

doi: 10.3788/gzxb20164508.0822004

# 带边缘驱动的单压电变形镜仿真与实验

陈凯<sup>1</sup>, 陈俊杰<sup>2</sup>, 毛宇昕<sup>2</sup>, 马剑强<sup>1</sup>, 褚家如<sup>2</sup>

(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, 合肥 230027)

**摘要:** 为了提高用于天文自适应光学系统的单压电变形镜的校正能力, 提出了一种直径为 75 mm 且包含 214 个单元的带边缘驱动的单压电变形镜, 单压电变形镜的边缘由数个压电堆栈执行器支撑. 首先, 通过有限元方法对变形镜进行仿真建模, 分析比较三点、六点能动支撑对变形镜性能的影响. 之后制备了三点、六点边缘驱动的变形镜样机. 最后, 利用波前传感器测试了边缘执行器对低阶像差的校正能力. 实验结果表明: 在 0~100 V 电压下, 三点能动支撑与六点能动支撑变形镜均可重构大于 12  $\mu\text{m}$  的倾斜像差, 对应的归一化残余误差小于 0.06, 六点致动对像散和三叶草像差也具有较好的校正能力, 证明边缘执行器可提高单压电变形镜的校正能力.

**关键词:** 自适应光学; 单压电变形镜; 像差校正; 压电堆栈执行器; 波前探测

中图分类号: TN384; O438

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0822004-6

## Simulation and Experiment of 214-element Unimorph Deformable Mirror with Edge-Driven

CHEN Kai<sup>1</sup>, CHEN Jun-jie<sup>2</sup>, MAO Yu-xin<sup>2</sup>, MA Jian-qiang<sup>1</sup>, CHU Jia-ru<sup>2</sup>

(1 Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(2 Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In order to improve the performance of unimorph deformable mirror for astronomical adaptive optics applications, an unimorph deformable mirror with edge-driven was proposed. The unimorph deformable mirror has a 75 mm diameter and 214 elements, which is supported by several piezoelectric stack actuators at the edge. First, the structural model was established using finite element method. The performances of unimorph deformable mirrors with three and six active supports were analyzed and compared. Then, a three points edge-driven unimorph deformable mirror and a six points edge-driven unimorph deformable mirror were fabricated. Finally, the correction performance of the supporting actuators for low aberrations was tested using a wavefront sensor. The experimental results show that, the unimorph deformable mirrors with three and six supporting actuators can reconstruct tip and tilt aberrations which are greater than 12  $\mu\text{m}$  under 100 V operating voltage with normalized residual error less than 0.06. Six supporting actuators also have a good correction capability for astigmatism and trefoil aberrations. It is proved that the supporting actuators at the edge can be used to improve the correction capability of the unimorph deformable mirror.

**Key words:** Adaptive optics; Unimorph deformable mirror; Aberration correction; Piezoelectric stack actuator; Wavefront sensing

**OCIS Codes:** 220.1080; 230.0230; 010.1285; 010.7350

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11303019)、浙江省自然科学基金(No. LQ13E050016)和宁波大学学科项目(No. xkl1325)资助

第一作者: 陈凯(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为压电变形镜. Email: chenkai5361@126.com

导师(通讯作者): 马剑强(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为压电变形镜与自适应光学技术. Email: majianqiang@nbu.edu.cn

收稿日期: 2016-01-25; 录用日期: 2016-04-07

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

自适应光学系统能实时测量并补偿由大气湍流引起的波前畸变,被广泛应用于天文望远镜中<sup>[1-3]</sup>.变形镜(Deformable Mirror, DM)作为波前像差校正器件,是自适应光学系统的核心部件<sup>[4-5]</sup>.其中双压电/单压电变形镜因结构紧凑、轻量化、低成本而在10 m以下天文望远镜中有广阔的应用前景<sup>[6-7]</sup>.美国夏威夷大学的Roddier等结合双压电变形镜和曲率传感器建造了廉价的天文自适应光学系统<sup>[8]</sup>.法国CILAS公司为日本Subaru望远镜研制了188单元双压电片变形镜,使望远镜达到了衍射极限<sup>[9]</sup>.国内中科院光电所研制了20单元双压电片变形镜并表征了其性能<sup>[10]</sup>.中国科学技术大学研制了214单元单压电变形镜,该变形镜具有变形量大、成本低廉的优点<sup>[11-12]</sup>.

