

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.01.016

随五轴加工轨迹变抛光力的控制策略与方法

史家顺, 董金龙, 刘 聪, 于天彪
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 设计了以 PWM 信号高速开关控制为核心的气动抛光力加载控制系统,采用滑动平均滤波 PID 算法调节,通过 Simulink 仿真和实验调整 PID 参数,提高系统动态性能,保证变抛光力的控制要求.借助五轴混联机器人动平台,搭建五轴变抛光力试验系统,进行跟随轨迹的变抛光力加载实验.实验结果表明,设计的滑动平均滤波 PID 控制能够在力控制要求改变时快速响应,使抛光力跟踪至设定值,力实测值误差在 $\pm 1\text{ N}$ 以内,波动范围小,具有足够的稳定性和准确性,满足变抛光力的控制要求,实现了跟随五轴加工轨迹的变抛光力控制.

关 键 词: 五轴加工轨迹;变抛光力;PID 控制;滑动平均滤波;PWM 信号
中图分类号: TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)01-0089-06

Control Strategy and Method for Variable Polishing Force Adapting to the 5-Axis Machining Trajectory

SHI Jia-shun, Dong Jin-long, LIU Cong, YU Tian-biao
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: SHI Jia-shun, E-mail: jshshi@mail.neu.edu.cn)

Abstract: A pneumatic polishing force loading control system based on high speed on/off controlled by pulse-width modulation (PWM) signals was designed. The control system was adjusted by the moving average filter PID control method. PID parameters were determined by Simulink simulation and experiment, so the dynamic property of the system was improved to ensure the control requirement of variable polishing force. Assisted by a 3-TPS hybrid robot, a 5-axis variable polishing force experiment system was built, and the experiment of variable polishing force adapting to the 5-axis machining trajectory was conducted. The experiment results illustrate that the moving average filtering PID control can quickly respond as the setting force changes and the measure force value can quickly track the changing setting value. The average error of the force is about $\pm 1\text{ N}$ with a small fluctuation range. The control system has enough stability and accuracy to satisfy the control requirement of variable polishing force. Variable polishing force adapting to the 5-axis machining trajectory is thus achieved.

Key words: 5-axis machining trajectory; variable polishing force; PID control; moving average filtering; PWM signal

抛光加工是保证光学曲面元件面型精度的重要加工手段^[1]. 根据 Preston 理论,抛光过程中的材料去除率依赖于抛光工具与工件之间的接触压力^[2-3]. 法向抛光力大小需根据光学曲面上不同抛光点处的曲率变化而相应变化,才能使抛光接触压力保持恒定,从而得到恒定的材料去除率以保证工件的表面质量. 因此自动抛光机床需要同

时实现对抛光工具位姿及抛光力的控制^[2,4-6],且抛光力需要根据抛光表面的曲率及法矢量变化实现大小和方向的变化^[7]. 目前,对抛光加工控制系统的研究和开发多集中在抛光驻留时间控制及恒力抛光控制上^[8-11],对随加工轨迹的变抛光力控制研究较少. 因此,实现准确且快速跟踪的变抛光力控制是自动抛光领域一个亟待解决的重要

问题.

本文设计了一套基于高速开关阀调节的抛光力气动加载系统,以东北大学自主研发的 3-TPS 五轴立卧混联机器人为运动平台,构建五轴抛光力加载实验系统.系统协同控制加工运动与抛光力加载,实现了可跟踪加工位置的变抛光力控制.

1 五轴变抛光力加载系统原理

本文设计的抛光力气动加载系统采用高速开关阀调节.高速开关阀具有速度快、价格低、抗污染等优点^[12-13],采用脉宽调制(PWM)信号控制,是数字量,避免了模拟量容易受到外界信号干扰的缺点.气动系统由气缸实现力输出,抛光工具由活塞杆驱动,以保持抛光工具与被抛光表面的抛光力.气动系统原理见图 1.气缸及抛光工具装载在 3-TPS 混联机器人末端,实现五轴抛光运动.

