果曲面存在上述问题，截面线也将出现间隙（图4a）和重合（图4b）。本文首先对相交得到的曲线段进行排序，然后对相邻的曲线段进行间隙和

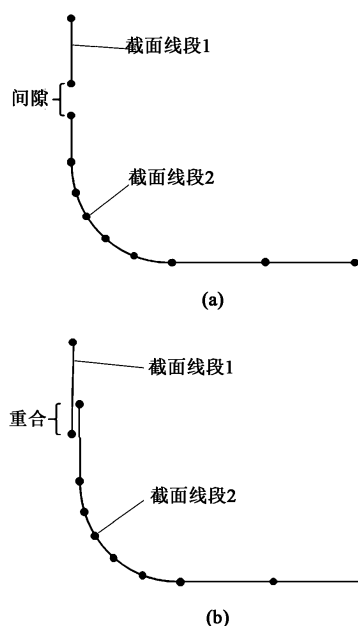


图4 曲线质量问题

(a) 间隙 (b) 重合

Fig. 4 Problems of curve quality

(a) Gap (b) Overlap

重合检测，最后对异常区域分别进行桥接和去重处理，保证得到连贯的正常截面线，如图5所示。

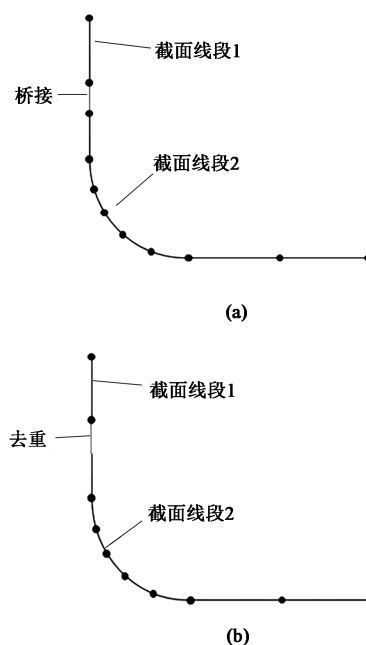


图5 间隙、重合处理

(a) 桥接 (b) 去重

Fig. 5 Treatments processing of gap and overlap

(a) Bridge (b) Removal of overlap

(2) 定位原始圆弧

本文算法基于截面线倒圆，通过对原始截面线

圆弧区域的编辑来构造新截面线圆弧,进而构造圆角曲面。所以,在对原始圆角进行编辑时,准确定位截面线上的原始圆弧区域至关重要。由于自由圆角曲面的尺寸往往存在波动,导致所求截面线上的圆弧不再为标准圆弧,传统的按照曲率定位圆弧区域的方式将产生定位误差较大的问题,而本文算法利用圆角面的边界特点,可以准确定位圆弧区域。

由于圆角面的边界具有明显的方向性,本文利用控制线的走向来区分圆角的侧面边界线和端部边界线,然后计算侧面边界线与平面的交点,作为定位点,上下两个定位点之间的点集即为原始圆弧区域(图6)。

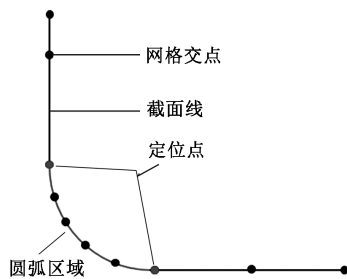


图6 圆弧区域定位

Fig. 6 Positioning of arc region

(3) 计算圆弧角点

如图7所示,在定位圆弧区域后,接下来即需要重构这一区域的形状,首先计算定位点在截面线上的切向,分别延伸后交于一点,将圆弧区域更改为尖角,圆弧区域的点集将被替换为图7中的角点。

