

文章编号 1004-924X(2011)05-1013-09

非球面精密数控研抛中研抛力的控制

史永杰^{1,2}, 郑 堤^{*2,3}, 王龙山¹, 胡利永²

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;
3. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100)

摘要:提出了一种基于磁流变力矩伺服装置(MRT)的研抛力控制方法来控制非球面数控研抛系统中的研抛力以实现恒压力研抛。研究了该方法的原理、模型、影响因素并研发了相应的实验研究系统。阐述了基于磁流变力矩伺服装置的研抛力控制原理;应用 Preston 方程分析了恒压力控制的重要性并基于 Hertz 理论建立了研抛压力模型,进而建立了研抛力控制模型,探讨了影响研抛力控制的主要因素;最后,规划了系统的研抛压力并进行了实验研究。实验结果表明,在研抛用时均为 90 min 的情况下,恒力研抛得到的非球面表面粗糙度为 0.067 μm ,表面粗糙度不均匀度为 94.4%,而恒压力研抛得到的表面粗糙度为 0.028 μm ,表面粗糙度不均匀度为 11.4%,研抛质量和效率显著提高。该方法能够独立、主动、实时地控制研抛过程中的研抛力和研抛压力,实现非球面超精密、高效、低成本数控研抛。

关键词:数控研抛;非球面;研抛力;研抛压力;磁流变力矩伺服装置

中图分类号:TQ171.684 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111905.1013

Polishing force control in precise NC polishing of aspheric parts

SHI Yong-jie^{1,2}, ZHENG Di^{2,3*}, WANG Long-shan¹, HU Li-yong²

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
3. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

* Corresponding author, E-mail: zhengdi@nbu.edu.cn

Abstract: A novel force control method was proposed based on the Magnetorheological torque-servo (MRT) to control the polishing force to maintain a polishing pressure constant in precise NC polishing of aspheric parts. The mechanism, model and affecting factors of the method were investigated, and a corresponding polishing system was developed. Firstly, the mechanism of the polishing force control method based on the MRT was presented. Then, the principle of constant pressure polishing was analyzed by using Preston equation, and the model of polishing pressure was established according to Hertz theory. Finally, the control model of polishing force was deduced to realize the constant pressure polishing, and the affecting factors of model were discussed. Experimental results indicate that the surface roughness of the part improves from initial value 1.6 μm to 0.067 μm and 0.028 μm respectively, and the unevenness of surface roughness is 94.4% and 11.4%, respectively, after polis-

收稿日期:2010-07-23;修订日期:2010-09-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50705044);宁波市重点实验室开放基金资助项目(No. 2007A22005)

hing with the constant force and constant pressure and the polishing time in 90 min, which means the polishing quality and efficiency have been improved greatly. It is concluded that the method can control the polishing force and polishing pressure independently, actively, and in real time and can improve the surface quality of parts remarkably.

Key words: Numerical Control (NC) polishing; aspheric part; polishing force; polishing pressure; Magnetorheological Torque servo (MRT)

1 引言

目前,高精度非球面和自由曲面多采用研磨和抛光(简称研抛)工艺作为最终加工工序^[1]。基于机床结构的数控研抛系统,由于具有较高的加工效率、加工精度和系统刚度,代表了非球面精密、超精密研抛技术的发展方向^[2-3],日益成为国内外学者和工程技术人员的研究热点^[4-5]。

相关研究表明,决定非球面研抛质量的是研抛工具和非球面之间的研抛压力,而非研抛力^[6],而研抛压力会随着非球面表面的曲率半径、施加在非球面表面的研抛力、研抛工具姿态的变化而实时变化^[7]。如果研抛压力过大,非球面将被过研抛,甚至损坏研抛工具;如果研抛压力过小,则非球面表面材料去除率降低,研抛效率降低。因此,为了提高研抛质量,需要实时控制研抛过程中的研抛力以保持研抛压力恒定。

