

五轴联动刀轴矢量插补优化算法

王玉涛, 唐清春, 周泽熙, 黎国强

(广西科技大学 工程训练中心, 广西 柳州 545006)

摘要: **目的** 研究解决五轴联动机床旋转轴角度采用线性插补方式生成的加工轨迹, 导致刀具姿态偏离所设计的理想平面, 引发刀具姿态误差的问题, 减少非线性误差, 提高零件表面质量。 **方法** 首先对旋转轴角度线性插补方式引发刀具姿态误差的原理进行了分析, 提出了一种刀轴矢量插补优化算法。然后在线性插补的基础上, 根据提出的刀轴矢量插补优化算法保证首末点间的刀轴插补矢量始终位于首末刀轴矢量所构成的平面内, 实现刀具姿态优化, 并在 MATLAB 中对线性插补和矢量插补优化两种方式进行仿真分析, 观测出对应方式下刀轴插补矢量的空间位置。最后利用叶片试件在 AB 型转台摆头类型机床上进行仿真和加工验证, 对比两种刀轴矢量插补方式仿真数据。 **结果** 在 VERICUT 同等条件下仿真, 刀轴矢量采用线性插补时, 叶片进出汽边误差值分别为 $-0.218\ 66\ \text{mm}$ 和 $-0.312\ 58\ \text{mm}$; 刀轴矢量插补优化后, 叶片进出汽边误差值分别为 $-0.095\ 46\ \text{mm}$ 和 $-0.099\ 05\ \text{mm}$ 。刀具姿态经过插补优化算法后, 叶片进出汽边的过切值明显降低。 **结论** 刀具姿态经过插补优化算法后, 叶片过切值的大小和数目明显减少, 使得非线性误差明显降低, 从而提高了零件表面质量。

关键词: 线性插补; 刀具姿态误差; 非线性误差; 优化算法; 仿真和加工; 表面质量

中图分类号: TG54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0090-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.012

Optimization Algorithm of Tool Axis Vector Interpolation in Five-axis Linkage

WANG Yu-tao, TANG Qing-chun, ZHOU Ze-xi, LI Guo-qiang

(Engineering Training Center, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of tool attitude deviation from designed ideal plane due to machining trajectory of rotary axis angle of the five-axis linkage machine in linear interpolation mode, reduce nonlinear error and improve surface quality of parts. Principle of tool attitude error caused by linear interpolation mode of rotary axis was analyzed, and an optimization algorithm of tool axis vector interpolation was proposed. Then, based on the proposed algorithm, the tool axis vector interpolation algorithm was adopted to ensure that the tool axis interpolation vector between the first and last points was always in the plane formed by the first and last tool axis vectors, and the tool attitude optimization was realized. The two modes were simulated and analyzed in MATLAB, and spatial position of the tool axis interpolation vector in corresponding mode was ob-

收稿日期: 2018-02-11; 修订日期: 2018-03-21

Received: 2018-02-11; Revised: 2018-03-21

基金项目: 广西教育厅项目 (0314101401); 广西自然科学基金 (2015GXNSFBA139219)

Fund: Guangxi Education Department Project (0314101401); National Natural Science Foundation of Guangxi (2015GXNSFBA139219)

作者简介: 王玉涛 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数控多轴加工技术研究。

Biography: WANG Yu-tao (1992—), Male, Master, Research focus: NC multi-axis machining technology.

通讯作者: 唐清春 (1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为数控多轴加工技术研究。

Corresponding author: TANG Qing-chun (1972—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: NC multi-axis machining technology.

刀轴矢量 \mathbf{v} (v_x, v_y, v_z) 与旋转轴角度对应的变换关系为:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A \\ 0 & \sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B & 0 & \sin B \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

即:

$$\begin{cases} v_x = \sin B \\ v_y = -\sin A \cos B \\ v_z = \cos A \cos B \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为绕 X 轴旋转的旋转角度; B 为绕 Y 轴旋转的旋转角度。

2 刀轴矢量插补优化算法

刀轴矢量插补优化算法的基本思想是: 首先在相邻刀轴矢量插补的过程中, 使得插补的刀轴矢量始终位于首末刀轴矢量所形成的平面上, 然后将插补的刀轴矢量转换成机床旋转轴的旋转角度, 最终达到减小非线性误差的目的。

