

文章编号: 1005-5630(2019)05-0059-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2019.05.009

# 非球面磁性复合流体抛光路径误差分析与仿真

钱大兵, 姜 晨, 姚 磊, 彭 涛, 张勇斌

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093;  
2. 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 针对光学系统中对非球面元件的精度要求, 设计了直线光栅式的抛光轨迹, 并用磁性复合流体以这一抛光轨迹抛光非球面。根据抛光轨迹和非球面方程计算出每个抛光点的坐标; 根据抛光点坐标和抛光头的抛光姿态计算出对应的抛光头中心点的坐标; 建立相邻两抛光点的弓高误差模型, 仿真出弓高误差模型并分析弓高误差的变化规律; 根据弓高误差变化规律, 用等弓高误差变步长控制算法实现弓高误差的一致性, 提高加工质量。

**关键词:** 磁性复合流体; 非球面; 等弓高误差; 路径规划

**中图分类号:** TH 161 **文献标志码:** A

## The error analysis and simulation of magnetic compound fluid polishing for aspheric components

QIAN Dabing, JIANG Chen, YAO Lei, PENG Tao, ZHANG Yongbin

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** According to the accuracy requirements of aspheric components in the optical systems, the linear grating polishing trajectory of magnetic compound fluid polishing is designed to polish aspheric components. Based on the polishing trajectory and the aspheric equation, the coordinates of each polishing processing point are calculated. The coordinates of the center point of the polishing head are calculated according to each polishing point and the polishing head which is relative to the geometry of the workpiece. The model of high-height error between each polishing point is established, and the variation rule of the surface arch error of workpiece is simulated by the model. According to the variation rule of the surface arch error, the equal arch error control algorithm is used to achieve arch error consistency and improve processing quality.

**Keywords:** magnetic compound fluid; aspheric; equal arch error; path planning

收稿日期: 2019-01-17

作者简介: 钱大兵(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械工程。E-mail: 18217117992@163.com

通信作者: 姜 晨(1978—), 男, 副教授, 研究方向为精密加工及检测技术。E-mail: jc\_bati@163.com

## 引 言

随着科学技术的快速发展,光学仪器的制造水平也越来越高,对光学元件的要求也不断提升。非球面具有成像质量好、质量轻、光能损失少、精度高、体积小等优点,广泛应用于变焦镜头、天文望远镜等之中。随着对非球面元件需求的增大,非球面元件的加工技术也逐步趋于完善。目前常用的加工技术有计算机控制表面成形、磁流变抛光、离子束加工、精密成型等,其中抛光作为非球面加工的最后一项关键技术,近年来也经历了快速的发展<sup>[1]</sup>。

磁场辅助抛光作为一种新型的加工技术近年来受到美国、日本等发达国家的高度重视,并且广泛应用于光学元件、半导体等有较高表面精度的零件的加工中。日本的 TAIA 等<sup>[2]</sup>研发了磁流体(MF)抛光技术,将松散的磨粒混合到磁流体中,通过磁场控制磨粒在磁流体中的机械运动和抛光,磨料颗粒的分散性较好,但粘度较低,从而使磨料颗粒的滞留量较小。美国 Roch 大学光学研究中心的 Prokhorov 等<sup>[3]</sup>研发了磁流变加工技术,磁流变液(magnetorheological fluid, MRF)是通过均匀混合煤油、磨料粒子、纯铁粉得到的,通过其在磁场中的磁流变性进行光整加工, MRF 粘度比较高、加工效率高,但是磨料的分布不是很均匀。日本的 Shimada 等<sup>[4]</sup>提出了一种新型的磁性复合流体抛光液(MCF), MCF 是 MF 和 MRF 的混合物,它结合了两者的优点,它的粘度和颗粒分布的稳定性都比较高,在磁场作用下产生较大的磁力,具有良好的抛光性能。

