

文章编号: 0253-2239(2009)07-1756-05

# 20 单元双压电片变形镜对 Zernike 像差空间拟合能力的实验研究

宁 禹<sup>1,2</sup> 余 浩<sup>1,2</sup> 周 虹<sup>1,3</sup> 饶长辉<sup>1</sup> 姜文汉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073  
<sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘要** 利用 20 单元双压电片变形镜和  $13 \times 13$  阵列哈特曼波前传感器所构成的闭环自适应光学系统, 实验测试了双压电片变形镜对 3~20 项静态 Zernike 像差的空间校正能力, 并将实验结果与仿真计算结果进行了对比。最后分析了哈特曼传感器与双压电片变形镜之间的对准误差对实验结果的影响。研究表明, 除了少数几项外, 双压电片变形镜对 3~20 项 Zernike 像差的拟合误差都小于 0.5, 各项 Zernike 仿真和实验结果之差平均小于 0.1。计算表明, 与严格对准的理想情况相比, 双压电片变形镜对 3~20 项 Zernike 像差中大多数项的拟合误差都随着失配程度的增加而增大, 对准精度对于高阶像差拟合效果的影响尤其严重。

**关键词** 自适应光学; 变形反射镜; 空间拟合能力; 泽尼克像差; 对准误差

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1756

## Experimental Research on Spatial Fitting Capability to Zernike Aberrations of 20-Element Bimorph Deformable Mirror

Ning Yu<sup>1,2</sup> Yu Hao<sup>1,2</sup> Zhou Hong<sup>1,3</sup> Rao Changhui<sup>1</sup> Jiang Wenhan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup>College of Photon-electron Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China  
<sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** A closed-loop adaptive optics system, which consists of a 20-element bimorph deformable mirror and a Shack-Hartmann wave-front sensor with  $13 \times 13$  sub-aperture arrays, is established to test the spatial fitting capability to 3~20 Zernike items of the bimorph deformable mirror. Contrast is made between experimental result and simulation result. And the effect of mismatch between bimorph deformable mirror and the sub-apertures of Shack-Hartmann sensor is analyzed. Results show that most of the fitting errors of 3~20 Zernike items are smaller than 0.5, and the mean difference between experiment and simulation is smaller than 0.1. Compared with rigorous aligned ideal situation, the fitting error gets larger with the increase of mismatch size. The effect of mismatch is more serious for higher order aberrations than the lower ones.

**Key words** adaptive optics; bimorph deformable mirror; spatial fitting capability; Zernike aberration; mismatch error

## 1 引 言

一个典型的自适应光学 (Adaptive optics, AO)

系统通常由波前传感器、波前校正器、波前控制器三部分构成, 波前传感器测量出波前误差, 波前控制器

收稿日期: 2008-09-26; 收到修改稿日期: 2008-11-11

基金项目: 国家 863 计划和国家自然科学基金(60438030)资助课题。

作者简介: 宁 禹(1979—), 女, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术等方面的研究。E-mail: ningyu\_0205@126.com

导师简介: 饶长辉(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学技术等方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

通过控制波前校正器产生所需的校正量,从而使校正后的光束波前接近理想的平面或球面。

变形反射镜(Deformable mirror, DM)作为波前校正器的一种,是自适应光学系统中的核心器件,变形镜的小型化可以有效减小整个 AO 系统的体积并降低其成本。目前,微小型变形镜按驱动方式可分为以下几类:基于纵向压电效应的传统压电变形镜,基于微机电(MEMS)技术构造的分立式变形镜和连续式薄膜变形镜(Membrane DM)、基于横向压电效应的双压电片变形镜(Bimorph DM)以及基于电光效应的液晶变形镜(Liquid crystal DM)等。其中, Bimorph DM 的动态范围大、激光辐照破坏阈值高、结构相对简单,并可直接与曲率传感器配合使用来提高 AO 系统的响应速度<sup>[1~3]</sup>。

在文献[4,5]中,对中科院光电所自行研制的 20 单元 Bimorph DM 的影响函数进行了实验测试和有限元分析,并仿真分析了该变形镜对 Zernike 像差的空间拟合能力。为了检验仿真计算的准确性,本文搭建了闭环系统实验测试 20 单元 Bimorph DM 对 3~20 项静态 Zernike 像差的空间校正能力,指出实验中应该注意的问题并分析哈特曼传感器与 Bimorph DM 之间对准误差对实验结果的影响。与文献[6]采用干涉仪开环测量分立变形镜对各阶 Zernike 像差的拟合能力相比,本实验采用闭环反馈方法使测试结果更能反映 Bimorph DM 的真实空间校正能力。

