

文章编号 1004-924X(2009)01-0001-07

# 基于 PZT 的非球面能动抛光盘的变形优化

胡自强<sup>1,2,4</sup>, 凌 宁<sup>1</sup>, 潘君骅<sup>3</sup>, 饶长辉<sup>1</sup>, 姜文汉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 成都光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;  
3. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006; 4. 烟台大学 光电信息学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:**基于 PZT 压电陶瓷驱动器的非球面能动抛光盘,能够在 PZT 驱动器的作用下改变面形,用于中小口径非球面镜加工。研制了一个口径 100 mm、含 19 个 PZT 驱动器的非球面能动抛光盘,用于口径为 350 mm、 $k=-1.112\ 155$ 、顶点半径为 840 mm 的双曲面镜的加工实验。为研究 PZT 压电陶瓷驱动器迟滞效应对非球面能动抛光盘输出面形的影响,实测各 PZT 压电陶瓷驱动器的电压位移特性曲线,用基于径向基函数的神经网络算法建立了各 PZT 压电陶瓷驱动器位移输出特性的数学模型并实施补偿,实测了各 PZT 压电陶瓷驱动器迟滞补偿前后的位移输出值。最后,利用有限元分析方法,得到了迟滞补偿前后非球面能动抛光盘的输出面形 RMS 以及剩余残差 RMS 分别为  $1.910\ \mu\text{m}$  和  $0.342\ \mu\text{m}$ 。通过补偿各 PZT 压电陶瓷驱动器的迟滞效应,非球面能动抛光盘输出面形精度得到了提高,剩余残差 RMS 减少了 82%。

**关键词:**非球面镜;非球面能动抛光盘;迟滞效应;径向基神经网络

**中图分类号:**TH703;TQ171.684 **文献标识码:**A

## Optimization control of PZT actuated deformable aspheric polishing lap

HU Zi-qiang<sup>1,2,4</sup>, LING Ning<sup>1</sup>, PAN Jun-hua<sup>3</sup>, RAO Chang-hui<sup>1</sup>, JIANG Wen-han<sup>1</sup>

(1. *Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*  
3. *Modern Optical Technology Institute, Suzhou University, Suzhou 215006, China;*  
4. *School of Optics & Electronics Information, Yantai University, Yantai 26400, China*)

**Abstract:** The deformable aspheric polishing lap based on Piezoelectric(PZT) actuator can change the lap surface continuously to fit the surface of middle aperture aspheric optical mirrors at any location. In this paper, a 100 mm diameter and deformable aspheric polishing lap consisting of 19 PZT actuators was designed and manufactured to polish a  $\Phi 350$  mm hyperboloid mirror in  $k=-1.112\ 155$ ,  $R=840$  mm. In order to analyze the influence of PZT actuator hysteresis on surface error, the output characteristic of each PZT actuator was measured and the mathematical model of displacement output of each PZT actuator was established by means of Radial Basis Function(RBF) neural network. By finite element method, the surface errors of the deformable aspheric polishing lap were calculated before and after PZT actuator hysteresis compensation. The results show that the surface residual error and RMS are  $1.910\ \mu\text{m}$  and  $0.342\ \mu\text{m}$  respectively. By PZT actuator hysteresis compensation, the surface error

收稿日期:2008-06-10;修订日期:2008-07-23.

基金项目:山东省重点实验室资助项目;烟台大学青年基金资助项目(No. WL07Z7)

of the deformable aspheric polishing lap reduces by 82%.

**Key words:** aspheric mirror; deformable aspheric polishing lap; hysteresis effect; Radial Basis Function(RBF) neural network

## 1 引言

在光学系统中应用非球面可以减少光学元件的数量和重量,缩小系统的尺寸,降低成本并改善像质等。随着现代科技的发展,在军工及高科技民用产品中,如办公自动化设备和照相机变焦镜等领域,对中小口径非球面的需求越来越大<sup>[1-2]</sup>。

计算机控制小磨头抛光技术在国内外已有成功的应用,但由于采用小尺寸磨头进行局部研磨来产生非球面面形,相对于大尺寸高陡度的非球面元件,加工效率低而且容易形成局部的高频残差,将对最终的光学系统质量产生影响<sup>[3]</sup>。

