

文章编号:1000-582X(2010)09-008-06

多轴联动砂带磨削刀触点路径规划及几何仿真

张伟文^{1,2}, 郭钢¹, 张岳^{1,2}, 黄云^{1,2}

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044;

2. 重庆市材料表面精密加工及成套装备工程技术研究中心, 重庆 400021)

摘要:采用多轴联动计算机数字控制系统的砂带磨削设备能够高效率加工具有复杂型面的零件。针对该类砂带磨削设备,提出了自由曲面上的等参路径规划算法和等间距截面路径规划算法。路径规划算法中的相邻刀触点的计算是根据磨具在进给方向的有效投影位置确定。等间距路径规划算法用最小二乘法来获取较优的截面法向。为了提高路径规划设计效率,减少试验以提高经济效益,开发出基于线性磨削模型的砂带磨削几何仿真程序。汽轮机叶片加工的试验结果表明该算法能够很好地应用于复杂型面的刀具路径规划设计。

关键词:磨削;多轴联动数控加工;几何仿真;路径规划

中图分类号:TH164;TG586

文献标志码:A

Tool path planning and geometry simulation for multi-axis CNC belt grinding

ZHANG Wei-wen^{1,2}, GUO Gang¹, ZHANG Yue^{1,2}, HUANG Yun^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chongqing Engineering Research Center for Material Surface Precision Machining and Whole Set Equipments, Chongqing 400021, P. R. China)

Abstract: Belt grinding machine with multi-axis computer number control (CNC) system can effectively process parts with complex moulding surfaces. In this paper, iso-parametric and iso-planar tool path planning strategies customized for this kind of machine are proposed. The tool path generation methods are designed based on the analysis of the belt grinding process. By using least square method, optimized cross section normal is computed in the iso-planar method. To improve the design efficiency of path planning, reduce experiments and increase economical benefit, the geometric simulation program based on linear grinding model is developed. Experiment on a turbine blade profile shows that the proposed algorithms work satisfyingly.

Key words: grinding; multi-axis CNC; geometry simulating; tool path planning

砂带磨削是以砂带为磨具的一种磨削加工方式。砂带磨头的接触轮和砂带都采用柔性材料制作,柔性材料的使用让砂带磨削很适合用于各种材

料的粗/精加工和抛光工艺。多轴联动计算机数字控制系统的采用大大提高了砂带磨削的加工效率以及能力,使砂带磨削设备可以实现对复杂型面的

收稿日期:2010-04-01

基金项目:重庆市重点科技攻关项目(CSTC 2007AB3004;CSTC 2008AB3014)

作者简介:张伟文(1977-),男,重庆大学博士研究生,主要从事计算机辅助工程研究。

郭钢(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)cqguogang@163.com。

精密加工^[1-2]。

目前对复杂型面上的刀具路径规划算法的研究大多是针对铣加工的,对砂带磨削的多轴数控刀具路径规划算法研究则比较少。在数控加工过程中,刀具路径规划指的是根据加工精度和误差等要求在加工曲面上计算出的一系列刀位点的过程。提高刀具路径规划的质量能直接影响到数控加工效率,因此设计合适的路径规划算法十分重要。常用的路径生产方法可大致分为6类。分别有:等参法^[3]、等距偏移法^[4]、等间距截面法^[5]、等残留高度法^[6]、等辐法^[7]以及一些有特定要求而设计的路径规划算法^[8-13]。Wang等设计了一个5轴联动端铣等圆锥法的路径规划算法^[14]。采用该算法刀具轴向进给以及转向均较为平缓,不过刀具轨迹总长较大。杨清好等设计了5轴联动数控砂带磨床上汽轮机叶片的路径规划算法^[15]。Sarma等研究了铣加工后的精磨路径规划算法^[16],该算法是根据分析铣加工后的残留痕迹来优化磨削路径。对特殊情况的路径规划方面的研究有:Chen等提出一个适合加工带陡峭曲面零件的五轴铣加工刀具轨迹规划方法^[9],该方法的主要特点是把曲面变化剧烈区域(如马鞍点、极点处)分离出来单独精细加工。Lazoglu等提出一个最小化切削力的路径生成方法^[12],使用该方法可以平稳加工过程的切削力,从而提高表面加工质量。Park等对存在裂痕以及重叠缺陷的CAD模型设计了一个3轴联动路径规划算法^[13]。Castagnetti等从定义刀具取向域概念出发来建立几何约束模型,并据此设计出平滑刀具走向和避免碰撞刀具路径规划方法^[8]。吴宝海等综述了自由曲面上5轴联动铣加工的路径规划的研究成果^[17]。从查阅的文献发现多轴联动数控磨削设备尤其是6轴联动数控砂带磨削设备的路径规划研究甚少。

