

文章编号 1004-924X(2014)08-2047-07

200 单元硅基单压电变形镜的设计与测试

马剑强^{1*}, 刘莹², 陈俊杰², 李保庆², 褚家如²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 针对天文望远镜对变形镜的需求, 设计了 200 单元级硅基单压电变形镜并对其进行了性能测试。首先, 通过有限元方法对单压电变形镜进行结构建模, 分析比较了电极排列形式和边界支撑方式对变形镜性能的影响。然后, 制备了 3 款 200 单元变形镜样机(环形简支, 环形固支, 六边形简支)。最后, 利用干涉仪测量了变形镜的影响函数, 并通过激光多普勒测振仪测量其频响特性。仿真与实验结果表明: 致动器在 50 V 电压下变形量可达 1 μm , 固支条件下谐振频率在 1 kHz 左右, 对前 100 项 Zernike 像差具有良好的校正能力。该变形镜在低成本天文自适应光学系统中具有应用潜力。

关键词: 压电变形镜; 硅基变形镜; 自适应光学; 天文望远镜

中图分类号: TN384; P111 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2047

Design and performance testing of 200-element silicon unimorph deformable mirror

MA Jian-qiang^{1*}, LIU Ying², CHEN Jun-jie², LI Bao-qing², CHU Jia-ru²

(1. College of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,

University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

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

Abstract: According to the requirements of astronomical telescopes for Deformable Mirrors (DMs), a silicon unimorph DM with 200 elements were designed and its characteristics were measured. Firstly, the structure model of unimorph DM was developed using finite element method. The influences of the electrode arrangement and the boundary support of the DM on correction capability were investigated. Then, three prototype DMs(annular & simply support, annular & clamped support, and hexagonal & simply support) were fabricated. The influence functions of the fabricated DMs were measured using an interferometer. And the frequency response was measured using a laser Doppler vibrometer. The simulation and experimental results indicate that the deflection of the actuator is more than 1 μm at 50 V and the resonance frequency of the DM with clamped boundary is about 1 kHz. The DMs have a well correction capability for the first 100 Zernike aberrations. These show that the developed

收稿日期: 2013-11-18; 修订日期: 2013-12-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11303019); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2013M531521); 浙江省自然科学基金资助项目(No. LQ13E050016)

DMs have potential applications for low-cost adaptive optics in astronomy.

Key words: piezoelectric deformable mirror; Si-based deformable mirror; adaptive optics; telescope

1 引言

自适应光学系统通过实时控制变形镜的镜面产生与波前畸变相共轭的变形来补偿光束,其克服了传统光学无法动态补偿波前畸变的局限,使系统能够达到衍射极限^[1]。自适应光学的发展对天文望远镜的研究产生了革命性的影响,现代大型地基、天基望远镜几乎都配备了自适应光学系统^[2]。随着天文望远镜(尤其是更大口径望远镜的建设)对自适应光学需求的增加,对其关键器件变形镜的挑战也越来越大^[3]:致动器数目高达上千乃至上万,变形量为 $10\ \mu\text{m}$,带宽百赫兹。

为满足天文自适应光学的要求,研究人员采用静电力驱动^[4]、电磁力驱动^[5]、压电驱动^[6]等方式进行了变形镜的研制。这些变形镜各有优缺点^[7],其中双压电和单压电变形镜采用横向压电效应驱动镜面变形,具有结构简单、轻量化、低成本等优点,在 $8\sim 10$ 米级望远镜中有着广阔的应用前景^[3]。法国 Cilas 公司研制的 188 单元双压电变形镜已成功应用在昴星团望远镜上^[8]。该变形镜采用对称结构,由两片 $1.8\ \text{mm}$ 厚的 PZT 层粘接而成,各有一层 $100\ \mu\text{m}$ 厚的玻璃贴在变形镜两面,而图形化的电极则位于两层 PZT 之间,其工艺复杂、制作难度大。在国内,中科院光电技术研究所研制了 20 单元的双压电变形镜^[9],中国科学技术大学研制了基于双驱动模式的 38 单元单压电变形镜^[10-11]。针对天文自适应光学,更多驱动单元的低成本、高性能单(双)压电片变形镜仍具有较大的研究价值。为此,本文提出了一种结构简单、低成本的 200 单元硅基单压电变形镜。通过有限元方法对变形镜进行结构建模,分析比较电极排列方式和边缘支撑方式对校正性能的影响,并制备了相应的原理样机来进行性能测试。