双压电/单压电变形镜通常采取边缘支撑方式,有固支、简支和点支撑三种形式<sup>[13-14]</sup>,这些支撑方式均不具备能动特性.此外,在天文自适应光学的应用中<sup>[15-16]</sup>,倾斜像差通常采用额外的倾斜镜进行校正,变形镜只专注于校正其他像差,倾斜镜的存在增加了光学系统的复杂性.为了提升单压电变形镜的性能,本文提出了一种带边缘驱动的单压电变形镜,单压电变形镜的边缘由数个压电执行器支撑,这些执行器具有额外校正倾斜及其他像差的能力.

## 1 带边缘驱动的单压电变形镜

带边缘驱动的单压电变形镜如图1,由单压电变形镜、压电堆栈执行器和基座组成.压电堆栈执行器底部固支在基座上,上端通过球形转接头和镜面背部粘接,压电执行器均匀分布在镜面边缘.

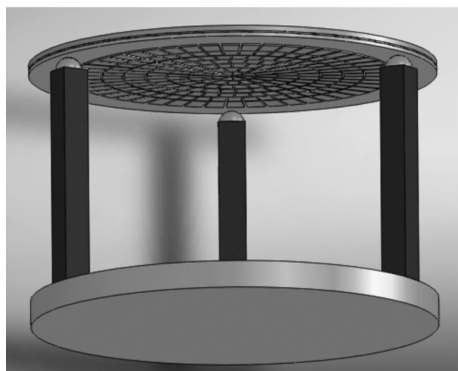


图1 带边缘驱动的单压电变形镜示意图

Fig. 1 Structural diagram of unimorph deformable mirror with edge-driven

单压电变形镜由400  $\mu\text{m}$ 厚的硅片和200  $\mu\text{m}$ 厚的压电陶瓷(Piezoelectric Ceramic, PZT)片粘接而成,其口径为75 mm,用于波前像差校正的有效口径为50 mm.单压电变形镜基于横向逆压电效应产生变形,

当对单压电变形镜单个电极施加电压时,压电片横向收缩带动硅镜面产生局部变形.当给所用电极施加适当的电压时,硅镜面产生与波前畸变相共轭的面形.用于边缘驱动的压电执行器基于纵向逆压电效应,执行器施加电压后产生纵向伸缩,推动镜面产生变形.当执行器达到一定数量,可控制镜面产生一些低阶像差(如倾斜、像散等).相比于传统双压电/单压电变形镜,边缘能动支撑提供的额外变形能力可以提升变形镜的校正能力.在天文应用中,该器件具备倾斜镜和变形镜的双重功能,降低系统的体积和成本.

压电堆栈执行器为苏州攀特电陶瓷科技股份有限公司的PT1500505301,尺寸为5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 28 mm,工作电压为0~150 V,标称位移为30  $\mu\text{m}$ .

## 2 有限元分析

### 2.1 有限元建模

单压电变形镜的数值建模可通过薄板理论和压电方程求解出电压和镜面变形量之间的关系,但在复杂边界条件下求解困难.有限元法使用公式建立代数方程组,且假设每个元素的近似函数与元素之间边界是连续的,可求出系统的完全解,是一种十分有效的方式.本文采用有限元法(ANSYS软件)建立变形镜模型,所用材料参量见表1.因为胶层、电极的厚度相对较小(微米级),在有限元模型中忽略,PZT层所用单元为solid 5(8节点压电-结构耦合单元,一阶单元),硅层所用单元为solid 45,边缘执行器所用单元为solid 5,三点能动支撑单压电变形镜网格划分如图2,整个划分单元数超过 $10^5$ .

表1 变形镜材料参量

Table 1 Material parameters of deformable mirror

	Si	PZT
Young's modulus $E/\text{GPa}$	190	68
Poisson ratio	0.3	0.3
Piezoelectric coefficient $d_{31}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	-	-450
Piezoelectric coefficient $d_{33}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	-	800