鉴于等参路径生成算法和等间距平面算法的适应性强和具有较好的稳定性^[3,5,18],笔者根据砂带磨削的加工特点设计出适合6轴联动数控砂带磨床加工复杂曲面的等参和等间距刀具路径规划算法。等参路径规划算法中的 u/v 等参参数之间的最大距离是由砂带磨削体在进给方向的投影关系确定。截面法向方向和截面间间距是等间距路径规划算法核心部分。为了得到较短的规划路径,等间距算法中的截面法向方向由曲面曲率计算确定。

另外,为了提高路径规划的设计效率,开发了砂带磨削加工的几何仿真程序。利用该仿真程序,可以很好地检查路径规划设计的性能和效率。

1 多轴联动砂带磨削技术

1.1 砂带磨削原理

砂带磨削属于涂附磨具磨削的一种,它的磨头主要由砂带、驱动轮、张紧轮和接触轮4部分组成,如图1(a)所示。砂带是砂带磨削的“刀具”,它由驱动轮带动,由接触轮施力和工件接触,利用砂带上磨粒实现磨削。

在砂带磨削加工过程中,砂带加工有效接触面近似于圆柱形,其截面如图1(b)所示。 O 是接触轮中心点, n 是其法线方向, t' 是侧向方向,且 $t' \perp n$ 。由空间几何理论可知,在三维空间砂带磨头的位置只需6个自由度参数即可确定。因此,6轴CNC设备能够驱动砂带磨头实现任意位置的磨削。砂带磨削加工体的三维实体近似于一扇状圆柱体,直接采用该实体去研究磨削过程比较困难。为了降低难度,笔者将用该实体在进给方向有效磨削投影面来研究磨削过程。如图1(c)所示,砂带磨头的磨削加工体(接触轮+砂带)投影到以进给方向为法向的平面的投影图形是平行四边形。根据该分析结果,砂带磨削过程中的有效加工体运动轨迹可视为带有仿射变化的平行四边形沿着既定路径作扫掠运动。

