

## 横向压电驱动变形镜的迟滞特性及其闭环校正

范占斌<sup>1,2</sup>, 戴一帆<sup>1,2</sup>, 铁贵鹏<sup>1,2</sup>, 关朝亮<sup>1,2</sup>, 宁禹<sup>3</sup>, 刘俊峰<sup>1,2</sup>

- (1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;
2. 超精密加工湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;
3. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 横向压电驱动变形镜在自适应光学系统中应用广泛, 其利用了压电陶瓷的横向逆压电效应驱动镜片实现变形。在高电场强度下变形镜迟滞曲线存在特殊的“蝴蝶形”, 增加了控制难度, 且变形镜无法正常工作。针对这一问题利用压电陶瓷极化及铁电材料的电滞回线理论进行了分析, 明确了蝶形曲线产生的原因。通过实验确定了变形镜矫顽场强度在 $-500\sim-400$  V/mm 之间, 迟滞曲线回归一般的“柳叶”形状。根据迟滞曲线的特点设计了静态的 PID 闭环校正系统, 并进行了校正实验。结果表明, 闭环校正后线性度得到明显提升, 迟滞率可降低至 1.8%。

**关键词:** 自适应光学; 变形镜; 迟滞; 蝶形曲线; 矫顽场强度; 闭环校正

**中图分类号:** TH161; O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1020001

## Hysteresis characteristics and closed loop correction of unimorph deformable mirror

Fan Zhanbin<sup>1,2</sup>, Dai Yifan<sup>1,2</sup>, Tie Guipeng<sup>1,2</sup>, Guan Chaoliang<sup>1,2</sup>, Ning Yu<sup>3</sup>, Liu Junfeng<sup>1,2</sup>

- (1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Key Laboratory of Ultra-precision Machining Technology, Changsha 410073, China;
3. College of Photon-electron Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The unimorph deformable mirror (DM) is widely applied in adaptive optics, which utilizes the lateral reverse piezoelectric effect of piezoelectric ceramics to drive the mirror to deform. The hysteresis curve of the deformable mirror is a special "butterfly shape" in the high electric field strength, which increases the difficulty of control, and the deformable mirror cannot work normally. The theory of piezoelectric ceramic polarization and the hysteresis loop of ferroelectric materials were analyzed so that the cause of the butterfly curve could be confirmed. The experimental results show that the covariate field of the DM is between  $-500$  and  $-400$  V/mm, and the hysteresis curve is normalized willow shape. Then a static PID closed loop correction system was designed for the characteristics of the hysteresis curve, and the correction experiment was carried out. The results show that the linearity is obviously improved, and the hysteresis rate is reduced to 1.8% by the PID closed loop correction.

**Key words:** adaptive optics; deformable mirror; hysteresis; butterfly curve; coercive field strength; closed loop correction

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(91323302, 51405151, 61378065, 61505257); 国家重点研发计划(2016YFB1102304)

作者简介: 范占斌(1989-), 男, 博士生, 主要从事精密工程方面的研究。Email: 15507488059@163.com

导师简介: 戴一帆(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事精密工程与计算机控制方面的研究。Email: dyf@nudt.edu.cn

## 0 引言

变形镜是自适应光学系统中的波前校正器件,其反射镜能够主动变形补偿光路中的波前畸变。压电陶瓷作为一种功能材料,广泛应用于变形镜的驱动器中<sup>[1-6]</sup>。单层横向压电驱动变形镜(Unimorph Deformable Mirror, Unimorph DM)的驱动器为一整块压电晶片。Unimorph DM 利用压电陶瓷的横向逆压电效应驱动镜片运动从而得到不同的镜面面形。

压电陶瓷的迟滞特性是其固有属性,常见的迟滞回线是柳叶形的闭合曲线。国内外对于压电陶瓷的迟滞和非线性的成因有着广泛的研究。压电陶瓷是铁电材料,具有铁电效应以及在电场作用下的电致伸缩效应和压电效应。由于压电效应是线性的,电致伸缩效应又极其微弱,可以认为迟滞和非线性的主要原因是铁电效应<sup>[7]</sup>。较大的迟滞率对器件的控制精度有一定影响,从而影响变形镜校正波前畸变的能力。目前对于压电陶瓷迟滞和非线性建模及控制有大量的研究报道<sup>[8-11]</sup>,其中作为压电陶瓷叠堆执行器最成熟、最简单的控制算法之一,PID 控制算法可以提高基于压电陶瓷叠堆执行器及其系统的稳态定位精度并且加快动态响应速度,改善其动态性能。Unimorph DM 的压电陶瓷通高压电后的迟滞回线经测试会发生改变,出现蝶形的回线。压电陶瓷本身的蝶形曲线与铁电材料特性和极化有关,但具体过程中的影响因素没有定量分析,并且没有明确的解决方法。