图2 三点能动支撑单压电变形镜网格划分

Fig. 2 Grid partition of unimorph deformable mirror with three active supports

### 2.2 边缘执行器重构能力

在光学系统中,波前形状十分复杂,很难直接用简单的函数精确表示,通常采用 Zernike 多项式来拟合波前像差.将波前像差分解为一定项数的 Zernike 多项式组合,各阶 Zernike 多项式面型之间相互正交.通过变形镜重构 Zernike 多项式可以反映它对波前像差的校正能力<sup>[1]</sup>.变形镜驱动电压和镜面形貌之间的关系用影响函数描述,它由变形镜驱动方式、构成材料刚度、致动器形状等决定.仿真中给每个单压电变形镜致动器或边缘支撑执行器加载 50 V 电压,其对应的镜面形貌变形即为影响函数.然后采用最速下降控制算法计算重构 Zernike 多项式的控制电压<sup>[17]</sup>.仿真分析边缘执行器重构低阶像差,并对残余误差做归一化处理(重构误差除以重构面形).

图 3 为仿真边缘三个、六个执行器重构前几项

Zernike 像差形貌图.对比理论像差图像,三点致动能够有效重构倾斜项,六点致动能够有效重构倾斜及像散等像差.边缘执行器数目的增加提高了镜面边缘的灵活性,能重构一些形状简单的像差.图 4 为对应的归一化后的残余误差.三点重构  $x$ 、 $y$  方向倾斜的残余误差均方根值(Root Mean Square, RMS)小于 0.02,其他像差受限于致动点数量而无法有效校正.变形镜三点支撑时可以作为产生大变形量的倾斜镜使用,控制镜面的整体倾斜程度.边缘执行器的校正能力与执行器数量及安装位置有关.六点执行器除了能够很好地重构倾斜项外,还能够校正像散以及三叶草像差.重构像散的残余误差约为 0.09,重构第 9 项三叶草像差时的残余误差约为 0.04.边缘执行器加强了单压电变形镜变形的控制能力,可辅助校正一些低阶像差.