然而,现有的数控研抛过程所需的研抛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。如果要精确控制研抛过程中的研抛力,就需要研抛工具的位置偏离理想编程轨迹,使得非球面和研抛工具之间产生足够的接触变形;如果要精确控制研抛工具的位置,则不能产生足够的接触变形,也就难以获得所需的研抛力。这一力-位耦合,各自难以独立、精确、实时控制的问题,已成为阻碍研抛质量和效率提高的关键。为了解决这一问题,国内外学者进行了大量的研究,但这些研究主要集中在被动柔顺控制^[8]和主动柔顺控制(力控制)^[9-10]的控制策略以及研抛路径的规划^[11]上,力-位耦合问题仍没有从根本上得到解决。

本文提出一种新的基于磁流变力矩伺服装置的数控研抛力控制方法,由磁流变力矩伺服装置(Magnetorheological torque servo, MRT)独立控制研抛过程中所需的研抛力,由两轴数控车床

控制研抛工具的位置和非球面转速,从而实现了研抛力与研抛工具位置的解耦控制。在此基础上,基于 Hertz 理论建立了系统研抛压力模型,以恒压力控制为目标建立了研抛力控制模型,分析了影响研抛力控制的主要因素,规划了系统的研抛压力,研制了相应的实验系统,并进行了一系列实验研究。

2 基于 MRT 的数控研抛力控制原理

2.1 磁流变力矩伺服装置 (MRT)

MRT 是本文研制的一种基于磁流变效应的新型力矩传递与控制装置,其结构原理如图 1 所

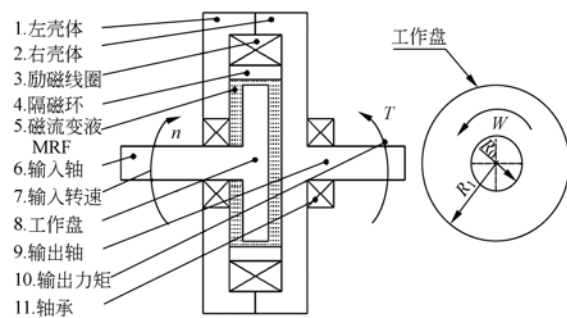


图 1 MRT 的结构原理

Fig. 1 Schematic structure of MRT

示。该装置以剪切模式工作,通过磁流变液的剪切应力传递力矩,其输出力矩可根据需要由施加在励磁线圈上的励磁电流伺服控制,具有结构简单、响应快、可控性强、无机械冲击、噪声低等优点。通过实验测试^[12],获得本文设计的 MRT 输出力矩为:

$$T = 1.1398I - 0.3812 \quad (1)$$

2.2 基于 MRT 的研抛力控制机理

基于 MRT 的研抛力控制机理如图 2 所示。MRT 和研抛工具都固定在数控车床的刀架上, MRT 输出的力矩 T 通过同步带传递到研抛工具的刀柄上,研抛工具的刀柄和固定研抛头的连杆

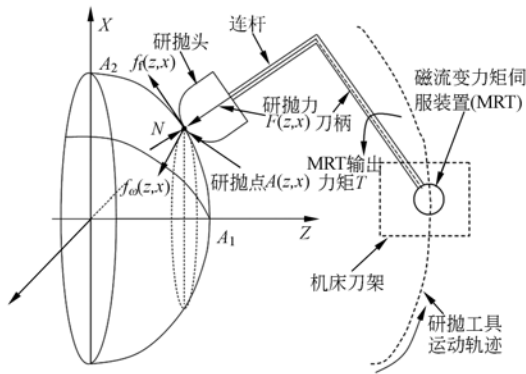


图 2 基于 MRT 的研抛力控制机理

Fig. 2 Control mechanism of polishing force

刚性垂直连接,保证 MRT 的输出力矩 T 垂直施加在研抛头上。研抛过程中,数控(NC)车床的数控系统始终控制研抛头垂直于非球面表面,在 XOZ 平面内沿着非球面的旋转母线 $A_1 A_2$ 做研抛进给运动,非球面表面在研抛点 $A(z, x)$ 处受到研抛头对它的法向力 $F_n(z, x)$,切向摩擦力 $f_o(z, x)$ 和沿研抛头进给方向上的摩擦力 $f_i(z, x)$ 。由于研抛头始终垂直于非球面表面,因此由 MRT 提供的研抛头对非球面的法向力 $F_n(z, x)$ 就是研抛点的研抛力 $F(z, x)$,可表示为:

$$F(z, x) = F_n(z, x) = T(z, x) / L, \quad (2)$$

其中, L 为刀柄长度, $T(z, x)$ 为 MRT 在研抛点 A 提供的力矩。将式(1)带入式(2),可得:

$$F(z, x) = [1.1398I(z, x) - 0.3812] / L. \quad (3)$$

由式(3)以及前面的分析可以看出,研抛过程中的研抛力可以通过施加在 MRT 线圈上的励磁电流来控制,而研抛工具的位置和姿态则由数控系统按数控程序和预先规划好的路径来控制,从而实现了力控空间、位控空间和姿控空间的正交分离控制,并为研抛力的精确、实时控制奠定了基础。

3 恒压力研抛力控制模型及分析

3.1 恒压力研抛理论

抛光过程中材料的去除率 $h_t(z, x)$ 和有关工艺参数之间的关系可用如下方程来描述^[13]:

$$h_t(z, x) = \frac{dh(z, x)}{dt} = K_p p_n(z, x) v(z, x), \quad (4)$$

其中, $h(z, x)$ 为非球面表面在研抛点 $A(z, x)$ 处材料的去除量; K_p 为比例常数,取决于压力和速度以外的其它一些次要因素; $v(z, x)$ 是研抛工具

和非球面在研抛点处的相对速度; $p_n(z, x)$ 是研抛工具和非球面在研抛点的研抛压力。由式(4)可知,材料的去除率与研抛点的研抛压力、相对研抛速度有关。在数控车床上可以保证非球面表面上不同研抛点的线速度恒定,即 $v(z, x) = v$,此时材料去除率只与研抛压力有关。如果能够控制研抛压力保持恒定,则非球面表面材料的去除率恒定,即 $p_n(z, x) = p$,则可显著提高研抛质量。

3.2 研抛压力模型

研抛压力是指研抛过程中研抛工具和工件在接触区域的平均压力。假设研抛工具和工件都是线弹性体,根据 Hertz 理论,研抛工具和非球面之间的接触区域一般为椭圆,接触压力服从 Hertz 椭圆分布,分布方程为:

$$p(z, x) = p_0(z, x) \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}}, \quad (5)$$

其中, $p_0(z, x)$ 是作用在椭圆中心点的最大接触压力; a, b 分别是接触椭圆的长半轴和短半轴。接触区域的平均压力也即研抛压力 $p_n(z, x)$,可用下式表示:

$$p_n(z, x) = \frac{2}{3} p_0(z, x) = \frac{k_1 k_2}{\pi} \times \left[\frac{16 F_n(z, x) \times E^*}{9 R_r(z, x)^2} \right]^{1/3}, \quad (6)$$

其中, $F_n(z, x)$ 是施加在研抛点的法向研抛力; E^* 是研抛头和非球面的相对弹性模量, $1/E^* = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$; E_1, E_2 分别为研抛头和非球面材料的弹性模量, ν_1, ν_2 分别为研抛头和非球面材料的泊松率; $R_r(z, x)$ 为研抛头和非球面在研抛点的相对曲率半径; k_1 和 k_2 由 k_0 决定, $k_0 = (B - A)/(A + B)$ 。 R_r, A, B 可由式(7)-(9)确定:

$$R_r(z, x) = \frac{1}{2} (AB)^{-1/2}, \quad (7)$$

$$A + B = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'} \right], \quad (8)$$

$$B - A = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right]^2 + \left[\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right]^2 + 2 \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right] \left[\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'} \right] \cos(\alpha) \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

其中, R_1, R_1' 为研抛头在研抛点的最大和最小曲率半径,对于平面研抛头, $R_1 = R_1' = \infty$,对于球形研抛头, $R_1 = R_1' = R_s, R_s$ 为球体半径; R_2, R_2' 为

非球面在研抛点的最大和最小曲率半径; α 为研抛头和非球面在研抛点处的正交主平面的夹角。

3.3 研抛力控制模型

当研抛头和非球面的材料和形状等参数确定以后, k_1, k_2 和 E^* 也随之确定。设:

$$\sqrt[3]{\frac{16}{9}} \times \frac{k_1 k_2}{\pi} \times E^{*2/3} = K_m, \quad (10)$$

