

多点切触加工在复杂凸曲面中的应用

樊文刚, 李建勇, 黄泽华, 马丽梅

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 100044, 北京)

摘要: 针对目前多点切触加工主要应用于复杂凹曲面这一现状, 以汽车顶盖曲面为例, 对一般性复杂凸曲面的多点切触加工进行了深入研究. 先利用逆向工程技术由散乱点云数据建立了凸曲面的几何模型, 然后利用旋转法对不同走刀方向下的刀位误差分布, 以及一些关键参数对刀位误差分布的影响规律进行了深入分析, 结果指出, 在对凸曲面进行多点切触加工时, 一般只有使圆环面刀具沿着凸曲面的最大主曲率方向进给, 刀具表面和凸曲面之间才有可能达到两点切触, 这和凹曲面多点切触加工时的情况是完全相反的. 仿真和实际加工表明, 将多点切触加工理论应用到复杂凸曲面上, 加工效率得到明显提高, 约为 UG 算法的 2.3 倍.

关键词: 多点; 加工; 凸曲面; 误差分布

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)03-0053-05

Application of Multi-Point Contact Machining to Convex Sculptured Surface

FAN Wengang, LI Jianyong, HUANG Zehua, MA Limei

(School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To improve the current situation that multi-point contact machining has mostly been for concave sculptured surface, a strategy for general convex sculptured surface, taking a cover car convex surface as the instance, is proposed. The model of the convex surface from the scattered point clouds is reconstructed. Then the tool position error distribution for different path direction with rotary method is analyzed, and the relationship between the key parameters in rotary method and the tool position error distribution is also discussed. The results show that the condition for multi-point contact of the general convex surface is to make the toroidal cutter feed along the maximum direction of curvature of the convex surface, which gets completely opposite to the concave surface. The simulation and machining experiment show that the multi-point contact theory can heighten the machining efficiency to 2.3 times of that by UG algorithm for convex sculptured surface machining.

Keywords: multi-point; machining; convex surface; error distribution

复杂曲面五坐标数控加工的主要目的是使刀具表面和工件曲面在不发生干涉的条件下达到更好的几何匹配, 以获得尽可能大的加工带宽. 理论上, 加工带宽越大, 用于完成曲面加工的刀路数量就会越少, 加工效率就会越高. 多点切触加工由于采用 2 个切触点来确定优化刀位, 使得刀具表面和工件曲面

之间更加紧密接触, 并被证明可以比那些单点刀位算法产生更大的加工带宽. 常见的多点刀位算法主要有 MPM 算法^[1-4]、Hermite 算法^[5]、AIM 算法^[6]、割线法^[7]和旋转法^[8]等. 与此同时, 为了充分利用由多点刀位算法带来的加工带宽优势, 一些对应的刀轨规划算法, 如双线驱动刀轨规划算法^[9]、特征参数

线刀轨规划算法^[10]等,已经被提出.然而,多点切触加工的研究目前主要集中于复杂凹曲面方面,有关复杂凸曲面多点切触加工的文献几乎没有.由于多点切触加工凸曲面时使用的是圆环面刀具的内圆切削部分,这使得多点切触加工凸曲面在刀具定位、走刀方向选择及干涉避免等方面有所不同,因此有必要加强对多点切触加工理论研究的深度和广度,从而进一步推动多点切触加工在实际工程领域中的应用.

在汽车模具工业中,常见的汽车顶盖曲面属于曲率以复杂形式变化,但变化比较缓慢的开敞凸曲面.为此,本文以汽车顶盖凸曲面为例,对复杂凸曲面多点切触加工时不同走刀方向下的刀位误差分布,以及刀位优化算法中的一些关键参数对刀位误差分布的影响进行了深入分析.利用旋转法和特征参数线刀轨规划算法生成了凸曲面多点切触加工的无干涉刀位轨迹,并通过仿真和实际加工对得到的相关结论进行了验证.