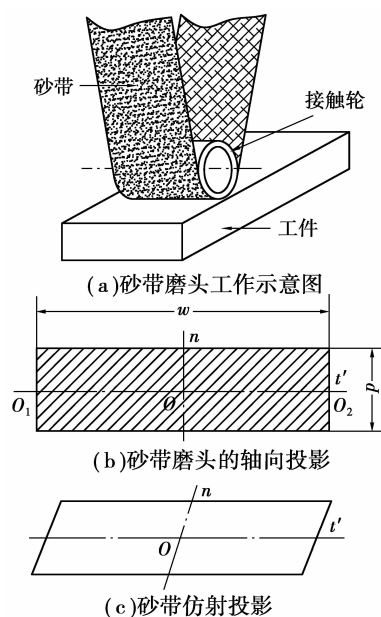


图1 砂带磨头的二维简化投影

1.2 6轴联动砂带磨削平台

笔者研究的设备原型是用于加工核电高压容器的6轴联动数控砂带磨床(参见图2)。该设备提供3个轴向运动X、Y、Z和3个旋转轴向运动

A、B、C。设备的 Z 轴位于磨头一侧,提供小尺度的进给控制。

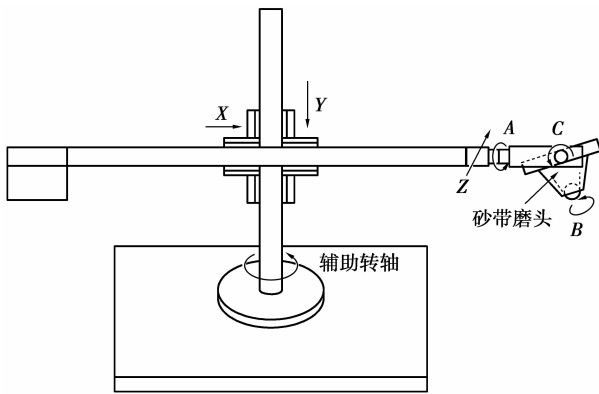


图 2 6 轴联动砂带磨床

2 刀具路径规划

2.1 刀触点等参算法的设计

在 NUBRS 曲面上,NUBRS 等参线是指固定某 u 或 v 数值,曲面上所有对应点 (u, v) 集合。等参路径规划迹算法是通过设定一系列的 u 或 v 值,然后通过这些参数值在加工 NUBRS 曲面上产生相应等参曲线作为加工轨迹。在初始化首条等参路径之后,等参路径规划的下一等参路径是由前一个 u/v 等参曲线路径来确定的。

首先,确定砂带磨削刀具各轴向方向和刀触点坐标。如图 3 所示 c 为一已知刀具路径。 P 是过在路径 c 上刀触点 T_1 且法向为 c 切向的截面。图中平行四边形为砂带磨削刀具体在进给方向的有效切削投影面。取曲面在该接触点 T_1 的法向方向作为磨头轴向方向 n, t 与 n 垂直。取磨头侧向方向 $t' = n \times t$ 。此时,路径 c 上 T_1 点的刀触点的坐标和方向均已确定。

下一路径的 u 值参数可由当前路径 c 和残留高度 h 确定。先考虑与点 T_1 对应的邻近候选刀触点位置。图 3 中 l 为 P 和加工曲面交线。曲率变化不大的情况下,下一相邻点进给方向与当前点相近。现取同向,以方便计算。在给定最大残留高度 h 的情况下,下一最远的邻近刀触点位置应位于当前的截面交线 l 上,且不超过 Q 点。 Q 距离 T_1 弧长为—个砂带有效宽度 w 。位于 T_1 邻近候选刀触点的有效切削投影面应和前—位置有效切削投影面相交,且交点到 l 的距离和 h 相等。采用迭代算法容易在区间 (T_1, Q) 计算下一刀位点位置 T_2 。

等参路径规划算法的最终邻近等参路径 u/v 参数值是由当前等参曲线上所有邻近候选刀触点中对应的最小参数值来确定的。等参刀具路径规划参见算法 1。

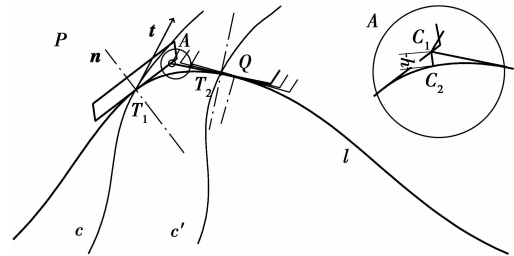


图 3 邻近候选刀触点计算示意图

算法 1 (u 向等参刀具路径规划算法)

输入:加工曲面 S ,加工精度 h ,当前轨迹等参路径 c 。

输出:下一等参路径 c' 。

过程:

1) 采用弦截法离散化曲线 c ,得到点列集合 $\{C\}$ 。

2) 计算 $\{C\}$ 上所有点的最远候选参数点集。于候选点集中提取最近参数点的相应 u 参数作为下一等参路径参数值 u' 。

3) 将参数 u' 生成等参数曲线作为下一刀具轨迹 c' 。

2.2 等间距刀具路径规划法的设计

等间距截面法是用一组平行截平面和加工曲面相交,截取得到的交曲线来作为刀具路径。截平面之间的间距将根据最大残留高度 h 来确定,具体计算类似于前面等参路径规划算法。该算法的难点在于确定截面的法向和截面间的间距。普通等间距截面算法大多采用和坐标轴相垂直的平面。这样常会产生很差的刀具路径规划。为了提高砂带磨削的加工效率,选取适当的截面法线方向十分必要。

如图 2 所示,砂带磨削的“刀具”截面是一矩形,加工效率易受曲面的曲率变化影响。在加工直纹面的时候,应选取直纹面的最小曲率为 0 的方向为 t' 方向以使残留高度为 0。可见,当接触轮 t' 方向和刀触点曲率最小方向同向时,能提高加工的效率。

为了确定曲面上较优的截面方向,笔者取曲面上最小曲率方向信息做处理。先将曲面离散化为 $(n \times m)$ 个点,求出所有点的最小曲率向量,在三维空间中以原点为起点,对每点最小曲率作一矢量,这样可以获取最小曲率的向量集合。用最小二乘法,