基于能动抛光盘的计算机控制抛光技术,能在抛光运动过程中随时自动改变抛光盘的形状以适应所到之处的镜面面形,实验证明,该技术可以加工出很好的镜面。但这种可变形抛光盘只适用于大镜面,因为使抛光盘变形的执行机构较大,没有足够的空间就无法实现<sup>[4]</sup>。

基于 PZT 压电陶瓷驱动器的非球面能动抛光盘<sup>[5]</sup>,为中小口径非球面镜提供了一种新的工具。其基本原理是:当被加工非球面工件以旋转轴为中心旋转时,能动抛光盘在工件表面沿径向相对工件进行移动;根据能动抛光盘与被加工非球面工件的相对位置,控制 PZT 压电陶瓷驱动器变形,按规定改变能动抛光盘的面形,从而使能动抛光盘能够在任意时刻和位置输出理想非球面镜的局部表面形状,将工件加工为非球面。

PZT 压电陶瓷驱动器的位移输出精度对非球面能动抛光盘面形输出精度具有决定性作用。为研究 PZT 压电陶瓷驱动器迟滞效应对非球面能动抛光盘输出面形的影响,实测各 PZT 压电陶瓷驱动器的电压位移特性曲线,本文用 RBF 径向神经网络算法建立了各 PZT 压电陶瓷驱动器位移输出特性的数学模型并实施迟滞补偿,实测了各 PZT 压电陶瓷驱动器迟滞补偿前后的输出值,并利用有限元分析方法,计算迟滞补偿前后非球面能动抛光盘输出面形的剩余残差,为基于 PZT 压电陶瓷驱动器的非球面能动抛光盘提高输出面形精度提供指导。

## 2 能动抛光盘变形基本原理

基于 PZT 压电陶瓷驱动器的非球面能动抛光盘,由底座、压电陶瓷驱动器、基盘、基头和导线插座组成,如图 1 所示。底座上表面是球面,压电陶瓷驱动器沿径向安装在底座上表面上;基盘是铝制球面薄板;每一个压电陶瓷驱动器上都有一路加载在其上的数控电压源,各压电陶瓷驱动器通过导线插座与各自的数控电压源相联接。

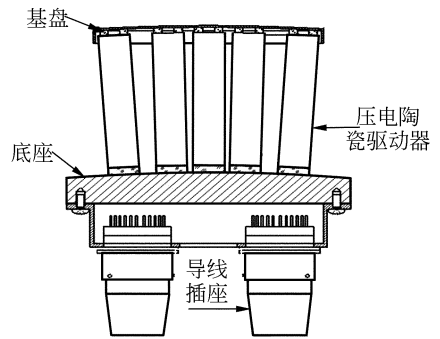


图 1 基于 PZT 的非球面能动抛光盘结构示意图  
Fig. 1 Framework of PZT actuated deformable aspheric polishing lap

改变各 PZT 压电陶瓷驱动器的控制电压,使各 PZT 压电陶瓷驱动器产生伸缩位移变形,从而使非球面能动抛光盘产生变形,输出所需的非球面面形。

因此,PZT 压电陶瓷驱动器的位移输出精度对非球面能动抛光盘面形输出精度具有决定性作用。

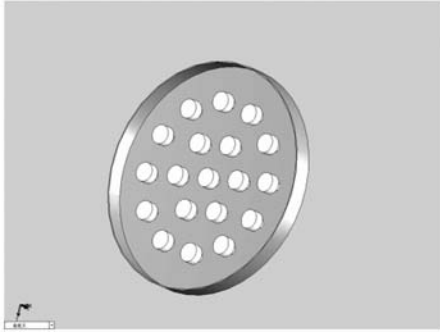
## 3 PZT 压电陶瓷驱动器变形量的理论计算

采用 ALGOR 有限元计算软件包,建立 19 单元 PZT 圆形排布的非球面能动抛光盘有限元计算模型,可计算得到各 PZT 压电陶瓷驱动器的影响函数,如图 2 所示。