文中以 19 单元横向压电驱动变形镜为研究对象,对高电场下的蝶形迟滞回线进行理论分析。从极化过程出发,得到影响迟滞回线形状的因素,并通过实验进行测定。将迟滞回线调整到一般的柳叶形后,设计静态闭环校正系统,采用 PID 控制算法观测变形镜的迟滞闭环校正效果。

## 1 变形镜迟滞测试实验

### 1.1 实验系统

变形镜迟滞测试的实验系统如图 1 所示。系统主要由驱动电源、高压放大器、变形镜以及立式干涉仪组成。其中,变形镜为 19 单元单层横向压电驱动变形镜,从上至下主要包括反射镜、地极、导电胶层、

压电陶瓷驱动、驱动电极以及支撑结构。反射镜为经过双面抛光后的单晶 Si 镜,直径 42 mm。压电陶瓷材料为 PZT-5H,直径 30 mm,具体物理参数见表 1。支撑结构为铝合金<sup>[12]</sup>,支撑环面的宽度为 2 mm。

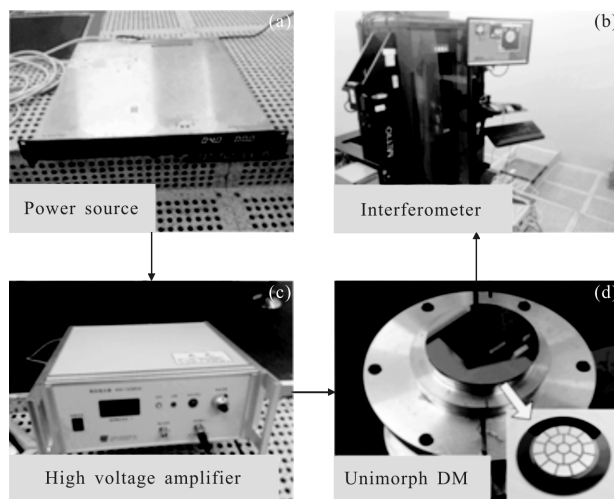


图 1 实验系统

Fig.1 Experiment system

表 1 PZT-5H 部分物理参数

Tab.1 Some physical parameters of PZT-5H

Piezoelectric strain constant $d_{31}$ / $\mu\text{C} \cdot \text{N}^{-1}$	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio	Curie point / $^{\circ}\text{C}$	Relative dielectric constant
-283	60	0.34	250	3 400

实验时,以中心电极为例,驱动电源输出 $\pm 5\text{ V}$ 内的电压,经高压放大器放大作为变形镜的输入电压。在立式干涉仪下得到不同电压下的镜面面形的变化及其变形量(PV 值),绘制迟滞回线。

### 1.2 变形镜蝶形曲线

图 2(a)、(b)分别为在加载的电场强度最大值  $E_{\text{max}}=1\ 300\ \text{V/mm}$  和  $E_{\text{max}}=650\ \text{V/mm}$  下得到的变形镜迟滞曲线。从图 2(a)中可以发现,整体曲线类似蝴蝶形,而非常规的柳叶形。电场强度从  $0\ \text{V/mm}$  升至  $1\ 300\ \text{V/mm}$ ,然后降至  $-600\ \text{V/mm}$  这一段,迟滞曲线为细长的柳叶形, $-600\sim-1\ 300\ \text{V/mm}$  曲线发生突变,开始上升,变形量出现正值。 $-1\ 300\sim600\ \text{V/mm}$  段变形量减小,曲线一直下降。 $600\sim1\ 300\ \text{V/mm}$  曲线出现第二次突变,转为上升直至加载到  $1\ 300\ \text{V/mm}$  结束。当  $E_{\text{max}}=650\ \text{V/mm}$ ,迟滞曲线既不是柳叶形也不是蝶形,而是一个“8”字形(图 2(b))。在  $E=500\ \text{V/mm}$