如图 2 所示, 设工件坐标系为 $O_w X_w Y_w Z_w$, 将初始刀轴矢量 \mathbf{v}_1 和终止刀轴矢量 \mathbf{v}_2 移动到工件坐标系的原点 O_w , 在理想情况下, 各插补点处的刀轴矢量都应在相邻刀轴矢量平面上。以工件坐标系的原点 O_w 作为新坐标系的原点, 以不共面的矢量 \mathbf{e}_x 、 \mathbf{e}_y 、 \mathbf{e}_z 作为新坐标系的一组基, 构成新坐标系的 x_0 轴、 y_0 轴和 z_0 轴, 故工件坐标系到新坐标系的过渡矩阵为 $\mathbf{E} = [\mathbf{e}_x^T, \mathbf{e}_y^T, \mathbf{e}_z^T]^T$, 假设 $\mathbf{L}_w = (L_{xj}, L_{yj}, L_{zj})^T$, $\mathbf{L}_n = (u'_j, v'_j, w'_j)^T$, 根据坐标变换公式, 工件坐标系和新坐标系存在如下关系:

$$\mathbf{L}_w = \mathbf{E} \cdot \mathbf{L}_n \quad (3)$$

式中: \mathbf{L}_w 为 L 点在工件坐标系中的坐标; \mathbf{L}_n 为 L 点在新坐标系中的坐标; \mathbf{E} 为工件坐标系到新坐标系的过渡矩阵。

过渡矩阵 \mathbf{E} 的单位矢量 \mathbf{e}_x 、 \mathbf{e}_y 、 \mathbf{e}_z 具有如下关系:

$$\begin{cases} \mathbf{e}_x = \frac{(\mathbf{e}_y \times \mathbf{e}_z)}{|\mathbf{e}_y \times \mathbf{e}_z|} \\ \mathbf{e}_y = \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{e}_z = \frac{(\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2)}{|\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2|} \end{cases} \quad (4)$$

首先需计算初始刀轴矢量 \mathbf{v}_1 和终止刀轴矢量 \mathbf{v}_2 间的夹角:

$$\theta = \arccos(\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2) \quad (5)$$

刀轴矢量插补优化算法原理示意图如图 3 所示, 可知初始刀轴矢量 \mathbf{v}_1 和终止刀轴矢量 \mathbf{v}_2 之间的线性插补就是在新坐标系的平面内进行线性插补。在新坐标系下, 初始刀轴矢量为 $\mathbf{v}_1 = (0, 1, 0)$, 终止刀轴矢量

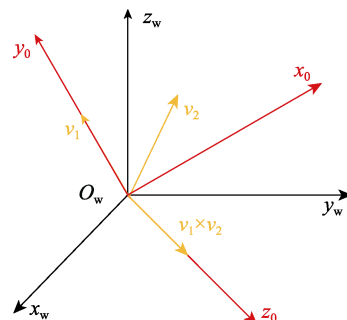


图 2 刀轴矢量坐标变换示意图

Fig.2 Schematic diagram for coordinate transformation of tool axis vector

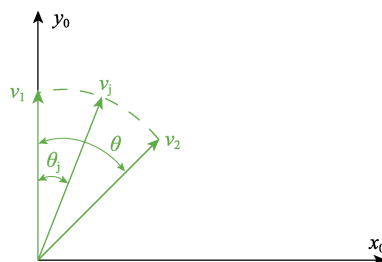


图 3 刀轴矢量平面插补原理示意图

Fig.3 Schematic diagram for plane interpolation principle of tool axis vector

为 $\mathbf{v}_2 = (\sin \theta, \cos \theta, 0)$, 因此可以按照平面线性插补得到新坐标系下的刀轴矢量。

其次对 θ 进行线性插补, 得到插补刀轴矢量与初始刀轴矢量 \mathbf{v}_1 的夹角:

$$\theta_j = j \cdot \frac{\theta}{n} \quad (6)$$

然后在新坐标系的平面内进行圆弧插补, 得到的插补刀轴矢量为:

$$\begin{cases} u'_j = -\sin \theta_j \\ v'_j = \cos \theta_j \\ w'_j = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由此可得在新坐标系下的刀轴矢量, 最后根据式(3)进行坐标转换得到在工件坐标下的刀轴矢量 $\mathbf{L}_w = (L_{xj}, L_{yj}, L_{zj})^T$, 其结果为:

$$\begin{cases} L_{xj} = -(\mathbf{v}_{y1} \cdot (\mathbf{v}_{x1} \cdot \mathbf{v}_{y2} - \mathbf{v}_{y1} \cdot \mathbf{v}_{x2})) - \mathbf{v}_{z1} \cdot (\mathbf{v}_{z1} \cdot \mathbf{v}_{x2} - \mathbf{v}_{x1} \cdot \mathbf{v}_{z2})) \cdot \sin(\theta_j) + \mathbf{v}_{x1} \cdot \cos(\theta_j) \\ L_{yj} = -(\mathbf{v}_{z1} \cdot (\mathbf{v}_{y1} \cdot \mathbf{v}_{z2} - \mathbf{v}_{y1} \cdot \mathbf{v}_{z2})) - \mathbf{v}_{x1} \cdot (\mathbf{v}_{x1} \cdot \mathbf{v}_{y2} - \mathbf{v}_{y1} \cdot \mathbf{v}_{x2})) \cdot \sin(\theta_j) + \mathbf{v}_{y1} \cdot \cos(\theta_j) \\ L_{zj} = -(\mathbf{v}_{x1} \cdot (\mathbf{v}_{z1} \cdot \mathbf{v}_{x2} - \mathbf{v}_{x1} \cdot \mathbf{v}_{z2})) - \mathbf{v}_{y1} \cdot (\mathbf{v}_{y1} \cdot \mathbf{v}_{z2} - \mathbf{v}_{z1} \cdot \mathbf{v}_{y2})) \cdot \sin(\theta_j) + \mathbf{v}_{z1} \cdot \cos(\theta_j) \end{cases} \quad (8)$$

设由旋转轴角度线性插补方法求得的刀轴矢量为 \mathbf{v}_j , 由刀轴矢量插补优化算法求得的刀轴矢量为 \mathbf{L}_w , 以两刀轴矢量的夹角作为刀具姿态误差的评价, 即两矢量的夹角为:

$$\eta = \arccos(\mathbf{v}_j \cdot \mathbf{L}_w)$$

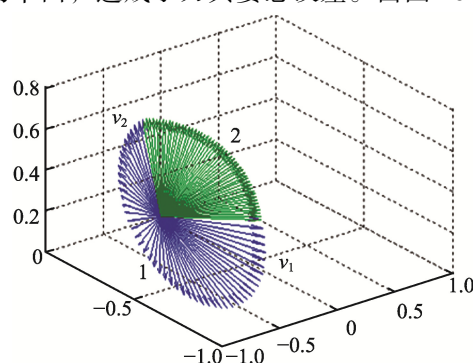
(9)

3 仿真分析与实验

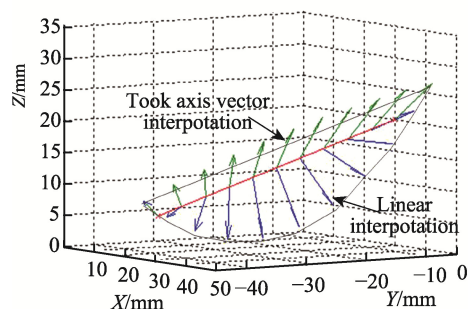
3.1 MATLAB 仿真分析

为了验证刀轴矢量插补优化算法的正确性, 利用 MATLAB 对旋转轴线性插补方式产生刀具姿态误差的原理、线性插补与刀轴矢量插补优化算法和刀具姿态误差分布进行了对比分析。