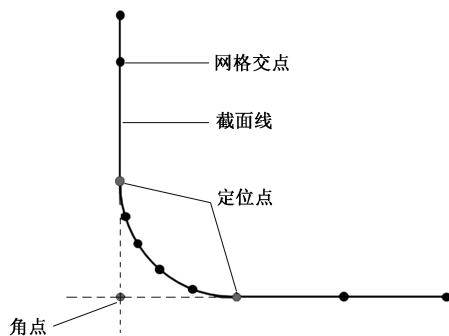
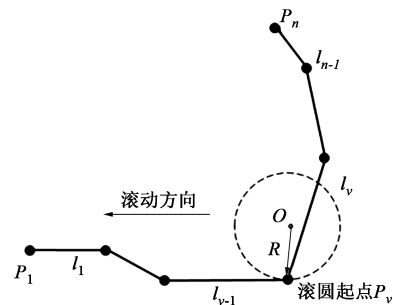


图7 计算圆弧角点

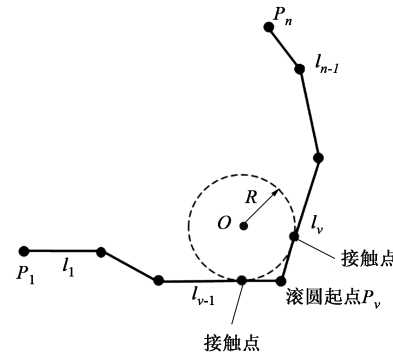
Fig. 7 Calculation of arc corners

(4) 确定新圆弧位置

对更改了圆弧区域的网格交点集,利用滚圆算法进行求解^[13]。图8为滚圆过程,其中, R 为滚圆半径, O 为滚圆圆心, P_i 为网格交集中的点, $i=1, 2, \dots, v, \dots, n$, n 为网格交集中的点数量, l_i 为 P_i 相连构成的线段, P_v 为上步计算的角点。由



(a)



(a)

图8 滚圆计算接触点的过程

(a) 起始位置 (b) 终止位置

Fig. 8 Process of calculating contact points in circles

(a) Starting position (b) Termination position

于已经确定滚圆的终止位置在角点,所以,此处对原始滚圆算法进行了改进,如图8b所示,直接从角点处开始滚动,从而快速实现接触点的计算。

根据新圆角半径与原始圆角半径的大小关系,最终重构后的截面线可表现为两种形式:缩小圆角情况下为直线-圆弧-直线形状(图9a);扩大圆角情况下为圆角形状(图9b)。初始圆角的创建相当于对原始半径为0的圆角进行扩大,可归入圆角扩大情况。

2.2 自相交处理

在构造截面线圆弧时,可能会出现如图10所示的截面线圆弧相交的情况,这往往是由于用户输入的半径超过了局部区域的曲率半径,即理论上的半径最大值。而在圆角建模过程中,此值是难以评估的。并且,在实际应用中,设计人员可能会因为工艺的需要而创建一个较大的圆角,当局部区域因为上述原因无法创建时,将导致整个区域圆角建模的失败。为了解决这种情况,本文开发了截面线圆弧干涉检查算法,对干涉的区域进行检测并处理,允许丧失干涉区域的圆角尺寸精度,从而保证圆角建模成功。

算法中对于截面线相交处理的具体流程如下:

