

有机玻璃研抛机器人自动化工艺研究

刘广保^{1,2}, 赵吉宾², 陈白宁¹, 杨林²

(1.沈阳理工大学 机械工程学院 辽宁 沈阳 110159 2.中国科学院 沈阳自动化研究所 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 以力和位置混合控制的机器人自动化研抛系统为实验平台, 研究有机玻璃 (Polymethylmethacrylate 简写 PMMA) 的研磨抛光工艺。分析了单个磨粒的磨削材料的去除机理, 以弹性力学理论、Preston 磨削理论为基础建立了有机玻璃的机器人端面研抛去除函数模型; 然后通过研磨抛光实验, 研究了主要研抛加工参数 (如研抛压力、研抛工具转速、机器人进给速度、循环加工次数等) 对工件表面材料去除厚度的影响规律, 并在单因素试验的基础上对研抛加工参数进行了初步的参数优化, 经过优化后的加工参数加工出的有机玻璃样品表面几乎无微小变形和光学畸变, 满足了实际加工工艺要求。

关键词: 机器人自动化研抛系统; 有机玻璃 (PMMA); 去除模型; 参数优化

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2014)08-0151-04

A Study of Robotic Automation Process for Polymethylmethacrylate Grinding and Polishing

LIU Guang-bao^{1,2}, ZHAO Ji-bin², CHEN Bai-ning¹, YANG Lin²

(1.School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Liaoning Shenyang 110159, China;

2.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

Abstract Grinding and polishing process for polymethylmethacrylate (PMMA) is investigated based on previous proposed position/force control method of robotic automation grinding and polishing system. Through the analysis of the material removal mechanism of single abrasive grain, a model based on the elastic mechanic theory and Preston theory is proposed for predicting the surface of workpiece material removal volumes. The effect of different parameters on material removal volumes is investigated by conducting experiments, such as the polishing pressure, polishing tool rotational speed, feed rate, cutting cycles and abrasive grid size. The optimal processing parameters of the grinding and polishing for PMMA are determined by conducting the single factor experiments. Applying the processing of determined parameters, the surface deformation and microcrack of PMMA do not exist. The optimal surface finishing parameters can also meet the requirement of practical process.

Key Words Robotic Automation Grinding And Polishing System; PMMA; The Material Removal Model; Parameter Optimization

1 引言

研抛加工技术作为高精度成型加工技术之一, 目的是获得较高的工件表面粗糙度, 同时不改变工件的表面形状精度。传统的研磨抛光加工主要是以操作经验十分丰富的技术工人凭借长期积累的经验进行加工, 不仅费时费力, 而且难以保证加工产品质量的一致性。

为保证加工质量、减小工人劳动强度、增加产品产量, 自上世纪九十年代, 模具的机器人自动化研抛加工引起了各国研究机构和学者的广泛关注^[1-5]。文献^[2]建立了基于位置/力混合控制的工业机器人模具自动化抛光系统, 并通过实验验证了其控制方法的可行性。文献^[3]提出了基于材料均匀去除的机器人研抛加工系统。文献^[4]通过理论分析与实验研究了不同的研抛路径对工件表面材

料去除的影响规律。文献^[6]以有机玻璃为研究对象, 介绍了机器人研抛工艺, 初步建立了机器人研抛加工系统。文献^[7]基于大量研抛实验初步制定了一种机器人研磨抛光加工策略。由于有机玻璃具有良好的透光性、密度小、化学稳定性和耐候性等特点被广泛应用于各行业, 但有机玻璃加工过程中很容易发生微量变形、表层灼伤等, 影响最终加工质量, 导致产品的报废。近几年, 有机玻璃的研抛加工引起了国内研究机构的关注。

一些科研人员研究只是通过正交试验做了简单的去除研究, 得出一组加工参数, 不能真正应用于实际生产。本研究仍以有机玻璃的研抛为例, 以 Preston 方程为理论基础, 建立了有机玻璃的机器人研抛加工工件表面材料去除模型。然后通过研抛实验, 分析各参数对去除模型的影响规律, 验证了去除模型的准确性, 并

来稿日期 2014-01-10

作者简介 刘广保 (1989-) 男, 山东枣庄人, 硕士, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器人自动化研抛技术;

赵吉宾 (1970-) 男, 山东济南人, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要研究方向: 复杂曲面零件的研抛加工