1 凸曲面几何模型的建立

一般来说,汽车顶盖凸曲面的原始数据为扫描后的散乱点云形式,因此需要通过逆向工程技术重构汽车顶盖凸曲面的几何模型.针对某汽车的整车点云,利用逆向工程软件 Imageware 可以将所需要的凸曲面创建出来,如图 1 所示.通过编写程序,从凸曲面的 IGES 文件中将控制顶点提取出来,最终的控制顶点为 11 行乘 12 列的点阵.采用三次非均匀有理 B 样条理论来描述该凸曲面,控制顶点阵横向将作为 v 参数方向,纵向作为 u 参数方向,控制顶点与参数 u 和 v 在 XOY 平面上的关系如图 2 所示.根据控制顶点,利用里森费尔德方法^[11]可分别求得凸曲面在 u, v 方向上的节点矢量 $\mathbf{U}=[0, 0, 0, 0, 0, 0.209\ 485, 0.313\ 469, 0.415\ 524, 0.516\ 623, 0.617\ 430, 0.718\ 237, 0.819\ 336, 1, 1, 1, 1]$, $\mathbf{V}=[0, 0, 0, 0, 0, 0.174\ 792, 0.269\ 626, 0.363\ 289, 0.456\ 165, 0.548\ 492, 0.640\ 555, 0.732\ 585, 0.824\ 808, 1, 1, 1, 1]$.

最后,根据双三次非均匀有理 B 样条曲面拟合,可以得到凸曲面的几何模型.

2 走刀方向选择

圆环面刀具在加工凸球面时,切削工作面是它的内圆切削部分.根据几何的对称性,圆环面刀具和凸球面之间可以实现圆曲线接触,即刀具可以完美

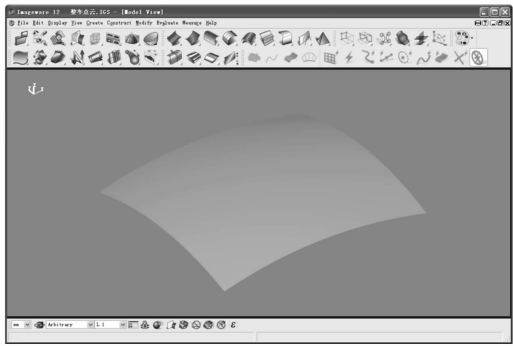


图 1 由软件 Imageware 创建的凸曲面几何模型

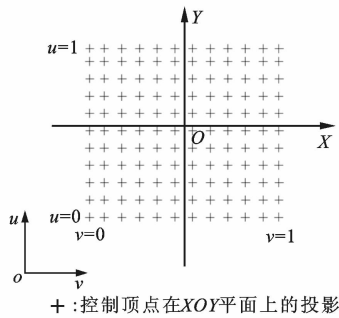


图 2 凸曲面控制顶点与参数的关系

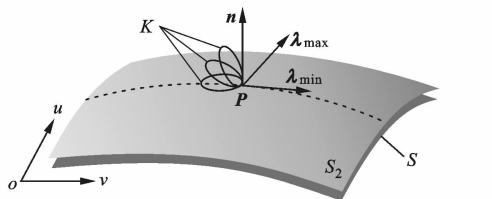
地扣在凸球面上,只要合理地规划好刀位轨迹,这种刀具定位方式就能够完全避免残余高度的产生^[1].对于曲率以复杂形式变化,但变化比较缓慢的复杂凸曲面,尽管圆环面刀具和工件曲面之间不可能实现线接触,但仍然可以利用刀具扣在曲面上这一定位理念,使刀具和工件凸曲面之间获得最好的几何匹配.旋转法的基本原理是先确定刀具的初始位置,然后往后旋转刀轴以找到没有干涉的刀具最小后跟角,实际上这符合刀具扣在表面上的加工方式.因此,在复杂凸曲面多点切触加工的不同走刀方向下,本文采用旋转法对刀位误差分布的情况进行了考察.选择圆环面刀具环心圆曲线半径 $R=8\text{ mm}$,圆角小半径 $r=5\text{ mm}$,设定最大允许加工误差 $e=0.01\text{ mm}$,偏置距离 $h=0.005\text{ mm}$,迭代优化精度 $\epsilon=10^{-6}$.

2.1 刀具沿凸曲面 v 参数线方向的进给

在图 3a 中, $\mathbf{P}, \lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ 和 $\mathbf{n}$ 构成了曲面 S_2 在 $\mathbf{P}$ 处的局部直角坐标系.根据旋转法基本原理,可以确定刀具环形圆曲线 K 在该局部坐标系中的位置,刀具的后跟角 α 分别为 $0^\circ, 30^\circ$ 和 60° .

