

# 复杂曲面多点切触加工特征参数线刀轨规划

樊文刚, 李建勇, 蔡永林, 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:** 为了使旋转法得到更好的应用,对旋转法的多点切触加工特性进行了深入分析,提出了特征点和特征参数线的概念.在此基础上,提出了适用于旋转法的特征参数线刀轨规划算法,首先利用旋转法确定圆环面刀具的最优刀位,然后通过迭代判断使下一条刀路的左特征参数线和当前刀路的右特征参数线在精度范围内重合,并由此实现刀轨的编排.算例表明,特征参数线刀轨规划算法可有效产生光顺无干涉的刀路,可充分利用旋转法加工带宽的优势,与等参数线法相比,其加工效率得到了明显的提高.

**关键词:** 特征参数线;刀轨规划;复杂曲面

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)01-0081-05

## Characteristic Parameter Curve Tool Path Planning Method for Multi-Point Contact Machining of Sculptured Surface

FAN Wengang, LI Jianyong, CAI Yonglin, MA Limei

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

**Abstract:** To acquire better applications for the rotary method, the multi-point contact property is deeply analyzed, the concept of the characteristic point and the characteristic parameter curve are presented. Then the characteristic parameter curve tool path planning method is developed. The essentiality is determining the optimal tool positions of the toroidal cutter to make the left characteristic parameter curve of the next path being collinear with the right characteristic parameter curve of the current path under the given precision by iterative computation. Finally, the tool paths are completely arranged. An example shows that the characteristic parameter curve tool path planning method enables to generate the smooth and interfere-free tool paths and improve the actual machining efficiency because it gains the advantages of machining strip width over iso-parametric method.

**Keywords:** characteristic parameter curve; tool path planning; sculptured surface

自 20 世纪 90 年代中期以来,多点切触加工在理论和应用上都得到了很大发展,一些多点刀位算法,如 MPM 算法<sup>[1-3]</sup>、Hermite 算法<sup>[4]</sup>、AIM 算法<sup>[5]</sup>、割线法<sup>[6]</sup>、旋转法<sup>[7]</sup>等都已经提出.多点刀位算法认为,在刀具和工件曲面之间存在 2 个切触点,它改善了刀具和工件曲面之间的几何匹配,并已被证明可以比那些单点刀位算法产生更大的加工

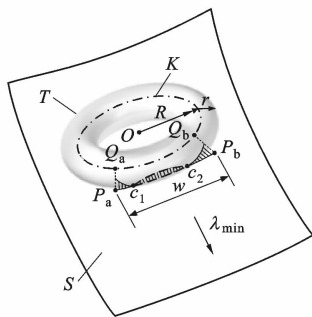
带宽<sup>[8]</sup>,因此在复杂曲面宽行加工领域得到了广泛的应用.然而,从完成整个曲面加工的角度来看,刀轨规划同样重要,它的优劣不仅直接决定了曲面加工效率,也深刻影响了曲面加工后的表面质量.刀轨规划算法主要包括等参数线法<sup>[9]</sup>、等距截平面法<sup>[10-11]</sup>、等残留高度法<sup>[12-13]</sup>等.不同的多点刀位算法来自于不同的理论基础,表现出不同的特性,因此

需要发展与之相对应的刀轨规划算法来充分利用由多点刀位算法带来的加工带宽的优势. 为此, 金曼等人<sup>[14]</sup>提出了端点误差控制刀位的算法, 它采用表征公差带范围的有效特征线段的两端点对刀具进行优化定位, 实现了行宽方向 2 个相邻刀位的首尾衔接, 从而减少了刀轨重叠, 提高了实际加工效率. Xu 等人<sup>[15]</sup>提出了适用于 MPM 算法的双线驱动刀轨规划方法, 该方法首先用 MPM 算法来确定一条刀路上的所有刀位, 然后根据所有刀位处的最小加工带宽得到两条驱动线, 最后用 MPM 算法对刀具进行重新定位, 使两条驱动线作为两条切触点轨迹, 由此消除了相邻刀轨衔接处的尖锐残高, 提高了表面加工质量. 但是, 对于计算效率比 MPM 算法和 Hermite 算法更快的旋转法, 目前还没有相对应的刀轨规划方法. 因此, 为了推动旋转法在复杂曲面多点切触加工中的应用, 本文提出了特征参数线刀轨规划算法, 并通过实例验证了该算法的正确性和有效性.