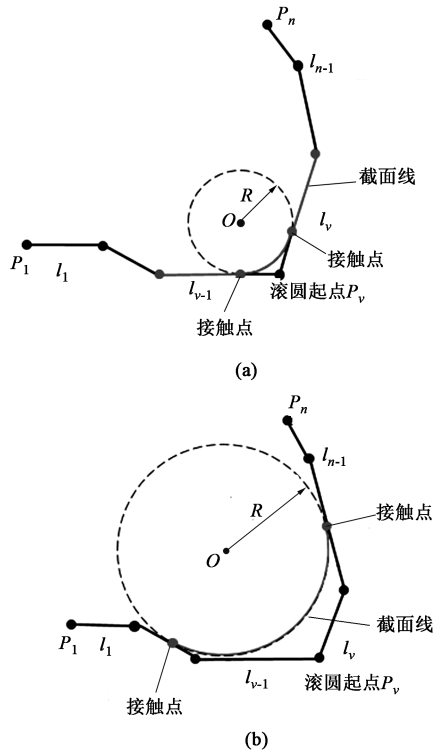


图9 截面线类型

(a) 直线-圆弧-直线 (b) 圆弧

Fig. 9 Types of section curves

(a) Line-arc-line (b) Arc

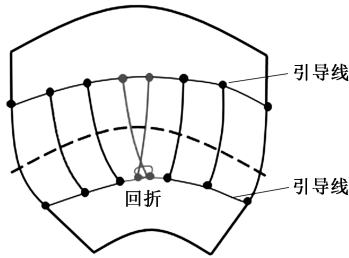


图10 截面线干涉

Fig. 10 Interference of section curve

(1) 识别相交区域, 确定起始、终止位置

首先通过干涉检查算法定位出截面线干涉的区域, 记录出现干涉的首尾截面线的位置。

(2) 构造桥接曲线

当检测出干涉区域后, 先对引导线也进行重构, 算法中的处理方案是删除干涉区域的引导线, 由两侧正常的引导线片段创建桥接曲线进行替换, 桥接结果如图11所示。

(3) 构造插值截面线

桥接引导线后, 接下来需要重构截面线。首先, 分别在起始、终止位置以及干涉区域内的截面线处, 以截面线所在平面为 XY 平面、平面法向为 Z 轴建立局部坐标系。

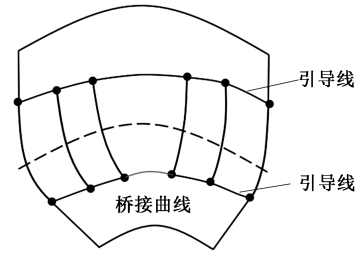


图11 截面线桥接处理

Fig. 11 Bridge treatment of section curve

之后, 根据起始、终止处的截面线圆弧计算插值截面线圆弧 (图12)。计算时, 会在起始、终止截面线圆弧上均匀取相同数量的点, 设 P_s 为起始截面线上一点的坐标, P_e 为终止截面线上对应点坐标, 则可以得到 P_s 、 P_e 在对应局部坐标系上点的坐标为:

$$P'_s = A_s^{-1} P_s \quad (1)$$

$$P'_e = A_e^{-1} P_e \quad (2)$$

式中: P'_s 、 P'_e 分别为 P_s 、 P_e 在对应局部坐标系上的点的坐标; A_s^{-1} 、 A_e^{-1} 分别为全局坐标系到 P_s 、 P_e 所在的局部坐标系的过渡矩阵的逆矩阵。

图12中, X_1 、 Y_1 、 Z_1 分别为干涉区域起始截面线处局部坐标轴, X_2 、 Y_2 、 Z_2 分别为干涉区域待插值重构截面线处局部坐标轴, X_3 、 Y_3 、 Z_3 分别为干涉区域终止截面线处局部坐标轴。

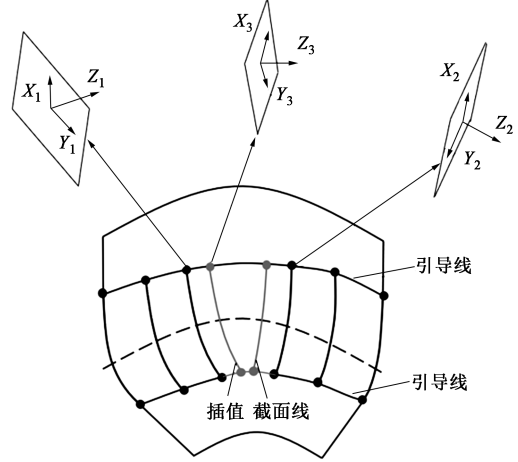


图12 插值截面线构造

Fig. 12 Construction of interpolation section curve

根据待插值点在插值区间的位置计算插值比例 α , 则插值处的点坐标 P'_m 为:

$$P'_m = \alpha P'_s + (1 - \alpha) P'_e \quad (3)$$

再由全局坐标系到插值处的局部坐标系的过渡矩阵 A_m 得到全局点坐标 P_m 。

$$P_m = A_m P'_m \quad (4)$$

在得到所有的插值点后,再约束到插值区域的端点,最后由点构造出插值截面线。

2.3 过渡

汽车覆盖件中的圆角大多是处于模型的内部,因此,在编辑局部的圆角曲面时,还需要保证新圆角曲面在端部与周围曲面的光滑过渡。

这就需要保证端部截面线圆弧的形状,而不能直接使用根据输入参数计算的截面线圆弧。算法中的具体方案为:端部截面线圆弧保持原状,内部截面线圆弧的半径则通过结合端部截面线圆弧半径以及及与端部的距离插值得出。

如图 13 所示,如果原始圆角面有相邻曲面,则圆角建模时需要进行过渡。设用户输入的新圆角半径为 R' 、原始半径为 R_0 、控制线长为 L 、过渡区域长度为 D ,对于内部的一条截面线,设其与起始端在控制线上的距离为 T 。则此处的截面线圆弧半径 R 通过式 (5) 求得:

$$R = \begin{cases} \frac{D-T}{D}R_0 + \frac{T}{D}R' & 0 < T \leq D \\ R' & D < T < L-D \\ \frac{T+D-L}{D}R_0 + \frac{L-T}{D}R' & L-D \leq T < L \end{cases} \quad (5)$$

