

文章编号 1004-924X(2015)04-1019-08

大口径非球面光学研抛压力控制系统

范 敏, 刘 凤, 王 佩, 石为人
(重庆大学 自动化学院, 重庆 400030)

摘要:根据大口径非球面光学元件研抛工艺的需求,基于行星式研抛装置设计了一种新型的双路气压平衡研抛压力控制系统。该系统利用低摩擦气缸,压力传感器和两个电气比例阀构建研抛气压闭环回路。分析了系统工作原理,建立了压力控制系统的非线性模型。为了实现恒压控制,运用前馈控制及双模态 PID 控制算法设计了复合控制器。实验结果表明,该系统能实现研抛压力的平缓过渡,可完成研抛压力的无级调节和柔性控制,输出研抛压力在 0 到 350 N 可调,稳态压力波动小于 1 N,对气缸活塞位移波动干扰有较强的鲁棒性。该系统基本满足研抛系统对研抛压力稳定性和精准确度的要求。

关键词:大口径非球面;光学研抛;研抛压力;压力控制;PID 控制

中图分类号:TP273;TQ171.684 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152304.1019

Polishing pressure control system for large caliber aspherical optics

FAN Min, LIU Feng, WANG Pei, SHI Wei-ren

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

* Corresponding author, E-mail: fanmin@cqu.edu.cn

Abstract: According to the demands of large-caliber aspherical optical elements for polishing technology, a kind of dual pressure balanced polishing pressure control system was proposed based on the planet type rotational structure. The closed-loop pressure control system was built by using a low friction cylinder, two electrical proportional valves and several pressure sensors. The nonlinear mathematical model of the pressure control system was built by analyzing experimental values. In order to output a constant pressure, a composite controller was developed by combining with a feedforward control and multiple sets of bimodal PID controls. Experimental results show that the control system achieves grinding pressure smooth transition and implements stepless adjustment and flexible control for the polishing pressure. The output of the pressure is adjustable within the range 0 to 350 N and the steady pressure fluctuation is less than 1 N. The system has stroger robustness against the enough disturbances of a cylinder piston. The system basically meets the stability and accuracy requirements of the polishing pressure.

Key words: large caliber aspheric; optical polishing; polishing pressure; pressure control; PID control

收稿日期:2014-08-13;修订日期:2014-09-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61473050);重庆市科技攻关资助项目(No. CSTC2012GG-YYJS40008)

1 引 言

大口径非球面光学元件加工是一个复杂的工艺过程,研抛工具和非球面间的研抛压力直接影响非球面的研抛质量^[1]。在传统的光学加工过程中,研抛细磨阶段往往采用手工修抛的方式来加工光学元件,但人工施加研抛压力存在效率低下,重复精度差等缺点,不适合大口径高精度光学元件的大批量生产^[2-3]。

目前,国外大口径非球面光学元件研抛技术比较成熟,其中具有代表性的是美国亚力桑那大学开发的应力盘技术、Itek 公司开发的应力抛光技术和离子束抛光技术等^[4]。国内对大口径非球面光学元件研抛控制系统的研究起步较晚,目前主要依靠集成数控机床和摆架式抛光机等进行研抛^[5],研抛压力均需通过工具系统的位移及其与非球面的接触变形来产生和控制,存在力-位耦合问题^[6]。为了解决这一问题,国内外学者对研抛压力的控制策略和研抛路径规划进行了大量的研究,但将气动压力控制系统运用于光学研抛压力控制的比较少。

由于气动压力具有有效抑制高频干扰和柔性接触镜面的特性,故有学者将单路气压控制方式引入行星式旋转磨头,建立研抛压力控制系统^[1]。但在前期的模拟实验中,发现该系统存在低压控制不稳定和末端压力检测不合理的缺陷。因此,本文提出了采用双路气压控制方式,通过两个电磁比例阀控制气缸的上、下腔压强,与气动轴末端压力传感器构成的双路气压控制系统。该系统根据压力的设定范围改变控制气缸下气腔电磁比例阀的工作模式,采集研抛磨头的末端输出压力作为反馈压力,提高了研抛压力低压控制的稳定性和精确性,实现了研抛压力的无级调节和柔性控制,为大口径非球面光学元件行星式研抛提供了一种安全、稳定和精确的研抛压力控制方法。