根据前面提出的研抛力控制原理, 通过 MRT 施加在研抛头上的力就是研抛头和非球面之间的研抛力, 即 $F(z, x) = F_n(z, x)$, 则式(6)可改写为:

$$p_n(z, x) = K_m \left[\frac{F(z, x)}{R_r(z, x)^2} \right]^{1/3}, \quad (11)$$

若研抛压力 $p_n(z, x)$ 恒定, 设 $p_n(z, x) = p_c$, 则可得:

$$F(z, x) = \frac{p_c^3 \times R_r(z, x)^2}{K_m^3}, \quad (12)$$

令 $(p_c / K_m)^3 = K$, 则式(12)可写为:

$$F(z, x) = K R_r(z, x)^2, \quad (13)$$

式(13)即为恒压力研抛时的研抛力控制模型。将式(3)带入式(13)可得:

$$I(z, x) = \frac{K L R_r(z, x)^2}{1.1398} + 0.3812, \quad (14)$$

式(14)即为恒压力研抛时的励磁电流控制模型。研抛过程中, 可根据非球面表面曲率半径的变化, 按式(14)控制施加在 MRT 线圈上的励磁电流, 即可获得所需的研抛力, 从而实现恒压力研抛。

3.4 模型分析

由式(6)可知, 非球面和研抛工具之间的研抛压力主要受相对曲率半径、研抛力、工件材质等因素的影响。采用平面研抛头时相对曲率半径 $R_r(z, x)$ 就是非球面表面的曲率半径 $R(z, x)$, 即 $R_r(z, x) = R(z, x)$ 。研抛压力 p 与非球面曲率半径 R 和研抛力 F 的关系如图 3 所示。从图中可以看出, 当研抛力恒定时, 研抛压力随着曲率半径的增大急剧减小; 当研抛力增大时, 研抛压力也随之增大, 但增大速率较缓。可见, 非球面曲率半径对研抛压力的影响大于研抛力对研抛压力的影响。

当研抛压力恒定时, 研抛力和曲率半径的关系如图 4 所示。可见, 若要保持研抛过程中的研抛压力恒定, 必须根据非球面曲率的变化对研抛力施加相应的控制。

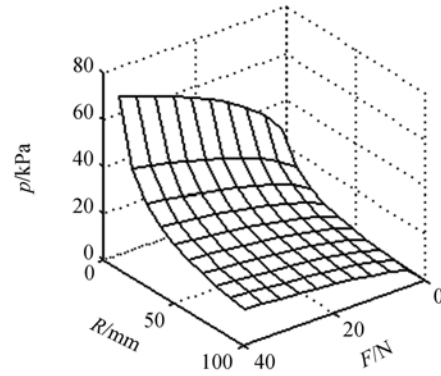


图 3 研抛力与曲率半径对研抛压力的影响

Fig. 3 Effects of polishing force and radius of curvature on polishing pressure

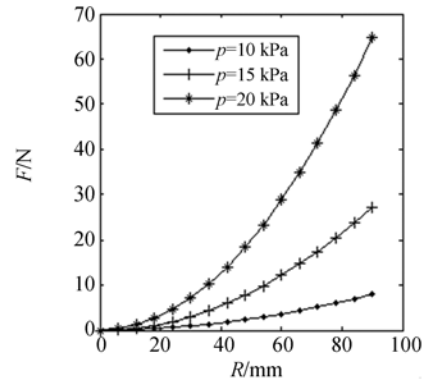


图 4 恒压力研抛时研抛力和曲率半径的关系

Fig. 4 Relationship between F and R

此外, 受数控插补误差等因素的影响, 研抛工具在进给时实际研抛点与编程轨迹中的理想研抛点之间有一个微小的误差, 从而使得研抛点的曲率半径发生了变化。假设研抛工具在 Z 轴方向上的误差为 Δz , 在 X 轴方向上的误差为 Δx , 并设非球面在 XOZ 平面内的母线方程为 $x = q(z)$, 则理想曲率半径 R 、实际曲率半径 R_p 分别如式(15)、(16)所示:

$$R(z, x) = \frac{\sqrt{(1+x'^2)^3}}{x''}, \quad (15)$$

$$R_p(z, x) = \frac{\sqrt{(1+(x+\Delta x)')^2)^3}}{(x+\Delta x)''}, \quad (16)$$

其中, $x'', (x+\Delta x)''$ 为非球面母线方程 $x = q(z)$ 在理想研抛点和实际研抛点的二阶导数, $x', (x+\Delta x)'$ 为一阶导数, 实际研抛力变化可用下式表达:

$$\Delta F(z, x) = K [R_p^2(z, x) - R^2(z, x)], \quad (17)$$

令 $K[R_p(z, x) + R(z, x)] = C, R_p(z, x) - R(z, x) = \Delta R$, 则式(17)可表示为:

$$\Delta F(z, x) = C\Delta R. \quad (18)$$

式(18)即为运动轨迹误差引起的研抛力误差, 其与非球面表面轮廓的凹凸程度有关。

4 研抛实验

4.1 研抛实验系统

为了验证所提出的理论和方法, 本文研制了基于 MRT 的非球面数控研抛实验系统, 如图 5 所示。该系统主要包括 3 部分:(1)研抛力控制子系统, 主要由磁流变力矩伺服装置, 可控电流源, 工控机, 力矩控制系统等组成, 通过控制施加在 MRT 线圈上的励磁电流, 控制 MRT 的输出力矩, 进而控制研抛过程中的研抛力;(2)位姿控制子系统, 主要由 CAK3665Di 型数控车床的数控系统、刀架和研抛头等组成, 数控系统控制研抛工具的运动轨迹, 使得研抛头始终垂直于非球面表面, 保证理想的研抛轨迹和姿态;(3)主运动子系统, 由数控车床的主运动系统提供非球面工件的旋转运动及速度控制。



图 5 数控研抛实验系统

Fig. 5 Experimental NC polishing system

在该实验系统上对母线如图 6 所示的铝质椭球进行研抛试验, 所采用的抛光介质为金刚石抛光膏, 粒度分别为 W2.5, W1.5 和 W0.5, 研抛工具为直径 25 mm、厚度 8 mm 的盘状羊毛毡。椭球体长半轴为 23 mm, 短半轴为 15 mm, 曲率半径变化如图 7 所示。采用宁波联晟公司生产的 SRM-1(D) 型表面粗糙度测量仪检测表面粗糙度。

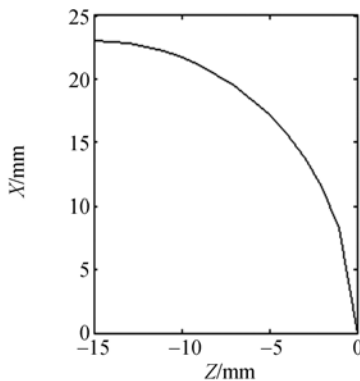


图 6 非球面表面轮廓

Fig. 6 Profile of aspheric part in XOZ plane

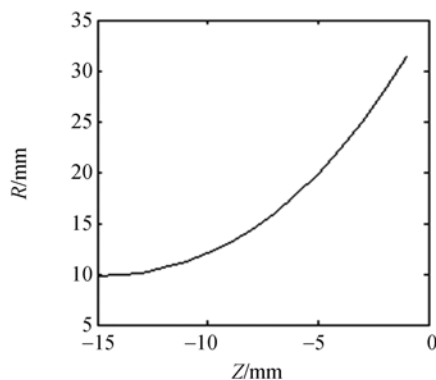


图 7 非球面表面曲率变化

Fig. 7 Curvature variation of aspheric part

4.2 研抛压力规划

本文研制的 MRT 在工作区间内可提供的最大研抛力 $F_{max} = 45 \text{ N}$, 最小研抛力 $F_{min} = 2.7 \text{ N}$, 因此必须依据非球面曲率半径的变化对预设定的研抛压力 p 进行规划, 以选择合适的研抛压力。图 8 所示为采用最大研抛力和最小研抛力研抛