## 2 基于 20 单元 Bimorph DM 和 13×13 阵列哈特曼传感器的 AO 系统

20 单元 Bimorph DM 由三层材料构成(如图 1(a)所示),包括一层上表面抛光镀膜作为反射面的玻璃基底和两层材料、尺寸完全相同的压电薄片,每层压电薄片的上下表面都镀有金属电极层[如图 1(b)、(c)所示]。图中浅色代表被动层(一般由玻璃或硅材料构成),深色代表压电层(由具有压电性质的材料构成),g 代表公共地电极, $e_1$ ,  $e_2$  代表控制电极层位置,控制层  $e_1$  上分布着 19 个分立电极,控制层  $e_2$  上为一整片离焦电极(标记为 No. 20)。

闭环自适应实验装置如图 2(a)所示,主要由 Bimorph DM、哈特曼波前传感器、高压放大器和内置数模转换卡、图像采集卡和相应控制软件的工控计算机构成。哈特曼传感器由中科院光电所自行研制,工作波长  $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ ,输出准平行光的最大测量口径为 60 mm,对应 32×32 子孔径阵列。该传感

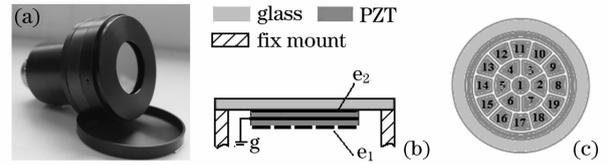


图 1 (a)封装 20 单元 Bimorph DM 实物图; 层结构(b)和电极排布示意图(c)

Fig. 1 20-actuator bimorph deformable mirror (a), and its structure (b) Lateral view of layers and fixing mount, (c) arrangement of 1~19 discrete electrodes

器配有面形良好的标准平面镜,通过控制面板上的粗对准、精对准和测量环节中的细微调整,可以实现哈特曼内光路和外部测量光路的共轴调节,理论测量精度为 P-V( $\lambda/10$ ), RMS( $\lambda/20$ )。本实验中有效孔径覆盖 13×13 阵列中的 137 个有效子孔径,并在哈特曼的配套软件中加入了控制 Bimorph DM 的模块部分,用于实现基于哈特曼传感器和 Bimorph DM 的闭环校正功能。实验采用哈特曼内置准平行光作为探测光源,光路中哈特曼和 Bimorph DM 对立放置,子孔径与电极的空间匹配关系如图 2(b)所示。

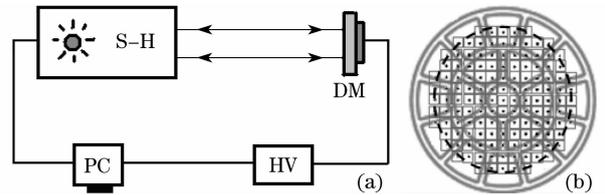


图 2 Bimorph DM 空间校正能力闭环测试实验装置图(a); 哈特曼子孔径与 Bimorph DM 驱动器对应关系示意图(b)

Fig. 2 Experiment layout of Bimorph DM Correction capability test device (a). and corresponding relationship between Bimorph DM and Hartmann sensor

## 3 20 单元 Bimorph DM 空间拟合能力测试方法和步骤

由于很难制作特定口径下的具有 Zernike 多项式分布的像差板,本实验采用软件生成的虚拟像差板作为待拟合目标。具体方法是构造以有效孔径半径为归一化半径的单位圆,将圆内区域按照有效孔径内的子孔径划分成多个子区域,先确定各子区域的几何中心点(0,0),代表对应各子孔径的理想平面波前的聚焦光斑位置,然后计算具有某项 Zernike 分布的畸变波前在相应子孔径内的聚焦光斑位置,并求出其相对于中心点的偏移量( $\Delta x, \Delta y$ ),如图 3

所示。该偏移量的大小与透镜焦距相关,对于不同的哈特曼传感器要乘以修正系数。由于哈特曼传感器是根据光斑偏移量来测量波前畸变信息的,因此光斑偏移量矩阵的作用就相当于真实的波前像差板。