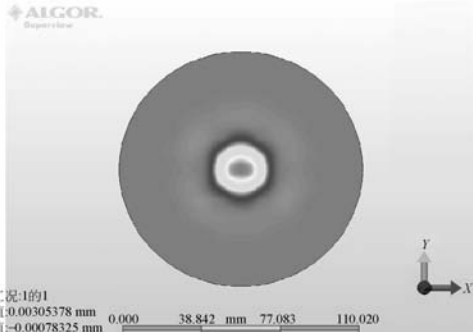
根据能动光学器件的工作原理,非球面能动抛光盘表面整体变形为所有 PZT 压电陶瓷驱动器对盘面单独作用的线性组合<sup>[3]</sup>。以矩阵形式可以表示为:

$$S_i = A_{ij} \times C_j, (i \leq M, j \leq N)$$

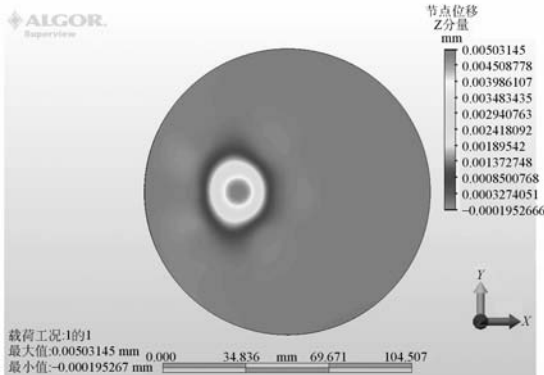
其中,  $C_j$  为第  $j$  个 PZT 压电陶瓷驱动器的驱动信号,  $A_{ij}$  为影响函数, 意义为第  $j$  个 PZT 压电陶瓷驱动器产生单位变形时对第  $i$  个点的影响。



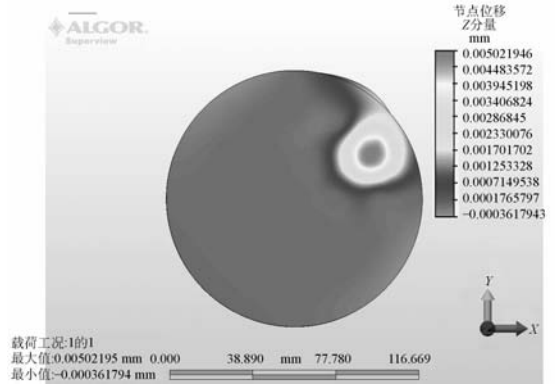
(a) 有限元计算模型  
(a) Finite element model of lap



(b) 1# 驱动器的影响函数  
(b) Influence function of PZT actuator 1



(c) 5# 驱动器的影响函数  
(c) Influence function of PZT actuator 5



(d) 9# 驱动器的影响函数  
(d) Influence function of PZT actuator 9

图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element model of lap

利用有限元方法计算得到的各 PZT 压电陶瓷驱动器影响函数, 可以根据需要的面形, 通过求解矩阵的广义逆来求得每个 PZT 压电陶瓷驱动器需要的变形量:

$$C_j = [A_{ij}]^{-1} \times S_j = [C_1, C_2, \dots, C_n]^T, (i \leq M, j \leq N).$$

以加工口径 350 mm、 $k = -1.112155$ 、顶点半径  $R = 840$  mm 的双曲面非球面镜为例, 根据变形量计算公式<sup>[5]</sup>可计算出, 当非球面能动抛光盘中心到非球面工件中心距离  $L$  为 120 mm 时, 非球面能动抛光盘上任意点需要的变形量如图 3 所示。