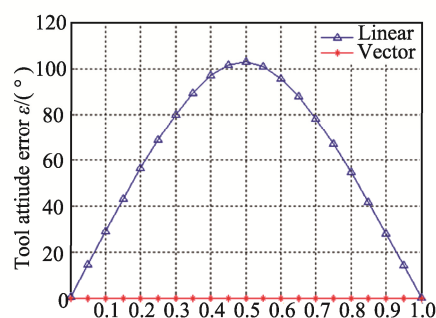
图 4 为仿真效果图。由图 4a 中, \mathbf{v}_1 和 \mathbf{v}_2 为任意两相邻刀轴矢量, 曲面 1 为旋转轴角度线性插补算法时的刀轴矢量所在的曲面, 平面 2 为理想的两相邻刀轴矢量所在的平面。由图 4a 可知, 旋转轴角度线性插补过程中的刀轴矢量偏离出相邻刀轴矢量所形成的平面, 造成了刀具姿态误差。由图 4b 可知,



a 旋转轴角度线性插补时的刀轴矢量



b 两种插补方法仿真效果对比



c 刀具姿态误差分布

图 4 仿真效果

Fig.4 Simulation results: (a) tool axis vector in linear interpolation of rotating axis angle, (b) comparison of simulation effects of two interpolation methods, (c) tool attitude error distribution

刀轴矢量插补优化算法的插补刀轴矢量始终落在首末刀轴矢量所形成的平面上, 而线性插补方式的刀轴矢量明显偏离首末刀轴矢量所构成的平面。与旋转轴角度线性插补方法相比, 刀轴矢量插补优化算法有效地修正了刀具姿态误差。由图 4c 可知, 非线性误差 ε 最大值出现在相邻刀位点的中点附近, 此时旋转轴角度线性插补方法的最大刀具姿态误差 $\eta_{\max}=102.985$ rad, 且刀轴矢量插补优化算法不会产生刀具姿态误差, 在实际加工中可以有效地减小非线性误差。

3.2 实验验证

叶片作为复杂曲面的典型代表, 在加工过程中进出汽边刀轴矢量变化非常剧烈, 若非线性误差过大, 会导致过切或欠切现象。为验证该方法的有效性, 本文采用一透平叶片作为试件进行相关的实验论证。

3.2.1 NC 程序处理

刀位文件处理过程中设置判断角 $\varepsilon_{\text{许用}}$, 当刀位文件中两相邻刀轴矢量的夹角 ε 大于许用角度时, 移动轴位移采用中点插值法和旋转轴角度采用刀轴矢量插补优化算法进行插值, 直到相邻刀轴矢量的夹角 ε 小于许用角度 $\varepsilon_{\text{许用}}$ 为止。图 5 是后置处理得到的优化前后部分 NC 程序对比示意图, 其中相邻刀轴矢量设置了许用角度为 0.08° 。由图 5a 可知, 当相邻刀轴矢量夹角 ε 大于 0.08 时, 旋转轴角度会采用刀轴矢量插补。经后置处理得到图 5b 所示的优化后程序, 从图 5b 中明显发现在原

```
N92 G01 X251.923 Y2.4 Z63.65 A99.137 B12.179
N93 G01 X251.924 Y7.756 Z63.385 A104.251 B12.452
N94 G01 X251.925 Y13.114 Z62.637 A109.408 B12.783
N95 G01 X251.927 Y18.467 Z61.388 A114.643 B13.174
N96 G01 X251.929 Y23.726 Z59.641 A119.919 B13.619
N97 G01 X251.931 Y28.717 Z57.461 A125.111 B14.104
N98 G01 X251.933 Y33.442 Z54.868 A130.254 B14.624
N99 G01 X251.935 Y37.909 Z51.866 A135.389 B15.181
```

a 优化前

```
N92 G01 X251.923 Y2.4 Z63.65 A99.137 B12.179
N93 G01 X251.924 Y5.078 Z63.574 A101.693 B12.328
N94 G01 X251.924 Y7.756 Z63.385 A104.251 B12.452
N95 G01 X251.925 Y10.44 Z63.068 A106.829 B12.627
N96 G01 X251.925 Y13.114 Z62.637 A109.408 B12.783
N97 G01 X251.926 Y15.801 Z62.07 A112.024 B12.991
N98 G01 X251.927 Y18.467 Z61.388 A114.643 B13.174
N99 G01 X251.928 Y21.109 Z60.573 A117.276 B13.409
N100 G01 X251.929 Y23.726 Z59.641 A119.919 B13.619
N101 G01 X251.93 Y26.24 Z58.606 A122.511 B13.875
N102 G01 X251.931 Y28.717 Z57.461 A125.111 B14.104
N103 G01 X251.932 Y31.102 Z56.216 A127.678 B14.377
N104 G01 X251.933 Y33.442 Z54.868 A130.254 B14.624
N105 G01 X251.934 Y35.261 Z53.819 A132.819 B14.916
N106 G01 X251.935 Y37.909 Z51.866 A135.389 B15.181
```

b 优化后

图 5 优化前后的部分 NC 程序

Fig.5 Before and after optimization of partial NC program: (a) before optimization of partial NC program; (b) after optimization of partial NC program