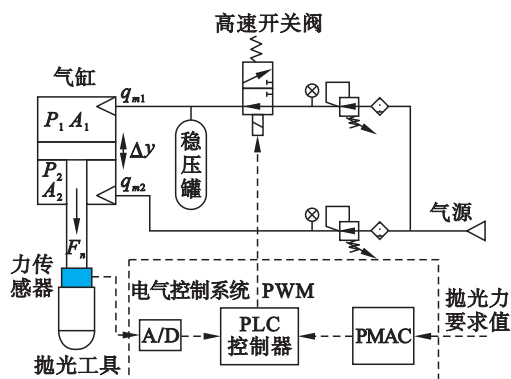


图 1 抛光力气动加载系统原理图

Fig. 1 Schematics of polishing force pneumatic loading system

五轴变抛光力加工平台控制系统由 PLC 西门子 S7-200 及 PMAC 多轴运动控制卡组成.力控制信号与运动控制信号通过 PMAC 卡的不同信号传输通道同步通信,力控制信号传递至 PLC 控制器,位置控制信号发送至各轴驱动器进行运动控制.力实测值通过装在气缸与抛光工具间的力传感器测量并反馈至 PLC 控制器,在 PLC 中实现滑动平均滤波 PID 算法,根据设定值及实测值计算 PWM 信号的占空比,控制通过高速开关阀到达气缸的气体流量,使气缸活塞输出力趋近于力设定值.抛光加工位置变化时,抛光力可以根据随轨迹变化的要求快速响应并跟踪至力设定值,加载过程力波动在误差允许范围内.五轴变抛光力实验平台如图 2 所示.

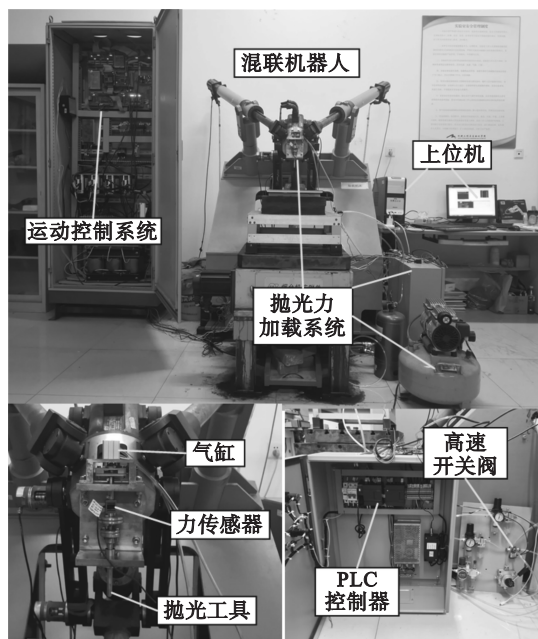


图 2 五轴变抛光力实验平台实物图

Fig. 2 5-axis variable polishing force experiment platform

2 跟随加工路径的变抛光力控制策略

2.1 系统传递函数

根据气动系统分析时的常用假设及高速开关阀的通用分析方法^[10,14-15],气动控制系统一般为三阶系统^[2,10,14,16],结合本文抛光力控制系统的原理框图,见图 3,推导得到了系统输出抛光力与 PWM 信号占空比的传递函数,系统开环传递函数为

$$G(s) = \frac{F(s)}{d(s)} = \frac{K_d K_q (K_{r2} s^2 + K_{r1} s + K_{r0})}{K_{u3} s^3 + K_{u2} s^2 + K_{u1} s + K_{u0}} \quad (1)$$

式中: K_d 为 PWM 信号占空比与等效控制电压转换系数; $K_q, K_{u3}, K_{u2}, K_{u1}, K_{u0}$ 为气体流量与气缸输出力的关系系数; K_{r2}, K_{r1}, K_{r0} 为输出抛光力与气缸输出力的关系系数.

2.2 系统辨识

由于气动控制系统较为复杂,传递函数中许多参数不容易得到,为了能够确定其中各系数,以下对此模型进行辨识.