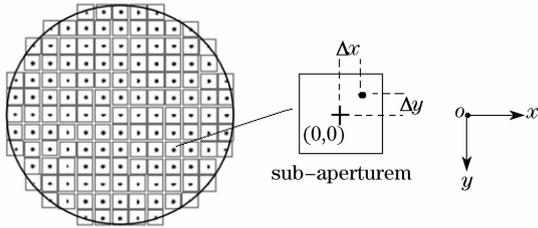


图 3 哈特曼传感器子孔径光斑与有效孔径对应关系及单子孔径内光点偏移示意图

Fig.3 Sub-apertures of Hartmann sensor used to sample the pupil and the spot shift in single sub-aperture

为了去除初始面形的影响,本实验在拟合前采用 Bimorph DM 初始面形对哈特曼进行标定,这样哈特曼就记录了各子孔内的光斑位置  $[x_0, y_0]$ ,然后在闭环过程中将上述光斑偏移量矩阵叠加到标定数据上,即得到待拟合目标面形对应的光斑位置坐标矩阵  $[x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y]$ 。当 Bimorph DM 在闭环迭代控制下产生相应面形使得畸变波前在各子孔径内的光斑位置达到或最大限度接近目标位置时,可以测得变形镜对该波前的空间拟合能力。

定义拟合误差(Fitting error,  $E_F$ )为残余波前  $C$  的 RMS 值与原始波前  $\varphi$  的 RMS 值的比值

$$E_F = \frac{RMS_C}{RMS_\varphi} = \frac{\left\{ \int \int [C(x, y) - \bar{C}]^2 dx dy \right\}^{1/2}}{\left\{ \int \int [\varphi(x, y) - \bar{\varphi}]^2 dx dy \right\}^{1/2}}$$

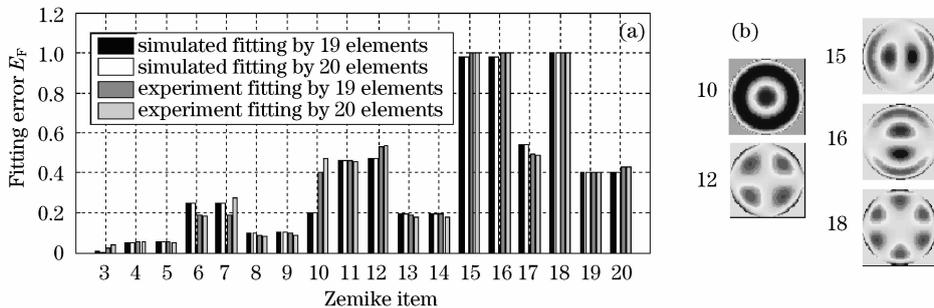


图 4 Bimorph DM 19 个分立电极以及全部 20 个电极对 3~20 项 Zernike 像差的拟合误差仿真结果和实验结果对比(a)及其中几项 Zernike 像差投影图(b)

Fig.4 Simulation and experimental results comparison of Zernike aberrations fitting done by Bimorph DM with 19 actuators and 20 actuators

从图 4 可以看到,除了少数项外(如 10,12,15,16 和 18),Bimorph DM 对 3~20 项 Zernike 像差的

实验中当测量 Bimorph DM 对某一项 Zernike 像差的拟合误差时,首先导入预先计算的该像差对应的各子孔径光斑偏移量,并记录面形数据;然后打开高压放大器,运行闭环程序由 Bimorph DM 对畸变波前进行校正,待输出控制电压稳定后,哈特曼显示的波前为拟合产生的残余波面,同样记录  $P-V$  和 RMS 等面形数据。这样,通过前后两次的测量数据就可以求得 Bimorph DM 对该项 Zernike 像差的拟合误差。

测量中值得注意的问题是控制电压不能过大,由于程序中对 Bimorph DM 的额定电压进行了限制,所以当某一控制电极的电压接近额定电压时,实验中就将该项 Zernike 像差乘以一定的比例系数,使其  $P-V$  相应减小,直至变形镜拟合时输出的稳定电压都小于限定值。本文认为这样测得的实验结果才真实反映了 Bimorph DM 的空间校正能力,而不受变形量的影响。

### 4 Zernike 像差拟合实验和仿真结果

按照上述步骤分别测得 Bimorph DM 除离焦外的分立电极、以及含离焦电极在内的所有电极对 3~20 项 Zernike 像差的拟合误差如图 4。在此图中还给出了采用文献[5]中有限元模型计算的影响函数拟合各像差波面的误差,同样分 19 个电极和 20 个电极两种情况显示。仿真中的有效孔径和实验保持一致,但所用待拟合像差由标准 Zernike 多项式计算生成,这样避免了将实验误差引入计算结果。(为计算方便,本文 Zernike 像差的排列顺序参照文献[7],与文献[5]中稍有不同)