2 研抛压力控制原理

经典抛光技术和现代计算机控制抛光技术的理论模型都是基于 Preston 假设,即在很大范围内,抛光可以被描述成一个线性方程^[7]:

$$\frac{dz}{dt} = Kvp, \quad (1)$$

式中: K 为比例常数, v 为被抛光物件表面一点 (x, y) 的瞬时抛光速度, p 为该点 (x, y) 的瞬时正压强。因此知道了某一点的速度和压强以及作用时间 t , 就可以计算出被抛光物件表面材料的去除量 Δz 。

采用气动压力为研抛装置提供研抛压力,工作示意如图 1 所示。研抛压力通过气缸直接作用在研抛盘联动轴上,联动轴通过球铰与研抛盘连接,使研抛盘贴合镜面,同时研抛磨头通过机器人的姿态调整使气动联动轴垂直于研抛盘,把研抛压力施加在非球面元件的法线上。由于气缸存在一定的缓冲和可压缩性,控制研抛盘柔性接触非球面元件,可以避免非球面元件被压坏。

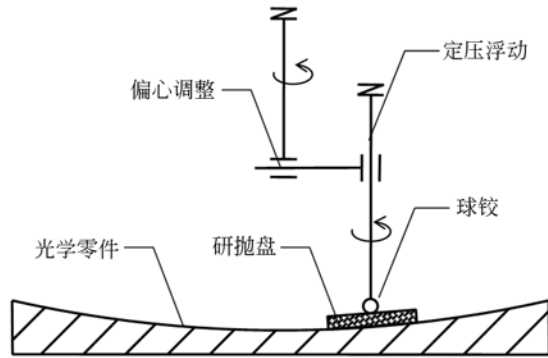


图 1 磨头工作示意图

Fig. 1 Grinding head working diagram

为了提高系统低压的控制精度,采用 2 个电磁比例阀构造研抛压力控制系统。其输出的气压分别作用于低摩擦气缸的上、下腔,使低摩擦气缸上下腔产生稳定的压差,通过低摩擦气缸提供研抛压力,图 2 所示为研抛压力控制原理。

这种控制方式与单路气压控制相比,具有提高高压控制稳定性的优点。由于比例阀控制精度固定,在低压时比例阀工作在其量程的一小部分,低压控制出现波动不稳定,人为的控制比例阀 2,使其工作在量程的 $1/3$ 处可以有效地提高高压控制精度^[8-10],实现大范围内无级调压。压力大于等于 30 N 时,比例阀 2 输出 0,通过比例阀 1 为系统提供压力,小于 30 N 时比例阀 2 工作在量程

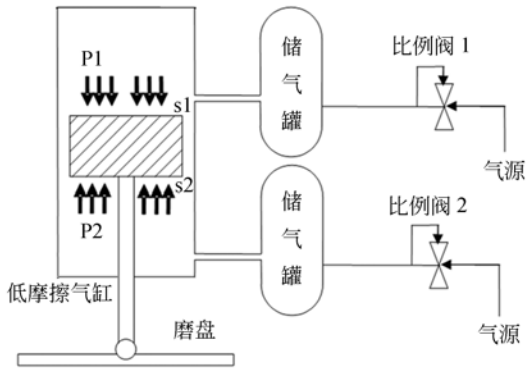


图 2 双路气压控制原理图

Fig.2 Dual pressure control schematic

的 1/3,系统输出的研抛压力为气缸上下腔压力差:

$$\Delta F = p_1 \cdot S_1 - p_2 \cdot S_2. \quad (2)$$

3 气动研抛压力控制系统设计

根据实际研抛工艺的需求,对本气动研抛压力控制系统提出以下几个性能指标:

- (1)研抛压力可调在 0~300 N;
- (2)系统输出研抛压力精度为 1%。

通过分析研抛工艺和所要求的系统性能指标,对气动研抛压力控制系统进行如下设计。

3.1 控制系统构成

双路气压平衡系统的研抛压力回路连接如图 3 所示。在非工作状态下,比例阀关闭,输出压力为 0,在工作状态下,控制器控制比例阀,改变其电磁阀阀芯位置,控制气缸输出压力的大小。控制器根据期望控制量、控制策略和工作阶段,与压力传感器共同组成双模态闭环 PID 控制,来实现研抛压力的精密控制。研抛压力回路由气压输出回路和气压反馈回路两部分组成。

气压输出回路由空压机、过滤组合、电磁比例阀、储气罐和低摩擦气缸组成。空压机和过滤组合为回路提供干燥、无油污的气源。电磁比例阀接收控制器信号,控制作用于气缸的压强,选用 FESTO 比例阀,FSTO 电磁比例阀内部自带闭环控制,其控制方式有单比例阀的常规控制和比例阀加传感器的多传感器控制^[10],常规控制与多传感器控制响应曲线如图 4 所示。由实验结果可以得到,多传感器控制比常规控制的控制精度高,动

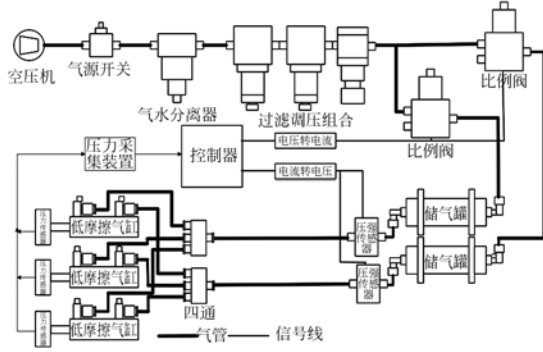


图 3 研磨压力回路连接图

Fig.3 Gas path connection diagram

态响应性能好,不会出现过冲现象,故本文选用 FSTO VPPM 比例阀加传感器的多传感器控制策略。

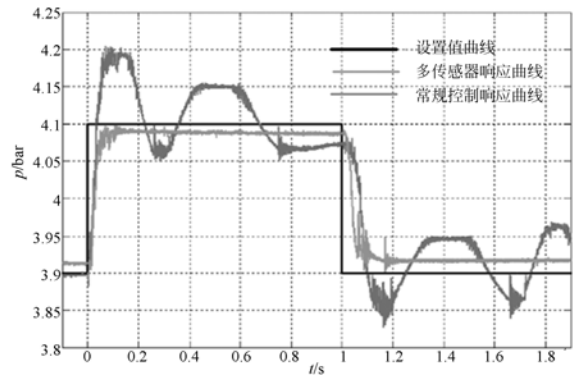


图 4 常规控制与多传感器控制响应曲线

Fig.4 Control response curves of conventional control sensor

该研抛装置为行星旋转结构,不能直接测量磨盘末端输出压力,因此压力传感器安装在每个气缸输出杆末端,用于检测气缸末端压力输出,检测值通过压力检测装置反馈给控制器做 PID 闭环控制。由于该气压控制系统所处环境存在电磁干扰,所选的压力传感器与压强传感器均采用电流信号控制。

3.2 系统模型建立

气动控制系统是非线性控制系统,为了建立其数学模型做如下假设^[11-13]:

- (1)气源是理想气体;
- (2)忽略气动回路连接管的影响;
- (3)整个气动控制过程视为等温过程;
- (4)气体流过比例阀阀口视为等熵过程;
- (5)系统回路没有气体泄漏。