2 硅基单压电变形镜

硅基单压电变形镜如图 1 所示,由一层 $400\ \mu\text{m}$ 厚的硅材料和一层 $200\ \mu\text{m}$ 厚的压电材料组成,变形镜直径为 $75\ \text{mm}$,有效校正口径为 50

mm。压电层内表面覆盖成片的金属膜作为公共电极,外表面则覆盖经过图形化的电极阵列,工作电压为 $-100\sim 100\ \text{V}$ 。硅片外表面根据实际应用场合镀上金属或者介质反射层。以硅材料而非传统玻璃作为变形镜的光学镜面具有如下优点:优异的机械性能、与微加工工艺兼容、 $200\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ 厚, $50\sim 150\ \text{mm}$ 直径的商用抛光硅片易于获得且成本低、抛光表面具有良好的光学性能。

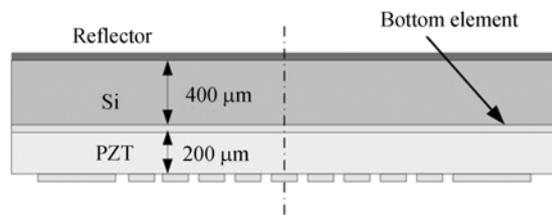
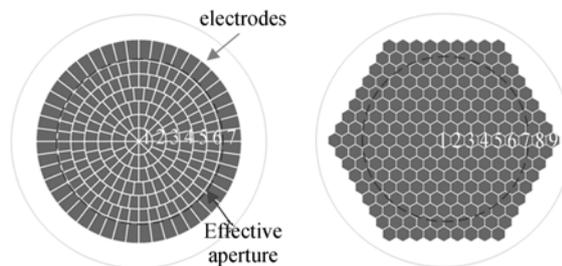


图 1 硅基单压电变形镜原理图

Fig. 1 Schematic diagram of silicon unimorph deformation mirror

单压电变形镜的致动器由电极阵列决定,因此电极的形状与排列方式影响着变形镜的校正能力^[12]。图 2 所示为两种典型的电极排列方式:环形排列(214 单元)和六边形排列(217 单元)。此外,变形镜边缘的支撑方式(固支或者简支)对校正性能也有一定的影响。根据电极排列方式和边界条件组合成了 4 种设计方案:环形简支、环形固支、六边形简支和六边形固支。



(a) 环形排列

(b) 六边形排列

(a) Annular arrangement (b) Hexagonal arrangement

图 2 电极图案

Fig. 2 Electrode patterns

3 仿真设计

单压电变形镜建模后可应用薄板理论分析材料内部的应变和应力,建立描述电压和变形之间关系的方程,从而获得解析表达式^[13]。但这种方式不适合求解复杂电极,而有限元方法提供了一种有效的解决途径。在有限元模型中,硅层所使用的单元为 solid45(8 节点结构单元,一阶单元),压电层所使用的单元为 solid5(8 节点压电-结构耦合单元,一阶单元),划分的网格单元数约为 10^5 。变形镜材料参数如表 1 所示。

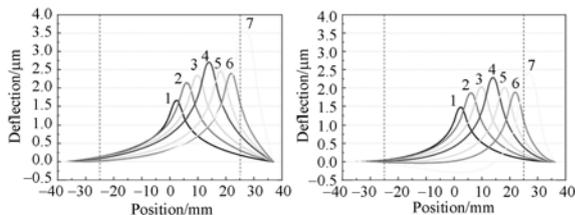
表 1 变形镜材料参数

Tab.1 Material parameters of deformation mirror

	Si	PZT
杨氏模量 E/GPa	190	68
泊松比 ν	0.3	0.3
压电系数 $d_{31}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$		-450

