

基于模板的2-D特征截面线参数化设计*

鲍镜如¹ 张向奎¹ 郭威² 胡平¹

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023; 2. 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130022)

【摘要】 为提高模面型面设计的效率与稳定性,提出了一种基于截面线模板的参数化优化方法。首先对2-D截面线的特征和类型进行分析,给出截面线统一的NURBS显式表达式;然后针对截面线的结构特点,提出一种简洁、高效的截面线编辑策略,并设计相应的优化算法。将算法集成到自主开发的冲压成形分析软件DCiP模面设计模块,并与HyperForm的Die Module进行比较,结果表明:算法避免了现有方法中飞逸、越界等异常的发生,简化了用户的操作,缩短了产品的设计周期。

关键词: 汽车覆盖件 特征截面线 参数化设计 编辑策略

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0225-06

A Parametric Template-based Design for 2-D Section Feature

Bao Jingru¹ Zhang Xiangkui¹ Guo Wei² Hu Ping¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

2. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract

To enhance the efficiency and stability of die-face design, a parametric optimization method based on the template of section feature was proposed. The 2-D section feature was generally represented in NURBS form while its characteristics were systematically analyzed. Then, an optimization algorithm was designed with a simple and effective editing strategy. With the algorithm integrated into the independently developed DCiP forming analysis system, a comparison with HyperForm Die Module was made. The results showed that the proposed method could avoid abnormal problems, and had great ability to simplify user operations and shorten product design periods.

Key words Automobile panel, Section feature, Parametric design, Editing strategy

引言

目前汽车覆盖件工艺补充面的造型设计大多采用由二维特征截面线构造曲面的方式,依靠二维特征截面线来反映零件的型面特征。特征截面线设计的合理与否,直接决定着工艺补充部分的构造方式以及拉延件的成形质量,影响覆盖件模具的设计与制造。当前关于模具型面设计的主要研究多集中于控制和设计工艺补充面的方法^[1-5],针对特征截面线设计和解析表示方面的研究非常有限。现今的一些集成了CAD模面

设计模块的CAE分析软件均采用特征截面线的方式构造工艺补充,然而部分软件在针对截面线进行修改编辑时,因其设计方法的缺陷,致使截面线出现了飞逸、越界等异常现象,使得用户不得不重复设计步骤,不仅延长了修改时间,也影响了设计进程。

本文通过对工程上常用的截面线类型进行分析整理,以模板技术为基础,对特征截面线进行参数化设计并给出显式的解析表示。针对截面线编辑过程中产生的异常现象,提出相应的特征截面线编辑策略和优化算法。

收稿日期: 2011-04-11 修回日期: 2011-05-31

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA04Z101)、国家自然科学基金资助项目(10932003)、国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB832700)和中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(DUT11LK12)

作者简介: 鲍镜如,博士生,主要从事模面型面设计研究,E-mail: jingrubao@gmail.com

通讯作者: 张向奎,副教授,主要从事车身工程和计算固体力学研究,E-mail: email4zxk@gmail.com

1 特征截面线的设计思想及模板类型

1.1 设计思想

当前普遍采用的基于二维特征截面线的工艺补充面的设计方法为(这里仅指外工艺补充,即在零件沿外轮廓边缘展开的基础上添加上去的那部分工艺补充,不包括内部孔洞):首先根据零件构造合适大小和位置的压料面;再通过零件边界上的若干个点,构建零件与压料面之间的截面线;构造压料面模口线,即压料面上插值于所有截面线与压料面交点的曲线,如图1所示;最后由边缘线、截面线及压料面模口线,通过曲面造型技术、参数化设计、三角面片、网格划分等方法构造工艺补充面。图2所示为外工艺补充面的设计流程。

