

961 单元变形镜研制及性能测试

林旭东¹ 刘欣悦¹ 王建立¹ 李洪文¹ 王富国¹ 卫沛锋¹ 王亮¹ 姚凯男^{1,2} 贾建禄¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了满足天文望远镜自适应光学系统的需要,研制了一个 961 单元的变形镜及其控制系统。利用 Zygo 激光干涉仪对变形镜的性能进行测试,包括单个促动器的响应测试、相邻促动器间推拉测试、耦合测试;对于变形镜的校正能力,分别进行了 Waffle 模式测试、Zernike 多项式拟合和展平测试。测试表明,961 单元变形镜在单个促动器作用下的最大面形校正量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$;相邻促动器间推拉变形量为 $4 \mu\text{m}$;相邻促动器间的耦合为 23%;相对于之前的 137 单元变形镜,其对 Zernike 多项式的拟合能力有较大地提高;展平后的面形优于 $\lambda/70$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。测试结果达到了天文望远镜自适应光学系统对变形镜的性能指标要求。

关键词 自适应光学;变形镜;性能测试;校正能力

中图分类号 P124; TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0601001

Development and Performance Test of the 961-Element Deformable Mirror

Lin Xudong¹ Liu Xinyue¹ Wang Jianli¹ Li Hongwen¹ Wang Fuguo¹ Wei Peifeng¹
Wang Liang¹ Yao Kainan^{1,2} Jia Jianlu¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A 961-element deformable mirror (DM) and its control system are developed to satisfy the demand of the adaptive optical system of the astronomical telescope. The performance of the deformable mirror is tested by Zygo interferometer. Three tests are carried out, which include the response function test of individual actuator, the push-pull capability test of the neighbor actuators and the coupling test between two actuators. Then, the correction capability of the deformable mirror is tested by performing the Waffle mode test, Zernike polynomial fitting test and flattening test. The testing results show that the max correction ability of the deformable mirror actuated by individual actuator is $\pm 2.5 \mu\text{m}$. The inter-actuator stroke is $4 \mu\text{m}$. And the coupling between two neighbor actuators is 23%. Compared to the former 137-element deformable mirror, the fitting capability of the Zernike polynomials of the 961-element deformable mirror is much better. The surface flatness of the deformable mirror after flattening is better than root-mean-square (RMS) value of $\lambda/70$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). The test results satisfy the requirements of the deformable mirror which is to be used in the adaptive optical system of the astronomical telescope.

Key words adaptive optics; deformable mirror; performance test; correction capability

OCIS codes 010.1080; 010.1285; 120.4610; 230.1150; 230.4040

1 引言

为了满足天文望远镜高分辨率成像的要求,需

要在望远镜系统中实现能够主动补偿大气扰动的自适应光学技术。而波前校正器是自适应光学系统中

收稿日期: 2012-10-09; **收到修改稿日期**: 2012-11-21

基金项目: 国家 863 计划(2011AAXX1003)和中国科学院三期创新项目资助课题。

作者简介: 林旭东(1982—),男,博士,副研究员,主要从事自适应光学波前校正器方面的研究。

E-mail: linxudong_82@126.com

本文电子版彩色效果请见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的关键部件,一般要求其有足够大的校正量及足够的校正单元数,而且还要求变形镜(DM)的响应足够快以满足对大气扰动实时校正的要求^[1,2]。

目前,有多种波前校正器实现技术可以满足上述的需求,文献[3]详细介绍了各波前校正器技术的实现方式及优缺点。根据现在所掌握的技术以及从实现难易、可靠性、成本和风险的角度考虑,本文在前期工作的基础上^[4],设计并成功研制了961单元的分离促动器连续镜面变形镜,满足了大口径望远镜的需求。详细描述了对变形镜进行的一些测试,包括面形测试、促动器响应测试、耦合测试和整体的校正能力测试等。