## 1 旋转法的特性

在旋转法中,先确定圆环面刀具在工件曲面误差限等距曲面上局部坐标系中的初始位置,然后通过调整刀轴矢量来获得所求的多点刀位,最终刀具表面和工件曲面可以在最小主曲率方向两侧获得 2 个切触点.实际上,这 2 个切触点是伪切触点,并不满足绝对切触条件,但由于 2 个切触点之间的最大欠切误差能够得到很好的控制,因此刀具和工件曲面之间可以获得很大的加工带宽.同时,旋转法还可以有效地避免刀具和工件曲面之间的局部过切,从而不需要额外的局部过切检测及修正处理.

图 1 为采用旋转法进行多点切触加工的示意图.



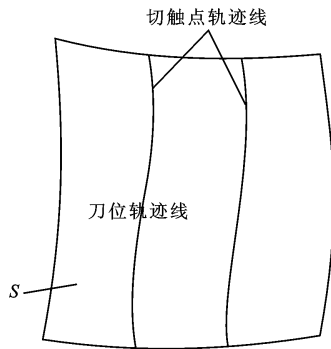
S:工件曲面; T:刀具圆环面; K:刀具环心圆曲线; O:圆环面中心;  $c_1, c_2$ : T和S的2个切触点; R, r: T的环心圆半径和圆角小半径;  $P_a, P_b$ : S上的点投影;  $Q_a, Q_b$ : K上的点;  $\lambda_{\min}$ : 最小主曲率方向;  $w$ : 加工带宽度

图1 旋转法多点切触加工示意图

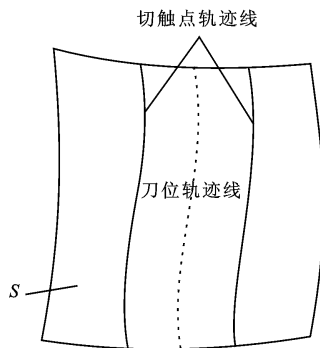
在利用旋转法确定所求刀位时,除了满足避免局部过切条件以外,还要求  $c_1$  和  $c_2$  之间的最大欠切误差不能大于给定的最大加工误差  $e$ ,这是在相同的加工精度下,多点刀位算法可以获得比单点刀位算法大得多的加工带宽的根本原因.另外,从图中阴影部分容易看出,误差分布沿  $c_1$  和  $c_2$  连线方向呈现出多点切触加工特有的 W 形状,而那些单点刀位算法的误差分布则通常呈现出 U 形或者 V 形.假定刀具进给方向与  $\lambda_{\min}$  一致,  $Q_a$ 、 $Q_b$  代表使得  $T$  和  $S$  之间的距离等于  $e$  时的点.由于加工带宽应该在  $S$  上进行度量<sup>[14]</sup>,则  $\omega$  可由下式求出

$$\mathcal{W} = \left\| \overline{P_a P_b} \times \lambda_{\min} \right\| \quad (1)$$

多点刀位算法来自于不同的理论基础,这使得它们在刀轨规划方面也有一定的差异性。传统的多点刀位算法如 MPM 算法首先选定一条刀触点轨迹,并由此确定第 1 个刀触点,然后根据最大曲率估计方法求得第 2 个刀触点,最后通过调整刀轴矢量来得到满足切触条件和无干涉条件的多点刀位。可以看出,在利用 MPM 算法进行刀轨规划时,用于刀位计算的轨迹线即为一条切触点轨迹线,如图 2a 所示。旋转法的刀位计算轨迹线位于 2 个切触点轨迹线之间,如图 2b 所示。