为了能够有效地反映系统的实际状态并且不使辨识过程过于复杂,本文设计了如图 4a 所示的占空比变化作为辨识输入.将 PWM 信号的周期设为 100 ms,依次设置占空比为 0.6, 0.8, 1.0, 0.8, 0.6,并连续采集传感器反馈的力实测值.根据最小二乘辨识算法,对采集的数据进行运算、处

理及辨识,得到辨识后的系统开环传递函数为

$$\frac{F(s)}{d(s)} = \frac{1.915s^2 + 0.003\,531 + 0.003\,042}{s^3 + 0.053\,02s^2 + 0.002\,998s + 8.059 \times 10^{-5}} \quad (2)$$

辨识输出与实际输出的对比曲线见图 4b,可见辨识模型与实际模型的吻合度较好,模型契合

度达到了 91.8%。

此时测试系统在单位阶跃信号下的响应时间较长,响应波动较大,此外系统信号传输过程以及压缩空气在系统中的运动过程均存在迟滞。因此,靠系统自身的响应不能满足抛光过程中抛光力实时调节的任务要求。

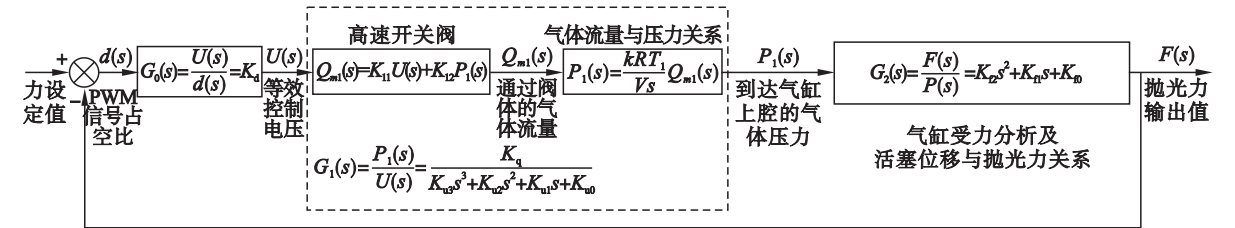


图 3 抛光力气动控制系统原理框图
Fig. 3 Schematics of polishing force pneumatic control system

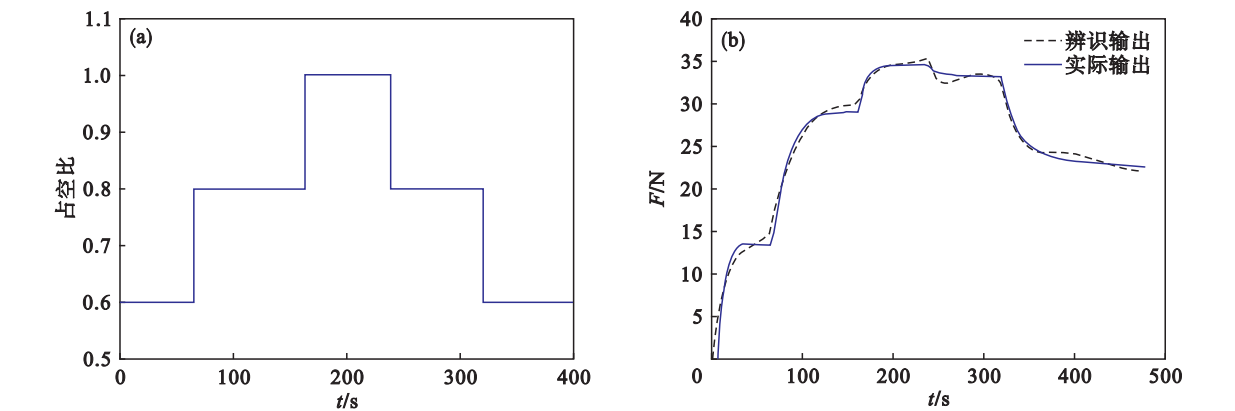


图 4 抛光力控制系统传递函数辨识
Fig. 4 Transfer function identification for the polishing force control system
(a)—辨识输入; (b)—输出曲线。

2.3 滑动平均滤波 PID 算法应用

为改善系统动态性能,提高响应速度,以满足随路径的变抛光力控制要求,本文采用增量式 PID 进行控制,并在增量式 PID 控制过程中加入了滑动平均滤波算法,对 PID 调节的实时过程变量进行滤波处理,提高了系统的稳定性及响应速度. 滑动平均滤波算法的计算公式为

$$\bar{a}_k = \frac{\sum_{i=k-n}^{i=k-1} a_i + a_k - a_{k-n}}{n} \quad (i \geq k \geq n \geq 1) \quad (3)$$