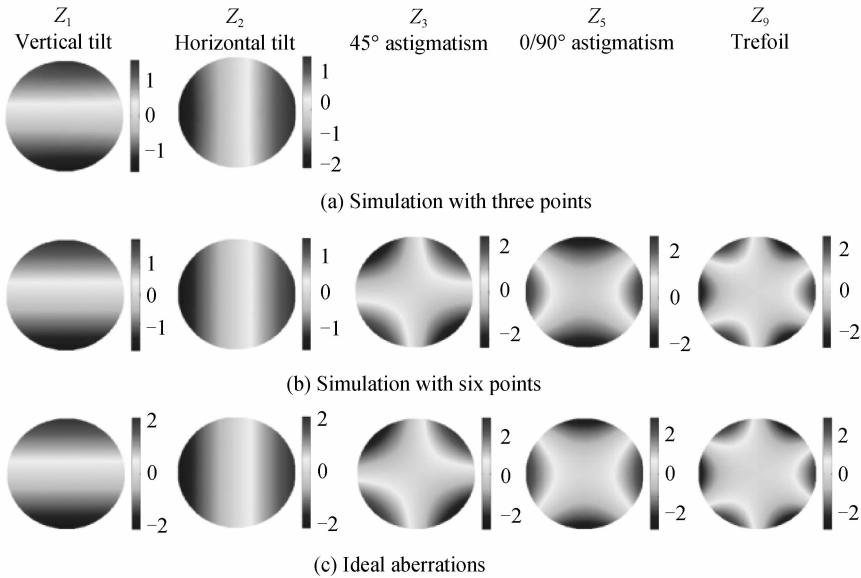


图 3 仿真重构低阶像差面形  
Fig. 3 Simulation reconstruction of low order aberrations

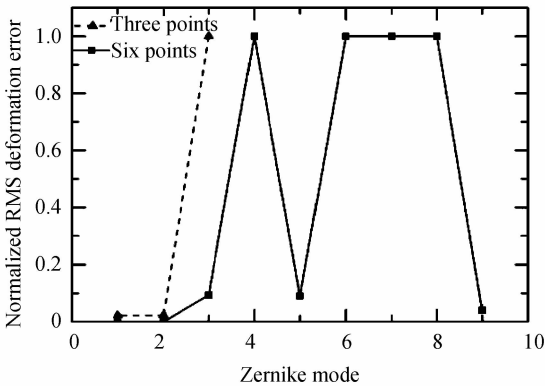


图 4 归一化残余误差  
Fig. 4 Normalized residual error

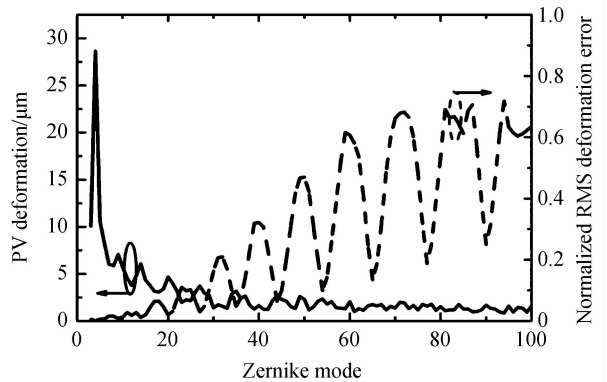


图 5 重构幅值及残余误差  
Fig. 5 Amplitude and normalized residual error of reconstructed aberrations

### 2.3 六点支撑下单压电变形镜校正性能

仿真分析 214 单元变形镜在六点支撑下重构前 100 项 Zernike 多项式的性能,仿真时施加电压为

-50~50 V,结果如图 5.重构离焦项的变形量最大,超过了 28  $\mu\text{m}$ .随着 Zernike 多项式项数的增加,重构

幅值下降,这与单压电变形镜交联值较大相关.重构误差随项数增加呈波浪式上升,重构前 20 项像差的重构误差小于 0.08,重构前 35 项像差的重构误差基本小于 0.2,这显示了 214 单元单压电变形镜良好的校正性能.

### 3 变形镜制备与表征

#### 3.1 变形镜的制备

实验中制备了三点支撑、六点支撑两块 214 单元单压电变形镜,其中单压电变形镜的制备流程可参考文献[11].首先将硅片与 PZT 片通过环氧胶粘接,加载均匀压力后常温固化,之后通过湿法刻蚀技术刻蚀出环形电极图案,环形电极通过柔性电路板引出.边缘执行器底部与石英平晶粘接,顶部与球形转接头端面粘接,球形转接头另一端通过光学结构胶和镜面背部粘接,制备的变形镜原型样机如图 6.

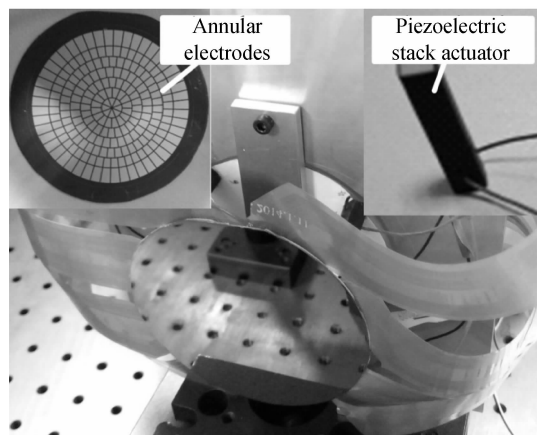
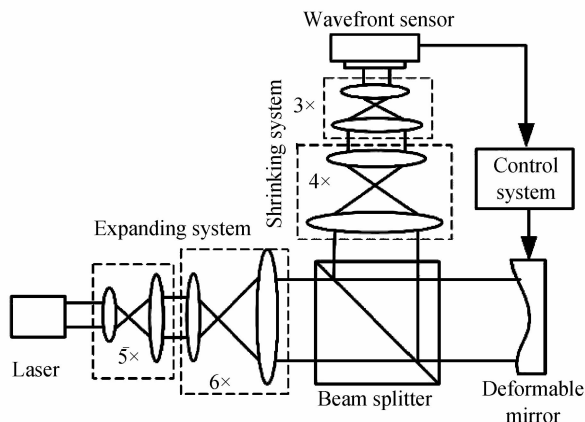