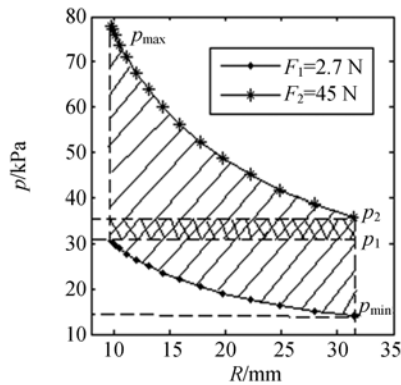


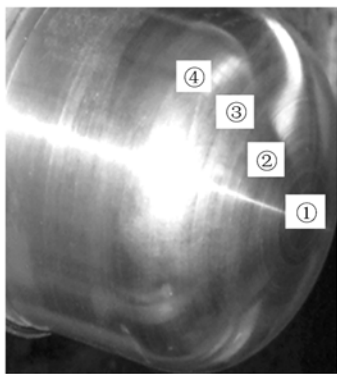
图 8 研抛压力变化区域

Fig. 8 Polishing pressure variation area

时,研抛头和非球面之间的研抛压力。由图 8 可知,当研抛压力 $p_{\min} < p < p_1$ 时,曲率半径越小,所需的研抛力超出 MRT 的工作范围越大;当 $p_2 < p < p_{\max}$ 时,曲率半径越大,所需的研抛力超出 MRT 的工作范围越大。可见研抛压力设定的大小,决定着研抛过程中所需研抛力的范围,为了保证所需的研抛力在 MRT 的工作范围内,应选取最佳研抛压力 $p_1 \leq p \leq p_2$ 。

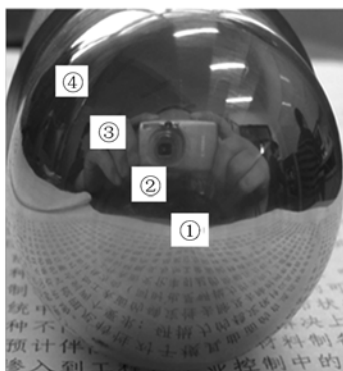
4.3 恒研抛力研抛

保持施加在 MRT 线圈上的励磁电流恒定,使得研抛过程中的研抛力恒定,研抛后的椭球如图 9(b)所示。对椭球表面的四个不同区域的粗糙度进行检测,检测结果如表 1 所示。



(a) 研抛前

(a) Before polishing



(b) 恒力研抛后

(b) After polishing with constant force



(c) 恒压力研抛后

(c) After polishing with constant pressure

图 9 椭球体研抛前后对比图

Fig. 9 Ellipsoid part before and after polishing

4.4 恒研抛压力研抛

根据研抛压力规划结果,选取预定研抛压力 $p=35$ kPa,研抛过程中的研抛力控制曲线如图 10 所示,励磁电流控制曲线如图 11 所示。研抛后的椭球如图 9(c)所示,表面粗糙度检测结果如表 1 所示。

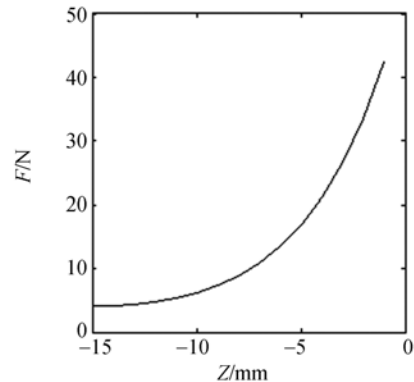


图 10 MRT 控制的研抛力

Fig. 10 Polishing force controlled by MRT

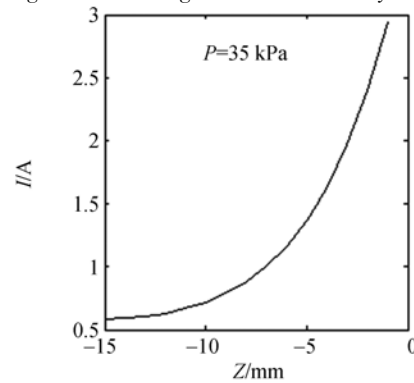


图 11 励磁电流控制曲线

Fig. 11 Control curve of excitation current

表1 表面粗糙度检测结果

Tab.1 Measuring results of surface roughness

测量区域	研抛前粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	恒力研抛		恒压力研抛		研抛用时 t/min		
		研抛力	研抛压力	粗糙度	研抛压力		研抛力	粗糙度
		F/N	p/kPa	$R_a/\mu\text{m}$	p/kPa		F/N	$R_a/\mu\text{m}$
①	1.6		19	0.067		40	0.028	
②	1.45		26	0.051		17	0.025	
③	1.40	7	35	0.025	35	7	0.025	90
④	1.5		41	0.035		4.2	0.027	