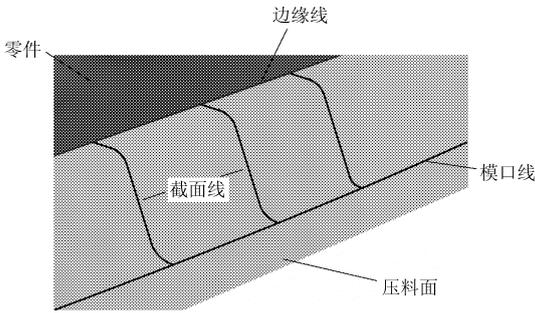


图1 工艺补充面的骨架构成

Fig.1 Skeleton structure of addendum

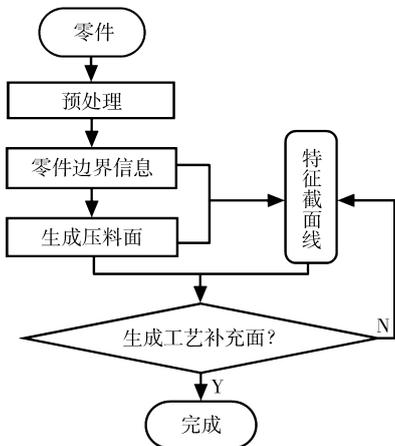


图2 工艺补充面的设计流程

Fig.2 Flow chart of addendum design

因为方法简洁、快速、有效,特征截面线已经成为目前工程中构造工艺补充面的重要手段。Autoform、Dynaform、Pam Stamp等集成了CAD模面设计模块的CAE分析软件均采用特征截面线的方法,通过2-D与3-D窗口交互的方式生成用户选定类型的截面线,然后根据实际情况修改相关的特征尺寸参数。虽然截面线的设定已经大大加快了模具型面设计的步伐,但现有软件在处理截面线时出现的飞逸、越界等异常现象,极大地影响了用户的设计

进程;而工艺参数的种类和名称不统一、手工反复修改工艺参数的方式往往使得设计者需要更多的时间来熟练掌握。

1.2 主要模板类型

根据零件的形状特征及成形要求,可以把特征截面线归纳为5种类型:标准型、台阶型、胀台型、自由曲线型、台阶胀台型,如图3所示。工艺参数包括凹、凸模圆角半径 $R_1、R_2、R_3、R_4、R_5、R_6$,斜侧壁长度 $L_1、L_2、L_3$,斜侧壁与冲压方向夹角 α ,斜侧壁与水平方向的夹角 β 等,这些参数决定了特征截面线的几何特性。合理的工艺参数的设定是创建良好工艺性的拉深模型的基础,不仅能够保证凸模和凹模有足够的强度,同时还有利于毛坯的变形和塑性流动,驱动着工艺补充面的整体设计实现。在实际应用中,由工艺参数决定的截面线类型仍会有一些的局限性,设计者有时候也需要根据覆盖件的实际形状创建出不同于经典类型的、简单灵活的自由曲线型截面线,这样既可以简化拉深工艺,又能满足零件塑性变形的要求。

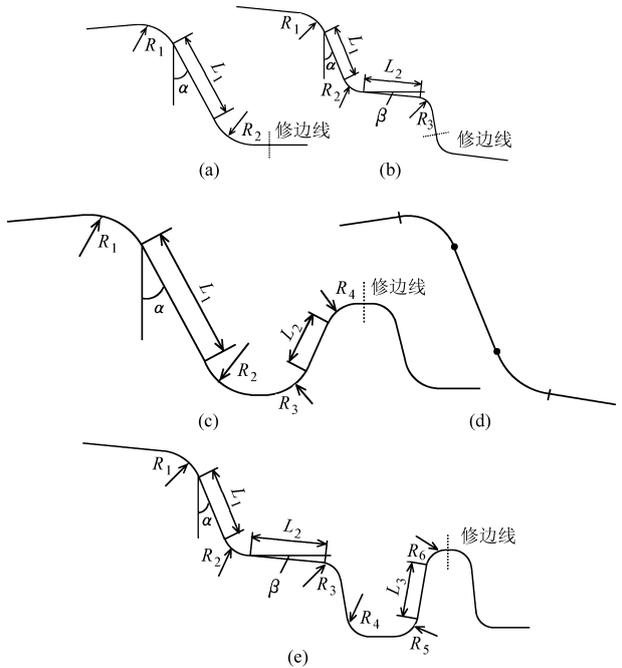


图3 特征截面线类型

Fig.3 Section feature of addendum

- (a) 标准型 (b) 台阶型 (c) 胀台型 (d) 自由曲线型
- (e) 台阶胀台型

有时相邻的零件边界端的材料流动方向差异较大,直接生成截面线会导致工艺补充部分产生畸变,破坏其整体性。为了使截面线的走向具有良好的 consistency,在与零件边界端相连接的截面线处,提供了直线段和圆弧段两种零件端过渡类型,如图4所示。过渡段也具有圆角半径等工艺参数属性,在设计过程中可以和特征截面线放在一起同时考虑。