目前我国也开展了相关的研究:张健等<sup>[5]</sup>提出了小磨头自适应抛光的方法,对铣削后中频误差较大的非球面进行预抛光,抑制中频误差;潘日等<sup>[6]</sup>基于大口径轴对称光学非球面,设计制造了一套气囊抛光系统,并对其结构进行了仿真分析;王宏一<sup>[7]</sup>研究了阿基米德螺旋线的线间距变化规律和重叠率规律,提出了一种等重叠率的螺旋线轨迹规划方法。由于现有的研究不涉及非球面的 MCF 抛光,本文采用线性光栅轨迹规划方法对弓高误差进行仿真分析,采用等弓高误差的变步长控制算法<sup>[8]</sup>,通过仿真模拟分析了弓高误

差和步长之间的规律,实现了弓高误差的可控性,为磁性复合流体抛光非球面的精度控制提供参考。

## 1 抛光路径规划

### 1.1 加工路径规划

在传统加工中:常用的规划方法有直线光栅式、螺旋线式、Hilbert 曲线等;常用的行距确定方法有参数线法、截平面法、等残留高度法;常用的步长确定方法有等参数步长法、等弦长步长法、等弓高步长法,但这些方法主要应用于铣削和磨削加工中。

抛光加工是抛光头沿着设定好的抛光轨迹进行驻留抛光的过程。对不同的抛光轨迹,有不同的抛光方法,即使是同一种抛光轨迹抛光不同的工件,抛光的效果也不同,因此选择合适的抛光轨迹显得尤为重要。目前常用的抛光轨迹是直线光栅式和螺旋线式抛光轨迹,因为螺旋线式抛光轨迹在平面上投影的线距变化较大,导致轨迹间去除区域的接触面积变化较大,抛光效果不好<sup>[9]</sup>,本文采用直线光栅式轨迹对非球面抛光进行研究。

### 1.2 路径规划算法

主要有以下 4 步:

(1)建立非球面数学模型,非球面的方程可以表示为

$$F(x,y,z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 \quad (a \geq 0, b \geq 0, c \geq 0) \quad (1)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为非球面的中半轴、长半轴、短半轴。

基于非球面方程,采用直线光栅式轨迹规划得到工件上抛光点的坐标为  $P(x,y,z)$ 。

(2)在加工过程中,抛光头的自转轴与抛光头和加工面接触点的法线的夹角(即进动角)始终保持不变,求出点  $P(x,y,z)$  关于工件表面的单位法向量,即

$$\mathbf{n} = (F_x, F_y, F_z) = \left( \frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}, \frac{\partial F}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中:  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  为加工点的单位法向量在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的分量;  $\partial F/\partial x$  为非球面方程关于  $x$  的偏导方程;  $\partial F/\partial y$  为非球面方程关于  $y$  的偏导方程;  $\partial F/\partial z$  为非球面方程关于  $z$  的偏导方程。

(3) 设抛光头中心点坐标为  $A(x_a, y_a, z_a)$ , 半径为  $r$ , 如图 1 所示。

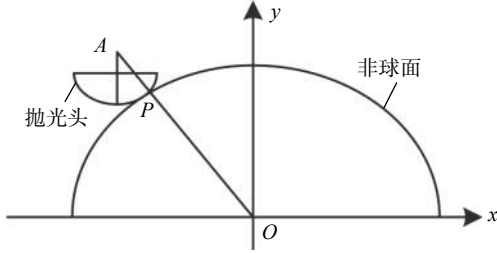


图 1 抛光头中心坐标

Fig. 1 The center point of the polishing head

根据抛光点与抛光头中心点的几何关系, 可以算出抛光头中心点的坐标为

$$\begin{cases} x_a = x + \frac{F_x}{I}r \\ y_a = y + \frac{F_y}{I}r \\ z_a = z + \frac{F_z}{I}r \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$I = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (4)$$

(4) 根据线性光栅的轨迹规划, 得到各抛光点的抛光头中心坐标, 即可得到抛光头中心的

$$(x-x_1)\cos\theta_1 - (y-y_1)\sin\theta_1 + x_1 - \Delta x_1 = -a((x-x_1)\sin\theta_1 + (y-y_1)\cos\theta_1 + y_1 - \Delta y_1 - y_0)^2 - x_0 \quad (8)$$