式中: \bar{a}_k 为滤波后的测量值; a_k 为当前时刻的采集数据值; n 为之前时刻数据的数量。

PID 参数采用 Z - N 法初步整定,首先置积分系数 $K_I = 0$ 、微分系数 $K_D = 0$,然后逐渐增加比例系数 K_P 直至系统出现振荡,将此时增益记录为 K_m ,此时的振荡周期记为 T_r ,最后由经验公式得到近似整定参数. Z - N 法经验公式见表 1,其中 T_s 为控制器采样周期, T_I 为积分时间常数, T_D 为微分时间常数。

表 1 Z - N 法经验公式 Table 1 Ziegler-Nichols empirical formula					
控制器类型	K_P	T_I	T_D	K_I	K_D
P	$0.5K_m$	—	—	—	—
PI	$0.45K_m$	$0.83T_r$	—	$K_P T_s / T_I$	—
PID	$0.6K_m$	$0.5T_r$	$0.12T_r$	$K_P T_s / T_I$	$K_P T_D / T_s$

在初步整定的 PID 参数基础上,利用 Simulink 对系统进行仿真,仿真过程中对 PID 参数进行调整.按先比例、后积分、再微分的顺序进行微调,寻找最优控制参数,保证系统的响应速

度、准确性和稳定性,最终得到较为理想的系统响应,调整后系统闭环单位阶跃响应及误差如图 5 所示.图 6 所示为 PID 参数整定后系统在不同输入下的系统仿真响应.

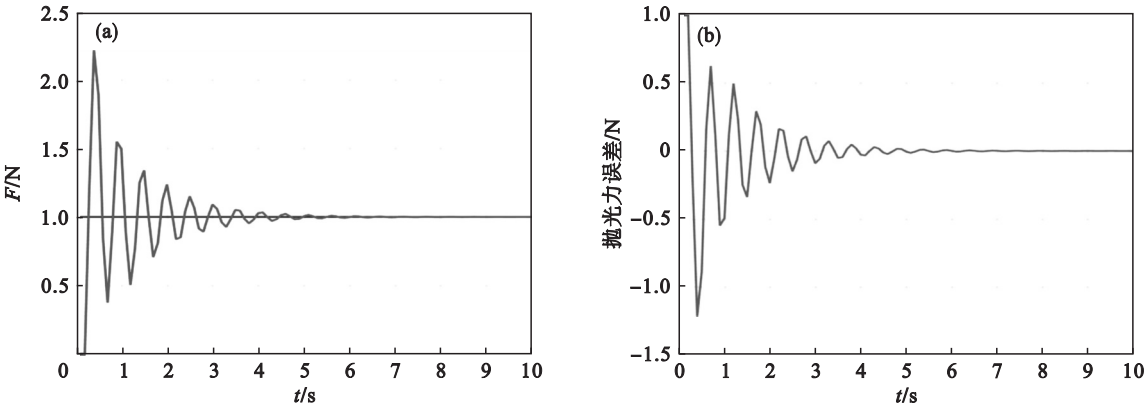


图 5 仿真分析调整后系统闭环阶跃响应
Fig. 5 Step response of the closed-loop system based on simulation
(a)—整定后抛光力阶跃响应; (b)—整定后抛光力阶跃误差.