可以获得一个优化曲率向量,该曲率与其他最小曲率的欧式距离最小。该优化曲率向量的曲率方向将作为截面的法线方向。

和等参轨迹计算下一等参曲线参数值类似,等间距路径规划法的相邻截面最远间距也可由其有效切削投影面和残留高度 h 决定。磨头的方向也和等参算法一致。平面间的间距具体计算和等参法相似。详细的等间距路径规划算法参见算法 2。

算法 2(等间距法路径规划算法)

输入:加工曲面 S , 残留高度 h , 截平面起始点 Q 。

输出:离散化路径轨迹。

过程:

1) 离散化曲面, 计算离散点最小曲率。用最小二乘法求得曲率方向为截面法线方向 t 。

2) 根据候选点 Q 和法线方向 t 获得初始截平面 P , 并求出平面 P 和曲面 S 的交线 c 。

3) 根据加工精度, 用弦线自适应步长算法离散化截线 c 为点列。

4) 和算法 1 类似, 根据 c 切线方向构造的投影截面, 计算最远间距 d 。

5) 设置 $Q+d \cdot t$ 为 Q , 返回 2), 重新计算, 直到截面超出 S 。

6) 再以 t 反向方向 $-t$ 为截面法向量, 原候选点 Q 为起始点, 在反方向求加工路径。

2.3 路径规划示例

以一个含有正弦形状曲面矩形体工件为试样。其尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 加工精度为 0.01 mm , 砂带有效加工宽度 10 mm 。图 4 给出采用上述 2 个算法可以获得正弦曲面上的路径。

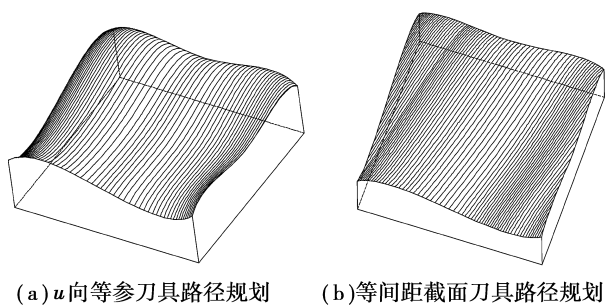


图 4 刀具路径规划示例

表 1 以路径总长和路径转向次数为性能参数给出 3 个生成路径的性能数据。数据表明上述算法产生的路径性能相似, 差别并不大。

表 1 刀具路径规划性能

路径规划类型	路径总长/mm	路径条数(转向次)
等间距截面法	5 682.89	54
等参法(u 向)	5 582.84	56
等参法(v 向)	5 785.02	55

3 几何仿真程序及试验

仿真程序将以 Spatial 公司的 ACIS 三维建模开发工具作为核心, 在 Visual C++ 编译环境下开发仿真程序。仿真程序首先通过一磨削模型来确定磨削率, 然后构造磨具的扫掠体, 最后使用 ACIS 三维实体的布尔操作实现磨削加工仿真。

3.1 磨削率的确定

在砂带磨削加工过程中, 除了刀具路径规划之外, 还有其他的加工参数影响整个加工过程。砂带的磨削量和这些磨削参数密切相关。Hamann 提出一个线性模型^[19]。该模型可以通过输入磨削参数计算平均去除率, 其表达式为

$$r = C_A K_A k_t \frac{v_b}{v_w L_w} F_A, \quad (2)$$

式中: r 是平均去除率; C_A 是待定磨削常量; K_A 是工件和砂带阻尼因子常量; v_b 、 v_w 、 L_w 和 F_A 分别是砂带磨削速度、工件进给速度、磨削宽度和法向作用力。在确定以上参数后, 可以得到相应磨削去除率。

3.2 几何仿真设计

如前面 2.1 节所述, 砂带加工过程视为一个仿射平行四边形在空间的扫掠过程。在获得所需的磨削参数之后, 利用式(2)可以确定磨削去除率, 进而确定每个刀触点的进给深度。类扫掠体可由刀具路径上的关键插值点建立有效切削面构造。为了减少仿真误差, 每两个仿真体之间可以插入一定数量的简化平行四边形实现更精确的拟合。插入位置使用欧式距离的线性插值, 而轴向角度则是采用弧度的线性插值。插值体如图 5 所示, I_{AB} 为平行四边形体 A 和 B 之间的插值体。在构造完单个扫掠体后, 仿真过程采用布尔差操作实现仿真加工结果。具体算法参见算法 3。