对于变形镜动态性能的测试,文献[5]做了详细的描述,在961单元变形镜上面进行了同样的测试,并获得了类似的测试结果。

2 961单元变形镜

对于分离促动器连续镜面变形镜的分析设计过程,文献[1,6,7]给出了一套较为实用的分析方法,可以作为设计参考。

961单元变形镜的薄变形镜片直径为243 mm,材料为超低膨胀融石英(ULE)玻璃,基底采用与镜片一样的材料,可以降低温度对整个变形镜的影响。

促动器采用压电陶瓷(PZT)促动器,961个促动器采用 35×35 方形排列,相邻促动器间距为7 mm。

薄变形镜片采用边缘支撑的结构形式,也就是使最外面一圈的压电陶瓷促动器尽可能地靠近镜片边缘。这种结构形式有两个方面的优点:1)可以对薄镜片边缘实现支撑加工,从而获得较好的整镜面面形;2)可以对薄镜片边缘实现主动校正控制,利用变形镜全口径就可以进行面形校正,而不像其他的变形镜需要预留一到三圈促动器才能进行镜片边缘控制,最终使镜片的有效通光口径减小^[8,9]。

图1为961单元变形镜组成示意图。图2为变形镜实物图,变形镜被安装在一个二维倾斜调整台上。

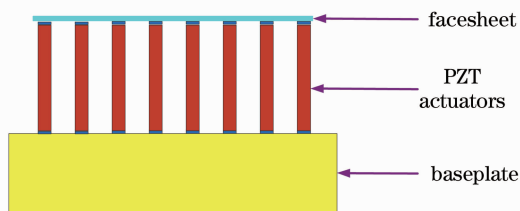


图1 961单元变形镜示意图

Fig.1 Composition of 961-element DM

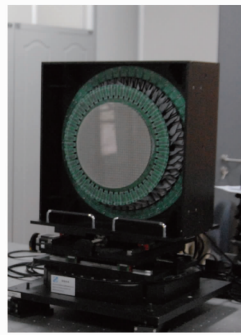


图2 961单元变形镜

Fig.2 961-element DM

3 变形镜性能测试

对变形镜进行测试,一方面能够了解变形镜的性能指标,确定其是否满足自适应光学系统的设计要求;另一方面可以把测试结果与有限元分析结果进行对比,从而改进分析方法。该测试是静态测试,用大口径Zygo干涉仪作为测量设备,图3为测试过程中的照片。



图3 测试中的961单元变形镜

Fig.3 961-element DM in test with interferometer

3.1 促动器响应及耦合测试

促动器响应测试是对单个促动器施加电压,用干涉仪测得此时的镜面面形减去施加电压之前的面形即为该促动器在镜面处的响应,如图4所示(图中PV指峰谷值,RMS指均方根值)。图4是对该促动器施加 $1/4$ 控制电压时的镜面变形量,约为 2λ (λ 为测试光波长,取 λ 为632.8 nm,下同),依照变形量与控制电压之间的近似线性关系,算得该促动器作用下的镜面最大变形量为 8λ (约为 $5 \mu\text{m}$,即 $\pm 2.5 \mu\text{m}$)。对多个促动器测试结果取平均也表明该变形镜在单个促动器作用下的最大变形量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 。

促动器之间耦合的大小会影响变形镜的校正能力。如果耦合系数太小,变形镜对低频像差的校正能力就弱;如果耦合系数太大,变形镜对高频像差的校正能力就会减弱。响应函数及耦合系数从某方面

决定了变形镜对像差的校正能力,而它们又由设计时的诸多参数决定,如薄镜片材料、厚度、促动器的材料特性及促动器排列间距等^[10,11]。

经过对该变形镜的耦合系数的测量,图 5 给出了单个促动器运动后耦合系数的测量情况,用相邻促动器位置的镜面变形量除以所加电压促动器位置的镜面变形量即为耦合量。图 5 中左侧黄色十字线表示的峰值位置就是所加电压促动器位置的镜面变形量,为 1.95λ ,图中右侧蓝色十字线所在位置就是与所加电压促动器相邻的促动器位置对应的镜面变形量,为 0.45λ 。由该数据可以算得耦合量为 $1 - 0.45/1.95 \approx 23\%$ 。