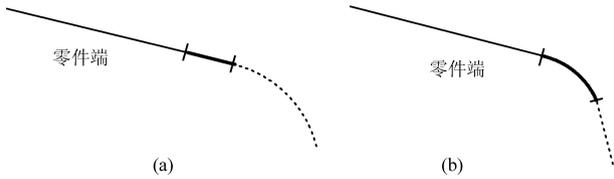


图 4 过渡端类型

Fig. 4 Transitional type

(a) 直线过渡段 (b) 圆弧过渡段

在零件边界上选取点后,根据零件在该点处的边界情况做平行于冲压方法的截面线。以选取点为起点,根据起点到压料面的垂直距离,调整各参数的实际值,创建出位于截平面上的特征截面线,并在 2-D 窗口中显示。截面线在两端点处的流动方向会根据金属的流动规律来自动确定,以确保实现冲压成形。

2 特征截面线的参数化设计及解析表示

考虑到圆角半径和斜侧面等属性因素,设计通常采用圆弧段与直线段交替连接的方式组成截面线,这也方便开发者创建新的由圆弧与直线组合构成的截面线类型;当设计者希望根据实际情况创建出不同于经典类型的截面线时,同样需要提供能够自由变形的截面线。截面线以工艺补充面的纵向骨架形式存在,其作用是为工艺补充面提供 u 向线,因此用统一形式来表示截面线是非常必要的。针对所有设定好的截面线类型,考虑到 NURBS 曲线能够表示圆弧这一优势,给出了统一的二次 NURBS 表达形式,为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n \omega_i P_i N_{i,2}(u)$$

$$(u \in [u_k, u_{k+1}] \subset U = [u_0, u_1, \dots, u_m], n = m - 3)$$

式中 U ——节点矢量 ω_i ——权因子

P_i ——曲线 $C(u)$ 的控制顶点

$N_{i,2}(u)$ ——节点矢量 U 的二次 B 样条基函数

用 NURBS 表示圆弧段和直线段,需要对节点矢量 U 、权因子 ω_i 和控制顶点 P_i 作一些特殊的设定。分别记圆弧段和直线段的节点矢量和权因子分别为

$$U_A = [0, 0, 0, \frac{1}{2}, 1, 1, 1]$$

$$\omega_A = [1, \cos \frac{\theta}{4}, \cos \frac{\theta}{4}, 1]$$

$$U_L = [0, 0, 0, 1, 1, 1] \quad \omega_L = [1, 1, 1]$$

如图 5a、5b 所示,即得到了最简的二次圆弧段与直线段 NURBS 表示。在公共连接点与前后顶点共线的情况下,可以对其进行组合^[6]得到 G^1 连续的组合曲线,如图 5c 所示。组合曲线的次数为二次,节点矢量为

$$U = [0, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, 1, 1]$$

权因子为

$$\omega = [1, \cos \frac{\theta}{4}, \cos \frac{\theta}{4}, 1, 1, 1]$$

组合后的控制顶点为 $P_i (i = 0, 1, \dots, 5)$ 。依次对模板中的圆弧段和直线段进行组合,最终即可得到一条由 NURBS 表示的完整截面线。

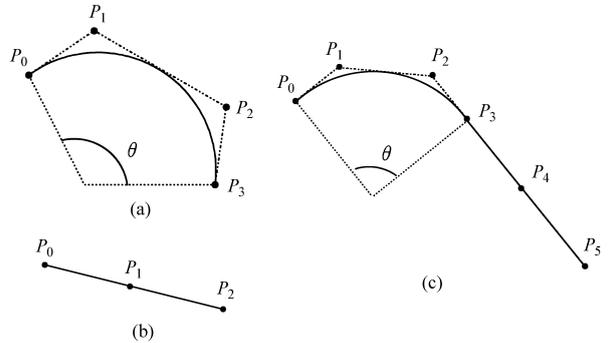


图 5 二次 NURBS 圆弧段和直线段表示及其组合形式

Fig. 5 Quadratic NURBS arc/line and combination curve

(a) 二次 NURBS 圆弧段 (b) 二次 NURBS 直线段

(c) 组合曲线

对于二次自由曲线来说,只需保证曲线两端分别与零件端和压料面段相容,即 G^1 连续即可。因此对于给定的节点矢量 U 和权因子 ω_i ,控制顶点只需满足条件

$$\begin{cases} P_0 = P_F \\ P_n = P_L \\ \Delta P_0 = P_1 - P_0 = V_F \\ \Delta P_{n-1} = P_n - P_{n-1} = V_L \end{cases}$$