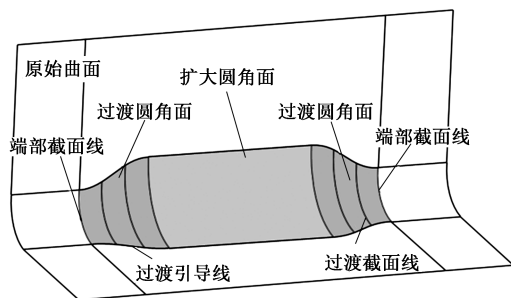


图 13 过渡圆角示意图

Fig. 13 Schematic diagram of transition of fillet

3 实例效果展示

针对提出的圆角建模算法,基于 NX 平台,开发了圆角建模系统,实现圆角面的快速创建和稳定的编辑更新。

本系统已对典型汽车覆盖件模型进行了测试,图 14 为此系统应用于侧围的效果图。测试结果表明,该系统在多种场景下均稳定可靠。

截面线干涉区域的处理效果见图 15,图 15a 中标识区域出现干涉,NX 倒圆角命令在对整个区域进行

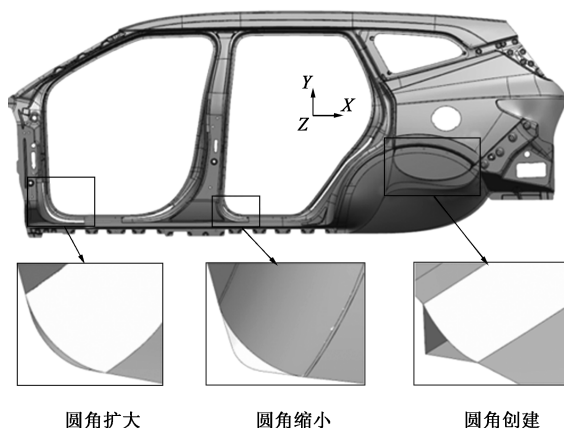


图 14 圆角建模效果及剖面图

Fig. 14 Fillet modeling effect and section view

倒圆角时将由于局部区域的干涉而失败,而本文提出的圆角建模算法通过干涉检查算法,调整了此处截面线圆弧,保证了圆角建模的稳定性(图 15b)。

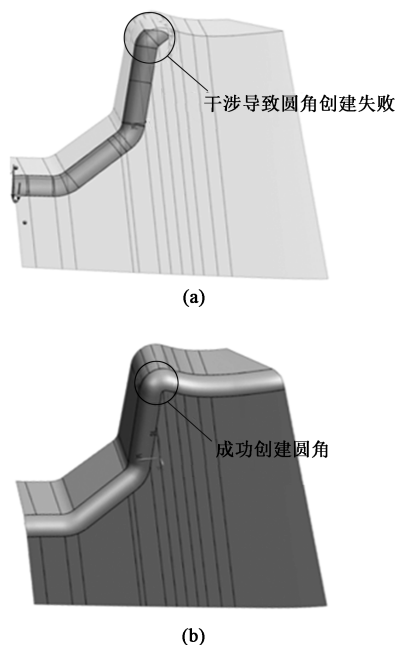


图 15 干涉区域处理效果

(a) NX 处理 (b) 本文圆角建模算法处理

Fig. 15 Treatment effects of interference region

(a) Treatment of NX (b) Treatment of fillet modeling algorithm in this paper

此外,经所合作企业东风汽车有限公司东风日产乘用车公司设计人员的使用及与 Autoform 对比得到如图 16 所示的反馈。结果表明,Autoform 在复杂区域建模时,圆角面存在凸包、圆角面扭曲、边界不光顺等质量问题。而在相同参数下,通过本文圆角建模算法建模无此问题,建模质量更高。

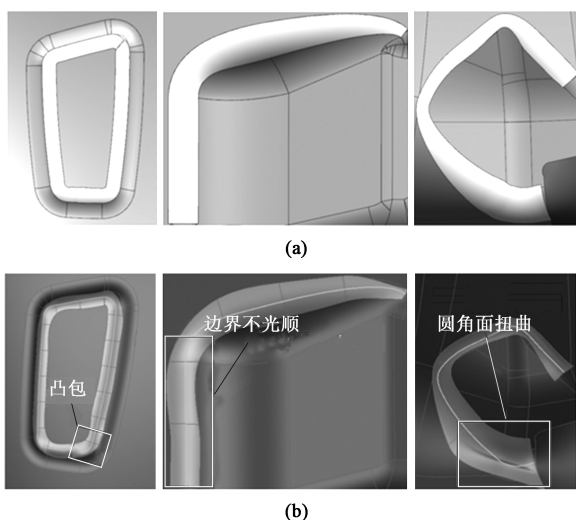


图 16 圆角建模效果对比

(a) 本文圆角建模算法 (b) Autoform

Fig. 16 Comparison of fillet modeling effect

(a) Fillet modeling algorithm in this paper (b) Autoform

进一步评估圆角建模的质量及精度,选取轮罩内板进行详细分析,图 17 为对轮罩内板产品面上复杂圆角区域进行圆角编辑。

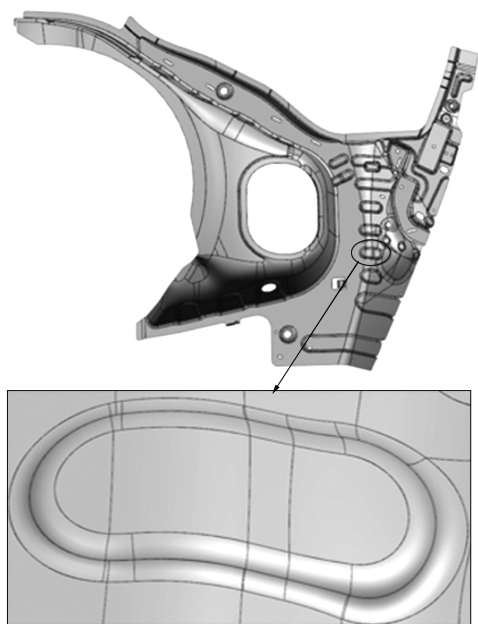


图 17 轮罩内板上的圆角

Fig. 17 Fillet on inner panel of wheel housing

编辑后的新圆角曲面如图 18 所示,结果显示,新圆角曲面不存在表面缺陷,整体形态和曲面质量较好。图 19 为对结果进行连续性分析的云图,可以看出,利用本文圆角建模算法进行圆角建模后,圆角面完全满足曲面间的 G0 连续,其最大误差为 0.0152 mm,小于所设定的 G0 误差阈值 0.100 mm;