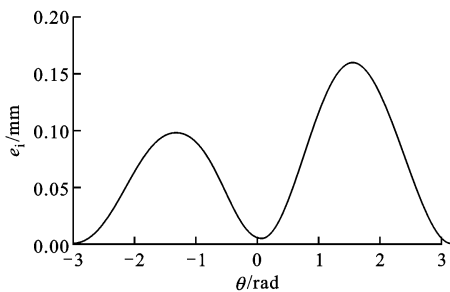
当 $\alpha \geq 0^\circ$ 时, K 和 S_2 之间永远不会发生干涉.为了应用旋转法求得参数 $(u, v)=(0.5, 0.5)$ 处的最优刀位,设 α 的初值为 0° .若采用二分法对 α 进行优

化调整,可以求得无干涉条件下的刀具最小后跟角 $\alpha_{\min} = -1.854^\circ$. 将 K 离散为一系列采样点,然后分别求这些采样点到 S 的最小距离,并减去圆环面刀具的圆角小半径 r ,就可以得到当前刀位处的整体误差分布情况,如图 3b 所示,其中横坐标 θ 代表这些采样点对应的环心圆圆心角,变化范围为 $[-\pi, \pi]$,纵坐标 e_i 代表相应的加工误差. 从图 3b 中可以看出,当 $\theta=0$ 时, $e_i=0.005$ mm,在 $\theta=0$ 的两侧, e_i 在一定范围内会逐渐增大, $\theta=\pm\pi$ 附近的误差分布与此类似. 在该刀位下,圆环面刀具的前、后端误差分布都呈现出 U 形. 由于刀具的后端距离刀触点较远,已经不能用来准确描述刀位处的误差分布情况,因此只能根据刀具的前端误差分布来确定刀位处的加工带宽. 计算得到的最大允许加工误差 $e=0.01$ mm,在该刀位处的加工带宽为 2.743 mm.



S_1 :凸曲面; S_2 :等距面; P : S_2 上的向量点; K :刀具环心圆曲线;
 $\lambda_{\min}$:最小主曲率向量; $\lambda_{\max}$:最大主曲率向量; n :法矢量

(a) 刀具定位示意图



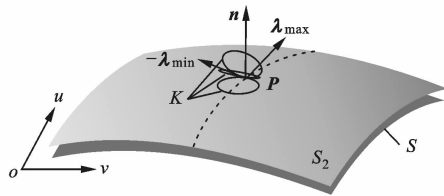
(b) 误差分布曲线

图 3 刀具沿凸曲面 v 参数线方向的进给情况

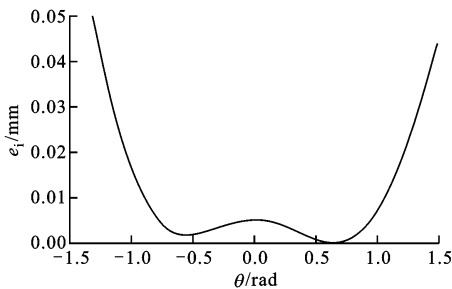
2.2 刀具沿凸曲面 u 参数线方向的进给

如图 4 所示,仍以参数 $(u, v) = (0.5, 0.5)$ 为例,此时以 P 为局部坐标系原点, $\lambda_{\max}$ 方向为 x 轴, $\lambda_{\min}$ 负方向为 y 轴, n 为 z 轴,则可以确定 P 点处的局部坐标系. 根据旋转法可以求得该刀位处的最优刀具后跟角为 -2.176° ,由此可以获得对应刀具前端的误差分布.

从图 3 和图 4 中可以看出,只有当圆环面刀具沿凸曲面的 u 参数线方向进给时,刀具前端误差分



(a) 刀具定位示意图



(b) 误差分布曲线

图 4 刀具的定位示意图及误差分布曲线

布曲线才能呈现出多点切触加工特有的 W 形状,在最大允许加工误差为 0.01 mm 时,该刀位处产生的加工带宽约为 12.990 mm,这比刀具沿凸曲面的 v 参数线方向进给且在相同刀位时产生的加工带宽 (2.743 mm) 要大得多,提高了约 4.7 倍.