式中 P_F ——截面线起始点 P_L ——截面线终结点

V_F ——截平面上零件在 P_F 点的切向矢量

V_L ——截平面上压料面在 P_L 点的切向矢量

图 6 为 $n = 3$ 时的二次自由曲线,其节点矢量和权因子分别为

$$U = [0, 0, 0, \frac{1}{2}, 1, 1, 1]$$

$$\omega = [1, 1, 1, 1]$$

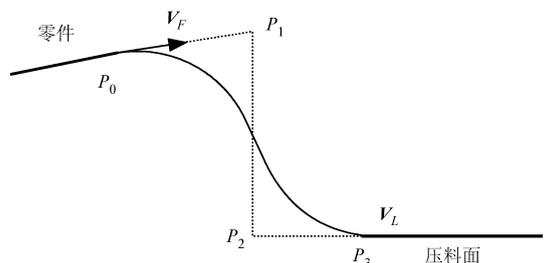


图 6 $n = 3$ 时的二次自由曲线

Fig. 6 Quadratic freeform curve with $n = 3$

3 特征截面线的编辑策略和算法实现

为使生成的工艺补充面部分满足冲压成形的要求,在编辑截面线的过程中不仅要保留设计中创建

的特征,还要保证其与零件端和压料面端的相容关系不被破坏。制定合理的截面线编辑策略,并给出相应的优化算法,既可以保证截面线操作的鲁棒性,避免飞逸、越界等异常现象的发生,又可以节省设计时间,缩短设计周期。

3.1 编辑策略

首先给出 handle 点的定义:它不同于 NURBS 的控制顶点,而是任何经鼠标拖动后可以改变特征截面线形状的操作点。它可以是圆弧段和直线段的端点,或是自由曲线上任意一个用户已插入的控制点。根据对不同类型 handle 点拖动的需求,可制定如下的编辑策略:

圆弧段的后端点:改变圆弧的半径。凸、凹模的主要工艺参数为圆弧的圆角半径 R 。当圆心角 θ 取固定值时, R 就与两端点之间的距离 L 呈正比。因此对圆弧的操作可以间接修改各凸、凹模圆角半径 R 的大小。

直线段的后端点:改变直线段的倾角和长度。工艺参数中斜侧壁与冲压方向或水平方向的夹角、斜侧壁的长度,可以通过直线段的属性来直接表达。改变直线部分的倾角和长度的同时,对其前、后圆弧段的圆心角 θ 作自适应的调整,从而实现对接圆弧段的任何可能需要的编辑设定。

自由曲线上的控制点:可任意修改自由曲线的形状。用户可根据需要,在自由曲线上任意的插入和删除 handle 点,然后对自由曲线进行编辑。添加控制点后曲线的形状不会改变,拖动 handle 点的同时需要保持截面线两端点处的相容性。

编辑策略的制定把对截面线特征参数的修改直接体现在对截面线的操作上,编辑变得异常简单、直观、易于掌握。图 7 分别给出了编辑规定下的曲线操作过程。图中 R_N 为编辑后圆角半径, L_N 为编辑后斜侧壁长度, θ_N 为编辑后圆心角。

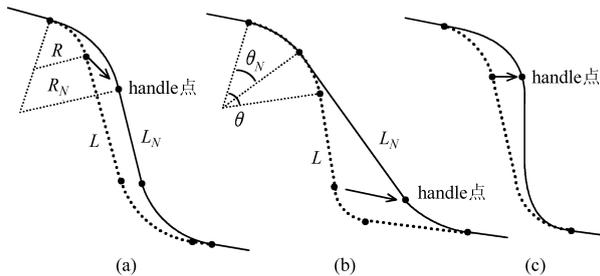


图 7 编辑策略

Fig. 7 Editing strategy

(a) 圆弧段编辑 (b) 直线段编辑 (c) 自由曲线编辑

3.2 优化算法

特征截面线在操作的时候需要满足动态相容条件:起始点始终位于零件端,终结点位于压料面截面上;特征截面线整体 G^1 连续;不会出现打折、交叉

及飞逸、越界等异常现象。二次 NURBS 曲线本身具有的内部 G^1 连续的性质,因此可以满足曲线内部的连续性要求;此外仍需要附加圆弧段与直线段间的整体连动条件,以保证曲线连接处的 G^1 连续,使截面线在编辑时可以做自适应调整。结合编辑策略与上述提出的相容条件,给出相应的约束条件方程