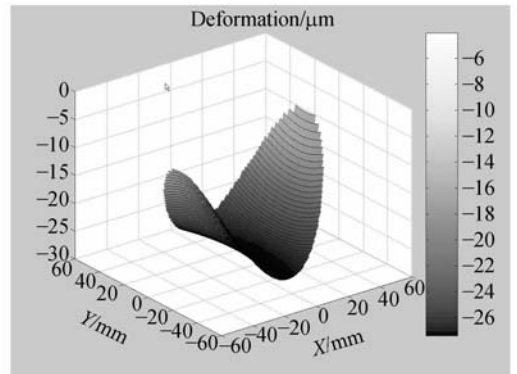


图 3 距离  $L$  为 120 mm 时, 非球面能动抛光盘所需变形量

Fig. 3 Deformation needed by PZT actuated deformable aspheric polishing lap

因此可以计算出当非球面能动抛光盘中心到非球面工件中心距离  $L$  为 120 mm 时, 19 个

PZT 压电陶瓷驱动器所需的理论变形量,见表 1 第 2 列。

表 1 PZT 压电陶瓷驱动器输出位移

Tab.1 Displacement output of each PZT actuator

| 驱动器<br>编号 | 理论变形量<br>( $\mu\text{m}$ ) | 线性近似模型<br>输出结果( $\mu\text{m}$ ) | RBF 网络<br>非线性模型<br>输出结果( $\mu\text{m}$ ) |
|-----------|----------------------------|---------------------------------|--|
| 1         | -27.804 5                  | -25.5                           | -28.3                                    |
| 2         | -24.317 5                  | -21.1                           | -24.1                                    |
| 3         | -26.634 5                  | -24.0                           | -26.6                                    |
| 4         | -25.089                    | -22                             | -24.8                                    |
| 5         | -21.232                    | -18.0                           | -21.7                                    |
| 6         | -25.26                     | -22.4                           | -25.2                                    |
| 7         | -26.768 5                  | -24.1                           | -26.9                                    |
| 8         | -6.167                     | -2.4                            | -5.7                                     |
| 9         | -11.889 5                  | -8.2                            | -12.3                                    |
| 10        | -20.919 5                  | -17.4                           | -21.4                                    |
| 11        | -26.398                    | -23.8                           | -26.5                                    |
| 12        | -22.804                    | -19.8                           | -22.7                                    |
| 13        | -13.756 5                  | -10.3                           | -13.5                                    |
| 14        | -9.126                     | -4.7                            | -9.7                                     |
| 15        | -13.705 5                  | -10.2                           | -13.3                                    |
| 16        | -23.100 5                  | -20.3                           | -22.8                                    |
| 17        | -27.289                    | -24.7                           | -27.8                                    |
| 18        | -21.586                    | -18.5                           | -22                                      |
| 19        | -11.294 5                  | -7.5                            | -11.8                                    |

在理想模型情况下,各 PZT 压电陶瓷驱动器按理论值无误差输出,则非球面能动抛光盘输出面形残差  $\text{RMS}=0.303 \mu\text{m}$ ,见图 4。

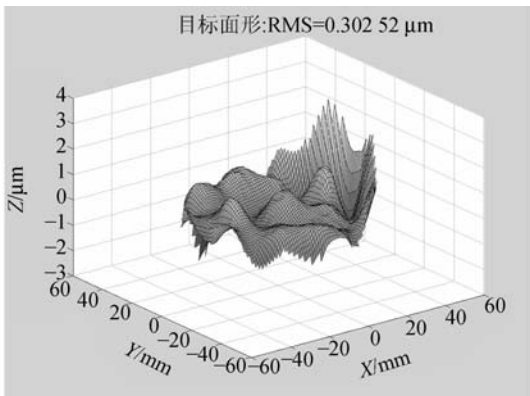


图 4 理想模型,  $\text{RMS}=0.303 \mu\text{m}$

Fig.4 Ideal model,  $\text{RMS}=0.303 \mu\text{m}$

## 4 线性近似模型

考虑 PZT 压电陶瓷驱动器的固有迟滞特性,在许多 PZT 压电陶瓷驱动器的实际应用中,为了控制简便,常采用线性近似模型,即把 PZT 压电陶瓷驱动器的输入电压  $V$  与输出位移  $Y$  近似为线性关系:

$$Y=A * V+B$$

实测各 PZT 压电陶瓷驱动器的电压位移特性曲线,可求出各驱动器的系数  $A$  和  $B$ 。再根据各驱动器所需的理论变形量,利用线性近似模型,求出对应输入电压。然后各驱动器输入相应电压,利用微位移传感器实测各驱动器的实际输出位移值,见表 1 第 3 列。

在采用线性近似模型情况下,根据各 PZT 压电陶瓷驱动器的实际输出位移值,非球面能动抛光盘输出面形残差  $\text{RMS}=1.910 \mu\text{m}$ ,见图 5。