系统所用比例阀为电流型控制阀,比例阀阀

门开度与电流大小成比例,假设比例阀的动力学模型为一阶系统,输入为电流 i ,则输入电流与比例阀开口面积的关系为:

$$A_t = -K_s A_t + K_f i, \quad (3)$$

式中: K_f, K_s 为常数, A_t 为比例阀开口面积。

系统的控制容积 V 为气缸的体积和储气罐体积之和之和,假设气缸活塞开始处于气缸的底部,则:

$$V = V_0 + 3\alpha S_p x_p, \quad (4)$$

式中: V 为系统控制容积, V_0 为储气罐体积, S_p 为气缸活塞面积, x_p 为气缸活塞位移, α 为气缸的作用效率值,可以通过实验测试的方法确定该值。

气体流过比例阀阀口是一个复杂的过程,通常把它当做理想气体的无摩擦等熵流动,结合气体的流量方程、理想气体方程和气体质量密度方程,可以得到系统加压和释放压力动态过程的微分方程:

$$\frac{dp}{dt} = \begin{cases} B_r \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/k+1} \sqrt{C}, & \frac{p_d}{p_u} \leq 0.528 \\ B_r \sqrt{C \left[\left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{(k+1)/k} \right]}, & \frac{p_d}{p_u} > 0.528 \end{cases}, \quad (5)$$

$$C = \frac{2k}{(k+1)} R_0 T_1, \quad (6)$$

$$B_r = \frac{kA(t)P_u}{V}, \quad (7)$$

式中: $A(t)$ 为 t 时刻气动比例阀阀门的开度面积, R_0 为气体常数, k 为绝热指数, p_u, p_d 分别为比例阀气腔上下游压力,系统施加研抛压力时 $p_u = p_1, p_d = p$,系统减小或释放研抛压力时 $p_u = p, p_d = p_2, p_1, p_2, p$ 分别为气源压力,大气压和气缸压力。

联立式(3)~(7)可得到该气动研抛压力控制系统的数学模型,该模型为复杂的非线性系统,进一步可以知道系统输出压力受阀门参数,气缸效率值和气缸活塞位移波动影响。

气动研抛压力控制系统的主要参数如表 1 所示,为系统通入 0.47 MPa 压力值,通过实验测试和 MATLAB 求解数学模型的方法,分别检测系统的试验输出压力和模型理论计算输出压力,测试曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出通过理论计算所得模型可作为研抛压力控制系统分析模型,可通过对其分析得到研抛压力控制的特性和规律。

表 1 系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of polishing pressure system

K_f (kg/($m^2 \cdot V^{-1}$))	K_s	V_0/L	α	S_p/m^2	P_1/MPa	K	$R_0/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
1.284×10^{-4}	85	0.4	0.75	3.14×10^{-4}	0.8	1.4	287.1

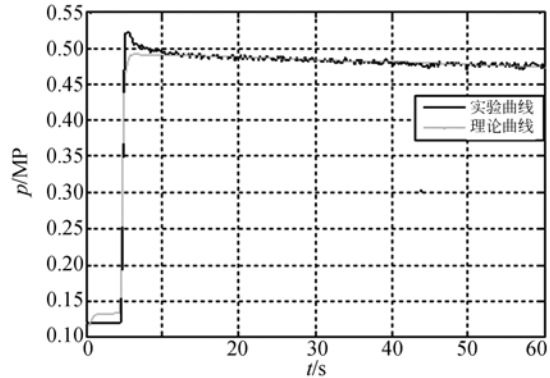


图 5 系统理论输出和实验曲线

Fig. 5 Theoretical and experimental curves of system output

3.3 高精度气动研抛压力控制器设计

由上述系统模型分析可知,研抛过程中气缸活塞位移 x_p 的变化将影响系统气动研抛压力的稳定性,在实际的曲面研抛过程中,系统气缸活塞存在周期性的变化,而且气压控制本身存在响应滞后、刚性低等缺陷^[14]。为解决该问题,设计了如图 6 所示复合控制器。