旋转后  $P_2$  的方程为

$$(x-x_2)\cos\theta_2 - (y-y_2)\sin\theta_2 + x_2 - \Delta x_2 = -a((x-x_2)\sin\theta_2 + (y-y_2)\cos\theta_2 + y_2 - \Delta y_2 - y_0)^2 - x_0 \quad (9)$$

联立式(8)、式(9), 求出交点坐标  $N(x_N, y_N)$ , 过  $P_1$ 、 $P_2$  作直线  $P_1P_2$ , 该直线方程为

$$(y-y_2)/(y_1-y_2) = (x-x_2)/(x_1-x_2) \quad (10)$$

过点  $N$  作  $MN$  垂直于  $P_1P_2$ , 计算过程中用线段  $P_1P_2$  代替弧线  $P_1P_2$ , 所以定义  $MN$  为弓高误差  $d$ , 该误差可表示为

$$d = \frac{|y_N(x_1-x_2) - x_N(y_1-y_2) + y_1x_2 - x_1y_2|}{\sqrt{(x_1-x_2)^2 + (y_1-y_2)^2}} \quad (11)$$

轨迹。

## 2 加工误差分析及控制

### 2.1 建立误差模型

在用 MCF 进行自由曲面精密抛光的过程中, 使用短线段连接来逼近原来的曲线, 即用弦长代替弧长, 就会产生弓高误差, 且弓高误差不可避免。本文在研究弓高误差时, 假设每个抛光点的驻留时间都相等。假设抛光头初始位置在  $P_0(x_0, y_0)$ , 抛光头对工件去除轮廓的一半, 即

$$x = -a(y-y_0)^2 - x_0 \quad (5)$$

$P_0(x_0, y_0)$  为初始点,  $P_1(x_1, y_1)$  为第一个抛光点,  $P_2(x_2, y_2)$  为第二个抛光点, 两个抛光点坐标相对于初始点坐标产生了  $\Delta x_1$ 、 $\Delta y_1$ 、 $\Delta x_2$ 、 $\Delta y_2$  增量。图 2 为抛光过程示意图, 由于抛光过程中进动角保持不变, 抛光头从  $P_0$  到  $P_1$  需要旋转  $\theta_1$ , 抛光头从  $P_0$  到  $P_2$  需要旋转  $\theta_2$ , 则  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为:

$$\theta_1 = \arccos \frac{OP_0 \cdot OP_1}{|OP_0||OP_1|} \quad (6)$$

$$\theta_2 = \arccos \frac{OP_0 \cdot OP_2}{|OP_0||OP_2|} \quad (7)$$

旋转后  $P_1$  的方程为

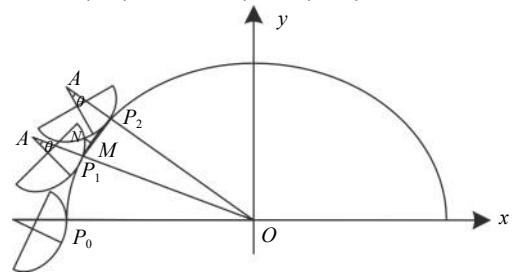


图 2 抛光过程示意图

Fig. 2 Schematic of polishing process

### 2.2 误差分析

根据上述建立好的 MCF 抛光误差模型, 通

过 MATLAB 仿真抛光轨迹、抛光头中心点轨迹和弓高误差。在仿真过程中设抛光头的圆弧半径为 50 mm，非球面方程的参数如表 1 所示。

表 1 非球面及工件参数  
Tab. 1 Aspheric and workpiece parameters

参数	取值
非球面长半轴 $b/\text{mm}$	200
非球面中半轴 $a/\text{mm}$	120
非球面短半轴 $c/\text{mm}$	100
工件尺寸 $/\text{mm} \times \text{mm}$	400×240

根据直线光栅式的加工轨迹和抛光头中心点的计算方法，可以仿真出抛光轨迹和抛光头中心轨迹，如图 3 所示。

图 4(a) 所示，根据直线光栅式的抛光轨迹，当步长变大其  $y$ - $z$  平面内的弓高误差也变大，当步长变小其  $y$ - $z$  平面内的弓高误差也变小。MATLAB 仿真结果表明：当  $y$  的值从