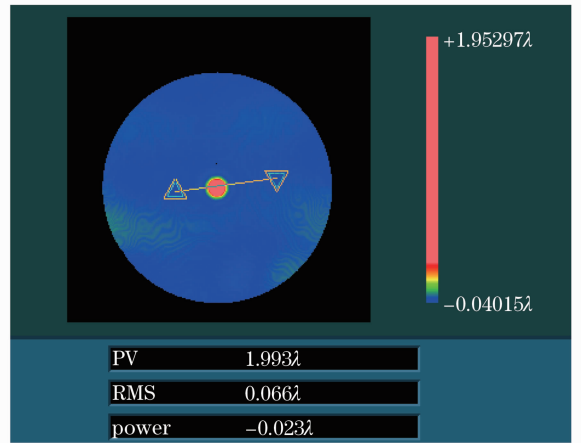


图 4 单个促动器的面形响应

Fig. 4 Response at surface of single actuator

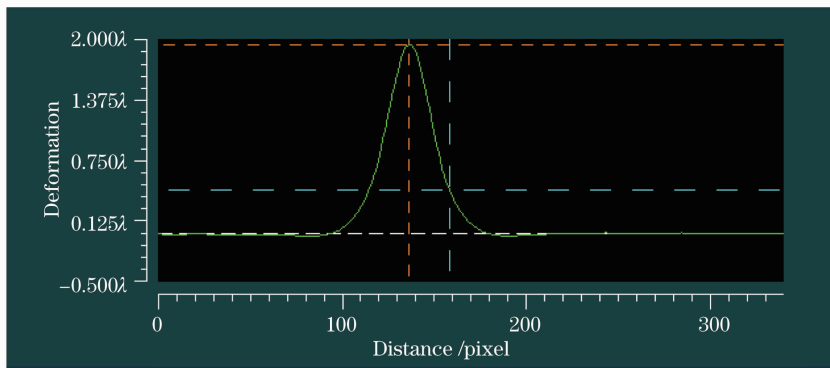


图 5 促动器间耦合量的测量

Fig. 5 Measurement of the coupling between the actuators

3.2 变形镜面推拉测试

变形镜面推拉测试指的是测量镜面在相邻两个促动器推拉作用下的变形量,反映了变形镜在其最大空间校正频率下的最大校正量。图 6 给出了镜面推拉变形的一个测试情况,在该测试中,相邻促动器所加的电压差是满行程控制电压的 $1/3$,从图中可以看出镜面的变形量为 2.16λ ,依照变形量与控制

电压之间的近似线性关系,算得该促动器作用下的镜面最大变形量为 6.48λ (约为 $4.1\mu\text{m}$)。实验中对多对促动器推拉作用测试结果取平均表明镜面在相邻促动器作用下的最大变形量(即 PV)为 $4\mu\text{m}$ 。