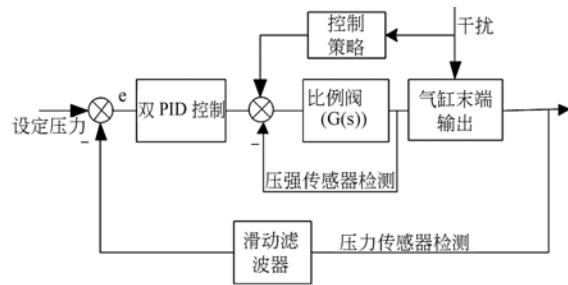


图 6 研抛压力复合控制器模型

Fig. 6 Pneumatic compound controller model

复合控制器采用前馈控制及双模态 PID 的复合控制策略:

$$U = \begin{cases} k_{p1} e_1 + k_{i1} \int e_1 dt + k_{d1} e_1 + k_f F & |e_1| > e_2 \\ k_{p2} e_1 + k_{i2} \int e_1 dt + k_{d2} e_1 + k_f F & |e_1| \leq e_2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: F 为压力设定值, U 为控制器输出控制量, e_1 为设定值与实际值的偏差, k_p 、 k_i 、 k_d 、 k_f 分别为PID控制参数及前馈系数, e_2 为双模态PID控制的切换阈值,由系统对压力的要求及压力的调试性能来确定。

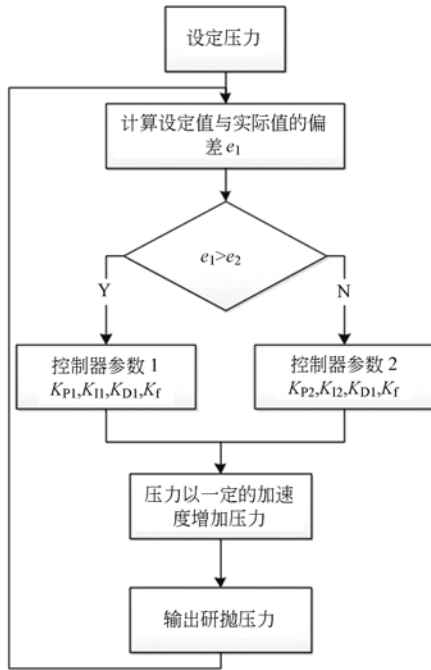


图 7 控制流程图

Fig. 7 Control flow chart

反馈控制系统由两组PID控制参数组成即双模态PID控制系统,以 e_1 作为双模态之间切换的条件。当 e_1 小于 e_2 时,PID 3个参数分别选取较小的比例系数 k_{p1} ,较大的积分系数 k_{i1} 及较小的微分系数 k_{d1} ;当 e_1 大于 e_2 时,PID 3个参数分别选取较大的比例系数 k_{p2} ,较小的积分系数 k_{i2} ,较大的微分系数 k_{d2} ,以缩短系统的响应时间,提高其抗干扰能力,从而提高系统的稳定性及系统精度。具体控制流程如图7所示。

4 实验结果与分析

为了检验研抛压力控制系统的稳定性和性能指标,把研抛装置放在直径为1 m,带压力检测装置的镜胚上进行长时间粗磨,进行工程实践验证,如图8所示。在测试期间分别进行了系统性能指标验证和稳定性测试。