$$Hx = [G^T \ B^T \ I^T \ E^T]^T x = b$$

式中 H ——总约束矩阵 b ——约束值
 G ——策略矩阵 B ——边界约束矩阵
 I ——连接约束矩阵 E ——异常控制矩阵

方程的个数大于或者等于未知数的个数,而编辑策略的提出决定了方程有唯一解,因此就可直接求得最终的解为

$$x = (H^T H)^{-1} H^T b$$

事实上,由圆弧段和直线段构成的非自由曲线仍然可以选择相对自由的操作模式,即对接圆弧段的圆角半径和圆心角不做任何限制。引入拉格朗日乘子法,对 n 元函数

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad (1)$$

式中 \bar{x}_i ——各 handle 点及圆心角的初始值
 x_i ——对应于 \bar{x}_i 的满足约束条件的最优解
 求其在 m 个约束条件 ($m < n$)

$$\begin{cases} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

下的最小极值。

式(2)为约束方程

$$Hx - b = [G^T \ B^T \ I^T \ E^T]^T x - b = 0$$

的分量表示。定义函数

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \sum_{i=1}^m \lambda_i h_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

为求解式(1)的极值,对式(3)求偏微分,得到 n 个新的方程

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x_1} = 0 = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial x_1} + \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial x_1} + \dots + \lambda_m \frac{\partial h_m}{\partial x_1} \\ \frac{\partial F}{\partial x_2} = 0 = \frac{\partial f}{\partial x_2} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial x_2} + \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial x_2} + \dots + \lambda_m \frac{\partial h_m}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial x_n} = 0 = \frac{\partial f}{\partial x_n} + \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial x_n} + \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial x_n} + \dots + \lambda_m \frac{\partial h_m}{\partial x_n} \end{cases} \quad (4)$$

将式(2)、(4)结合就得到了一个含有 $n + m$ 个未知数及 $n + m$ 个方程的方程组,用牛顿迭代法^[7]

求解,即可得到包含 handle 点和圆心角信息的 $x_i (i=1,2,\dots,n)$ 。自由操作模式下的特征截面线虽然不能直接针对圆角半径和斜侧面控制其参数信息,但自由度更高,截面线仍旧体现了所需的工艺参数属性,满足了设计者的多种设计需求。

在自由曲线中插入 handle 点,首先按照插入点在曲线中的位置确定相应的插入节点 u ,然后找到一个值 k ,使得 $u \in [u_k, u_{k+1})$ 。将 u 插入到 U 中,并重新编号后得到

$$\bar{U} = [\bar{u}_0 = u_0, \bar{u}_1 = u_1, \dots, \bar{u}_k = u_k, \bar{u}_{k+1} = u, \bar{u}_{k+2} = u_{k+1}, \dots, \bar{u}_{n+4} = u_{n+3}]$$

这个新节点矢量 \bar{U} 决定了一组新 B 样条基 $\bar{N}_{i,2}(u)$ ($i=0,1,\dots,n+1$)。新的控制顶点和权因子分别由原控制顶点和权因子线性确定

$$\bar{P}_i = \alpha_i P_i + (1 - \alpha_i) P_{i-1} \quad (i=0,1,\dots,n)$$

$$\bar{\omega}_i = \alpha_i \omega_i + (1 - \alpha_i) \omega_{i-1} \quad (i=0,1,\dots,n)$$

其中
$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & (0 \leq i \leq k-2) \\ \frac{\bar{u} - u_i}{u_{i+2} - u_i} & (k-1 \leq i \leq k) \\ 0 & (k+1 \leq i \leq n) \end{cases}$$