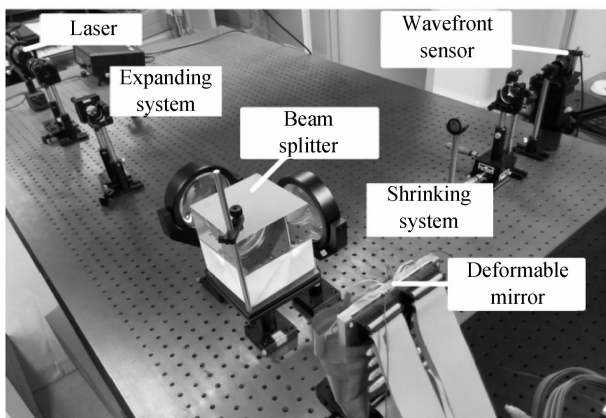
图 6 变形镜原型样机

Fig. 6 Photo of the deformable mirror prototype

基于哈特曼波前传感器的测试系统光路如图 7.激光束先通过两级望远系统扩束(扩束比分别为 5 倍与 6 倍),使光束口径达到 80 mm 左右.扩束后光束通过消偏振分光棱镜达到变形镜镜面.从镜面反射回的光束再一次经过分光棱镜反射至测量端,经过两级缩束系统(缩束比分别为 4 倍和 3 倍)后被波前传感器探



(a) The principle diagram



(b) The real product photo

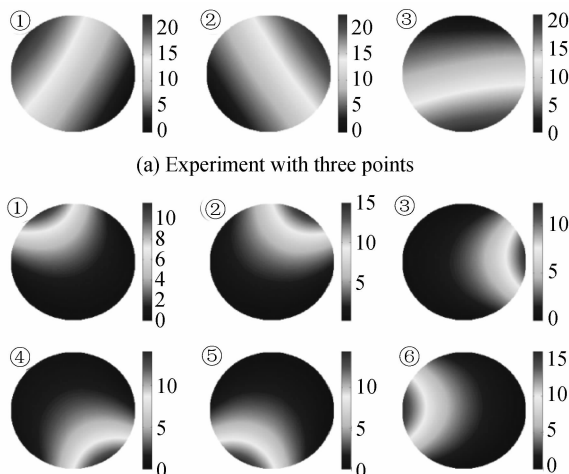
图 7 测试系统

Fig. 7 The test system

测.缩束系统用于匹配变形镜口径(50 mm)与波前传感器口径( $\sim 4.3$  mm).波前传感器为 Thorlabs WFS 150-5C,使用  $29 \times 29$  微透镜阵列.由于光束经过入射、反射两个过程,波前幅值为镜面变形的 2 倍.控制系统根据测量的波前像差计算控制电压并实时控制变形镜.

#### 3.2 边缘执行器影响函数

采用波前传感器测量边缘执行器的影响函数,通过对执行器施加 50 V 电压时的镜面变形减去初始镜面形貌得到.图 8 为边缘三点、六点致动时各个执行器的影响函数.在 50 V 电压下,各个执行器最大波前变形量超过了  $10 \mu\text{m}$ ,显示了边缘执行器大变形的特点.



(b) Experiment with six points

图 8 50 V 下各执行器的影响函数

Fig. 8 Influence function of each actuator at 50 V

#### 3.3 实测边缘执行器校正性能

采用实测得到各个执行器的影响函数,通过最速下降控制算法计算控制电压,测量边缘执行器施加电压后重构的面形.三点支撑重构前三项像差,六点支撑重构前九项像差.图 9 为实际测量得到的边缘执行器

重构面形图,实测重构面形与仿真结果相符.

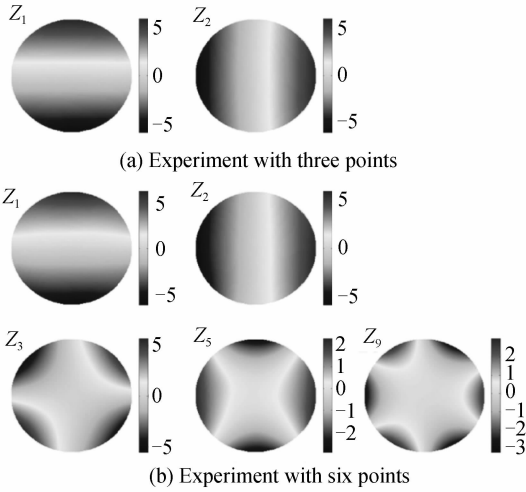


图 9 实验重构 Zernike 面形

Fig. 9 Experimental reconstruction of Zernike profiles

图 10 为三点致动重构前三项像差的归一化残余误差及重构幅值图,重构倾斜项时重构幅值超过了  $12\ \mu\text{m}$ ,此时的残余误差为 0.055. 三点致动无法有效重构其他像差,残余误差接近 1. 图 11 为六点致动重构