对凸曲面曲率进行分析,可知该凸曲面上任一点处的最小主曲率方向与 v 参数线方向大致相同,最大主曲率方向与 u 参数线方向大致相同. 由此可以得到重要结论:对于复杂凸曲面多点切触加工,一般只有当圆环面刀具沿最大主曲率方向进给时,刀具表面和工件曲面之间才有可能获得 2 个切触点,这与复杂凹曲面多点切触加工一般选择最小主曲率方向为进给方向是完全相反的. 当刀具沿凸曲面的 u 参数线方向进给时,由于该方向上凸曲面的曲率较大,圆环面刀具可以更深入地扣在凸曲面上,所求得的 $\alpha_{\min} (-2.176^\circ)$ 小于刀具沿 v 参数线方向进给时求得的 $\alpha_{\min} (-1.854^\circ)$,与此同时,在与进给方向垂直的方向上凸曲面的曲率较小,当往后旋转刀轴时,刀具的 K 和 S_2 之间更容易发生干涉,使 P 点两侧的误差小于偏置距离 h ,而 h 为 0.005 mm 的可能性加大,最终形成了 W 形的误差分布. 因此,在本文给出的汽车顶盖凸曲面例子中,应当选择凸曲面的 u 参数线作为走刀方向.

3 误差分析

在旋转法中,不同的关键参数,如偏置距离 h 和

圆环面刀具环心圆曲线半径 R 等参数对刀位误差分布也有着很大的影响,对它们进行深入的定量研究将有助于提高加工带宽。

3.1 偏置距离对加工带宽的影响

根据旋转法的基本原理, h 实际上是可调节的,不同的 h 值对求得的 α 和刀位处的加工带宽 w 都具有一定的影响,因此 h 不能为 0,否则旋转法将失效.选择圆环面的刀具参数 $R=8\text{ mm}$ 、 $r=5\text{ mm}$,在由 $(u,v)=(0.5,0.5)$ 确定的刀位处,分别计算不同 h 值下该刀位处的误差分布,结果如图 5 所示.从图 5 中可以看出, h 可很好地控制 W 形误差分布的最大欠切误差,而 h 越大,其产生的误差分布曲线越开阔.图 6、图 7 分别显示了 h 对 α 和 w 的影响规律,从图 6、图 7 中可以看出,随着 h 的增大, α 越来越小,而 w 则越来越大.因此,从理论上来讲, h 越大越好,当 $e=0.01\text{ mm}$ 时,最佳偏置距离为 0.01 mm .

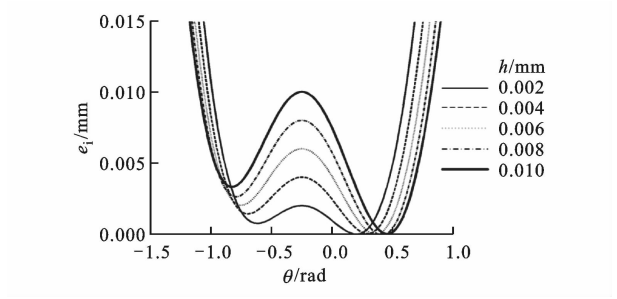


图 5 偏置距离不同时的刀位误差分布曲线

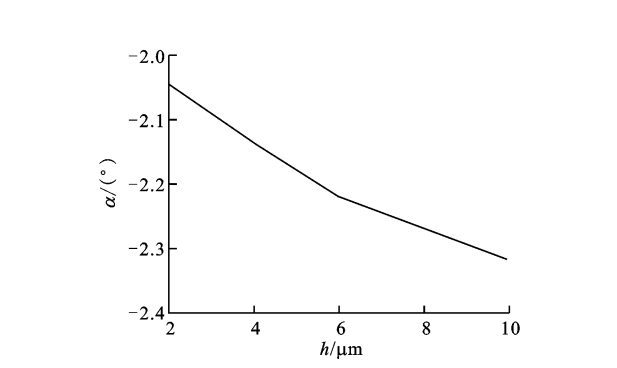


图 6 偏置距离对刀具后跟角的影响曲线

3.2 刀具环心圆曲线半径对加工带宽的影响

在旋转法中,刀具的圆环面与工件曲面之间的关系已经被等效为刀具环心圆曲线与工件曲面等距面之间的关系,因此这里只考察刀具的 K 、 R 变化对刀位处加工带宽的影响情况。

当 $r=5\text{ mm}$ 且保持不变时,假定 $h=0.005\text{ mm}$,在由 $(u,v)=(0.5,0.5)$ 确定的刀位处,分别计算不同 R 下该刀位处的误差分布,结果如图 8 所示.从图 8 中可以看出, R 越大时,刀位处的误差分布曲线