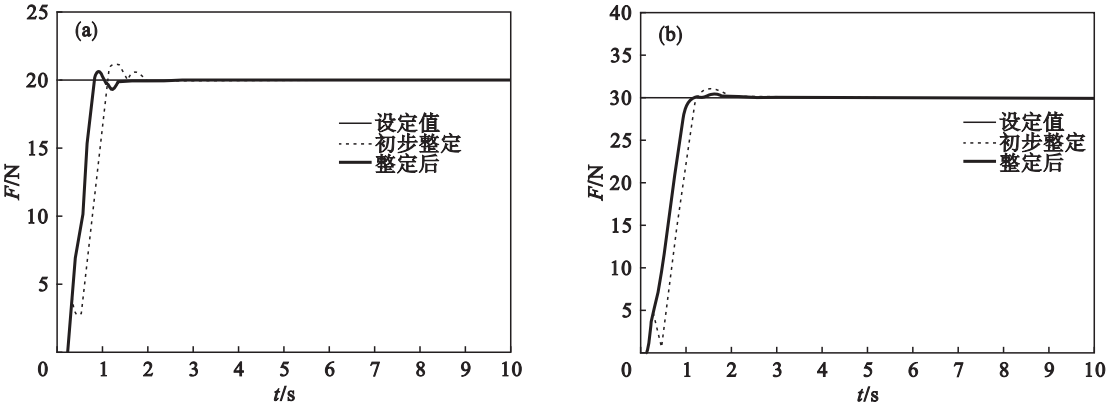


图 6 PID 参数整定后系统在不同输入下的仿真响应
Fig. 6 Simulation results of system with different input values based on the adjusted PID parameters
(a)—抛光力设定值为 20 N; (b)—抛光力设定值为 30 N.

为达到更加稳定的控制效果,采用实验进一步调节 PID 参数,在五轴抛光实验平台上按力设定值为 25 N 运行抛光力加载系统.对加入滑动平均滤波 PID 控制算法进行调节的抛光力跟踪变化情况和无控制时的抛光力跟踪变化情况实时监测,在实验过

程中根据系统实际响应进一步调整 PID 参数,提高系统动态性能.得到 PID 控制的参数为:比例系数 $K_p=3.13$,积分系数 $K_i=1.04$,微分系数 $K_d=2.26$.

图 7 为调整后的滑动平均滤波 PID 控制与无控制时的抛光力跟踪误差对比.

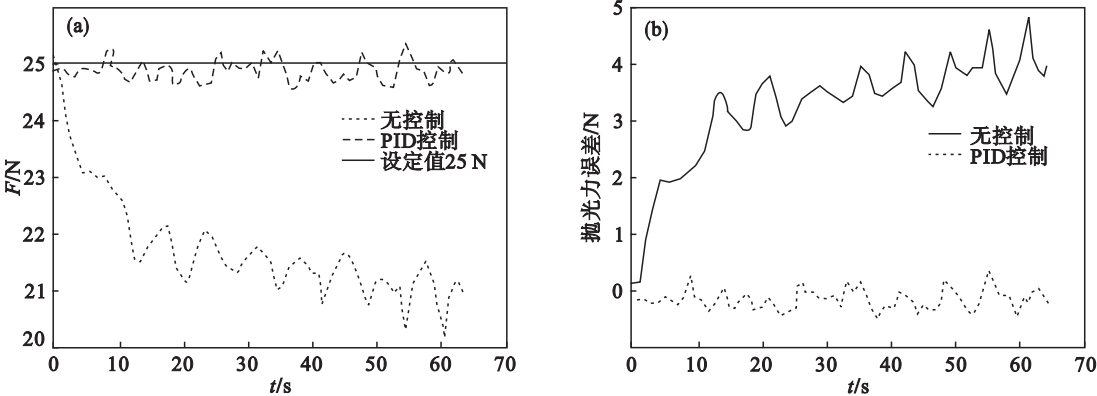


图 7 PID 控制前后的力控制误差对比
Fig. 7 Force control error comparison between PID control and without PID control
(a)—设定值为 25 N 时系统输出; (b)—设定值为 25 N 时系统误差.

由图可见,滑动平均滤波 PID 控制使系统对单位阶跃信号的响应时间明显缩短,有效地改善了系统的动态性能. 未进行 PID 控制调节情况下,抛光力在 60 s 的时间内从 25 N 下降至 20 ~