对研抛加工参数进行了优化,最终确定了适合有机玻璃的机器人研抛加工参数,加工出了符合工艺要求的样件以指导实际生产加工。

2 机器人研磨抛光工艺系统

研究中所采用的研抛工艺系统,如图1所示。机器人研抛工艺系统组成为六自由度 KUKA 30-3 串联机器人及控制系统,通过 RS232C 数据接口与工作站(EWS)或个人计算机(PC)进行信息交互传输,六自由度的 ATI 力/力矩传感器安装在机器人末端,用来检测研抛过程中工具与工件表面之间相互作用力的大小,通过信号转换传输装置输送到 EWS 或 PC 机进行分析处理,分析后发送信号给机器人控制器保证机器人末端运动工具与工件之间保持恒定的压力,从而实现力和位置的混合控制。

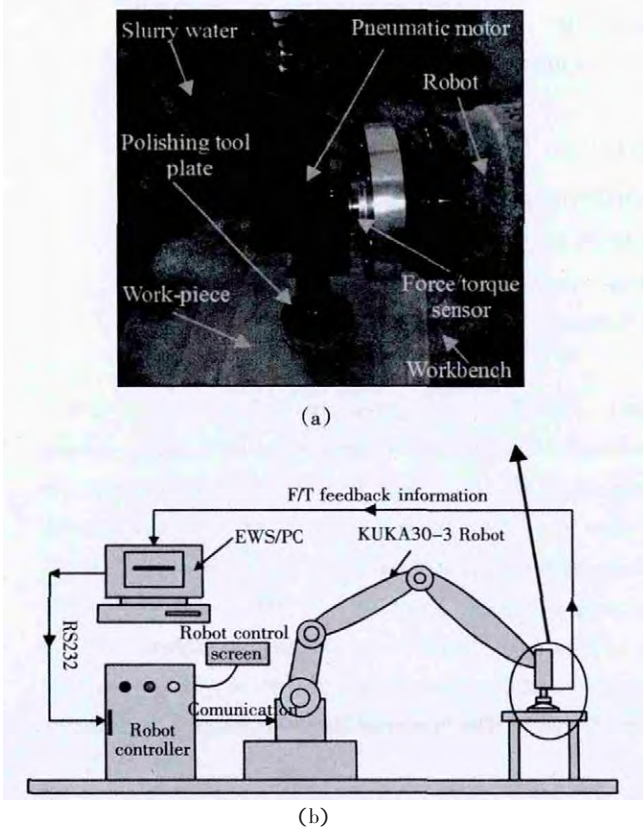


图1 机器人研抛系统

Fig.1 Robotic Grinding and Polishing System

3 工件表面材料研抛去除模型的建立

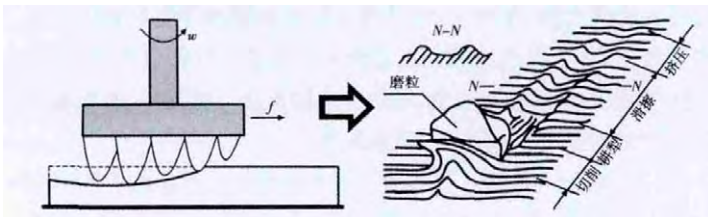


图2 单个磨粒切削材料的过程图

Fig.2 The Process of a Single Abrasive Grain Cutting Material

研抛加工过程是一个复杂的材料去除过程,包括挤压、摩擦、耕犁和切削^[8]。如图2所示。主要取决于不同条件下磨粒和工件表面的相互作用。文献^[9]概述了磨削技术的研究现状并对近几年的发展趋势做了预测。研究中运用Hertz 接触理论、Preston 理

论和切削理论,对磨粒去除材料的过程进行研究与分析,建立有机玻璃表面研抛加工过程中材料的去除模型,为机器人研抛系统的建立和工艺参数的选择、合理规划研抛路径以提高加工效率和保证工件表面形状精度提供理论依据。

实际研抛过程中,抛光工具的转速、研抛压力和机器人的进给速度等因素都与时间有关,因此,研抛工具的去除深度也是随研抛加工的时间不断变化的。由于实验中使用的研抛工具为圆盘形,研抛工具的这种结构使得越靠近工具中心,研抛工具的线速度越小,去除深度也就越小,工件表面的去除深度的分布也就不均。加工过程中,研抛工具按规划轨迹(Zig-Zag 扫描路径)在工件表面运动并在各接触点停留一定时间,即力和位置的混合控制以保证工件与研抛工具之间保持恒定的力,这就是研究中基于力和位置混合控制的研抛加工的实质。