后,曲线由降变升,这个形状类似于蝶形和柳叶形的过度状态。因此,变形镜迟滞曲线的形状与加载的电场强度有关,而且出现蝶形曲线的原因还与压电陶瓷的物理特性相关。

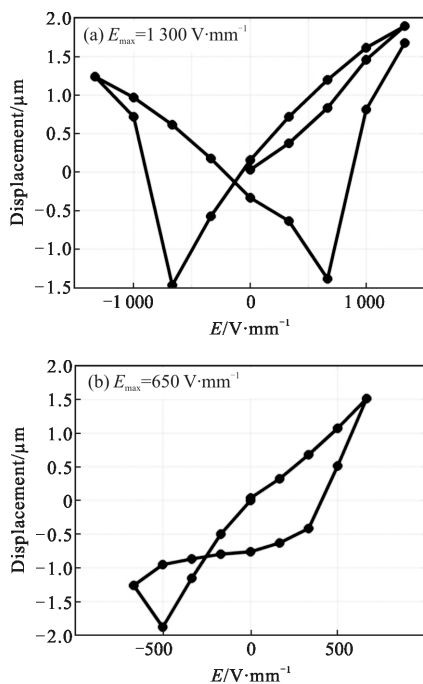


图 2 迟滞曲线

Fig.2 Hysteresis curves

### 1.3 原理分析

电介质材料在外电场作用下应变与电场的一般关系式为<sup>[13]</sup>:

$$S = dE + ME \cdot E \quad (1)$$

式中:一次项系数  $d$  为压电常数;二次项系数  $M$  为电致伸缩系数。PZT-5H 属于铁电陶瓷,电致伸缩相比压电效应弱,因此常被忽略,理论上变形镜加载电场不会有迟滞,更不会出现蝶形迟滞回线。事实上,压电效应的线性度与加载电场强度的大小密切相关,也就是说外加电场的不同会影响到迟滞回线的线性程度。压电效应来自于对陶瓷的人工极化作用,图 3 所示为压电陶瓷极化的极化原理。压电陶瓷的极化类似于磁铁的充磁,在未进行极化时,压电陶瓷内部存在着自发极化方向一致的区域称为电畴,不同的电畴方向各不相同导致了压电陶瓷整体的极化强度为零,从而不具有压电效应。人工极化就是在陶瓷上加一定的直流电场迫使电畴转向,整体朝向与极化方向一致。极化后撤掉外加电场,陶瓷内部的极

化强度不再为零,这种极化强度称为剩余极化强度 ( $Pr$ )。压电陶瓷经过极化后便具有了压电性<sup>[14-15]</sup>。文中所用压电陶瓷极化方式采用油浴极化,油温  $120\text{ }^\circ\text{C}$ ,极化强度为  $3\ 000\ \text{V/mm}$ ,极化时间  $20\ \text{min}$ 。

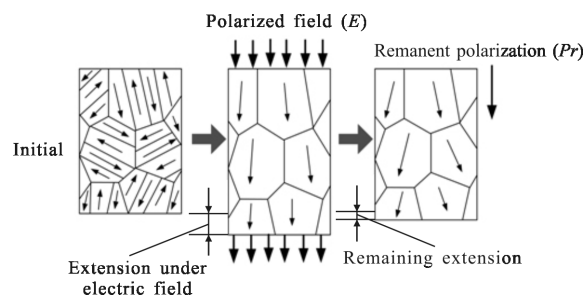


图 3 极化原理<sup>[16]</sup>

Fig.3 Principle of polarization<sup>[16]</sup>

二次极化后电场强度与极化强度之间会形成一个回路曲线,如图 4 所示,称为电滞回线。曲线从  $OA$  段开始, $BC$  段为线性增加。 $Ps$  为自发极化强度,这时的电场强度为零,极化强度不为零。当电场反向增加到  $Ec$  时,极化强度为零, $Ec$  称为矫顽场强度。

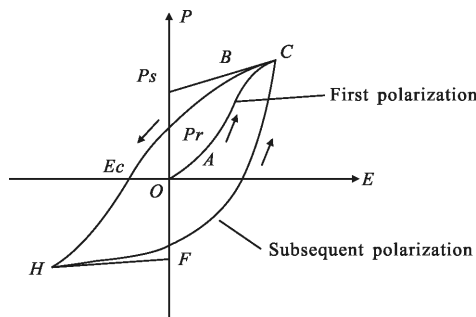


图 4 电滞回线<sup>[17]</sup>

Fig.4 Ferroelectric hysteresis loop<sup>[17]</sup>

由图 4 可知,当  $E \in (Ec, 0)$  时,极化强度小于剩余极化强度  $Pr$ ;而且靠近  $Ec$  时,极化强度减小并趋于 0,促使电畴定向排列的作用就会越小。此时极化方向不变,但将导致正向压电效应一定程度地减弱。当变形镜加载的电场强度  $E < Ec$ ,陶瓷内部极化反转,即外电场与陶瓷内部的极化场同向。横向应变发生反向突变,压电陶瓷反向变形,变形镜镜面向上变形。