21 N,误差约为 4 ~ 5 N,接近 20%. 增加 PID 控制调节后,系统输出抛光力始终保持在 24.5 ~ 25.5 N 之间,误差在 ±0.5 N 以内. 最终确定气动变抛光力加载系统的控制原理见图 8.

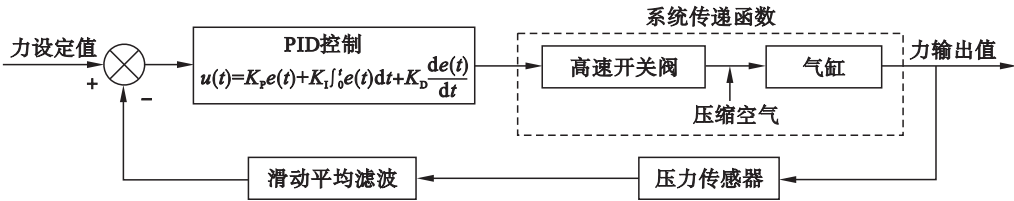


图 8 变抛光力加载系统控制原理框图
Fig. 8 Structure of the variable polishing force control system

3 跟随运动轨迹的变抛光力加载实验

为验证系统跟随加工轨迹的变抛光力控制效果,本文采用一条矩形抛光轨迹及一条直线圆弧混合抛光轨迹进行力加载实验. 实验轨迹如图 9 所示.

矩形轨迹为图中正方形 CDEF, 边长为 100 mm,各边上的抛光力加载要求值分别为 20, 25, 20, 15 N. 混合轨迹为图中 ACFB, 其中 AC 和 FB 段沿直线运行,长度为 50 mm,CF 和 BA 段沿圆弧运行,半径为 50 mm. 各段轨迹上的抛光力加载要求值分别为 20, 25, 30, 25 N.

实验轨迹各段的抛光力加载要求值不同,以验证力加载系统变抛光力控制的准确性和稳定性. 表 2 为正方形轨迹的抛光力控制实验结果及误差,表 3 为直线圆弧混合轨迹的抛光力控制实验结果及误差.

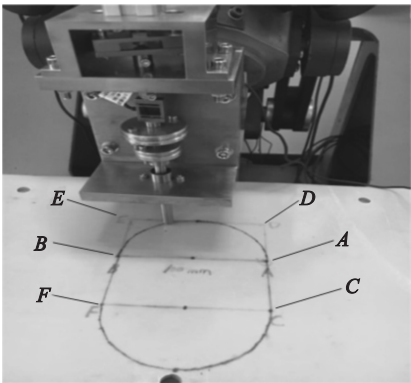


图 9 抛光实验轨迹

Fig. 9 Polishing experiment trajectory

由于实验过程中难免受以下因素影响,如气动系统的时滞性、信号传输速度、PLC 的计算速度等,抛光力加载不可避免地会存在误差. 在建模仿真过程中,由于气动系统的复杂性,理论模型相

对实际模型有一定程度的简化,如气缸活塞的摩擦力等因素未能在建模仿真中考虑,造成实测抛光力误差略大于仿真误差,但并未对控制系统的可靠性及稳定性造成较大影响.

表 2 正方形轨迹抛光力不同设定值误差列表

Table 2 Errors with different setting values on the square trajectory

轨迹	设定值 N	误差范围/N	最大偏差/N	误差百分比/%
CD	20	-0.75 ~ 0.95	0.95	4.8
DE	25	-0.48 ~ 0.97	0.97	3.9
EF	20	-0.76 ~ 0.94	0.94	4.7
FC	15	-0.72 ~ 0.75	0.75	5.0

表 3 直线圆弧混合轨迹抛光力不同设定值误差列表

Table 3 Errors with different setting values on the linear and circular mixed trajectory

轨迹	设定值 N	误差范围/N	最大偏差/N	误差百分比/%
AC	20	-0.79 ~ 1.00	1.00	5.0
CF	25	-0.37 ~ 0.98	0.98	3.9
FB	30	-0.22 ~ 0.97	0.97	3.2
BA	25	-0.78 ~ 0.95	0.95	3.8

从实验数据可以看出,系统经过 PID 控制的调节后,响应时间得到极大的缩短,且力控制误差较小,证明 PID 控制能够有效地改善系统的动态性能,以保证随轨迹变抛光力控制要求. 抛光力加载系统在矩形运动轨迹和直线圆弧混合运动轨迹上,均可实时跟踪随运动轨迹变化而改变的抛光力要求,当力设定值变化时,系统响应迅速,响应时间 2 ~ 3 s,及时控制抛光力跟踪至设定值附近. 在力加载过程中,力实测值波动范围在 ±1 N 以内,最大偏差不超过 5%.