### (a) MPM 算法



### (b) 旋转法

图 2 刀位轨迹线与切触点轨迹线的关系

## 2 特征参数线刀轨规划算法

### 2.1 特征点和特征参数线的定义

根据旋转法的误差分布特性,对于某条刀路上的任意刀位,一定存在着一对使得  $w$  最大时的在  $S$  上的临界点,这 2 个点分别被称为该刀位处的左特征点和右特征点,而由一条刀路上所有刀位处左特征点形成的曲线被称为左特征曲线,由所有右特征点所形成的曲线被称为右特征曲线。

假定参数曲面为  $S(u, v)$  ( $u, v \in [0, 1]$ ),如图 3 所示,刀路轨迹按照  $S$  的  $v$  参数线进行编排,且选定  $S$  的左边界( $u=0$ )作为初始刀路. 定义  $N_p$  代表完成整个曲面加工所需的刀路数量,  $M_{cc}$  代表每条刀路上在误差允许范围内按照等参数方法离散得到的刀位点数量,  $u_i$  ( $i=1, 2, \dots, N_p$ ) 代表  $S$  上的第  $i$  条刀路,  $P_{i,j}^l$  ( $j=1, 2, \dots, M_{cc}$ ) 和  $P_{i,j}^r$  ( $j=1, 2, \dots, M_{cc}$ ) 分别代表  $u_i$  上第  $j$  个刀位处的左特征点和右特征点,  $t_i^l$ 、 $t_i^r$  则分别代表  $u_i$  的左特征曲线和右特征曲线. 用  $P_{i,m}^l$  ( $m \in [1, M_{cc}]$ ) 代表  $t_i^l$  上使得  $u$  参数值最大的点,则其对应的  $u$  参数线被称为  $u_i$  的左特征参数线,用  $u_i^l$  表示. 同样,  $t_i^r$  上使得  $u$  参数值最小的特征点  $P_{i,k}^r$  ( $k \in [1, M_{cc}]$ ) 所对应的  $u$  参数线被称为  $u_i$  的右特征参数线,用  $u_i^r$  表示.  $u_i^l$  和  $u_i^r$  之间的曲面阴影区域则被称为  $u_i$  的特征参数加工区域。

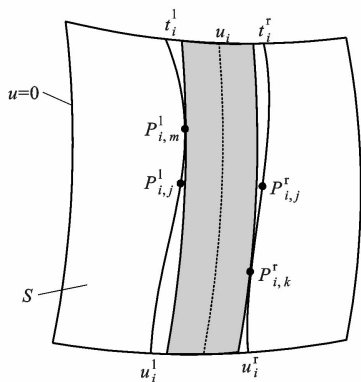


图 3 特征参数线刀轨规划原理

### 2.2 算法的基本原理

特征参数线刀轨规划算法的基本原理是使下一条刀路的左特征参数线和当前刀路的右特征参数线重合,即有  $u_{i+1}^l = u_i^r$ , 这样所有规划刀路对应的特征参数加工区域的集合恰好构成一张完整的曲面片,这可以通过不断调整决定下一条刀路的  $\Delta u$  的迭代判断过程来实现. 利用特征参数线刀轨规划算法加工  $S$  的流程如图 4 所示,具体步骤如下。