拟合误差小于 0.5,尤其对第 3 项离焦像差的良好校正效果体现了 Bimorph DM 相对传统连续表面分

立驱动压电变形镜的优势。由于 Bimorph DM 各电极影响函数的局域性不强,因此一个电极补偿其对应区域畸变所产生的变形往往会给其它区域的电极“帮倒忙”,这种情况在闭环实验存在各种随机扰动、且电极与波前畸变分布对应较差的时候尤其严重,如 15, 16 和 18 项等。在不存在随机扰动的仿真计算中,Bimorph DM 在校正这几项时各电极的最优控制电压幅值都非常小,镜面近似于原地不动,所以拟合误差接近于 1。

图 4 中实验测试结果和仿真计算结果之间差别较小,以 20 单元 Bimorph DM 拟合各项 Zernike 为例计算二者之间的差别平均小于 0.1,如图 5 所示。

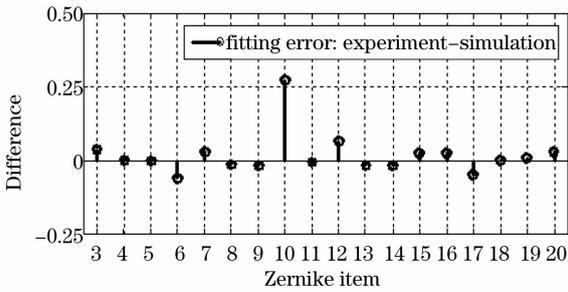


图 5 20 单元 Bimorph DM 对各项 Zernike 拟合误差实验结果与仿真结果(图 4)之差

Fig. 5 Difference between simulation and experimental results of Zernike aberrations fitting done by 20-element Bimorph DM

### 5 实验误差分析

基于上述实验设备和实验步骤,现对实验结果中可能存在的误差作以下说明:

(1) 作为核心校正器件,Bimorph DM 的性能一定程度决定了整个自适应光学系统的性能,其影响函数的线性响应特性和面形随温度的变化等都会对实验结果产生影响,虽然实验结果表明这些影响没有对静态像差的闭环校正造成严重干扰,但却增加了闭环系统中的不稳定因素,而这些因素在仿真分析过程中是无法准确考虑的,因此造成了仿真分析和实测结果之间存在微小差异。

(2) 哈特曼传感器的测量精度是实验分析的基础。文献[7]分析了哈特曼传感器在模式波前复原过程中存在的三种波前复原误差,即由于探测器子孔径空间分辨率限制造成的模式混淆误差;由于部分模式复原带来的模式截断误差和由于探测器噪声带来的波前复原误差。分析表明,各种误差作用下哈特曼传感器对各项 Zernike 的复原误差均小于 0.1。除了受自身理论测量精度限制外,探测光的强

度变化也会对测量结果的准确性造成影响,实验中保证了整个过程光强不变。

(3) 哈特曼传感器与 Bimorph DM 的对准误差也是导致实验和仿真结果存在微小差异的原因。哈特曼传感器自带的对准功能基本可以使 Bimorph DM 镜面与探测光轴垂直,但是却不能保证镜面上有效孔径和驱动电极之间的严格对准。根据 Bimorph DM 电极的中心轴对称分布特点,有效孔径的中心通常选择与镜面中心重合,而当二者之间存在微小错位时(如图 6 所示),必然导致测量结果不能真实反映变形镜的波前校正能力。以 21 mm 有效孔径为例,分析了当孔径中心相对镜面中心沿水平方向移动 1 mm、2 mm 和 3 mm 的情况下,Bimorph DM 拟合能力的变化见图 7。从图 7 中可以看到在 21 mm 口径下,与严格对准的理想情况相比,Bimorph DM 对 3~20 项 Zernike 像差中大多数项的拟合误差都随着失配程度的增加而增大,对准精度对高阶 Zernike 像差拟合效果的影响更大。