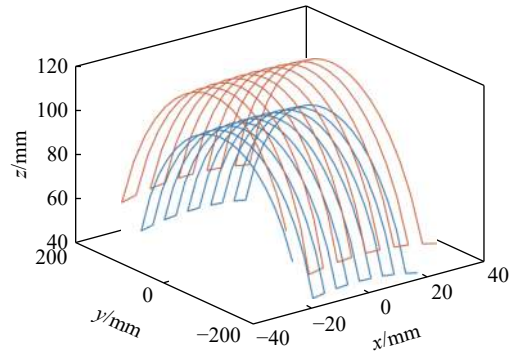
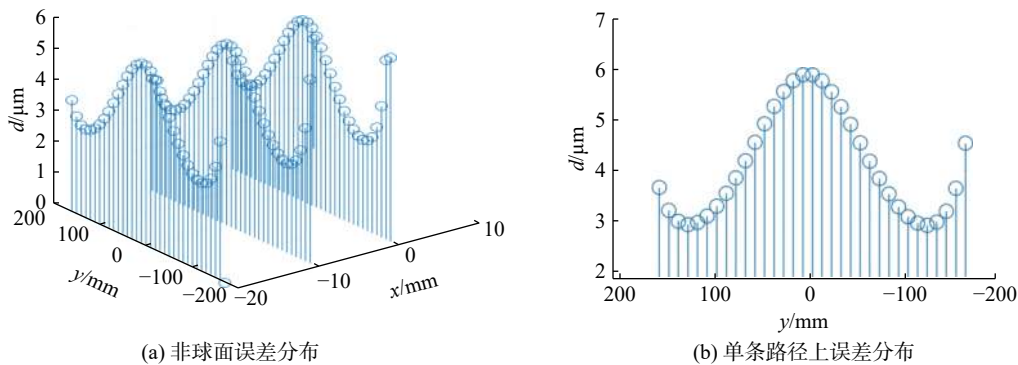


图 3 抛光头中心运动轨迹

Fig. 3 Motion trace of the center of the polishing head

-180 到 0 时，弓高误差  $d$  先减小后增大，当  $y$  的值从 0 到 180 时，弓高误差先减小再增大；在同一时刻， $x$  轴方向上的后一条轨迹的弓高误差的减小趋势比前一条减小的趋势更大；如图 4(b) 所示，在  $y$  等于 0 附近时，误差达到最高，在  $y$  等于 120 和 -120 附近时，误差达到最小值。



(a) 非球面误差分布

(b) 单条路径上误差分布

图 4 弓高误差分布

Fig. 4 Bow height error distribution

### 2.3 等弓高误差变步长控制算法

复杂曲面常用的计算步长方法有等参数法、等截面法、等弓高误差法<sup>[10]</sup>，为了获得满足弓高误差的最大步长，本文采用等弓高误差法来计算步长。先对弓高误差的模型进行简化，简化后的模型如图 5 所示。

根据简化后的误差模型来计算步长<sup>[11]</sup>，步长可表示为

$$L = \sqrt{\frac{8Rrh}{R+r}} \quad (12)$$

式中： $L$  相邻两抛光点之间的距离； $R$  为非球面

的局部曲率半径； $h$  为设定的弓高误差； $r$  为抛光头半径。

由于此误差模型是简化后的误差模型，用此误差模型计算出的步长所对应的弓高误差不一定在弓高误差的控制范围之内。当计算出的步长所对应的弓高误差不在弓高误差的控制范围之内时，需要用步长搜索法来确定满足弓高误差的最大步长。步长搜索法的原理是，当误差需要控制在  $\varepsilon_1 \leq d \leq \varepsilon_2$  ( $\varepsilon_1$  为弓高误差下限、 $\varepsilon_2$  为弓高误差上限) 时，如果弓高误差小于  $\varepsilon_1$ ，需要增大步长，直到误差在想要控制的范围之内，如果误差大于  $\varepsilon_2$ ，需要减小步长，直到误差在控制的范围