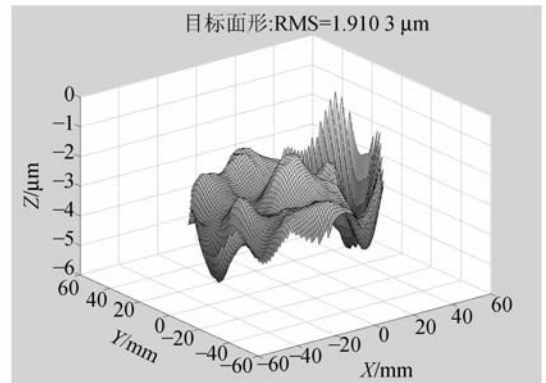


图 5 线性近似模型,  $\text{RMS}=1.910 \mu\text{m}$

Fig.5 Linearity model,  $\text{RMS}=1.910 \mu\text{m}$

## 5 基于径向基神经网络的迟滞补偿模型

PZT 压电陶瓷驱动器的固有迟滞特性,决定了采用线性近似模型会导致非球面能动抛光盘输出面形残差较大。

近年来国内外的专家学者提出了很多理论,针对 PZT 压电陶瓷驱动器迟滞特性建立准确的模型以有效地消除迟滞非线性特性。例如,Preisach 基本模型及其改进形式<sup>[6-10]</sup>,神经网络建模和遗传算法建模<sup>[11]</sup>,Winer 模型<sup>[12]</sup>等,各有

优缺点。

在前向神经网络中,RBF神经网络是一种局部神经网络,具有计算量少,学习速度快等诸多优点,被广泛应用到对象的建模、控制及信号处理等领域。近年来的研究表明,RBF神经网络具有较佳的函数逼近能力,可以以任意精度逼近任一平滑函数<sup>[13]</sup>;而且RBF神经网络从输入层到输出层的非线性映射可以有效地降低数据规模,它的非线性逼近能力比传统的代数迭代法的线性调整参数的收敛速度更快<sup>[14]</sup>。

RBF神经网络是一种三层前馈神经网络,隐含层节点取高斯核函数,该核函数能对输入矢量产生局部响应,对输入信号进行探测产生一个感受野。输出节点对隐含层节点的输出进行线性加权求和。

根据能动抛光盘的基本原理:能动抛光盘在工件表面沿径向相对工件进行移动,根据能动抛光盘与被加工非球面工件的相对位置,控制PZT压电陶瓷驱动器变形,按规定改变能动抛光盘的面形,从而使能动抛光盘能够在任意时刻和位置输出理想非球面镜的局部表面形状,将工件加工为非球面。以加工口径350 mm、 $k = -1.112\ 155$ 、顶点半径 $R = 840$  mm的双曲面非球面镜为例,可计算出在加工过程中,当非球面能动抛光盘中心到非球面工件中心距离 $L$ 为90~130 mm时,非球面能动抛光盘上16#驱动器所需变形量如图6所示。

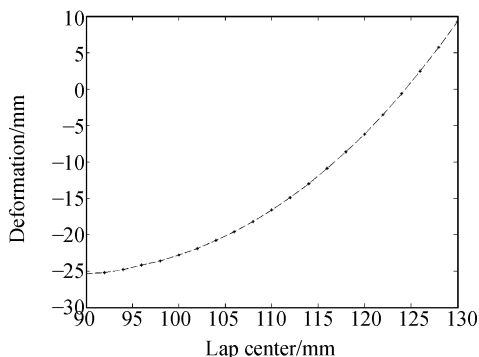


图 6 16#驱动器所需变形量

Fig. 6 Deformation need by PZT actuator 16

加工过程中,能动抛光盘在 $L$ 为90~130 mm之间做往复运动,因此16#驱动器沿图6所示曲线,往复依次顺序伸缩变形。因此,在任意时刻,根据磨盘的位置和运动方向,可确定16#驱

动器所需位移以及电压变化的历史和趋势,从而确定16#驱动器所需电压。

实测16#压电陶瓷驱动器电压位移特性曲线,电压从-310 V上升到+150 V,再从+150 V下降到-310 V,每次改变10 V,用微位移传感器测量非球面能动抛光盘上该对应点的变形量。将电压位移特性曲线的上升和下降部分,分别利用RBF神经网络拟合,建立非线性模型。实际测量数据以及得到的RBF神经网络非线性模型拟合曲线见图7。