算法 3(仿真程序)

输入: 待加工工件, 刀具路径插值点集 $\{P\}$ 。

1) 提取单个刀具路径 p 。

2) 由 p 上相邻两个路径刀触点构建有效切削体矩形截面。

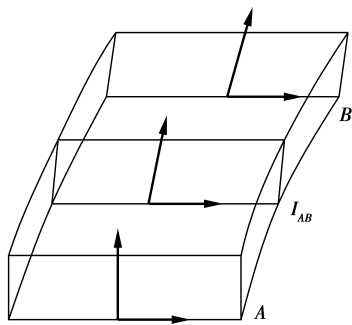


图 5 加工轨迹仿真体示意图

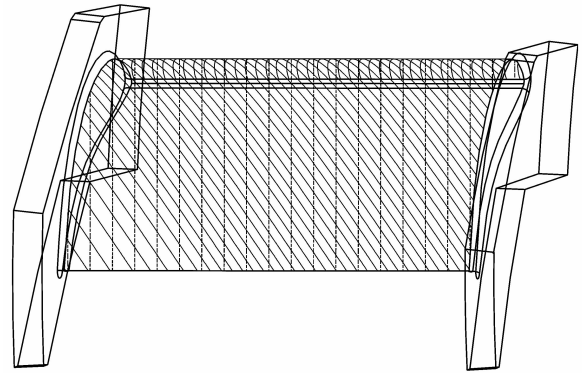


图 6 叶片等间距路径规划生成路径

a. 在两路径点间线性插入有效磨削体截面。

b. 根据起点、插值点和终点切削体矩形截面构造扫掠体。

3) 合并整条路径的扫掠实体。

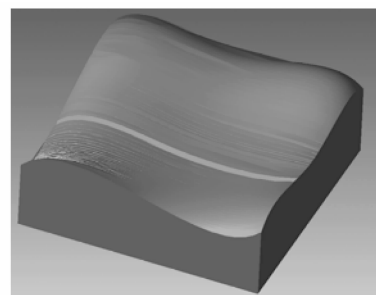
4) 路径扫掠实体和工件实体进行差布尔操作, 实现仿真加工。

5) 提取下一路径作为 p , 返回 2), 如此循环直到完成所有路径的仿真加工。

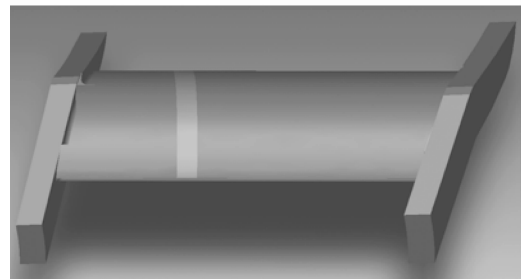
3.3 仿真试验

仿真试验将采用 2.3 节正弦曲面零件以及汽轮机叶片分别对等参路径规划和等间距路径规划算法实现仿真。正弦曲面零件将采用 2.3 节所示的 u 向等参路径, 路径总长 5 582.84 mm, 路径数 54, 其他加工参数同 2.3 节。汽轮机叶片待加工曲面为可展直纹面, 其面积为 10 452.72 mm², 周长 414.42 mm。加工叶片的砂带接触轮宽度设为 10.00 mm, 直径为 10.00 mm。加工精度取 0.02 mm。采用算法 2 根据优选的截面法向方向可以算出较佳刀具路径。计算得出的叶片曲面刀具路径总长为 1 642.04 mm, 路径数 21, 如图 6 垂直母线方向的虚线路径。作为对比, 另求出以 (0.100, 0.50, 0.85) 为截面法向量的等间距刀具路径, 得到路径的总长为 3 929.48 mm, 路径数 55, 如图 6 倾斜细实线路径。对刀具路径总长及路径数进行对比可以发现, 由于使用较好的截面法向采用算法 2 获取刀具路径总长小, 加工效率更高。

在加工仿真过程中, 假设 v_b 、 v_w 和 F_A 在加工过程中是不变量, L_w 磨削宽度由砂带接触轮和原零件实体的接触长度决定。采用算法 3 便可根据刀具轨迹生成加工仿真体。仿真效果见图 7, 图中高亮区域是单条刀具路径所产生的加工痕迹。