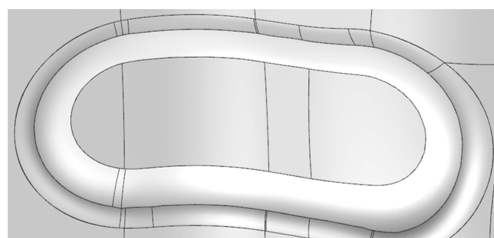


图 18 编辑后圆角曲面

Fig. 18 Edited fillet surface

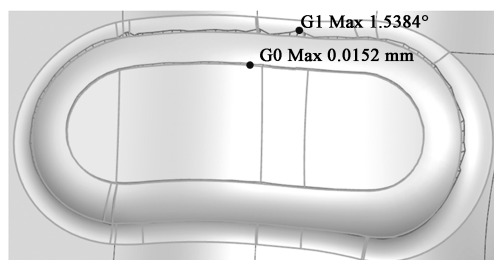


图 19 圆角面连续性分析云图

Fig. 19 Continuity analysis cloud chart of fillet surface

在所设 G1 误差阈值为 0.5° 的情况下,部分区域还无法达到 G1 连续,最大 G1 误差为 1.5384°。

作为一种圆角建模算法,圆角曲面的尺寸精度也需要进行保证,对图 18 中的圆角曲面的多个区域采点,进行圆角半径的尺寸精度分析。圆角编辑时所输入的半径参数为 10 mm,采样数据精度取 0.01 mm,对数据进行分析后发现,编辑后新圆角各处的尺寸与理论值偏差在 ± 0.03 mm 之内。此误差主要源于前步曲面离散操作,由于此处模型复杂,离散时存在一定误差,如果在简单区域进行圆角建模,经测量,各处尺寸基本与理论值无差别。

上述结果表明,本文所提算法可以有效地解决了汽车覆盖件中复杂区域的圆角建模,且稳定、可靠,曲面质量及精度也得到了保证。同时,本文算法用于汽车覆盖件模面的同步设计,同步设计完成后用于模拟仿真,目前的连续性可以满足模拟仿真的需要。

4 结论

(1) 本文提出了针对汽车覆盖件中复杂曲面的圆角建模算法。该算法采用截面线倒圆的方式构造圆角面,解决了传统 CAD 软件难以对自由圆角曲面进行编辑的问题。

(2) 开发了截面线干涉检查算法,显著提高了圆角建模的质量和稳定性。

(3) 经实际汽车覆盖件模型测试, 本文提出的算法适用于覆盖件模面设计中复杂圆角的快速建模和稳定编辑, 且建模曲面形态质量佳, 在边界处达到 G0 连续, 可用于实际工程中的同步设计。