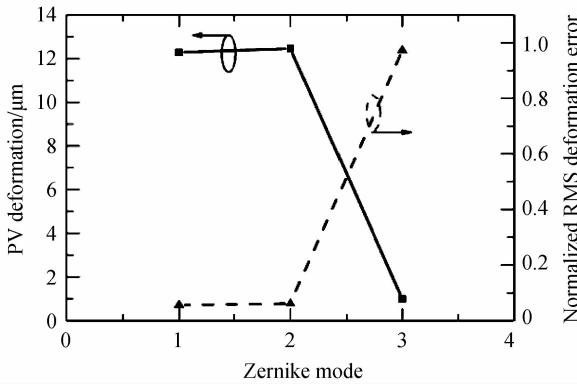


图 10 三点致动重构的波前幅值及残余误差

Fig. 10 Wavefront amplitude and normalized residual wavefront error of reconstructed aberrations by three points driven

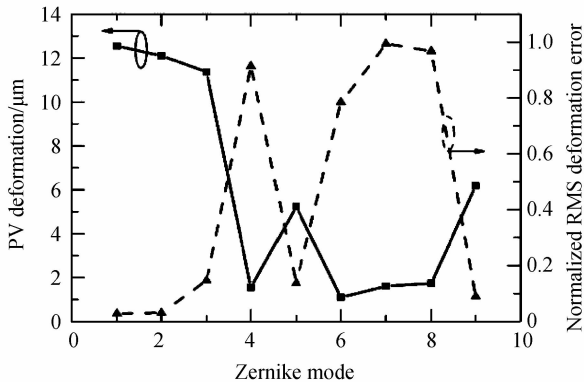


图 11 六点致动重构的幅值及残余误差

Fig. 11 Wavefront amplitude and normalized wavefront residual error of reconstructed aberrations by six points driven

前九项像差后归一化的残余误差及重构幅值. 六点执行器在重构倾斜项上的性能与三点类似,还能有效重构像散和三叶草像差. 边缘执行器能够有效产生大变形的像差,可用于增强镜面变形能力. 对于 214 单元变形镜的校正性能可见参考文献[12]. 由于支撑执行器和单压电变形镜可认为是两个单独的变形镜,采用普通控制算法可能会引起校正效果的抵消,复合校正可采用类似双变形镜的控制方法<sup>[18]</sup>,将在下一步工作中进行研究.

### 3.4 频率

共振频率是变形镜一项重要的性能指标,频率越高,反映变形镜能够正常工作的频带越宽,一般要求共振频率高于变形镜工作频率的 10 倍. 分别对三点、六点支撑变形镜中心电极施加  $50\sim 1\ 000\ \text{Hz}$  间隔为  $5\ \text{Hz}$  的  $10\ \text{V}$  正弦扫频信号,采用激光多普勒测振仪测量对应的中心电极处位移信号. 测试结果如图 12,三点支撑变形镜一阶谐振频率约为  $550\ \text{Hz}$ ,六点支撑的约为  $780\ \text{Hz}$ . 根据文献[13]的数据,相同尺寸单压电变形镜简支和固支条件下的一阶谐振频率分别约为  $550\ \text{Hz}$  和  $920\ \text{Hz}$ ,可知点支撑的频率在简支与固支之间.

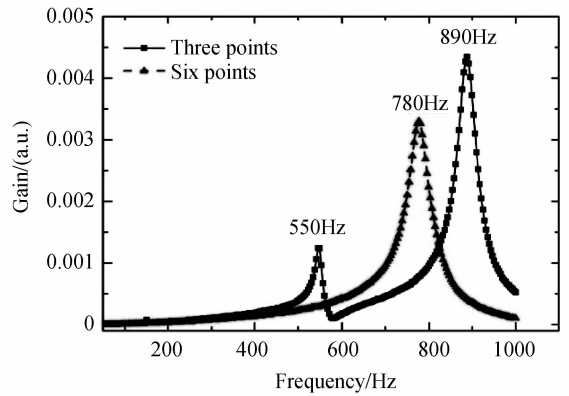


图 12 点支撑变形镜频率响应

Fig. 12 Frequency response of deformable mirror supported by multi-points

## 4 结论

本文提出了一种带边缘驱动的 214 单元单压电变形镜,能动执行器在支撑镜面的同时辅助校正波前像差,增加变形镜控制的灵活性. 分析了三点、六点两种支撑方案并制备了相应的变形镜原型样机进行测试. 测试结果表明,边缘执行器在  $50\ \text{V}$  电压下的波前变形量超过  $10\ \mu\text{m}$ ,边缘执行器能够有效重倾斜像差(波前幅值可达  $12\ \mu\text{m}$ ,残余误差小于 0.06),可用作倾斜镜. 六点支撑对于其他特定的低阶像差也具有较好的校正能力. 边缘执行器与单压电变形镜的结合有助于提高整个变形镜的校正性能,在天文自适应光学系统中具有应用价值.