(a) 正弦曲面实体加工仿真结果



(b) 叶片加工仿真结果

图 7 正弦曲面实体及汽轮机叶片仿真示例

4 结束语

讨论了砂带磨削的特点, 根据砂带磨削在进给方向的有效加工面投影来确定在给定残留高度的最近邻近候选点, 并据此设计出等参轨迹生成算法和等距截面轨迹生成算法。除此之外, 以 ACIS 为造型核心设计出砂带磨削的磨削加工几何仿真程序, 仿真结果较好地反应了实际加工的结果。不过由于仿真程序是基于以边界模型为核心的 ACIS 开发的仿真程序且采用布尔操作实现的几何加工仿真, 所以该仿真程序的运算速度较慢, 不适合用于实时仿真。为了提高仿真速度, 采用其他方式来实现实时砂带磨削仿真将是今后的研究内容。

参考文献:

- [1] 黄云,黄智. 砂带磨削的发展及关键技术[J]. 中国机械工程, 2007, 18(18):2263-2267.
HUANG YUN, HUANG ZHI. Development and key technologies of abrasive belt grinding [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(18):2263-2267.
- [2] HUANG Z, HUANG Y, ZHANG W, et al. The development of large high efficient CNC gantry grinder for vessel head in nuclear power[J]. Key Engineering Materials, 2009, 416(9):421-425.
- [3] WANG Y, TANG X. Five-axis NC machining of sculptured surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, 15(1):7-14.
- [4] HATNA A, GRIEVE R J, BROOMHEAD P. Offsetting 3D contours on parametric surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(3):189-195.
- [5] CHEN T, YE P. A tool path generation strategy for sculptured surfaces machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(3):369-373.
- [6] TOURNIER C, DUC E. A surface based approach for constant scallop height tool-path generation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(5):318-324.
- [7] YIN Z W, JIANG S W. Iso-phot based adaptive surface fitting to digitized points and its applications in region-based tool path generation, slicing and surface triangulation[J]. Computers in Industry, 2004, 55(1):15-28.
- [8] CASTAGNETTI C, DUC E, RAY P. The domain of admissible orientation concept: a new method for five-axis tool path optimisation [J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(9):938-950.
- [9] CHEN Z C, FU Q. A practical approach to generating steepest ascent tool-paths for three-axis finish milling of compound NURBS surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(11):964-974.
- [10] CHOI Y K, BANERJEE A, LEE J W. Tool path generation for free form surfaces using Bézier curves/surfaces[J]. Computers & Industrial Engineering, 2007, 52(4):486-501.
- [11] GRAY P J, ISMAIL F, BEDI S. Arc-intersect method for-axis tool paths on a 5-axis machine [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(1):182-190.
- [12] LAZOGLU I, MANAV C, MURTEZAOGLU Y. Tool path optimization for free form surface machining[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1):101-104.
- [13] PARK S C, CHANG M. Tool path generation for a surface model with defects[J]. Computers in Industry, 2010, 61(1):75-82.
- [14] WANG N, TANG K. Five-axis tool path generation for a flat-end tool based on iso-conic partitioning[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(12):1067-1079.
- [15] 杨清好,陈尔昌,鲍剑斌,等. 五坐标联动叶片砂带磨削的刀位点计算[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(2):30-34.
YANG QING-HAO, CHEN ER-CHANG, BAO JIAN-BIN, et al. CLDATA calculation of the turbine blade profile by 5-axis belt grinding [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1994, 22(2):30-34.
- [16] SARMA R, DUTTA D. Tool path generation for NC grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(3):177-195.
- [17] 吴宝海,罗明,张莹,等. 自由曲面五轴加工刀具轨迹规划技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10):9-18.
WU BAO-HAI, LUO MING, ZHANG YING, et al. Advances in tool path planning techniques for 5-axis machining of sculptured surfaces[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10):9-18.
- [18] DING S, MANNAN M A, POO A N, et al. Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(2):141-153.
- [19] HAMMANN G. Modellierung des abtragsverhaltens elastischer robotergeführter schleifwerkzeuge [D]. Stuttgart, Germany: University Stuttgart, 1998.

(编辑 张 莘)