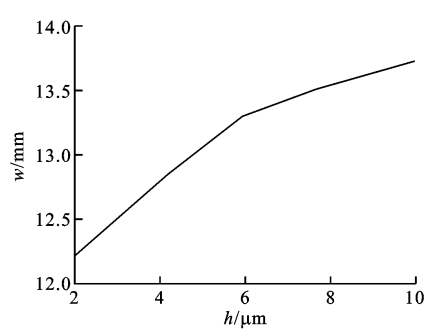


图 7 偏置距离对加工带宽的影响

越狭窄,这种变化趋势与不同 h 值时的情况完全相反.由图 9、图 10 很容易看出,随着 R 的增大, α 越来越小, w 则越来越大,这说明 w 不能单纯通过误差分布曲线的宽窄来衡量,由 R 的变化给 w 带来的影响要大于由误差分布曲线的宽窄变化对 w 的影响。

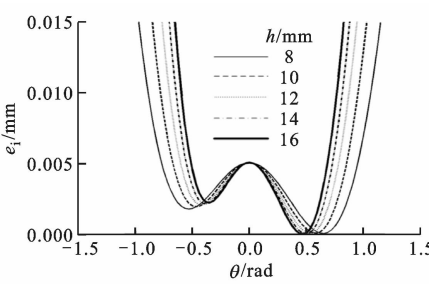


图 8 R 不同时的刀位误差分布曲线

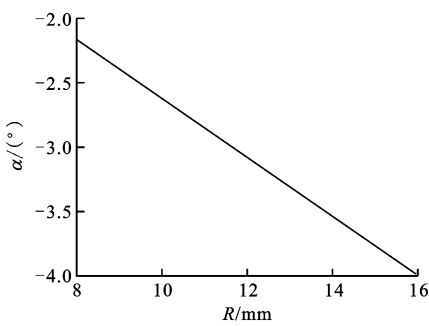


图 9 R 对 α 的影响曲线

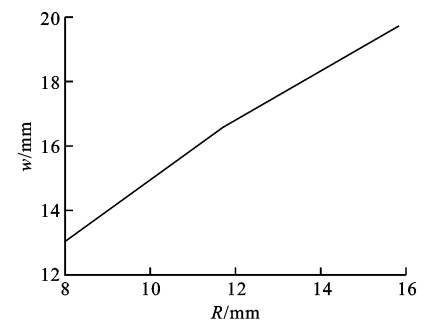


图 10 R 对 w 的影响曲线

从理论上讲, R 越大, w 越大,但 R 越大,圆环面刀具底面中心和凸曲面干涉的可能性也越大,因此在加工前确定圆环面刀具基本参数时干涉问题应该给予重视.

4 刀位轨迹的生成与验证

在对走刀方向和误差分布进行深入分析后,采用旋转法和特征参数线刀轨规划算法,来生成凸曲面多点切触加工的无干涉刀位轨迹. 选用瑞福泰圆环面刀具的型号为 26×200-C25-2T,主要参数 $R=8\text{ mm}$,刀片型号为 RPMW1003, $r=5\text{ mm}$, $e=0.01\text{ mm}$, $h=0.01\text{ mm}$, $\alpha_0=0^\circ$. 圆环面刀具沿着凸曲面的 u 参数线方向进给,且刀路编排从凸曲面的左边界(即参数 $v=0$)开始,每条刀路上离散的刀位点数 $M_{cc}=100$,设决定刀路参数的迭代步长 Δv 的最小判断精度为 10^{-3} . 表 1 给出了凸曲面多点切触加工的刀路信息,其中 v_i 代表第 i 条刀路对应的 v 参数值, v_i^l 、 v_i^r 分别为刀路 v_i 的左、右特征参数线. 从表 1 中可以看出,每下一条刀路的左特征参数线所对应的 v 参数值,都严格地在精度范围内小于当前刀路的右特征参数线对应的 v 参数值,而完成整个曲面加工所需要的刀路共有 15 条. 在同样条件下,用 UG 软件生成的刀轨数量共有 35 条. 显然,采用旋转法和特征参数线刀轨规划算法对该凸曲面进行加工时,加工效率得到明显提高,约为 UG 软件算法的 2.3 倍.

表 1 凸曲面多点切触加工的刀路信息

i	v_i	v_i^l	v_i^r
1	0.026 5	0.000 0	0.050 6
2	0.077 0	0.048 8	0.112 3
3	0.151 1	0.111 2	0.196 5
4	0.219 0	0.195 9	0.233 7
5	0.272 0	0.233 3	0.311 3
6	0.344 8	0.310 6	0.378 9
7	0.406 8	0.374 3	0.440 8
8	0.471 3	0.437 8	0.505 3
9	0.537 6	0.504 2	0.571 5
10	0.603 5	0.570 2	0.637 5
11	0.665 7	0.632 3	0.700 5
12	0.732 8	0.698 7	0.772 5
13	0.810 9	0.770 8	0.873 7
14	0.904 7	0.871 1	0.942 3
15	0.983 1	0.940 8	1.000 0

对由旋转法和特征参数线刀轨规划算法生成的刀位数据进行后置处理后,得到数控程序且载入到 VERICUT 软件建立的工程中(选择 Mazak_variaxis500 数控机床,Sin840D 西门子数控系统),设置毛坯参数和位置、圆环面刀具参数及程序原点等,进行数控仿真,其结果表明加工误差小于 0.01 mm.