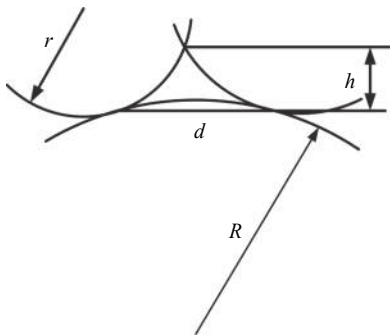


图 5 简化的误差模型

Fig. 5 Simplified error model

之内。等弓高误差变步长控制算法的具体实现方法如下。

- (1) 初始化  $y_1$ 、 $z_1$ 。
- (2) 根据初始  $y_1$ 、 $z_1$  用式(12)计算出步长  $L$ 。
- (3) 根据计算出的步长确定出  $y_2$ 、 $z_2$ 。
- (4) 根据式(11)求出弓高误差  $d$ 。

(5) 如果  $\varepsilon_1 \leq d \leq \varepsilon_2$ , 令  $y_1=y_2$ ,  $z_1=z_2$ , 然后转第 2 步。如果  $d$  不在弓高误差的控制范围之内: 当  $d < \varepsilon_1$  时, 确定增大搜索步长  $h_i$ , 在原  $y_2$  的基础上增大搜索步长  $h_i$ , 计算出对应弓高误差, 直到弓高误差在想要控制的范围之内; 当  $d > \varepsilon_2$  时, 确定减小步长  $h_d$ , 在原  $y_2$  的基础上减

小搜索步长  $h_d$ , 计算出对应的弓高误差, 直到弓高误差在想要控制的范围之内, 令  $y_1=y_2$ ,  $z_1=z_2$ , 然后转第 2 步。

用等弓高误差变步长控制算法对非球面的弓高误差进行控制, 所用的控制参数如表 2 所示。

表 2 非球面弓高误差控制参数  
Tab. 2 Aspheric bow height error control parameter

参数	取值
增大搜索步长 $h_i/\text{mm}$	0.10
减小搜索步长 $h_d/\text{mm}$	0.02
弓高误差下线 $\varepsilon_1/\mu\text{m}$	3.0
弓高误差上线 $\varepsilon_2/\mu\text{m}$	3.2

图 6 为用等弓高误差变步长控制算法得到的结果, 在弓高误差偏高区域, 步长偏密集, 在弓高误差偏低区域, 步长偏稀疏。当误差控制范围在 [2.8, 3.0] 时, 需要 39 个抛光点, 当误差控制在 [3.0, 3.2] 时, 需要 38 个抛光点, 当误差控制范围在 [3.2, 3.4] 时, 需要 37 个抛光点, 由此可知, 误差控制的范围越接近原始误差时, 抛光点的数量越少, 误差控制范围下降, 抛光点数量增加。

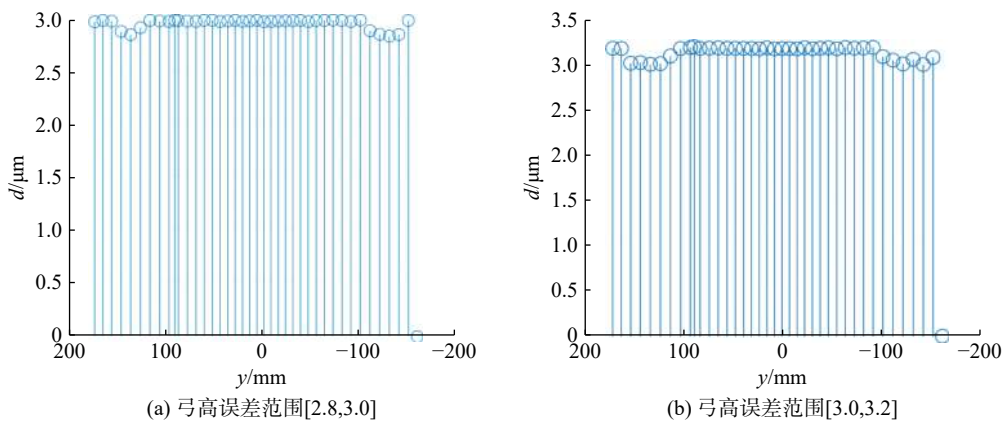


图 6 等弓高误差变步长

Fig. 6 Equal bow height error variable step size

图 7 是弓高误差的控制范围与最大和最小步长的关系, 当弓高误差的控制范围为 [2.8, 3.0]、[3.0, 3.2]、[3.2, 3.4] 时最大步长分别为 10.03、10.20、10.50, 最小步长分别为 7.35、7.57、7.79。由此不难看出, 弓高误差控制范围