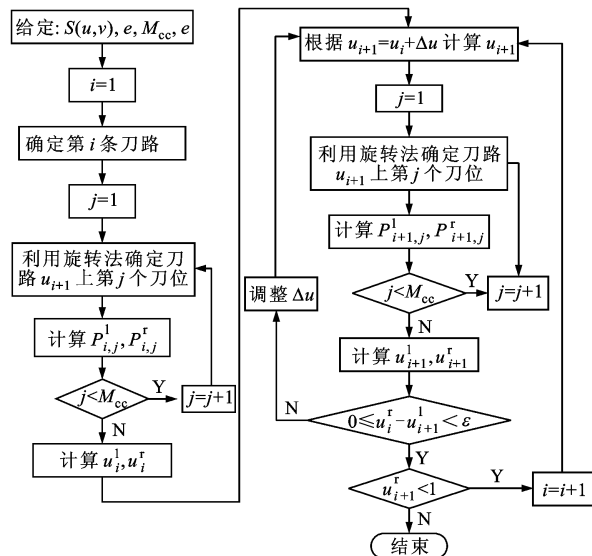


图 4 特征参数线刀轨规划算法流程图

**步骤 1** 选择  $S$  的左边界(即参数  $u=0$  的  $v$  参数线)作为第 1 条刀路  $u_0$ , 设定  $e$ , 确定每一条刀路上的  $M_{cc}$ 。

**步骤 2** 利用旋转法求得刀路  $u_i$  上所有  $M_{cc}$  个位置处的最优刀位, 计算所有刀位处的左特征点和右特征点, 即  $P_{i,j}^l$  ( $j=1, 2, \dots, M_{cc}$ ) 和  $P_{i,j}^r$  ( $j=1, 2, \dots, M_{cc}$ )。通过比较判断, 容易得到  $u_i$  的左特征参数线和右特征参数线。

**步骤 3** 根据  $u_{i+1} = u_i + \Delta u$ , 得到新的刀路  $u_{i+1}$ , 按照步骤 2 可以得到  $u_{i+1}$  的左特征参数线  $u_{i+1}^l$  和右特征参数线  $u_{i+1}^r$ 。

**步骤 4** 给定极小正数  $\epsilon$ , 判断  $0 \leq u_i^r - u_{i+1}^l < \epsilon$ , 如果满足, 则继续下一步; 如果不满足, 则需要调整  $\Delta u$ 。初始  $\Delta u$  可根据曲面具体情况进行设置, 然后转到步骤 3。

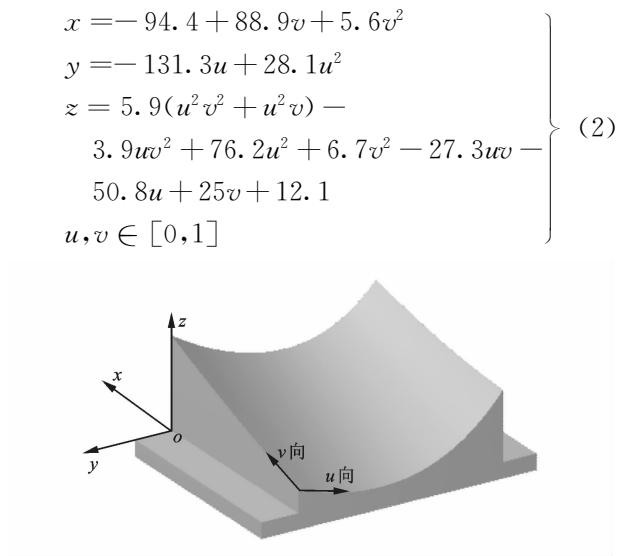
**步骤 5** 判断终止条件  $u_{i+1}^r > 1$ , 如果满足, 程序结束, 否则转到步骤 3, 继续求下一条刀路。

从算法原理可以看出, 完成上述刀路计算过程的关键是能够快速准确地计算出任意刀位处的左特征点和右特征点, 即  $P_{i,j}^l$  ( $j=1, 2, \dots, M_{cc}$ ) 和  $P_{i,j}^r$  ( $j=1, 2, \dots, M_{cc}$ )。在旋转法中, 通常需要先构造距离  $S$  为  $r$  的等距面  $S_1$ , 将圆环面刀具  $T$  与  $S$  的相对位置关系简化为  $K$  与  $S_1$  的相对位置关系, 然后向后旋转刀具, 并根据  $S, K$  的参数方程来确定满足条件的最优刀位. 可见,  $K$  实际上是代表了圆环面刀具, 通常可以将  $K$  离散成若干个采样点, 然后分别求这些采样点到  $S$  的最小距离, 用这些最小距离减去  $r$ , 就可以得到某刀位的误差分布. 因此, 容易根据点到