加工实验在本校的双转台式五坐标数控机床上进行,毛坯材料为普通铝,主轴转速为 2 000 mm/min,进给速度为 200 mm/min,切削方式选为单向切削,加工后的汽车顶盖凸曲面形态如图 11 所示.

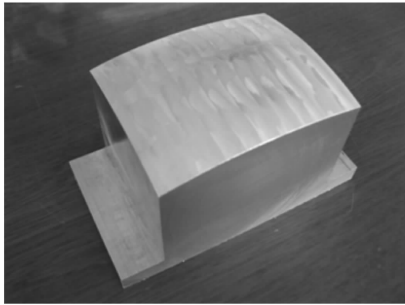


图 11 加工后的汽车顶盖凸曲面形态

5 结 论

(1)本文以汽车顶盖凸曲面为例,采用旋转法对复杂凸曲面多点切触加工时不同走刀方向下的刀位误差分布进行了分析,得到在进行凸曲面多点切触加工时,一般应当选择最大主曲率方向作为刀具的进给方向,这与凹曲面多点切触加工时的情况是完全相反的.

(2)本文分析了旋转法中的偏置距离、圆环面刀具环面圆曲线半径对刀位误差分布的影响规律. 在满足加工精度和无干涉的条件下,实验结果表明,偏置距离和圆环面刀具环面圆曲线半径都与加工带宽成线性增长关系.

(3)利用多点切触理论进行复杂凸曲面加工时,与 UG 软件算法相比,加工效率得到明显提高,从而推动了多点切触加工在实际工程领域中进一步的应用.

参考文献:

[1] WARKENTIN A, BEDI S, ISMAIL F. 5-axis milling of spherical surfaces [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995,36(2):229-243.
[2] WARKENTIN A, ISMAIL F, BEDI S. Intersection approach to multi-point machining of sculptured surfaces [J]. Computer Aided Geometric Design, 1998, 15(6):567-584.

- [3] WARKENTIN A, ISMAIL F, BEDI S. Multi-point tool positioning strategy for 5-axis machining of sculptured surfaces [J]. Computer Aided Geometric Design, 2000,17(1):83-100.
- [4] WARKENTIN A, ISMAIL F, BEDI S. Comparison between multi-point and other 5-axis tool position strategies [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000,40(2):185-208.
- [5] ENGELI M, WALDVOGEL J, SCHNIDER T. Method for processing work pieces by removing material; United States, US6485236 B1 [P]. 2002-11-26.
- [6] GRAY P, BEDI S, ISMAIL F. Arc-intersect method for 5-axis tool positioning [J]. Computer-Aided Design, 2005,37(7):663-674.
- [7] 王瑞秋,陈五一. 多点切触加工的割线法 [J]. 机械工程学报, 2006,42(7):203-206.
WANG Ruiqiu, CHEN Wuyi. Secant algorithm in multi-point contact machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(7):203-206.
- [8] 樊文刚,王小椿,姜虹,等. 一种开阔自由凹曲面五坐标加工多点刀位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2010,44(9): 69-73.
FAN Wengang, WANG Xiaochun, JIANG Hong, et al. Multi-point tool positioning strategy for five-axis machining of open sculptured concave surfaces [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010,44(9): 69-73.
- [9] XU Rufeng, CHEN Zhitong, CHEN Wuyi, et al. Dual drive curve tool path planning method for 5-axis NC machining of sculptured surfaces [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010,23(4): 486-494.
- [10] 樊文刚,李建勇,蔡永林,等. 复杂曲面多点切触加工特征参数线刀轨规划 [J]. 西安交通大学学报, 2012,46(1):81-85.
FAN Wengang, LI Jianyong, CAI Yonglin, et al. Characteristic parameter curve tool path planning method for multi-point contact machining of sculptured surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012,46(1):81-85.
- [11] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001:234-237.

(编辑 管咏梅)