研抛加工过程中能够较准确描述工件表面材料去除规律的基础理论仍是 Preston 在 1927 年提出的 Preston 方程,指出在研抛过程中,工件表面的材料去除与研抛工具盘相对工件的法向压力和速度成线性关系,数学描述为^[10]:

$$\frac{dh(x,y)}{dt} = k \cdot P(x,y,t) \cdot v(x,y,t) \tag{1}$$

式中: $\frac{dh(x,y)}{dt}$ —微小区域内的工件表面材料在时间 t 去除增量; k —比例系数,又称 Preston 常数,由除压力、速度以外的其他因素决定; $P(x,y,t)$ — (x,y) 点瞬时压强; $v(x,y,t)$ — (x,y) 点研抛工具的线速度。

根据 Preston 方程可知:工件表面的研抛压力恒定,表面上任意一点的去除量只与研抛工具的线速度和研抛加工时间有关。对于研抛工具的去除量,此处我们定义为去除材料的体积,具体建模如下:

由 Preston 方程知,去除深度 $h = \int_0^t k \cdot P \cdot v dt$, 则去除量为:

$$H = \int_A h dA = \int_0^t \int_A k \cdot P \cdot v dt dA \tag{2}$$

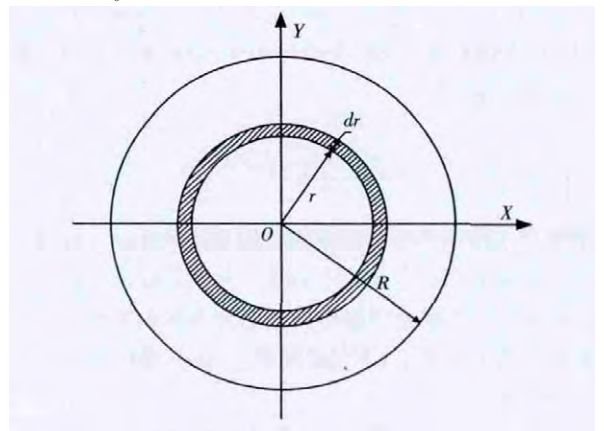


图3 研抛工具建模

Fig.3 Polishing Tool Modeling

由图3可知:

$$\begin{cases} dA = 2\pi r dr \\ v = \omega r \end{cases} \tag{3}$$

将式(3)带入式(2)积分,可得:

$$H = \int_0^t \int_{-R}^R (2\pi k P \omega r^2 dr) dt = \frac{2\pi}{3} k P \omega \Big| R^3 \Big|_t \tag{4}$$

上式说明研抛工具的去除量与抛光盘的半径三次方、研抛压力、线速度和研抛加工时间成正比。

经研究发现，工件表面的研抛去除量不仅与抛光盘本身的去除有关还与研抛工具的行走轨迹有关，必须针对具体的一种轨迹研究去除函数才有意义，本研究以最常见 Zig-Zag 扫描路径为例研究研抛工具的去除函数，如图 4 所示。

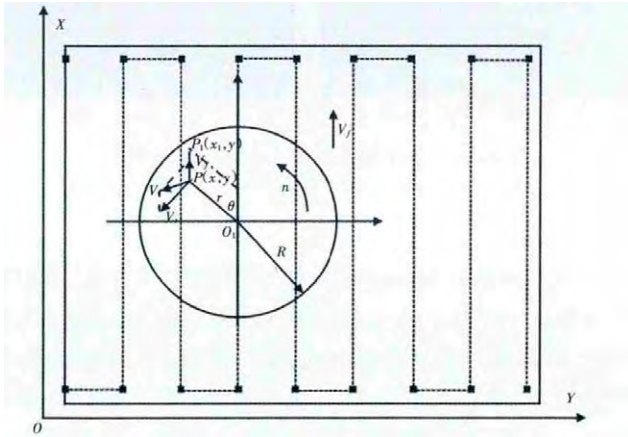


图 4 研抛加工过程示意图

Fig.4 Polishing Process Schematic Diagram

根据研抛工具与工件的相对运动关系，建立如图 4 所示坐标系，点 P 为被加工工件表面上的任意一点，对 P 点进行速度分析，研抛工具沿 X 轴正向运动，进给速度为 \vec{v}_f ，即机器人末端的移动速度，研抛工具转速为 $\vec{v}_r = \vec{\omega} \times \vec{r}$ 。假设 $t=0$ 时， O_1P 与 X 轴的夹角为 θ_0 ，半径为：

$$r = \sqrt{(x - X_0 - v_f t)^2 + (y - Y_0)^2} \quad (5)$$

合速度为：

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(\omega r)^2 - 2v_f \omega r \sin(\theta_0 + \omega t) + v_f^2} \quad (6)$$