可见,本文开发的抛光力气动加载系统能够

有效地跟随运动轨迹的变抛光力控制,并具有足够的响应速度、稳定性及控制精度。

4 结 论

1) 本文研究的抛光力气动加载系统在力设定值改变时,可以快速响应使抛光力跟踪至设定值,实现了随运动轨迹的变抛光力控制。

2) 本文研究的滑动平均滤波 PID 控制能够有效提高抛光力气动加载系统的动态性能,消除了抛光过程中由于外界因素影响造成的抛光力随运动而下降的现象,使抛光力保持在设定值附近。

3) 在力加载过程中,最大偏差在 5% 以内,误差波动范围在 $\pm 1\text{ N}$ 以内,波动范围小,具有足够的稳定性和准确性,满足抛光加工的力控制要求。

参考文献:

- [1] 李荣彬,张志辉,杜雪,等.自由曲面光学元件的设计、加工及面形测量的集成制造技术[J].机械工程学报,2010,46(11):137-148.
(Li Rong-bin, Zhang Zhi-hui, Du Xue, et al. Integrated manufacturing technology for design, machining and measurement of freeform optics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(11): 137-148.)
- [2] Fan C, Hong G S, Zhao J, et al. The integral sliding mode control of a pneumatic force servo for the polishing process[J]. *Precision Engineering*, 2019, 55(1): 154-170.
- [3] 樊成.光学曲面确定性抛光的面型精度控制研究[D].长春:吉林大学,2014.
(Fan Cheng. Investigation on control of surface form accuracy for deterministic polishing of optical part surfaces[D]. Changchun: Jilin University, 2014.)
- [4] 张雷,周宛松,卢磊,等.抛光力实时控制策略研究[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(6):853-857.
(Zhang Lei, Zhou Wan-song, Lu Lei, et al. Research on real-time control strategies of polishing force[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(6): 853-857.)
- [5] Lin B, Jiang X M, Cao Z C, et al. Development and

theoretical analysis of novel center-inlet computer-controlled polishing process for high-efficiency polishing of optical surfaces [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 59(10): 1-12.

- [6] Oba Y, Kakinuma Y. Simultaneous tool posture and polishing force control of unknown curved surface using serial-parallel mechanism polishing machine [J]. *Precision Engineering*, 2017, 49(7): 24-32.
- [7] Barber J R. Contact mechanics: Hertzian contact [M]. Cham: Springer, 2018: 29-41.
- [8] Nagata F, Hase T, Haga Z, et al. CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot [J]. *Mechatronics*, 2007, 17(4): 207-216.
- [9] Zeng S, Blunt L. An experimental study on the correlation of polishing force and material removal for bonnet polishing of cobalt chrome alloy [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(1/2/3/4): 185-193.
- [10] Han G C, Jia Z, Wang X Y. Research on unbounded abrasive polishing process with assisted ultrasonic vibration of workpiece [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1/2/3/4): 209-218.
- [11] Jin M S, Ji S M, Pan Y, et al. Effect of downward depth and inflation pressure on contact force of gasbag polishing [J]. *Precision Engineering*, 2017, 47(1): 81-89.
- [12] 向忠,陶国良,谢建蔚,等.气动高速开关阀动态压力特性仿真与试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(5):845-849,857.
(Xiang Zhong, Tao Guo-liang, Xie Jian-wei, et al. Simulation and experimental investigation on pressure dynamics of pneumatic high-speed on/off valves [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(5): 845-849, 857.)
- [13] Zhang B, Zhong Q, Ma J E, et al. Self-correcting PWM control for dynamic performance preservation in high speed on/off valve [J]. *Mechatronics*, 2018, 55(11): 141-150.
- [14] Najafi F, Fathi M, Saadat M. Performance improvement of a PWM-sliding mode position controller used in pneumatic actuation [J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2009, 15(1): 73-84.
- [15] Tao G L, Zhu X C, Cao J. Modeling and controlling of parallel manipulator joint driven by pneumatic muscles [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 18(4): 537-541.
- [16] Zhao P B, Shi Y Y. Composite adaptive control of belt polishing force for aero-engine blade [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(5): 988-996.