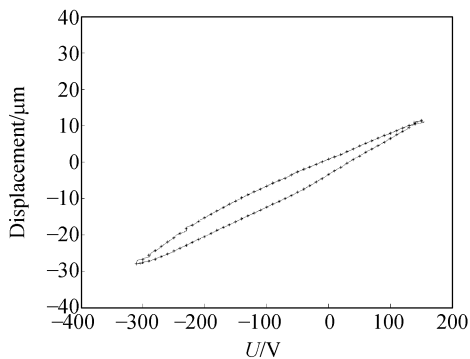


图 7 16#驱动器的实测数据和拟合曲线

Fig. 7 Measured data and fitted curve of PZT actuator 16

根据16#驱动器往复依次顺序伸缩变形的特点,利用变形量 $-25\ \mu\text{m}$ 至 $10\ \mu\text{m}$ 之间的电压位移特性外环数据训练网络,在已知所需位移和电压变化的历史和趋势时,可利用训练好的RBF神经网络非线性模型预测所需控制电压。

选取8个位移值和电压变化趋势,利用训练好的RBF神经网络非线性模型,预测所需控制电压。输入电压,测量实际输出位移,计算相对误差,见图8。

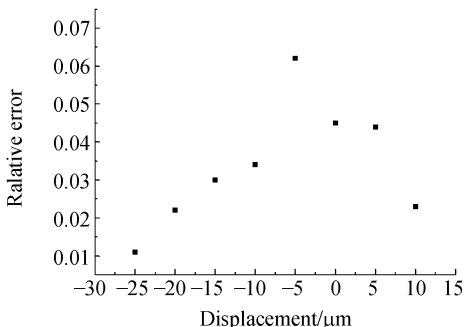


图 8 16#驱动器的实测数据和拟合曲线

Fig. 8 Measured data and fitted curve of PZT actuator 16

同理,实测各 PZT 压电陶瓷驱动器的电压位移特性曲线,用 RBF 径向基神经网络算法建立各 PZT 压电陶瓷驱动器位移输出特性的数学模型。再根据各驱动器所需的理论变形量,利用 RBF 神经网络非线性模型,求出对应输入电压。然后各驱动器输入相应电压,利用微位移传感器实测各驱动器的实际输出位移值,见表 1 第 4 列。

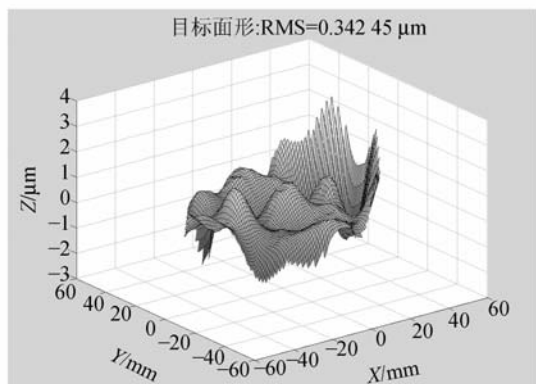


图 9 RBF 神经网络非线性模型,  $RMS=0.342 \mu\text{m}$

Fig. 9 Nonlinear model of RBF neural network,  $RMS=0.342 \mu\text{m}$

在采用 RBF 神经网络非线性模型的情况下,根据各 PZT 压电陶瓷驱动器的实际输出位移值,非球面能动抛光盘输出面形残差  $RMS=0.342 \mu\text{m}$ ,见图 9。

## 6 结 论

以非球面能动抛光盘中心到非球面工件中心的距离  $L$  为 120 mm 为例,利用 RBF 神经网络非线性模型对各 PZT 压电陶瓷进行迟滞补偿,可以使非球面能动抛光盘输出面形残差由  $1.910 \mu\text{m}$  减小为  $0.342 \mu\text{m}$ ,减少 82%。