由于研抛加工过程中，研抛工具的转速远大于机器人的进给速度，即 $v_r \gg v_f$ ，因此 v_f 可以忽略不计。故合速度为：

$$v \approx \omega r = \omega \sqrt{(x - X_0 - v_f t)^2 + (y - Y_0)^2} \quad (7)$$

由 Preston 方程可知，工件表面的去除深度为 $h = \int_0^t k P v dt$ ，其中 k 、 P 均为常数，将式(7)代入上式可得：

$$h = \int_0^t k P v dt = k P \omega \int_0^t \sqrt{(x - X_0 - v_f t)^2 + (y - Y_0)^2} dt \quad (8)$$

令 $a = y - Y_0$ ， $X = x - X_0 - v_f t$ ， $X_1 = x_1 - X_0 - v_f t_1$ ，代入(10)式，则：

$$h = k P \omega \left(\frac{X}{2} \sqrt{X^2 + a^2} + \frac{a^2}{2} \ln(X + \sqrt{X^2 + a^2}) \right) \Big|_0^{X_1} \quad (9)$$

记 $f(X) = \frac{X}{2} \sqrt{X^2 + a^2} + \frac{a^2}{2} \ln(X + \sqrt{X^2 + a^2})$ ，则：

$$h = k P \omega (f(X_1) - f(0)) \quad (10)$$

4 实验及结果分析

4.1 不同加工参数对去除量影响规律实验

实验以六自由度 KUKA30-3 串联机器人作为实验平台；工件材料为：有机玻璃（又名亚克力），化学成分为聚甲基丙烯酸甲酯；研抛压力为(2~8)N；研抛工具转速为(1500~2500)r/min；机器人

进给速度为(5~20)%；加工循环次数为(2~15)次；砂纸为 3M 268L (100~9) μm 氧化铝/碳化硅磨料，加工参数水平，如表 1 所示。不同的加工参数对工件表面材料去除量的影响曲线，如图 5~图 8 所示。

表 1 研抛加工参数

Tab.1 Grinding and Polishing Parameters

Process Parameter	Value
1 Press (N)	2 4 6 8
2 Tool rotation (rpm)	1500 2200 2500
3 Robot feed (m/min)	10 20 40
4 Process cycles (n)	2 5 8 10 15