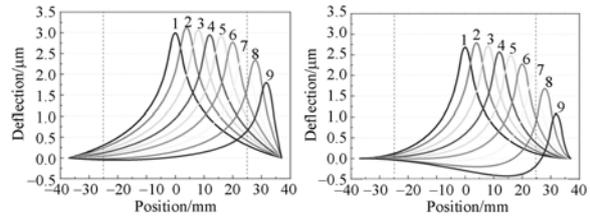
3.1 影响函数

影响函数反应了驱动电压与镜面变形之间的联系,在仿真中通过对单个电极施加 100 V 电压来获得。图 3 所示为基于 4 种设计方案的典型致动器(对应于图 2 中编号的电极)影响函数的截面线。致动器施加电压时可产生局部变形,各致动器的变形差异主要受电极面积及位置的影响。其中环形简支变形镜最内圈致动器的变形量约为 $1.5 \mu\text{m}$,最外圈致动器的变形量大于 $3.5 \mu\text{m}$ 。相比于环形简支变形镜,环形固支变形镜由于边界约束作用,最外围致动器的变形量明显降低,同时在有效口径内出现了负向变形,其他致动器则差别较小。六边形排列方式与环形排列方式情况类似,六边形简支时中心致动器的变形量大于 $3 \mu\text{m}$,由于第 8、9 号致动器都在有效口径之外,第 9



(a) 环形简支 (b) 环形固支

(a) Annular & simply support (b) Annular & clamped support



(c) 六边形简支 (d) 六边形固支

(c) Hexagonal & simply support (d) hexagonal & clamped support

图 3 典型致动器的变形曲线

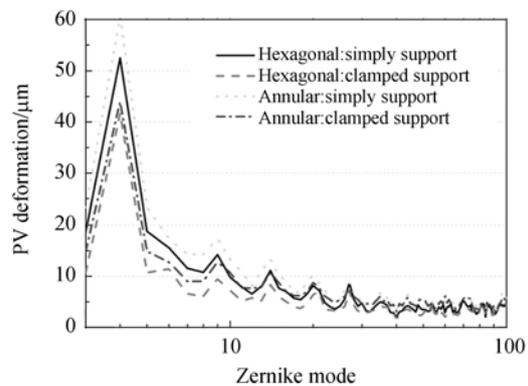
Fig.3 Deflection curve of the typical actuators

号致动器变形量较小可除去。变形镜的交联值反映两相邻致动器的影响,4 种变形镜的交联值都约为 60%,固支较简支略小。

3.2 校正性能

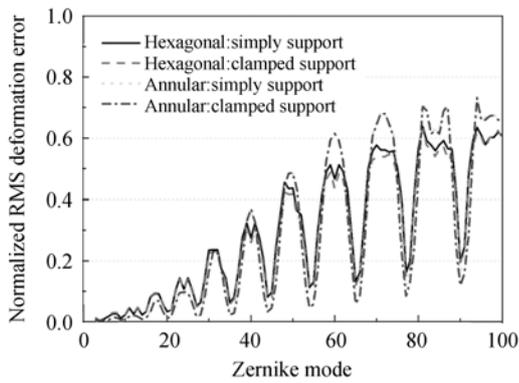
在自适应光学系统中,Zernike 多项式常用于描述波前像差,使用变形镜重构 Zernike 多项式像差能够很好地反映其校正性能。本文通过仿真获得所有致动器的影响函数,采用最速下降控制算法计算控制电压^[14],从而避免了基于最小二乘波前控制算法有可能出现的局部电压值过大的现象。仿真计算 $-100 \sim 100 \text{ V}$ 电压的重构性能,重构误差为重构面形与目标面形之差,并做归一化处理,即重构误差除以重构面形。

图 4 为 4 种设计方案中前 100 项 Zernike 像差的校正情况。由于单压电变形镜交联值较大,校正幅值随着项数的增加快速下降,其中环形简支变形镜的重构幅值最大,其离焦面形的幅值可达 $60 \mu\text{m}$ 。对于前 20 项像差,固支条件下的重构幅值明显小于简支,20 项之后差别变小。图 4(b)显示:归一化的重构误差随着项数的增加呈现波浪式上升,低阶时环形排列方式的重构误差小于