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] 吴嵩松, 朱军名. 车身外观圆角设计提升方法 [J]. 汽车工艺师, 2020, 201 (4): 56-57.
- Wu S S, Zhu J M. Auto manufacturing engineer [J]. Auto Manufacturing Enginner, 2020, 201 (4): 56-57.
- [3] 贾庚凤, 韦旺华. 小圆角棱线车门外板工艺设计 [J]. 装备制造技术, 2020, 301 (1): 78-81, 138.
- Jia G F, Wei W H. Small rounded edges outside the door plate process design [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020, 301 (1): 78-81, 138.
- [4] 卢金火. 倒圆曲面在模具造型中的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2001, (8): 1-4.
- Lu J H. Application of fillet surface in mold modeling [J]. Automobile Technology & Material, 2001, (8): 1-4.
- [5] 吴山洪, 成艾国. 汽车覆盖件成型模试模调整时 R 角不良问题处理 [J]. 机电产品开发与创新, 2004, (4): 51-53.
- Wu S G, Cheng A G. Research for mould radius of forming [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2004, (4): 51-53.
- [6] 李博. B 样条曲面拼接算法的设计与实现 [D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- Li B. Design and Implementation of B Spline Surface Splicing Algorithm [D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.
- [7] 张晓军. 过渡曲面的 B-样条曲线构造法研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2011.
- Zhang X J. Research on Construction of Parametric Blending Surface Via B-spline Curve [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2011.
- [8] Choi B K, Ju S Y. Constant-radius blending in surface modeling [J]. Computer-aided Design, 1989, 21 (4): 213-220.
- [9] Farouki R, Sverrisson R. Approximation of rolling-ball blends for free-form parametric surfaces [J]. Computer-Aided Design, 1993, 21: 871-878.
- [10] Chuang J H, Hwang W C. Variable-radius blending by constrained spine generation [J]. Visual Computer, 1997, 1: 316-29.
- [11] 徐伟, 张道忠, 魏威. 基于 Sinovation 的覆盖件模圆角自动减小算法与实现 [J]. 模具工业, 2015, 41 (5): 28-33.
- Xu W, Zhang D Z, Wei W. Sinovation-based algorithm and implementation of automatically reducing fillet in the die for panel [J]. Die & Mould Industry, 2015, 41 (5): 28-33.
- [12] 蒋磊, 马培兵, 王龙, 等. 基于 CAD/CAE 的侧围外板拉延模设计 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (6): 127-135.
- Jiang L, Ma P B, Wang L, et al. Draw die design of body side outer panel based on CAD/CAE [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (6): 127-135.
- [13] 王振. 汽车覆盖件模面智能化设计方法研究与应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- Wang Z. Research and Application on Intelligent Design Method for Die Face of Automobile Covering Panels [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

(上接第 22 页)

- [7] 林雅杰, 仲太生, 丁武学. 车用齿轮毛坯多工位精密热模锻工艺分析及模具设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54 (3): 82-87.
- Lin Y J, Zhong T S, Ding W X. Process analysis and die design of multi-station precision hot die forging for automotive gear blank [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2019, 54 (3): 82-87.
- [8] 赵德颖, 张连东, 朱恩领, 等. 枝杈类锻件挤压成形工艺参数对折叠缺陷的影响分析 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (23): 118-121, 125.
- Zhao D Y, Zhang L D, Zhu E L, et al. Influence analysis of extrusion forming process parameters on folding defects for branch-like forgings [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (23): 118-121, 125.
- [9] 张学奇. 单座阀杆热模锻工艺研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2016.
- Zhang X Q. Research on Single Seated Valve Stem Hot Forging Process [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016.
- [10] 赵劲松, 周昌磊, 黄素霞, 等. 60 钢热压缩变形行为及其变参数 Arrhenius 本构方程 [J]. 机械工程材料, 2022, 46 (11): 86-91.
- Zhao J S, Zhou C L, Huang S X, et al. Hot compression deformation behavior and variable parameter Arrhenius constitutive equation of 60 steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46 (11): 86-91.
- [11] 宋宇, 张丰收, 皇涛, 等. 基于高温磨损的 H13 热作模具钢磨损规律和模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 187-193.
- Song Y, Zhang F S, Huang T, et al. Study on wear law and model of H13 hot working die steel based on high-temperature wear [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 187-193.
- [12] 殷华英. 基于有限元模拟的四通阀体多向模锻工艺研究 [J]. 材料科学与工艺, 2022, 30 (2): 81-90.
- Yin H Y. Multi-directional die forging process for four-way valve body based on finite element simulation [J]. Materials Science and Technology, 2022, 30 (2): 81-90.