有程序量的基础上增加了近一倍,使得刀轴矢量更加接近设计理想平面,从而降低刀具姿态误差。

3.2.2 VERICUT 仿真加工

为了验证刀轴矢量插补优化算法的有效性,试件通过 VERICUT 仿真软件进行虚拟加工^[8-9]。通过 UG 生成刀位文件,将刀位文件经过专用后置处理软件^[10]生成 NC 程序。图 6 和图 7 分别是优化前程序仿真加工和优化后程序仿真加工的过切数目比较,可得图 6 过切数目明显多于图 7。表 1 是对叶片采用两种插补方式仿真加工后,随机选择相同点的过切值比较。通过数值比较得出,在叶片进、出汽边处,采用线性插补加工比插补优化算法加工产生的过切量分别多 0.213 53、0.1232 mm,具体数值见表 1。根据以上可知,刀轴矢量插补优化算法可有效减少叶片的非线性误差,验证了该算法的有效性和正确性。

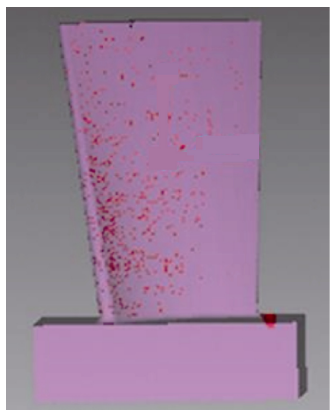


图 6 优化前 G 代码仿真加工
Fig.6 Original G code simulation processing

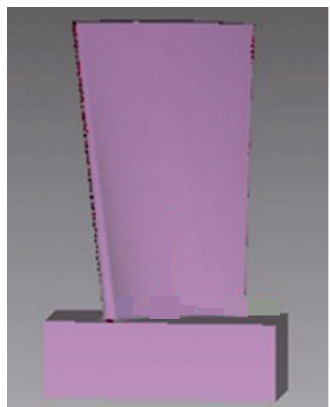


图 7 优化后 G 代码仿真加工
Fig.7 Optimized G code simulation processing

表 1 检测数据
Tab.1 Test data

插补方式	出汽边过切量/mm	进汽边过切量/mm
线性插补	-0.218 66	-0.312 58
刀轴矢量插补	-0.095 46	-0.099 05

3.2.3 实例验证

利用 UG 软件生成叶片的刀位轨迹并导出刀位文件,将刀位文件经过专用后置处理得到优化的 NC 程序,然后利用上述 VERICUT 仿真软件进行加工实验,最终的实物效果如图 8 所示。由实物加工效果可知,采用刀轴矢量插补优化算法后,叶片未出现明显的过切、欠切现象,刀具在叶片翻边过程中,刀具未出现明显的颤动,过渡平稳,叶片内背弧曲面及过渡圆角处光滑,轮廓误差达到工艺设计要求,验证了刀轴矢量插补优化算法的正确性。



图 8 叶片实物效果图
Fig.8 Effect picture of real blade

3.3 实验结果讨论

通过上述仿真、实际铣削加工,验证了本文提出的算法的有效性。虚拟仿真加工验证了提出的刀轴矢量插补角方法的正确性。实际切削验证了该方法可应用于实际工程。通过叶片的实际铣削加工,验证了该方法能在传统的线性插补基础上更加有效地解决非线性误差问题,提高复杂曲面零件的轮廓制造精度。

目前,该方法虽然可以大大降低非线性误差的影响,提高复杂曲面零件(特别是曲率变化大的复杂零件)轮廓精度。然而,该方法需基于后置处理技术,在传统运动学模型的基础上加载误差判断条件对前置处理刀位源文件进行优化处理。因此,后续研究工作需要开发专用的后置处理软件。