## 参考文献

- [1] JIANG Wen-han. Adaptive optical technology[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, **28**(1): 7-13.  
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, **28**(1): 7-13.
- [2] JIA Peng, ZHANG Si-jiong. Performance modeling of the adaptive optics system on the 2.16 m telescope[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, **56**(3): 658-662.
- [3] WEI Pei-feng, LU Zhen-wu, LIU Xin-yue, *et al.* Performance analysis of adaptive optical system for spatial objectives[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7): 100-106.  
卫沛锋, 卢振武, 刘欣悦, 等. 自适应光学系统对空间运动目标校正性能分析[J]. 光子学报, 2015, **44**(7): 100-106.
- [4] LIN Xu-dong, LIU Xin-yue, WANG Jian-li, *et al.* Development and performance test of the 961-element deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(6): 0601001.  
林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 961单元变形镜研制及性能测试[J]. 光学学报, 2013, **33**(6): 0601001.
- [5] CAO Zhao-liang, MU Quan-quan, HU Li-fa, *et al.* Preliminary use of nematic liquid crystal adaptive optics with a 2.16-meter reflecting telescope[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(4): 2530-2537.
- [6] TYSON R K. Principles of adaptive optics[M]. CRC Press, 2010.
- [7] MADEC P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy [C]. SPIE, 2012, **8447**: 844705.
- [8] RODDIER F. A new concept in adaptive optics: curvature sensing and compensation[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(7): 1223-1225.
- [9] OYA S, BOUVIER A, GUYON O, *et al.* Performance of the deformable mirror for Subaru LGSAO[C]. SPIE, 2006, **6272**: 62724S.
- [10] NING Yu, YU Hao, ZHOU Hong, *et al.* Performance test and closed-loop correction experiment of a 20-element bimorph deformable mirror[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **28**(9): 1638-1644.
- 宁禹, 余浩, 周虹, 等. 20单元双压电变形镜的性能测试与闭环校正实验研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(7): 4717-4723.
- [11] MA Jian-qiang, LIU Ying, HU Yan-lei, *et al.* Low-cost unimorph deformable mirror with high actuator count for astronomical adaptive optics[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(1): 016602.
- [12] CHEN Jun-jie, MA Jian-qiang, MAO Yu-xin, *et al.* Experimental evaluation of a positive-voltage-driven unimorph deformable mirror for astronomical applications[J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(11): 117103.
- [13] MA Jian-qiang, LIU Ying, CHEN Jun-jie, *et al.* Design and performance testing of 200-element silicon unimorph deformable mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(8): 2047-2053.  
马剑强, 刘莹, 陈俊杰, 等. 200单元硅基单压电变形镜的设计与测试[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(8): 2047-2053.
- [14] ELLIS E M. Low-cost bimorph mirrors in adaptive optics [D]. London: University of London, 1999.
- [15] LING Ning, CHEN Dong-hong, GUAN Chun-lin, *et al.* Two-dimension piezoelectrical fast steering mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **2**(1): 51-60.  
凌宁, 陈东红, 官春林, 等. 二维高速压电倾斜反射镜[J]. 光电工程, 1995, **2**(1): 51-60.
- [16] WANG Liang, CHEN Tao, LIU Xin-yue, *et al.* Compensation of non-common path aberrations in an adaptive optics system with a wavefront processor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 122-126.  
王亮, 陈涛, 刘欣悦, 等. 适用于波前处理器的自适应光学系统非共光路像差补偿方法[J]. 光子学报, 2015, **44**(5): 122-126.
- [17] ZHU L J, SUN P C, BARTSCH D U, *et al.* Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(1): 168-176.
- [18] HU Shi-jie, XU Bing, ZHANG Xue-jun, *et al.* Double-deformable-mirror adaptive optics system for phase compensation[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(12): 2638-2642.