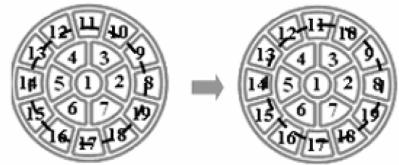


图 6 有效孔径中心和镜面中心之间存在横向对准误差示意图

Fig. 6 Lateral registration error between the pupil and Bimorph DM surface

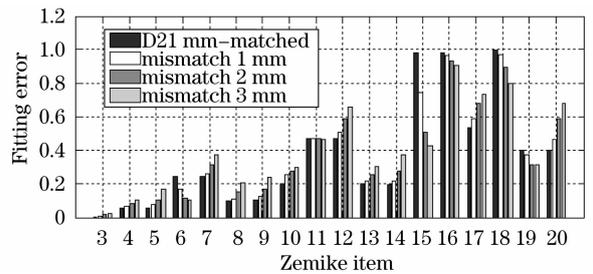


图 7 21 mm 口径下,有效孔径中心与镜面中心沿水平方向的对准误差对 Bimorph DM 拟合能力的影响  
Fig. 7 Influence of lateral registration error on the fitting error of Zernike aberrations in 21 mm pupil

### 6 结 论

搭建了基于哈特曼波前传感器和 20 单元双压电片变形镜的闭环自适应光学系统,实验测试了双压电片变形镜对 3~20 项静态 Zernike 像差的空间校正能力,并将实验结果与仿真计算结果进行了对比分析。研究表明,各项 Zernike 拟合误差仿真和

实验结果的平均差别小于 0.1,除了少数几项外(如 10, 12, 15, 16 和 18),Bimorph DM 对 3~20 项 Zernike 像差的拟合误差都小于 0.5,尤其对第 3 项离焦像差的良好校正效果体现了 Bimorph DM 相对传统连续表面分立驱动压电变形镜的优势。该研究为了解 Bimorph DM 的空间校正能力提供了实验参考,并给出了实验中对准误差调整的容限度。

### 参 考 文 献

- 1 Yudong Zhang, Ning Ling, Zeping Yang *et al.*. An adaptive optical system for ICF application[C]. *SPIE*, 2002, **4494**: 96~103
- 2 Wenhan Jiang, Xuejun Rao, Ning Ling *et al.*. Laser wavefront measurement of ICF amplifiers using Hartmann-Shack wavefront sensor [C]. *SPIE*, 2000, **4124**: 148~157
- 3 Rao Changhui, Jiang Wenhan, Zhang Yudong *et al.*. 61-element adaptive optical system for 1.2 m telescope of Yunnan Observatory [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 295~302  
饶长辉, 姜文汉, 张雨东等. 云南天文台 1.2 m 望远镜 61 单元自适应光学系统[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3): 295~302
- 4 Wenhan Jiang, Guomao Tang, Mingquan Li *et al.*. 21-element infrared adaptive optics system at 2.16m telescope [C]. *SPIE*, 1999, **3762**: 142~149
- 5 Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. An adaptive optics imaging system for living retina observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 1153~1160  
凌 宁, 张雨东, 饶学军等. 用于活体人眼视网膜观察的自适应光学成像系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 1153~1160
- 6 Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. Small table-top adaptive optical systems for human retina imaging [C]. *SPIE*, 2002, **4825**: 99~108
- 7 C. Schwartz, E. Ribak, S. G. Lipson. Bimorph adaptive mirrors and curvature sensing [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(2): 895~902
- 8 Yang Qiang, Zhu Jianping, Cao Genrui. The optimization design of Bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1163~1169  
杨 强, 朱建平, 曹根瑞. 双压电片变形反射镜的优化设计[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1163~1169
- 9 Yu Ning, Wenhan Jiang, Ning Ling *et al.*. Response function calculation and sensitivity comparison analysis of various Bimorph deformable mirrors [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(19): 12030~12038
- 10 Ning Yu, Zhou Hong, Guan Chunlin *et al.*. Influence function finite element analysis and measurement of a 20-element bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1638~1644  
宁 禹, 周 虹, 官春林等. 20 单元双压电片变形反射镜样镜的影响函数有限元分析和实验测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1638~1644
- 11 Wenhan Jiang, Ning Ling, Xuejun Rao *et al.*. Fitting capability of deformable mirror [C]. *SPIE*, 1991, **1542**: 130~137
- 12 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal reconstruction error of turbulence wave-front of Shack-Hartmann sensor [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2002, **14**(2): 243~249  
李新阳, 姜文汉. 哈特曼传感器对湍流畸变波前的泽尼克模式复原误差[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2): 243~249