4 结论

1) 根据五轴联动机床运动模型,可分析出非线性误差的产生机理 A 、 B 回转角的取值关系,并可进行多种组合优化选择。

2) 首末刀触点的刀轴矢量构建矢量平面进行中间点插补,获取插补点控制矢量,可减小非线性误差值。

3) 基于后置处理技术,利用机床的运动模型,

加载矢量插补算法, 通过控制许用误差值, 可快速获得满足非线性误差要求的 G 代码程序, 从而提高复杂曲面零件的轮廓精度。

参考文献:

- [1] 么居标, 曹著明, 孙红梅, 等. 复杂曲面五轴数控加工关键技术研究[J]. 机械设计与制造, 2017(7): 128-130.
YAO Ju-biao, CAO Zhu-ming, SUN Hong-mei, et al. The Research of Key Technology Based on Five Axis NC Machining of Complex Surface[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2017(7): 128-130.
- [2] 吴大中, 王宇晗, 冯景春, 等. 五坐标数控加工的非线性运动误差分析与控制[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(10): 1608-1612.
WU Da-zhong, WANG Yu-han, FENG Jing-chun, et al. Analysis and Control of the Nonlinear Errors in Five-axis NC Machining[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2007, 41(10): 1608-1612.
- [3] 杨旭静, 周元生, 陈泽忠, 等. 五轴数控加工中旋转轴运动引起的非线性误差分析与控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 140-146.
YANG Xu-jing, ZHOU Yuan-sheng, CHEN Ze-zhong, et al. Analysis and Control of Tool Path Interpolation Error in Rotary Axes Motions of Five-axis CNC Milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 140-146.
- [4] 周艳红, 周济, 周云飞, 等. 五坐标数控加工的理论误差分析与控制[J]. 机械工程学报, 1999, 35(5): 54-57.
ZHOU Yan-hong, ZHOU Ji, ZHOU Yun-fei, et al. Theoretical Error Analysis and Control of Five Axis NC Machining[J]. Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(5): 54-57.
- [5] 樊宏, 周席光, 王尚锦. 用特定向量控制刀轴矢量的任意曲面数控加工算法研究[J]. 机械设计与制造, 2002(6): 64-65.
FAN Hong, ZHOU Xi-guang, WANG Shang-jin. Research on NC Machining Algorithm of Arbitrary Curved Surface for Controlling Cutter Axis Vector with Specific Vector[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2002(6): 64-65.
- [6] 武跃, 王宇晗, 毕庆贞. 五轴联动数控加工中旋转角的优化和选择[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(5): 1-4.
WU Yue, WANG Yu-han, BI Qing-zhen. Optimization and Selection of Rotations of Five-axis Machining[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2009(5): 1-4.
- [7] 樊留群, 齐党进. 五轴联动刀轴矢量平面插补算法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 158-162.
FAN Liu-qun, QI Dang-jin. Plane Interpolation of Tool Orientation Algorithm for 5-axis Circumference Milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 158-162.
- [8] 唐青春, 刘谦, 马仲亮, 等. VERICUT 仿真软件在五轴联动加工中的应用研究[J]. 组合机床与自动化技术, 2014(9): 131-133.
TANG Qing-chun, LIU Qian, MA Zhong-liang, et al. The Application Research of Vericut Simulation Software in Five Axis Machining[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(9): 131-133.
- [9] 沈渤飞, 牛兴华, 赵锐, 等. 刀具轨迹优化及多轴数控加工仿真研究[J]. 制造业自动化, 2014, 36(22): 9-12.
SHEN Bo-fei, NIU Xing-hua, ZHAO Rui, et al. Study on Tool Path Optimization and Multi-axis NC Machining Simulation[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(22): 9-12.
- [10] 唐青春, 黎国强, 刘谦, 等. 摆头转台五坐标数控机床后置处理算法的研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(16): 21-23.
TANG Qing-chun, LI Guo-qiang, LIU Qian, et al. Study on Post-processing Algorithm for Five-axis NC Machine Tool with Table-rotating[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(16): 21-23.