PZT 压电陶瓷驱动器的变形精度对非球面能动抛光盘面形输出精度具有决定性作用。

今后可以通过尝试更优的迟滞补偿模型,进一步提高 PZT 压电陶瓷驱动器的变形精度,从而提高非球面能动抛光盘面形输出精度。

## 参考文献:

- [1] 倪颖,余景池,郭培基,等. 小型非球面轮廓测量仪的原理及应用[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 612-616.  
NI Y, YU J CH, GUO P J, *et al.*. Principle and application of miniature aspheric surface profile meter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 612-616. (in Chinese)
- [2] 张学军,张云峰,余景池,等. FS-GJ-1 非球面自动加工及在线检测系统[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(6): 70-76.  
ZHANG X J, ZHANG Y F, YU J CH, *et al.*. FS-GJ-1 aspheric automatic fabrication and on-line testing system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(6): 70-76. (in Chinese)
- [3] 曾志革,邓建明,李晓今,等. 能动抛光盘的变形实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 555-559.  
ZENG ZH G, DENG J M, LI X J, *et al.*. Investigation of deformation experiment for active polishing lap [J]. *High Power Laser and Particle*

*Beams*, 2004, 16(5): 555-559. (in Chinese)

- [4] 潘君骅. 成像光学工程面临的数学问题[J]. 中国工程科学, 2000, 2(3): 32-35.  
PAN J H. Optical problems in imaging optical engineering[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(3): 32-35. (in Chinese)
- [5] HU Z Q, NING L. Novel method of designing deformable polishing lap[J]. *SPIE*, 2007, 67223C: 1-7.
- [6] MAYERGOYZ I D. Mathematical models of hysteresis[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56(15): 1518-1521.
- [7] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Models of Hysteresis*[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [8] 李黎,刘向东,王伟,等. 压电陶瓷执行器迟滞特性的广义非线性 Preisach 模型及其数值实现[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 706-712.  
LI L, LIU X D, WANG W, *et al.*. Generalized nonlinear Preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramics actuator and its numerical implementation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5):

706-712. (in Chinese)

- [9] 贾宏光,郑岩,吴一辉. 非线性模型的压电元件复合控制方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1547-1552.  
JIA H G, ZHENG Y, WU Y H. PZT actuator control complex arithmetic based on nonlinear model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (10): 1547-1552. (in Chinese)
- [10] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1032-1040.  
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (6): 1032-1040. (in Chinese)
- [11] ADLY A, ABDELHAFIZ S R. Using neural networks in the identification of Preisach-type hysteresis models[J]. *IEEE Transaction on Magnetics*, 1998, 34 (3) : 629-635.

- [12] 党选举, 谭永红. 基于 WIENER 模型的压电陶瓷神经网络动态迟滞模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(11): 2701-2703.  
DANG X J, TAN Y H. Study on neural networks dynamic hysteresis model for piezoceramic based on Wiener model[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(11): 2701-2703. (in Chinese)
- [13] GUO P, LI H ZH. Image de-noising using cross-validation method with RBF network representation, *Lecture Notes in Computer Science* [C]. *Berlin Heidelberg: SpringerVerlag*, 2004: 393 - 398.
- [14] 郭平, 胡明. 基于 RBF 网络图像表示的 CT 重建算法研究[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1183-1186.  
GUO P, HU M. CT image reconstruction based on the RBF network image representation[J]. *ACTA ELECTRONICA SINICA*, 2007, 35(6): 1183-1186. (in Chinese)

#### 作者简介:



胡自强(1974—), 男, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事非球面加工和能动抛光盘等方面的研究。E-mail: hzqls@126.com

#### 导师简介:

凌宁(1935—), 女, 江苏武进人, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学技术等方面的研究。E-mail: ningling@ioe.ac.cn.

潘君骅(1930—), 男, 江苏常州人, 院士, 博士生导师, 主要从事光学非球面的研究。E-mail: jhpang@suda.edu.cn

饶长辉(1971—), 男, 江西南昌人, 研究员, 博士生导师, 主要从事自适应光学技术等方面的研究。E-mail: Raochanghui@ioe.ac.cn

姜文汉(1936—), 男, 浙江平湖人, 院士, 博士生导师, 主要从事自适应光学技术等方面的研究。E-mail: adopse@ioe.ac.cn