曲面的最小距离算法,先找到  $K$  到  $S$  的距离等于  $r$  和  $e$  之和时的左特征点和右特征点,然后得到每一条刀路的左特征参数线和右特征参数线,并由此实现刀轨编排.

### 3 算法实例分析

为了验证本文提出的特征参数线刀轨规划算法的正确性,选择模具行业中常用的参数凹曲面<sup>[7-8, 14-15]</sup>作为研究对象,如图 5 所示.曲面的参数方程如下



采用  $R$  为 8 mm、 $r$  为 5 mm 的圆环面刀具来加工该参数凹曲面,给定  $e$  为 0.01 mm.由曲面的曲率特性可知,曲面的最小主曲率方向在  $v$  参数方向附近,因此将刀具沿着曲面的  $v$  参数方向走刀,以获得最好的加工效果.设迭代步长  $\Delta u$  的最小判断精度  $\epsilon = 10^{-3}$ ,用旋转法来实现圆环面刀具的定位.从表 1 中可以看出,任意一条刀路的右特征参数线对应的  $u$  参数值在精度范围内大于其下一条刀路的左特征参数线对应的  $u$  参数值,当某刀路的右特征参数线对应的参数值大于  $1(u_{13}^r = 1.015\ 8)$  时,整个曲面片即可以被完整地加工出来.

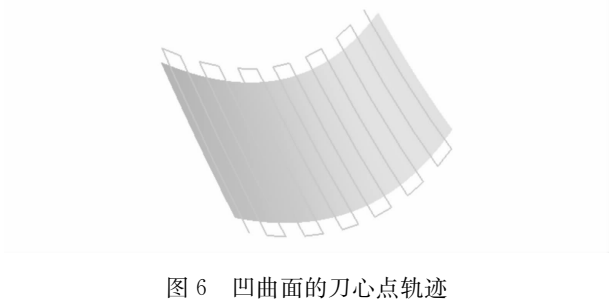
刀位算法和刀轨排列算法对于曲面的实际加工效率有着很大的影响.在 UG 软件中,选择可变轴曲面轮廓的铣模块,驱动方式选择曲面区域,刀轴控制方式选择“相对于驱动”,将前置角设为  $8^\circ$ ,侧倾角设为  $0^\circ$ ,残余高度设为 0.01 mm,则用 UG 软件中的刀位算法、刀轨排列算法加工参数凹曲面需要 31 条刀路.当利用旋转法确定最优刀位,再根据所有参数线处的最小加工带宽利用等参数线法进行刀轨规

表 1 刀路轨迹及其左右特征参数线对应的  $u$  参数值

| $i$ | $u_i$ | $u_i^l$  | $u_i^r$ |
|-----|-------|----------|---------|
| 1   | 0.000 | -0.028 3 | 0.036 7 |
| 2   | 0.067 | 0.035 7  | 0.107 5 |
| 3   | 0.140 | 0.107 2  | 0.183 3 |
| 4   | 0.218 | 0.182 8  | 0.264 2 |
| 5   | 0.298 | 0.260 6  | 0.346 6 |
| 6   | 0.383 | 0.342 3  | 0.433 1 |
| 7   | 0.460 | 0.415 9  | 0.510 8 |
| 8   | 0.541 | 0.492 4  | 0.591 5 |
| 9   | 0.628 | 0.575 8  | 0.678 3 |
| 10  | 0.716 | 0.661 1  | 0.765 0 |
| 11  | 0.805 | 0.751 0  | 0.849 5 |
| 12  | 0.890 | 0.837 1  | 0.931 9 |
| 13  | 0.975 | 0.923 3  | 1.015 8 |

注: $i$  为第 1~第 13 条刀路.