从而,插入节点后的自由曲线可以表示为

$$C_F(u) = \sum_{i=0}^{n+1} \bar{\omega}_i \bar{P}_i \bar{N}_{i,2}(u)$$

控制顶点增加了一个,曲线形状及连续性均保持不变。而删除 handle 点意味着删除其在节点矢量 \bar{U} 中对应的节点 u ,重新由插入节点前的各参数来表示曲线。

4 实例

本节运用自主开发的 DCiP 软件中的模具型面设计模块,验证前文提出的截面线参数化设计方法的编辑策略及优化算法,并与 HyperForm 的设计过程进行了比较。选用 HyperWork 9.0 软件平台下的 HyperForm Die Module 模块,模块中同样拥有针对特征截面线 handle 点的拖动功能,但却时常出现异常,如图 8a~8c 所示。而图 8d 中 DCiP 所提供的基于编辑规则的拖动可以很好地解决这个问题,对不同类型的 handle 点进行操作均可以保证截面线满足基本形态而不发生飞逸、越界等异常现象。

根据第 3 节的设计方法,选择需要的截面线模板类型,在零件边界处生成系统默认参数的自适应截面线。调节截面线的 handle 点来修改截面线以及工艺补充面形状,最后完成外工艺补充面的设计。图 9 为采用参数化设计方法和编辑策略修改截面线的过程,修改的结果实时的反映到 3-D 工艺补充面

中。图 10 为生成工艺补充面的最终结果。

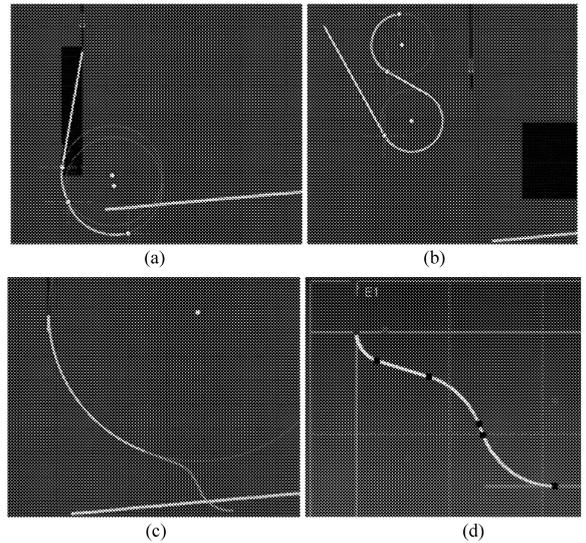


图 8 HyperForm 中的截面线编辑异常及其与 DCiP 的比较

Fig. 8 Abnormal occurrence using HyperForm compared with DCiP

(a) 冲压方向内凹,特征截面线越界 (b) 特征截面线飞逸 (c) 特征截面线越界 (d) DCiP 特征截面线编辑

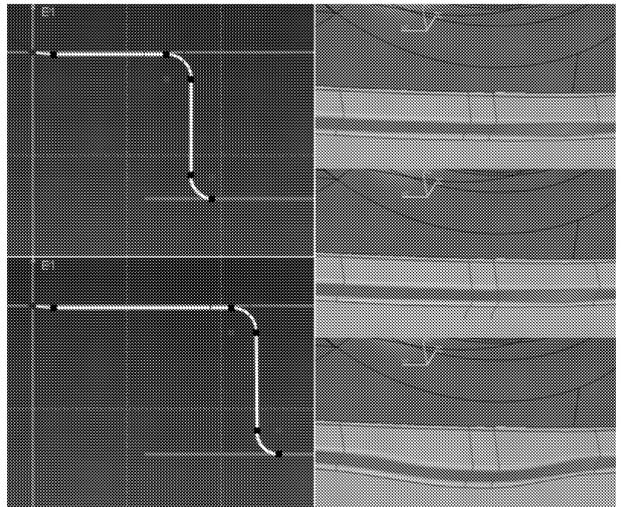


图 9 标准型 2-D 截面线向 3-D 曲面的实时显示
Fig. 9 Edition of standard section feature in 2-D for the 3-D addendum in real-time