上升, 最大步长和最小步长都在增大, 弓高误差控制范围下降, 最大步长和最小步长都在减小。用此控制算法可以把弓高误差控制在需要的范围之内, 可以获得满足弓高误差的最大步长, 提高了加工精度和加工效率。

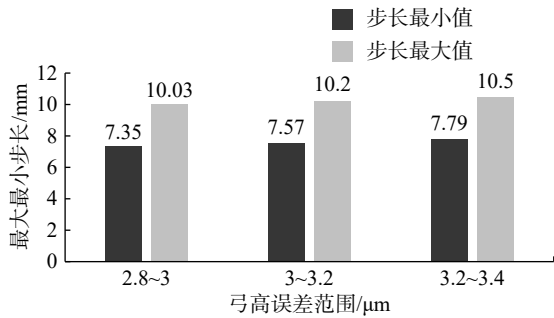


图 7 弓高误差控制范围与步长的关系

Fig. 7 The relationship between bow height error control range and step size

### 3 结 论

(1) 对非球面采用直线光栅式的加工轨迹进行表面加工, 针对 MCF 抛光的特性, 设计轨迹规划算法并且建立误差模型, 仿真出非球面的弓高误差分布, 对非球面的弓高误差分布进行分析。

(2) 根据仿真结果可知: 当弓高误差控制范围上升, 最大步长和最小步长都在增大, 抛光点数量在减少, 当弓高误差控制范围下降, 最大步长和最小步长都在减小, 抛光点数量在增多。

(3) 这一运动控制算法可以在 CNC 抛光设备上得以应用, 只需把算法生成的数据导入 CNC 抛光台, 抛光设备按算法生成的数据点进行抛光, 就可以实现弓高误差的一致性。

#### 参考文献:

[1] 王鹏, 姜晨, 陆葳坪, 等. 光学非球面磁性复合流体抛光运动控制及误差分析 [J]. 光学仪器, 2018, 40(2):

25 - 30.

[2] TANI Y, KAWATA K, NAKAYAMA K. Development of high-efficient fine finishing process using magnetic fluid[J]. *CIRP Annals*, 1984, 33(1): 217 - 220.

[3] PROKHOROV I V, KORDONSKY W I, GLEB L K, et al. New high-precision magnetorheological instruments-based method of polishing optics[J]. *OSA of Workshop Digest*, 1992, 24(1): 134 - 136.

[4] SHIMADA K, WU Y B, WONG Y C. Effect of magnetic cluster and magnetic field on polishing using magnetic compound fluid (MCF)[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, 262(2): 242 - 247.

[5] 张健, 代雷, 王飞, 等. 小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0822002.

[6] 潘日, 王振忠, 郭隐彪, 等. 大口径轴对称非球面气囊抛光进动运动建模及控制 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 183 - 190.

[7] 王宏一. 非球面 CCOS 抛光轨迹规划研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.

[8] 赵世田, 赵东标, 付莹莹. 自由曲面加工刀具路径生成高精度变步长算法研究 [J]. 机械科学与技术, 2010, 29(1): 32 - 35.

[9] 曲兴田, 王宏一, 樊成, 等. 等重叠率螺旋线的非球面抛光轨迹规划 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 126 - 131.

[10] 张森, 何代华, 刘新宽, 等. 医用镍钛合金的电解抛光进展 [J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(5): 302 - 308.

[11] 梁奉兴. 基于改进等残留高度的刀轨规划方法研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2017.

[12] 杨政. 复杂曲面五轴加工技术研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2015.

(编辑: 刘铁英)