以上分析表明,若想保证变形镜的迟滞回线为常规的柳叶形,必须要加载的电场强度大于压电陶瓷的矫顽场强度,即  $E > Ec$ 。从 1.2 节的实验结果可

知,  $E_c$  的绝对值至少需小于 500 V/mm。下一步将减小变形镜加载的电场强度, 得到变形镜迟滞曲线, 通过曲线形状确定  $E_c$  的大小。

### 1.4 测定矫顽场强度 $E_c$

加载强度  $E_{max}=400$  V/mm 时的变形镜迟滞回线如图 5 所示。曲线形状回归到柳叶形, 不再是蝶形, 因此  $-500$  V/mm  $< E_c < -400$  V/mm。变形镜控制的电场强度  $E$  其负值必须大于  $-400$  V/mm 以上, 否则将出现蝶形迟滞回线, 影响变形镜控制。图 5 中变形镜的迟滞率定义为同一电场强度下的最大误差与最大变形量的百分比, 因此文中变形镜的迟滞率为 21.9%。变形镜的迟滞率和非线性误差是影响控制精度的重要因素。为了提升变形镜的性能, 必须进行闭环校正。

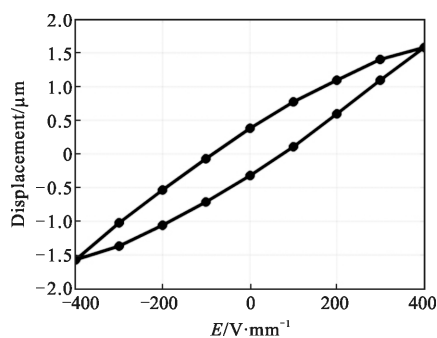


图 5 变形镜迟滞曲线

Fig.5 Hysteresis curve of the DM

## 2 闭环校正实验

为了研究不超过矫顽场强度下, 正负电场均加载的变形镜其迟滞特性的闭环校正能力, 同时提升变形镜校正波前畸变的精度, 对迟滞特性进行了校正实验。采用控制理论中最常用的 PID 控制算法建立实验系统, 进行闭环控制测试<sup>[18]</sup>。

### 2.1 闭环校正实验系统

搭建了变形镜迟滞特性闭环校正系统, 其原理图如图 6 所示。实验系统主要由变形镜、高压放大器、基恩士激光位移传感器 (Keyence LK-G10, 分辨率 0.01 μm) 和实时仿真系统 (基于 MATLAB/Simulink 的 dSPACE DS1104) 组成。以中心电极为例进行迟滞测试和校正。实验过程中, dSPACE 输出幅值 5 V 三角波信号  $u_f(t)$ , 经高压放大器进行 80 倍放大, 得到  $E_{max}=400$  V/mm 的变形镜输入信号驱动变形镜运动。

镜面中心位置的位移信号  $x_c(t)$  通过位移传感器反馈至 dSPACE, MATLAB/Simulink 进行相应的数据处理和输出闭环控制信号  $u_f(t)$ 。

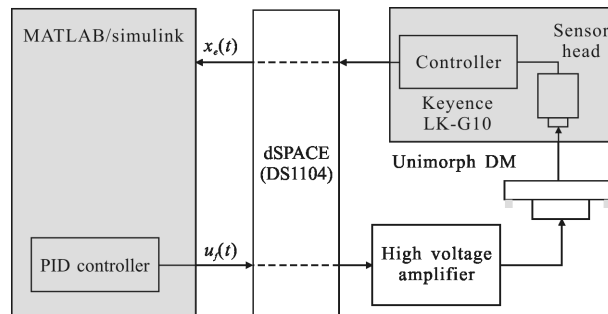
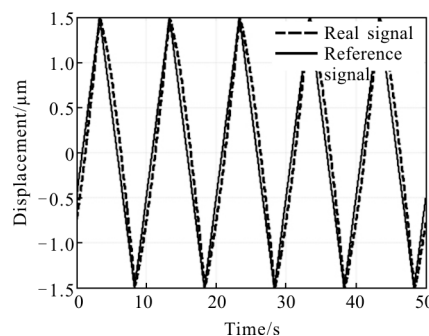