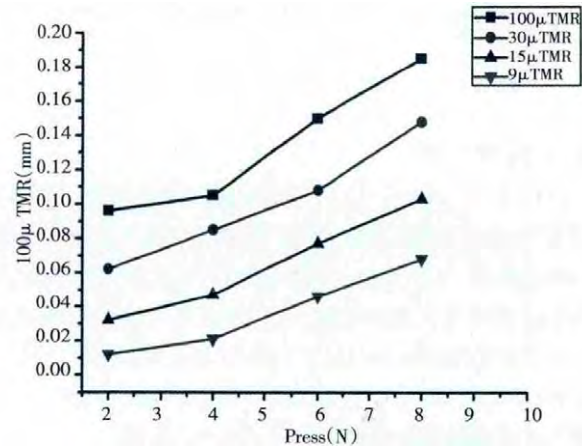


图 5 研抛压力对材料去除量的影响曲线

Fig.5 The Effect Curve of Polishing Press on Material Removal

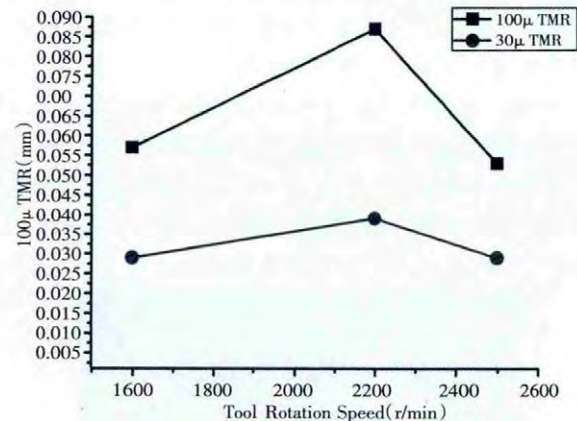


图 6 研抛工具转速对材料去除量的影响曲线

Fig.6 The Effect Curve of Polishing Tool Rotation on Material Removal

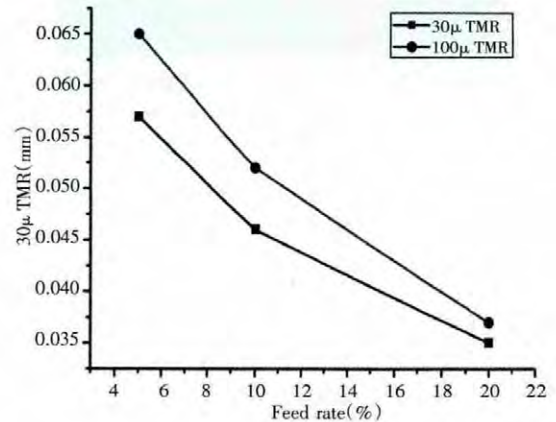


图 7 进给速度对工件表面材料去除量的影响曲线

Fig.7 The Effect Curve of Robotic Feed on Material Removal

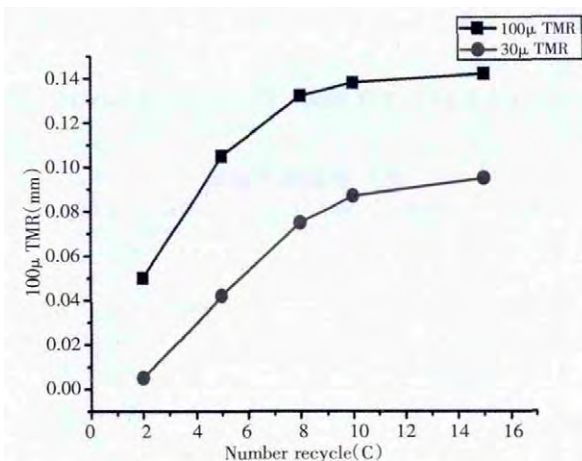


图8 材料去除量随加工循环次数的变化曲线

Fig.8 The Effect Curve of Process Cycles on Material Removal

4.2 实验结果分析

从图5中可以看出,工件表面去除厚度随研抛工具施加压力的增压而呈近似线性增加,即施加的压力越大,工件表面被去除的材料就越多。从图6中可以看出,在一定的转速范围内,工件表面的去除厚度与工具转速成正比,达到某一临界转速后,由于砂纸表面磨粒的磨损,去除能力下降,材料去除量随之下降。机器人研磨抛光加工过程中,与研抛工具转速相比,机器人的行走速度对工件表面材料去除的影响相对较小,从图7中可以看出,工件表面材料去除量与机器人行走速度近似呈线性关系。随机器人行走速度的增大,单位区域内研抛工具的停留时间相对较短,因此,材料去除量随行走速度的增大而减小。理想加工环境下,由理论分析可知工件表面材料去除量随加工循环次数的增加而增加,而实际加工过程中,通过分析磨粒切削材料去除机理,可知随加工次数的增加,磨具磨粒的磨损加剧,磨粒去除能力下降,磨粒相对工件表面去除量也逐渐趋于稳定值。实际加工过程中工件表面材料去除量随循环加工次数不同的变化曲线,如图8所示。加工过程中的工件表面纹理图,如图9所示。

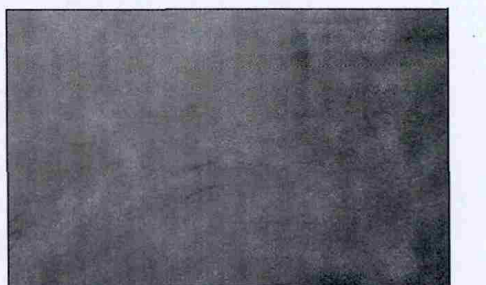


图9 加工过程中的实物图

Fig.9 The Processing Work-Piece

针对有机玻璃的研抛加工,通过大量实验数据分析及加工后表面直观的观测,可以得到在相对高且均匀的去除量下最佳的研抛加工参数为:研抛工具与工件之间的相互压力为3N、研抛工具转速为2500r/min、机器人的进给速度为15%、循环加工次数为10次,砂纸为:氧化铝磨料/碳化硅磨料(3M 268L 100 μ m、30 μ m、9 μ m)。加工前,应用便携式粗糙度仪测得有机玻璃有微小变形且表面粗糙(粗糙度为1.599 μ m)透过玻璃看到事物模糊有微量的变形,经过上述研抛参数加工后,使用千分尺测得工件表面去除厚度为0.250mm,使用便携式粗糙度仪 Mahr JB-8E 测得表面粗糙度为0.015 μ m。加工