划时,加工参数凹曲面需要 17 条刀路,而同样先用旋转法确定优化刀位,然后再用特征参数线刀轨规划算法加工参数凹曲面时,则只需要 13 条刀路,如图 6 所示,显然加工效率得到了进一步的提高.将采用旋转法和特征参数线刀轨规划算法得到的数控加工程序在 VERICUT 软件中进行仿真,利用其自带的 Auto-Diff 功能,对仿真后的参数凹曲面和输入的实际参数凹曲面进行比较,结果显示加工误差小于 0.01 mm,这也从侧面说明了旋转法和特征参数线刀轨规划算法的正确性.



在北京交通大学双转台式五坐标数控机床上进行了曲面的实际加工实验,选用瑞福泰圆环面刀具,型号为  $26 \times 200\text{-C}25\text{-}2\text{T}$ ,  $R = 8\text{ mm}$ ,刀片型号为 RPMW1003,  $r = 5\text{ mm}$ .设主轴转速为 2 000 r/min,进给速度为 300 r/min,工件材料为普通铝.为保证表面加工质量,切削方式选为单向,加工后得到的参

数凹曲面如图7所示。

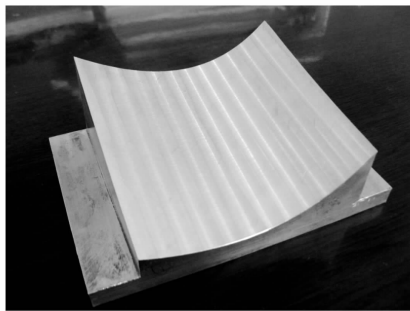


图7 加工后的参数凹曲面

## 4 结 论

(1)本文对旋转法的多点切触加工特性进行了深入分析,提出了特征点和特征参数线的定义.在此基础上,提出了适用于旋转法的特征参数线刀轨规划算法.该算法可以获得光顺无干涉的刀路,加工效率相比于等参数线法得到了明显提高,有利于推动旋转法在复杂曲面多点切触加工中的应用.

(2)今后在进行刀位轨迹规划时可以考虑机床的运动学和动力学特性,使得对刀轴矢量的规划结果不仅满足刀位及刀轨规划算法的要求,同时也符合机床的运动学和动力学特性,以充分发挥五轴加工的高速高效运行潜力.

## 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] ENGELI M, WALDVOGEL J, SCHNIDER T. Method for processing work pieces by removing material; US, 6485236 B1 [P]. 2002-11-26.
- [5] GRAY P, BEDI S, ISMAIL F. Arc-intersect method for 5-axis tool positioning [J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(7): 663-674.
- [6] 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]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 203-206.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] ELBER G, COHEN E. Toolpath generation for free-form surface models [J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(6): 490-496.
- [10] HUANG Y, OLIVER J. Non-constant parameter NC tool path generation of sculptured surfaces [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1994, 9(5): 281-290.
- [11] DING S, MANNAN M A, POO A N, et al. The implementation of adaptive isoplanar tool path generation for the machining of free-form surfaces [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(7/8): 852-860.
- [12] SURESH K, YANG D C H. Constant scallop-height machining of free-form surfaces [J]. Journal of Engineering for Industry, 1994, 116(2): 253-259.
- [13] LEE Y S. Non-isoparametric tool path planning by machining strip evaluation for 5-axis sculptured surface machining [J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(7): 559-570.
- [14] 金曼,张俐,陈志同. 圆环面刀具五坐标加工端点误差控制刀位优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1125-1128.
- JIN Man, ZHANG Li, CHEN Zhitong. End-points error controlling method for torus tool position optimization in five-axis NC machining [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9): 1125-1128.
- [15] 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.

(编辑 管咏梅)