图 6 变形镜闭环校正实验系统 PID 控制原理框图

Fig.6 Schematic of closed loop correction system with the PID control principle for the DM

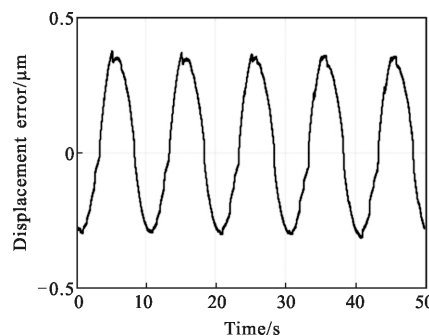
### 2.2 实验结果

分别进行开环和闭环条件下的实验, 对比迟滞率的变化。图 7(a) 所示为开环状态下, 频率 0.1 Hz 的输入参考信号和实际输出信号。由于压电陶瓷驱



(a) 响应曲线

(a) Response curve



(b) 误差曲线

(b) Error curve

图 7 开环测试结果

Fig.7 Open loop testing results

动器的迟滞非线性特性, 真实的输出信号未能有效跟踪参考输入信号。图 7(b)是信号的跟踪误差, 分布在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$  之间, 约占输入信号峰谷值的 24%, 跟踪误差的 RMS 值达到了  $0.23 \mu\text{m}$ 。

采用经典 PID 控制, 参考信号仍然是同频同幅的三角波信号, 控制器参数为  $P=3.1, I=100, D=0$ 。图 8(a)、(b)为闭环校正实验的实验结果, 可见实际输出信号得到明显改善。跟踪误差介于 $-0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$  之间, PV 值从占开环峰谷值的 24% 显著降低至 2.2%, 误差的 RMS 值从  $0.23 \mu\text{m}$  降至  $0.02 \mu\text{m}$ 。图 9 为闭环校正后的迟滞曲线, 迟滞率从 21.9% 降低至 1.8%, 校正效果显著。

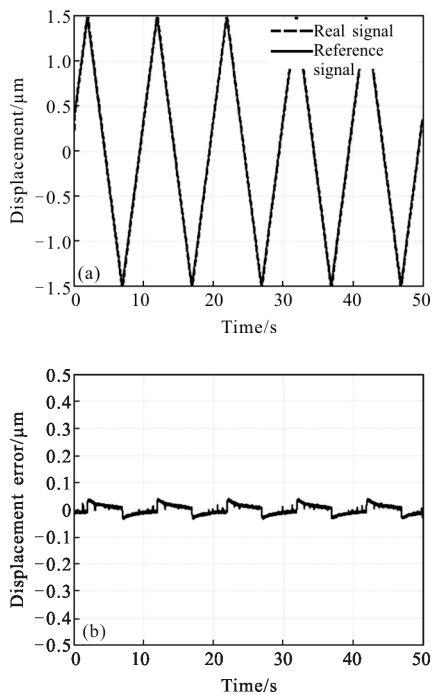


图 8 闭环测试结果

Fig.8 Closed loop testing results

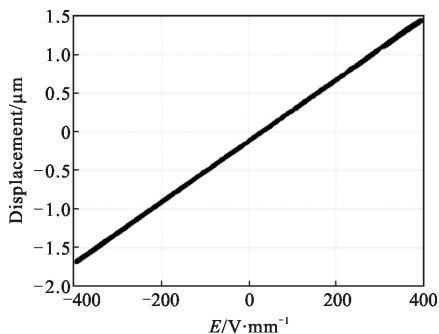


图 9 闭环迟滞曲线

Fig.9 Closed loop hysteresis curve

### 3 结 论

在自适应光学系统中, 横向压电驱动变形镜的迟滞特性主要是由于驱动材料压电陶瓷的迟滞非线性所致。

在高电场强度下的迟滞曲线呈特殊的“蝶形”, 而非常规的“柳叶形”。利用压电陶瓷的极化过程和电滞回线理论对这一现象进行了分析解释, 得到了关键的影响因素——矫顽场强度。通过实验的方法测定了变形镜的矫顽场强度范围, 并且迟滞曲线回归“柳叶”形。

搭建了 PID 控制算法的闭环校正实验平台, 对变形镜在不超过矫顽场强度下加载正负电场, 进行迟滞闭环校正。校正后, 跟踪误差的百分比从 24% 降低至 2.2%。线性度得到明显提升, 迟滞率从 21.9% 降低至 1.8%。