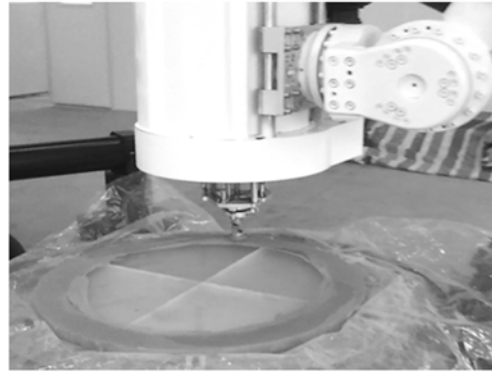


图 8 研抛气压系统试验平台

Fig. 8 Test platform of polishing pressure system

4.1 系统性能指标和稳态波动测试

光学加工系统对研抛压力的调节范围和稳态波动具有严格要求。表2所示为监控所得实际研抛压力数据,从测量数据可得系统输出研抛压力在0~350 N内可调,稳态波动小于1 N,当压力给定值大于设定的安全值350 N时,系统直接输出350 N,避免压坏镜胚,满足研抛工艺的实际需求。

表 2 研抛压力测量结果

Tab. 2 Result of polishing pressure measurement

(N)

设定压力	测定压力	稳态波动
0	0	0
10	9.35	-0.65
15	14.56	-0.46
25	25.34	0.34
50	49.55	-0.45
100	100.98	0.98
150	150.75	0.75
200	200.64	0.64
250	250.55	0.55
300	300.50	0.50
350	349.11	0.89
360	350.00	10.00

4.2 研抛压力低压输出稳定性测试

为了测试本气动研抛压力控制系统双路气压控制时的稳定性,分别测试了系统在局部定点研抛和走螺旋线研抛时,控制器在单路气压结构控制和双路气压结构控制下系统输出压力的稳定性。图9表示设定压力为25 N时,系统定点研

抛过程中的响应曲线。图 10 表示设定压力为 25 N 时,系统走螺旋线研抛时,气缸活塞位移对系统干扰下的响应曲线。

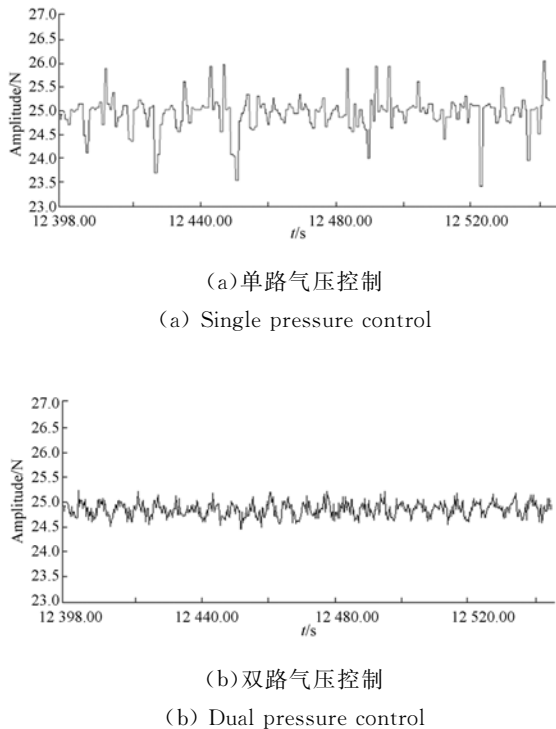


图 9 定点研抛时的气动响应

Fig. 9 Pneumatic responses of sentinel polishing

图 9(a)表明单路气压系统在低压定点工作时,研抛压力稳态波动较大,难以满足精确研抛需求,图 9(b)表示双路气压控制系统可以很好地提高该系统低压输出精度,为精确研抛提供精确稳定的定点研抛压力。

由于镜胚有曲率,系统在走螺旋线研抛时,气缸活塞位置周期性扰动,给系统造成一个周期性干扰。从图 10(a)和图 10(b)可以看出,低压控制时,在同一控制策略下,双路气压控制系统可以明显地消弱该干扰,输出精确稳定的研抛压力,满足精确研抛的实际需求。

从定点研抛实验和螺旋线研抛实验中,发现系统压力控制存在一个周期为 0.3 s 的气压波动。由于气压回路、气缸、滑环存在气压泄漏,气压控制存在滞后性,所以产生了气压波动,0.3 s 波动周期由比例阀反应时间和气压回路的长短所决定。尽管存在周期波动,但研抛压力稳态误差小于 1 N,系统还是满足研抛对研抛压力的需求。