后,表面粗糙度得到提高,通过直观观测微小变形几乎被完全消除,透过玻璃看到的事物非常清晰,没有微观的变形存在,满足了实际加工技术要求。抛光加工前后的对比效果图,如图10所示。

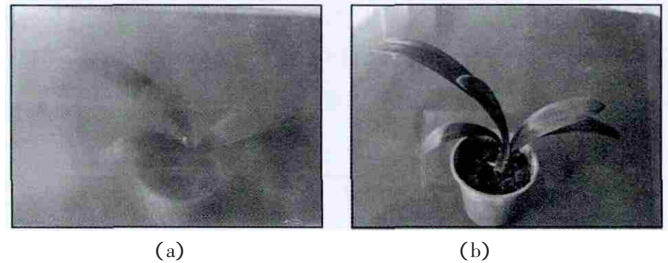


图10 加工前后效果对比 (a)加工前(b)加工后

Fig.10 The Compared of Before and After Processing

5 结论

研究以机器人为实验平台,通过对研抛材料去除过程和抛光盘运动速度分析,以 Preston 假设为理论基础,建立抛光盘在无移动和移动研抛过程中的去除函数。通过实验分析了不同研抛加工参数对去除量大小的影响规律,并通过加工实物验证了研抛加工参数的有效性。对实际有机玻璃透明件的研抛加工具有一定指导意义。

参考文献

- [1] J.J.Marquez, J.M.Perez. Process modeling for robotic polishing [J]. Journal of Material Processing Technology, 2005(159): 69-82.
- [2] F.Nagata, T.Hase, Z.Haga. CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot [J]. Mechatronics, 2007(17): 207-216.
- [3] M.J.Tsai, J.F.Huang. Robotic polishing of precision molds with uniform material removal control [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009(49): 885-895.
- [4] Hon-yuen Tam, Haobo Cheng. An investigation of the effects of the tool path on the removal of material in polishing [J]. Journal of Material Processing Technology, 2010(210): 807-818.
- [5] G.L.Wang, Y.Q.Wang. Research on polishing process of a special polishing machine tool [J]. Machining Science and Technology, 2009, 13(1): 106-121.
- [6] 郭彤颖, 曲道奎, 徐方. 机器人研磨抛光工艺研究 [J]. 新技术新工艺, 2006(1): 84-85.
(Gou Tong-ying, Qu Dao-kui, Xu Fang. Research on robot grinding and polishing processing technology [J]. New Technology and New Process, 2006(1): 84-85.)
- [7] 王瑞芳, 徐方. 机器人研磨抛光工艺研究与实现 [J]. 新技术新工艺, 2008(9): 19-22.
(Wang Rui-fang, Xu Fang. Research and realization of robot grinding and polishing processing technology [J]. New Technology & New Process, 2008(9): 19-22.)
- [8] 黄云, 朱派龙. 砂带磨削原理及其应用 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1993.
(Huang Yun, Zhu Pai-long. Grinding Technology and Application [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1993.)
- [9] 王涛, 李剑, 高航. 磨削技术的现状与发展趋势 [J]. 机械设计与制造, 2003(2): 116-118.
(Wang Tao, Li Jian, Gao Hang. The current situation and trend of development of grinding technology [J]. Machinery Design and Manufacture, 2003(2): 116-118.)
- [10] 王权陡, 刘民才, 张洪霞. 数控抛光技术中抛光盘的去函数 [J]. 光学技术, 2000, 26(1): 32-34.
(Wang Quan-dou, Liu Min-cai, Zhang Hong-xia. Removing function of polishing pad in computer controlled optical polishing [J]. Optical Technique, 2000, 26(1): 32-34.)
- [11] Zou Q, Zhao J. Iso-parametric tool-path planning for point clouds [J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(11): 1459-1468.
- [12] Zou Qiang, Zhang Ju-yong, Deng Bai-lin. Iso-level tool path planning for free-form surfaces [J]. Computer-Aided Design, 2014(53): 117-125.