### 参考文献:

- [1] Ning Y, Chen B, Jiang W H. Decoupling algorithm of a double-layer bimorph deformable mirror: analysis and experimental test [J]. *Appl Opt*, 2009, 48: 3154–3159.
- [2] Zhou Hong. Reserch on bimorph deformable mirror and its application in adaptive optics [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)  
周虹. 双压电片变形反射镜研制与应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [3] Gerber M, Graf T, Kudryashov A. Generation of custom modes in a Nd:YAG laser with a semipassive bimorph adaptive mirror [J]. *Appl Physics B*, 2006, 83: 43–50.
- [4] Rausch P, Verpoort S, Wittrock U, et al. Unimorph deformable mirror for space telescope: design and manufacturing[J]. *Opt Express*, 2015, 23(15): 19469–19477.
- [5] Dai Y, Zhao L, Zhang Y D. Adaptive optics vision simulation and perceptual learning system based on a 35-element bimorph deformable mirror [J]. *Appl Opt*, 2015, 54: 979–985.
- [6] Pribošek J, Diaci J, Sinzinger S. Simple unimorph deformable mirrors fabricated from piezo buzzers[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26: 1–7.
- [7] Cui Yuguo, Sun Baoyuan, Dong Weijie, et al. Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11 (3): 270–

275. (in Chinese)  
崔玉国, 孙宝元, 董维杰, 等. 压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(3): 270-275.
- [8] Zhu Wei. Hysteretic modeling, linearization and control method for piezoelectric ceramic stack actuators and piezoelectric ceramic stack actuators' based systems [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)  
朱炜. 压电陶瓷叠堆执行器及其系统的迟滞现象模拟、线性化及控制方法的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [9] Wang Geng. Study on correction of nonlinearity of piezoelectric actuator [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)  
王耿. 压电驱动器非线性校正技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [10] Wang Geng, Guan Chunlin, Zhang Xiaojun, et al. Design and control of miniature piezoelectric actuator based on strain gauge sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 709-716. (in Chinese)  
王耿, 官春林, 张小军, 等. 应变式微型精密压电驱动器的一体化设计及其 PID 控制 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 709-716.
- [11] Wang Shifan. Electrostrictive effects in relaxed ferroelectric PZT:La [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1982(5): 43-50. (in Chinese)  
王世蕃. 弛豫铁电体 PZT:La 陶瓷的电致伸缩效应的研究 [J]. 压电与声光, 1982(5): 43-50.
- [12] Wu Weibin, Dai Yifan, Guan Chaoliang, et al. Optimization design for transversal piezoelectric effect deformable mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0818003. (in Chinese)  
吴伟彬, 戴一帆, 关朝亮, 等. 横向压电效应变形镜优化设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0818003.
- [13] Xu Zuqian. Piezoelectric effect and electrostriction in ferroelectric ceramics [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1982(4): 1-5. (in Chinese)  
许祖谦. 铁电陶瓷中的压电效应和电致伸缩效应[J]. 压电与声光, 1982(4): 1-5.
- [14] Zhou Changrong, Liu Xinyu, Jiang Minhong, et al. Effect of BiCoO<sub>3</sub> on piezoelectric properties and depolarization temperature of BNT-BKT piezoelectric ceramics [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(5): 1796-1800. (in Chinese)  
周昌荣, 刘心宇, 江民红, 等. BiCoO<sub>3</sub> 对 BNT-BKT 陶瓷压电性能与退极化温度的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1796-1800.
- [15] Mao Jianbo, Yi Maoxiang. Research on the polarization technology of PZT piezoelectric ceramic [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2006, 28(6): 736-740. (in Chinese)  
毛剑波, 易茂祥. PZT 压电陶瓷极化工艺研究 [J]. 压电与声光, 2006, 28(6): 736-737.
- [16] 豆丁网. 压电陶瓷的极化详解 [DB/OL]. (2014-09-13) [2017-05-05] <http://www.docin.com/p-913648535.html>.
- [17] Du Kexiang, Pan Zhongyin, Duan Yaling. Polaring principle of piezoceramic and its test method [J]. *Petroleum Instruments*, 2010, 24(4): 34-36. (in Chinese)  
杜克相, 潘中印, 段亚玲. 压电陶瓷的极化原理和测试方法[J]. 石油仪器, 2010, 24(4): 34-36.
- [18] Hu Liangliang, Mi Fengwen, Jin Weiqi, et al. Open loop control of fast steering mirror based on PI inverse model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0818001. (in Chinese)  
胡亮亮, 米凤文, 金伟其, 等. 基于 PI 逆模型快速微摆反射镜的开环控制 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0818001.