(a) 重构幅值

(a) Peak to valley deformation



(b) 归一化残余误差

(b) Normalized RMS deformation error

图 4 重构前 100 项 Zernike 多项式像差

Fig. 4 Reproduction of the first 100 mode Zernike aberrations

六边形排列方式;而高阶则略高,说明环形排列方式更适合校正低阶像差。对于相同电极排列方式,支撑方式对重构误差的影响较小。

仿真结果表明,4 种方案都具备较强的校正能力。值得说明的是,边界固支可使变形镜的谐振频率更高,更符合天文自适应光学系统对工作带宽的要求。

4 变形镜性能测试

实验制备了 2 个 214 单元变形镜(环形固支和环形简支)和 1 个 217 单元变形镜(六边形简支),原型样机如图 5 所示。制备流程简述如下(详见文献[15]): 首先将压电陶瓷片通过环氧胶

与抛光硅片粘接,采用湿法刻蚀法腐蚀出电极图案,再通过磁控溅射法制备 200 nm 的金反射层。变形镜的电气连接则以导电环氧胶为黏接剂,通过丝网印刷方法印刷连接点,再通过柔性电路板从背面引出。由于制备过程中无抛光等复杂工艺,初步估计变形镜器件材料与制作成本在 1 万元人民币左右,具有低成本的优点。

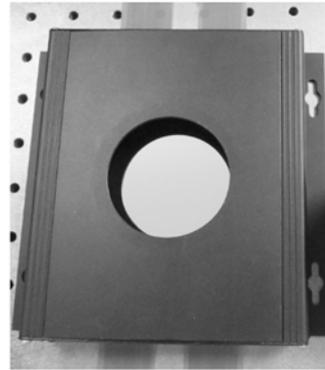


图 5 变形镜实物照片

Fig. 5 Photo of fabricated deformable mirror

4.1 影响函数

采用激光干涉仪(Wyko RTI 4100)测量致动器的影响函数。对被测致动器施加 50 V 电压,测量其镜面形貌并减去 0 V 时的初始面形。图 6 为环形固支变形镜 1~7 号致动器的影响函数,实测影响函数与有限元结果一致。分别计算环形简支、环形固支、六边形简支这 3 种变形镜影响函数的幅值,结果如表 2 所示。实验数据与仿真数据基本符合,证明仿真的有效性。3 种设计方案中大部分致动器在 50 V 电压下的变形量都大于 1 μm。

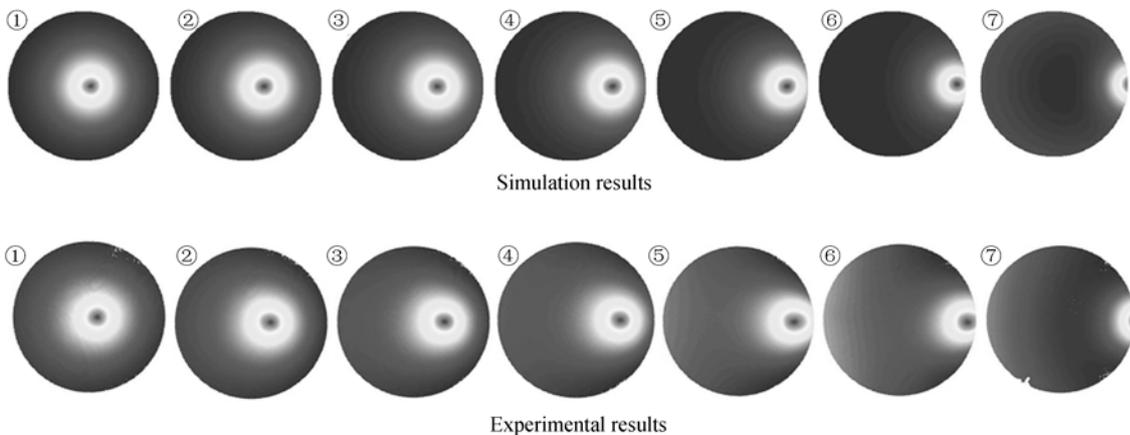


图 6 环形固支变形镜在 50V 电压下的影响函数

Fig. 6 Influence function of annular & clamped deformable mirrors at 50 V

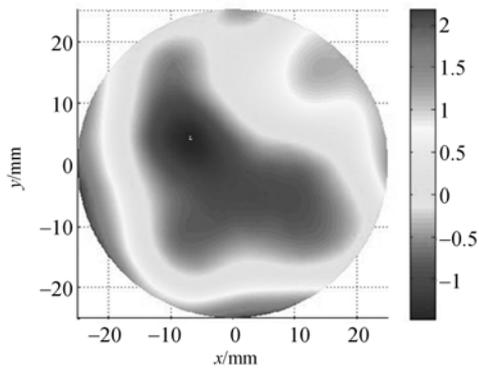
表 2 50 V 电压下致动器变形量的实验与仿真比较

Tab. 2 Comparison of actuator deflection between experiment and simulation at 50 V (μm)