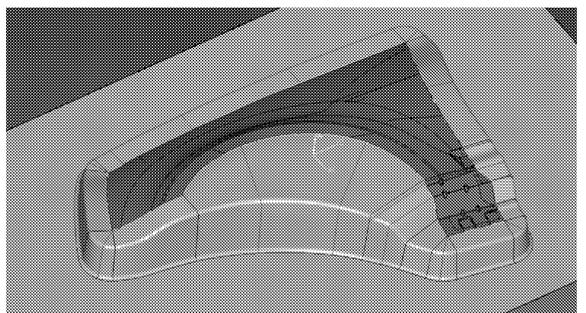


图 10 DCiP 软件中工艺补充面生成实例
Fig. 10 Example of addendum generation in DCiP

5 结束语

以模板技术为基础,给出了特征截面线的统一 NURBS 显式解析表示,精确表示出了由特定几何参数表示的工艺补充截面特征,并在此基础上提出了

截面线的编辑策略及相应的优化算法,该方法有利于形成规范的用户操作习惯,减少了用户的重复设计次数,同时避免了异常现象的发生,使得软件鲁棒性更强。

参 考 文 献

- 1 Chi Dy, Liu Ruijun, Hu Ping, et al. Smoothing parametric method to design addendum surface[C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2008,1: 1 140 ~ 1 144.
- 2 姚兴,陈军,石晓祥,等. 覆盖件拉延模工艺补充面及压料面参数化设计研究[J]. 模具技术,2002(4):6~9.
Yao Xing, Chen Jun, Shi Xiaoxiang, et al. Addendum and binder surface parametric design for automotive panel drawing die [J]. Die and Mould Technology, 2002(4):6~9. (in Chinese)
- 3 刘细芬,黄华艳,张洪锐. 基于 CAE 技术的汽车覆盖件拉延模具设计[J]. 机械设计与制造,2010(4):242~244.
Liu Xifen, Huang Huayan, Zhang Hongrui. Die design of drawing for the automobile panel based on CAE technology[J]. Machinery Design and Manufacture, 2010(4):242~244. (in Chinese)
- 4 陈涛,李光耀. 覆盖件拉延模工艺补充及压料面的参数化设计新方法[J]. 机械工程学报,2006,42(5):69~74.
Chen Tao, Li Guangyao. New method on parametric design of addendum binder surface and drawing process complementary for automotive panel drawing die[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5):69~74. (in Chinese)
- 5 王伟,施法中. 覆盖件拉延模型工艺补充部分的参数化设计[J]. 锻压技术,2007,3(2):105~109.
Wang Wei, Shi Fazhong. Process addendum's parametric design in panel drawing die modeling[J]. Forging and Stamping Technology, 2007, 3(2):105~109. (in Chinese)
- 6 Piegl L A, Tiller W. The NURBS book[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- 7 Ortega J M, Rheinboldt W C. 多元非线性方程组迭代解法[M]. 朱季泽,译. 北京:中国科学出版社,1983.
- 8 杨晓红,张邦成. 汽车覆盖件拉深模具结构设计模板化 CAD 系统[J]. 农业机械学报,2007,38(11):149~152.
Yang Xiaohong, Zhang Bangcheng. Stencil CAD system of auto panel die drawing and extending mould structure design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 149~152. (in Chinese)

(上接第 224 页)

- 7 崔剑,丁凡,李其朋,等. 耐高压双向旋转比例电磁铁的静态力矩特性[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(9): 1 578 ~ 1 581.
Cui Jian, Ding Fan, Li Qipeng, et al. Static torque characteristics of high-pressure bidirectional rotary proportional solenoid [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(9):1 578 ~ 1 581. (in Chinese)
- 8 雷天觉. 新编液压工程手册[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998:1 353 ~ 1 380.
- 9 阮健. 电液直接数字控制技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2000:218 ~ 228.
- 10 王宗培. 步进电动机[M]. 北京:科学出版社,1979:68 ~ 71.
- 11 邹继斌,李巍,李勇. 爪极式单相永磁步进电机特性的数值计算与分析[J]. 电工技术学报,2007,22(10):1~5.
Zou Jibin, Li Wei, Li Yong. Calculation and analysis of single phase stepper motor with claw poles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10):1~5. (in Chinese)
- 12 满军,丁凡,李其朋,等. 圆锥和平面形磁极高速电磁铁动态特性对比[J]. 农业机械学报,2009,40(3):213~217.
Man Jun, Ding Fan, Li Qipeng, et al. Comparative researches on high-speed solenoids of conical pole and planar pole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3):213~217. (in Chinese)