4.5 实验结果分析

4.5.1 表面质量

(1)无论是恒力研抛还是恒压力研抛,工件表面质量均得到了很大提高,表面粗糙度从研抛前的 $1.6\mu\text{m}$ 分别降低到研抛后的 $0.067\mu\text{m}$ 和 $0.028\mu\text{m}$,证明了本文提出的研抛力控制方法的正确性和有效性。

(2)恒压力研抛的材料去除率比恒力研抛的材料去除率更为均匀。恒力研抛得到的整个椭球体表面粗糙度的不均匀度为 94.4% ,而恒压力研抛得到的不均匀度仅为 11.4% ,表明恒压力研抛可获得更均匀的材料去除率。

(3)在区域③,两种方法所实际使用的研抛力和研抛压力基本相等,研抛后的表面粗糙度也相等;

在①、②区域,采用恒力研抛时,由于研抛压力较小,材料去除率较低,因此工件表面粗糙度较高,表明决定研抛质量的是研抛压力,而不是研抛力。

(4)区域①和④的表面粗糙度大于区域②和③的表面粗糙度,主要是因为区域④,机床振动和非球面定心误差在研抛力方向上的影响较大,选择合适的转速,减小定心误差可提高此区域的研抛质量;在区域①,椭球体表面的回转半径趋近于零,为保持和其他区域相同的线速度,机床转速应该无限高,而实际研抛中数控机床的转速达不到理想值,因此材料去除率降低,表面粗糙度较大。

4.5.2 研抛力的可控性

本文提出的研抛力控制方法,与非球面材质、表面轮廓和MRT的工作范围有关,需在研抛前预先对研抛工具和非球面之间的研抛压力进行规划;研抛过程中,应依据所建立的研抛力控制模型,通过实时控制励磁电流来控制研抛力;研抛工具在研抛点的驻留时间、研抛工具的位姿由机床的数控系统控制。研抛过程中不需要交互处理研抛力与研抛工具位置的关系,研抛力的可控性强。

5 结论

为了提高非球面表面的研抛质量,需要实时控制研抛过程中的研抛力以实现恒压力研抛。本文提出了一种新的基于MRT的数控研抛力控制方法,研抛过程中的研抛力由MRT独立控制,研抛工具的位置由数控机床的数控系统控制。介绍了MRT的工作原理及输出模型,阐述了基于MRT的研抛力控制机理,基于Preston方程分析了恒压力研抛的意义,进而基于Hertz理论建立了研抛力控制模型,分析了影响模型的因素。实验结果证明:恒力研抛得到非球面表面的粗糙度为 $0.067\mu\text{m}$,表面粗糙度不均匀度为 94.4% ;恒压力研抛得到的粗糙度为 $0.028\mu\text{m}$,表面粗糙度不均匀度为 11.4% ;恒压力研抛工艺优于恒力研抛工艺。该方法满足恒压力研抛对研抛力控制的要求,实现了研抛力的独立、主动和实时控制,显著提高了非球面表面的研抛质量。

参考文献:

- [1] 袁哲俊. 精密和超精密加工技术的新进展[J]. 工具技术, 2006, 40(3): 3-9.
YUAN ZH J. New developments of precision and ultra-Precision manufacturing technology [J]. *Tool Engineering*, 2006, 40(3): 3-9. (in Chinese)
- [2] 张华, 王文, 庞媛媛. 光学表面超精密加工技术[J]. 光学仪器, 2003, 25(3): 47-51.
ZHANG H, WANG W, PANG Y Y. Ultra-precision machining technology optical surface [J]. *Optical instruments*, 2003, 25(3): 47-51. (in Chinese)
- [3] 罗松保, 张建民. 非球面曲面光学零件超精密加工装备与技术[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 75-78.
LUO S B, ZHANG J M. Ultra-precision machining equipment and technology of aspheric optics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 75-78. (in Chinese)
- [4] 王毅, 倪颖, 余景池. 小型非球面数控抛光技术的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1527-1533.
WANG Y, NI Y, YU J CH. Computer controlled polishing technology for small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1527-1533. (in Chinese)
- [5] 薛栋林, 张忠玉, 张学军. 一种中小口径非球面数控抛光技术[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 198-204
XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHANG X J. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 198-204. (in Chinese)
- [6] LIAO L, XI F F, LIU K F. Modeling and control of automated polishing/deburring process using a dual-purpose compliant toolhead[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48: 1454-1463.
- [7] SHI Y J, ZHENG D, ZHAN J M, *et al.*. Modeling and control of NC compliant abrasive polishing for surface revolution [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 97-101: 4057-4060.
- [8] 王坤东, 颜国正, 鄢波. 基于被动柔顺性的机器人位置/力控制[J]. 中国机械工程, 2006, 17(7): 661-665.
WANG K D, YAN G ZH, YAN B. Position/force control of robot based on passive compliance [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(7): 661-665. (in Chinese)
- [9] LOPES A, ALMEIDA F. A force-impedance controlled industrial robot using an active robotic auxiliary device [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, 24: 299-309.
- [10] NAGATA F, HASE T, HAGA Z, *et al.*. A desktop NC machine tool with a position/force controller using a fine-velocity pulse converter[J]. *Mechatronics*, 2009, 19: 671-679.
- [11] 邓伟杰, 郑立功, 史亚莉, 等. 离轴非球面数控抛光路径的自适应规划[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 65-71.
DENG W J, ZHENG L G, SH Y L, *et al.*. Adaptive programming algorithm for generating polishing tool-path in computer controlled optical surfacing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 65-71. (in Chinese)
- [12] SHI Y J, ZHENG D, ZHAN J M, *et al.*. Design, modeling and testing of torque servo driver based on Magnetorheology[C]. *Proceeding of the IEEE International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha, P. R. China: ICMTMA*, 2010: 1081-1084.

作者简介:



史永杰(1983—),男,甘肃灵台人,博士研究生,2005年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事磁流变液智能材料的应用与自动化研抛技术方面的研究。E-mail: jiesy2007@126.com



胡利永(1978—),男,内蒙古乌兰察布人,博士,讲师,2003年于内蒙古工业大学获得硕士学位,2010年于吉林大学获得博士学位,主要从事磁流变液智能材料的应用及机电测控技术等方面的研究。E-mail: huliyong@nbu.edu.cn

通信作者:



郑堤(1956—),男,浙江宁波人,博士,教授,1982年、1984年于大连理工大学分别获得学士、硕士学位,1998年于吉林工业大学(现吉林大学)获得博士学位,主要从事智能材料,精密、超精密加工,数字化制造技术的研究。E-mail: zhengdi@nbu.edu.cn

导师简介:



王龙山(1946—),男,浙江宁波人,教授、博士生导师,主要从事智能制造,精密、超精密加工,CAD/CAM一体化、图像识别等方面的研究。E-mail: lswang@jlu.edu.cn

●下期预告

平转动大磨头加工大口径非圆形球面的粗磨试验

罗 霄^{1,2}, 郑立功¹, 张学军¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

对于大口径非圆形球面反射镜的研磨和抛光,采用传统方法工艺复杂,需要丰富的光学加工经验,而如果采用平转动小磨头的CCOS(Computer Controlled Optical Surfacing)技术,则受磨头尺寸限制,材料去除效率低,加工周期长。本论文基于平转动小磨头技术,通过增大磨头口径的方式来提高其材料去除效率,称为平转动大磨头技术。针对大口径磨头比较突出的边缘效应,通过低阶拟合以及高阶补偿相结合的方法,在虚拟加工算法中引入边缘效应的影响,保证材料去除效率提高的同时具有一定的面形收敛率,从而有效的缩短加工周期。最后利用一块1100×800的体育场形SiC坯料,进行了加工试验,总共22轮加工,总加工时间约51h,面形从122μm(PV)收敛至5.9μm(PV),与传统小磨头相比,效率提高了一倍以上,实现了大口径非圆形球面在粗磨阶段的高效去除。