致动器编号		1	2	3	4	5	6	7	8
环形简支	仿真	0.76	1.01	1.12	1.30	1.20	1.19	1.68	
	实测	0.69	1.05	1.11	1.14	1.07	0.99	1.66	
环形固支	仿真	0.71	0.92	1.01	1.13	1.02	0.96	1.18	
	实测	0.54	0.81	0.84	0.98	1.10	1.07	1.27	
六边形简支	仿真	1.35	1.44	1.44	1.41	1.42	1.36	1.28	0.84
	实测	1.16	1.16	1.23	1.20	1.10	1.10	0.91	0.86

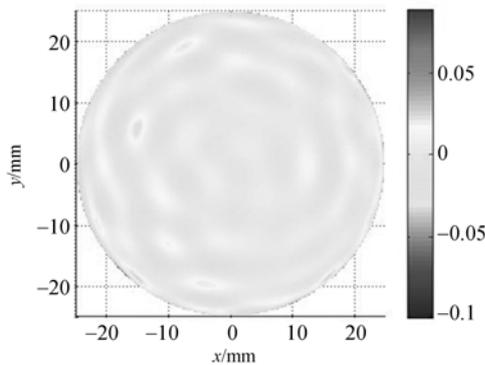
4.2 初始面形

变形镜的初始面形如图 7(a)所示,50 mm 有效口径内的幅值(PV)为 $3.76 \mu\text{m}$,均方根值(RMS)为 $0.76 \mu\text{m}$ 。由于变形镜制备未采取镜面抛光工艺,该面形符合预期结果。通过分析得到初始面形为低阶像差,且幅值在校正范围之内,因此可进行校平。校平采用环形固支变形镜的仿真影响函数,结果如图 7(b)所示。在电压为 $-20 \sim 25 \text{ V}$ 时,初始面形校正后的 RMS 小于 10 nm 。



(a) 初始面形

(a) Initial mirror surface



(b) 仿真校后面形

(b) Mirror surface after simulation correction

图 7 变形镜镜面特性

Fig. 7 Surface performance of deformation mirror

相比于 $\pm 100 \text{ V}$ 的工作电压,校平后的变形镜仍具有较大的校正空间。

4.3 频率响应

变形镜的谐振频率是另一个重要的性能指标。对中心电极施加 $50 \text{ Hz} \sim 2 \text{ kHz}$ 间隔为 10 Hz 的 0.5 V 正弦扫频信号,通过激光多普勒测振仪(MLD-821,Neoark Co.)测量变形镜中心处的位移。图 8 为环形电极变形镜在简支和固支条件下的频率响应情况。简支变形镜的一阶谐振频率为 550 Hz ,固支的为 920 Hz ,固支比简支频率提高了将近一倍。

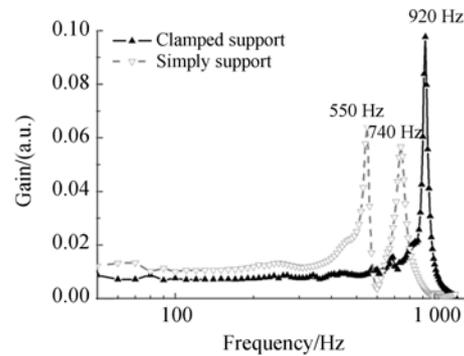


图 8 环形电极变形镜的频率响应

Fig. 8 Frequency response of deformable mirror with annular electrodes

根据薄板理论^[16],固支边界变形镜的等效弹性系数可表示为:

$$k = \frac{64\pi D_e}{r^2} \quad (1)$$

简支边界变形镜的等效弹性系数可表示为:

$$k = \frac{64\pi(1+\nu_e)D_e}{(5+\nu_e)r^2} \quad (2)$$

其中: r 为变形镜半径, ν_e 为等效泊松比, D_e 为等

效弯曲刚度,可表示为:

$$D_e = \frac{E_e t^3}{12(1-\nu_e^2)}, \quad (3)$$

其中: E_e 为变形镜的等效杨氏模量, t 为镜面厚度。

变形镜的谐振频率表示为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (4)$$

其中: m 为变形镜的质量。根据式(4)计算得到,简支时变形镜的谐振频率为 520 Hz,固支时为 1 050 Hz,与实验基本符合。

5 结 论

本文针对天文望远镜对变形镜的需求,对

200 单元级硅基单压电变形镜进行了设计与测试。根据电极排列方式和边界支撑方式设计了环形简支、环形固支、六边形简支和六边形固支 4 种变形镜,并制备了其中 3 种的原型样机。实验与仿真结果显示:变形镜致动器在 50 V 电压下的变形量可达 1 μm ,固支条件下谐振频率在 1 kHz 左右,对前 100 项 Zernike 多项式具有很好的校正能力。

采用有限元方法建立的变形镜模型可有效地预测变形镜在电压下的变形行为,为变形镜的设计提供指导。本研究为 200 单元变形镜性能的测试及更多单元变形镜的设计与研制奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 姜文汉. 自适应光学技术 [J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 7-13.
JIANG W H. Adaptive optical technology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(1):7-13. (in Chinese)
- [2] LENA P. Adaptive optics: a breakthrough in astronomy [J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 26: 35-48.
- [3] MADEC P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy [J]. *SPIE*, 2012, 8447:844705-1-18.
- [4] BIFANO T. Adaptive imaging MEMS deformable mirrors [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(1):21-23.
- [5] BIASI R, ANDRIGHETTONI M, ANGERER G, *et al.*. VLT deformable secondary mirror: integration and electromechanical tests results [J]. *SPIE*, 2012, 8447(84470G): 1-10.
- [6] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 137 单元变形镜的性能测试及校正能力实验 [J]. *光学精密工程*, 2012, 21(1):267-273.
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al.*. Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 21(1): 267-273. (in Chinese)
- [7] 林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状 [J]. *中国光学*, 2012, 4:337-351.
LIN X D, XUE CH, LIU X Y. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Optic*, 2012, 4: 337-351.
- [8] OYA S, BOUVIER A, GUYON O, *et al.*. Performance of the deformable mirror for Subaru LG-SAO [J]. *SPIE*, 2006, 6272: U1573-U1580.
- [9] 周虹, 宁禹, 官春林, 等. 双压电片变形反射镜样镜的设计与研制 [J]. *光学学报*, 2009, 29(6): 1437-1442.
ZHOU H, NING Y, GUAN CH L, *et al.*. Design and fabrication of prototype of bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1437-1442. (in Chinese)
- [10] MA J Q, LIU Y, HE T, *et al.*. Double drive modes unimorph deformable mirror for low-cost adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(29): 5647-5654.
- [11] 刘莹, 马剑强, 何挺, 等. 模拟退火-爬山混合算法用于无波前传感器快速像差校正 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 213-219.
LIU Y, MA J Q, HE T, *et al.*. Hybrid simulated annealing-hill climbing algorithm for fast aberration correction without wavefront sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 213-219. (in Chinese)
- [12] VERPOORT S, WITROCK U. Actuator pat-

- terns for unimorph and bimorph deformable mirrors [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): G37-G46.
- [13] NING Y, JIANG W H, RAO CH H, *et al.*. Response function calculation and sensitivity comparison analysis of various bimorph deformable mirrors [J]. *Optics Express*, 2009, 15(19): 12030-12038.
- [14] ZHU L J, SUN P C, BARTSCH D U, *et al.*. Wave-front generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(28): 6019-6026.
- [15] MA J Q, LIU Y, HU Y L, *et al.*. Low-cost unimorph deformable mirror with high actuator count for astronomical adaptive optics [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(1): 016602.
- [16] TIMOSHENKO S, WOINOWSKY-KRIEGER S. *Theory of Plates and Shells* [M]. New York: McGraw-Hill, 1995.

作者简介:

马剑强(1983—),男,浙江临海人,博士,讲师,2012年于中国科学技术大学获得博士学位,研究方向为压电变形镜及自适应光学。E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn



褚家如(1963—),男,安徽六安人,博士,教授,博士生导师,1997年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事微系统技术方面的研究。Email: jrchu@ustc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)