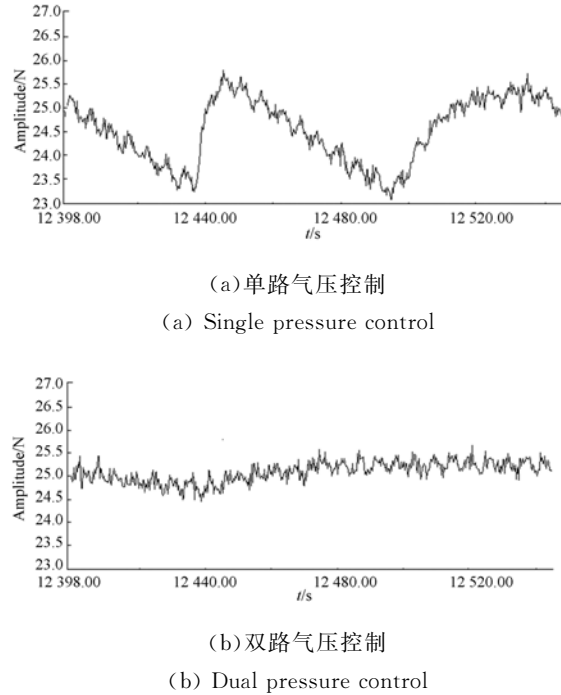


图 10 螺旋线研抛时的气动响应

Fig. 10 Pneumatic responses of spiral polishing

4.3 系统动态性能测试

研抛过程中,不同研抛阶段所需要的研抛压力不同,因此系统研抛压力的动态特性影响着研抛质量。图 11 所示为系统系统定点研抛时研抛压力从 30 N 升到 80 N 的动态响应曲线。

从图 11 可以看出,系统研抛压力从 30 N 上升至 80 N 过渡平缓,没有超调现象,不会出现压力过冲压坏镜胚的事故,研抛压力稳定,上升时间为 20 s。由于决定研抛质量的是研抛压力的稳定性,对系统动态响应时间要求不是很高,所以该系统满足实际研抛的安全和工艺需求。

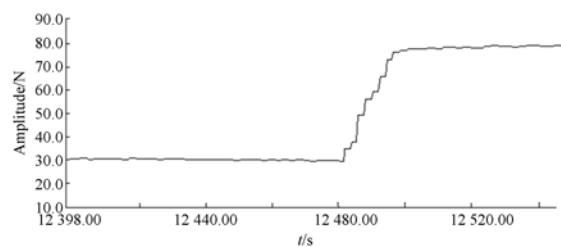


图 11 定点研抛时系统动态响应曲线

Fig. 11 Dynamic pneumatic response of sentinel polishing

5 结 论

本文根据研抛工艺对研抛压力的要求设计了

双路气压平衡的研抛压力控制系统,可实现高精度,高稳定性的抛光盘压力控制,为光学元件加工提供了一种高效安全的研抛压力控制系统。实验表明,系统输出压力在0~350 N内可无级调节,过段平缓,稳态压力波动小于1 N,实现了研磨压

力的高效、安全和智能控制,可以满足非球面光学加工系统对研抛压力的设计需求。但在实践工程测试的过程中发现该控制系统还存在调节时间过长、气压变化响应滞后等问题,有待进一步的完善。

参考文献:

- [1] 史永杰,郑堤,王龙山,等. 非球面精密数控研抛中研抛压力的控制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1013-1021.
SHI Y J, ZHENG D, WANG L SH, *et al.*. Polishing force control in precise NC polishing of aspheric parts[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1013-1021. (in Chinese)
- [2] 王鹏,陈压,宣斌,等. 大口径光学元件的机械手抛光[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1077-1085.
WANG P, CHEN Y, XUAN B, *et al.*. Polishing large aperture mirrors by manipulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1077-1085. (in Chinese)
- [3] 罗霄. 采用平转动应力盘技术加工超大口径非球面的研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2011.
LUO X. *Fabrication of large aspherics using stressed lap with orbital tool motion*[D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2011. (in Chinese)
- [4] ZHAN J M, ZHAO J, *et al.*. Study of the contact force in free form-surfaces compliant EDM polishing by robot [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 29(3): 186-189.
- [5] 王建. 大口径高精度光学元件数控抛光技术研究[D]. 四川:四川大学, 2004.
WANG J. *Stud on computer controlled optical finishing for large aperture high precision optics* [D]. Sichuan: Sichuan University, 2004. (in Chinese)
- [6] 刘振宇,罗霄,邓伟杰,等. 大口径非球面的组合加工[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2791-2797.
LIU ZH Y, LUO X, DENG W J, *et al.*. Multi-mode optimization for large optical aspheric mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2791-2797. (in Chinese)
- [7] 王楷,吕科,石为人,等. 大口径光学抛光系统的气动压力控制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 531-536.
WANG K, LV K, SHI W R, *et al.*. Pneumatic pressure control of large caliber optical polishing system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(3): 531-536. (in Chinese)
- [8] 路波,陶国良,刘昊. 零重力模拟气动悬挂系统的建模及恒压控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(2): 379-385.
LU B, TAO G L, LIU H. Modeling and constant pressure control of pneumatic suspension system for zero-gravity simulation [J]. *Journal of Zhejiang University Science (Engineering Science)*, 2010, 44(2): 379-385. (in Chinese)
- [9] 班伟,陶国良,路波,等. 新型气动比例压力阀的建模研究与特性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(11): 1953-1959.
BAN W, TAO G L, LU B. Modeling and characteristics on a new pneumatic proportional pressure valve [J]. *Journal of Zhejiang University Science (Engineering Science)*, 2012, 46(11): 1953-1959. (in Chinese)
- [10] 陆艺,郭斌,潘小旺,等. 直动型气动电磁阀综合性能测试系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 795-800.
LU Y, GUO B, PAN X W, *et al.*. Study on integrative performance test system for direct-driven pneumatic solenoid valve [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(4): 795-800. (in Chinese)
- [11] 胡永健. 一种基于PID算法的气压控制技术[J]. 测控技术, 2011, 30(8): 59-62.
HU Y J. A pneumatic pressure control of technology based on PID algorithm [J]. *Measurement & Control Technology*, 2011, 30(8): 59-62. (in Chinese)
- [12] 曹剑,朱笑丛,陶国良. 气动伺服控制中特性参数与结构参数的辨识[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(3): 569-573.
CAO J, ZHU X C, TAO G L. [J]. *Journal of Zhejiang University-Science (Engineering Science)*, 2010, 44(3): 569-573. (in Chinese)
- [13] 彭彦卿,罗键,兰维瑶. 基于模式识别的脉冲压力

自适应控制 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (11): 2351-2356.

PENG Y Q, LUO J, LAN W Y. Polishing large aperture mirrors by manipulator [J]. *Chinese Journal of scientific Instrument*, 2008, 29 (11): 2351-2356. (in Chinese)

[14] WANG X S, CHENG Y H, PENG G ZH. Modeling and self-tuning pressure regulator design for pneumatic pressure load systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2007 (15): 1161-1168.

作者简介:



范敏(1975—),女,重庆人,副教授,硕士生导师,1998年、2001年、2008年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事智能感知、控制与决策等方面研究。Email: fanmin@cqu.edu.cn



刘凤(1989—),男,江西萍乡人,硕士研究生,2012年于重庆大学获得学士学位,主要从事自动控制和气动控制等方面研究。Email: lf20085421@sina.com.

(版权所有 未经许可 不得转载)