3.3 Waffle 模式

在自适应光学系统中,变形镜的单元数直接决定了其对大气扰动的校正能力。Waffle 模式指的

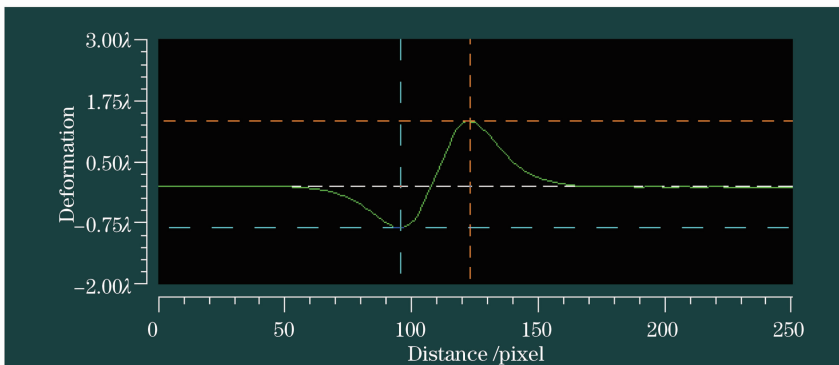


图 6 变形镜面在相邻促动器作用下的推拉变形测试

Fig. 6 Push-pull deformation measurement of the DM on the influence of two neighbor actuators

是控制变形镜的所有促动器,使其任意两个都对变形镜分别产生推拉作用。从 Waffle 模式中,可以直观地看到变形镜的单元数,也就可以判断出该变形镜的极限空间校正频率。图 7 为控制该变形镜所产生的 Waffle 模式镜面面形图,图 8 为对应的镜面干涉图。

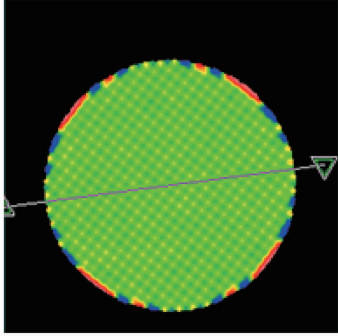


图 7 变形镜面 Waffle 模式下的面形图

Fig. 7 Surface profile of the DM in the Waffle mode

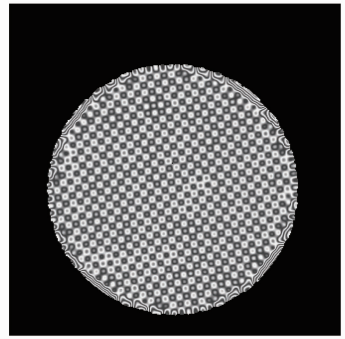


图 8 变形镜面 Waffle 模式下的干涉图

Fig. 8 Interferogram of the DM in the Waffle mode

在干涉仪测量时,变形镜的促动器坐标系与干涉仪水平坐标系有一个约 7.5° 夹角,该现象可以从干涉图中看出。

图 9 为镜面一维方向(对应一行促动器)上的变形情况,图中每个最高最低点分别对应一个促动器,从中可以看出该行有 35 个促动器。从保护变形镜的角度考虑,测试中只给变形镜施加了约 10% 的推拉控制量,所以图 9 中看到的数据 PV 值较小。

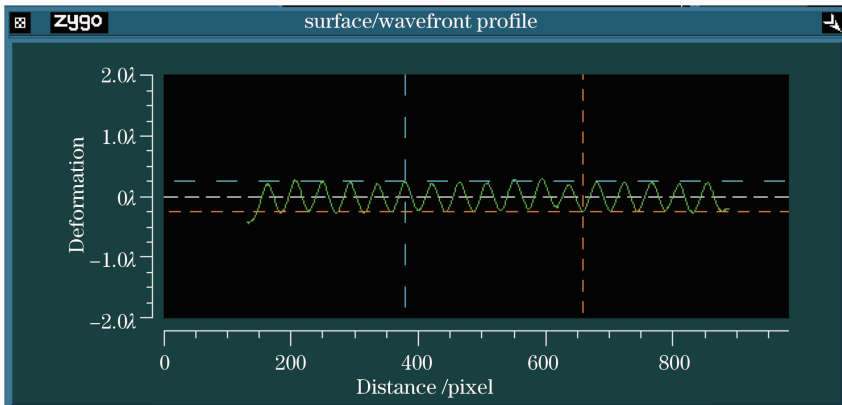


图 9 变形镜一维方向上的 Waffle 模式

Fig. 9 One-dimensional Waffle mode of the DM

3.4 Zernike 多项式拟合测试

变形镜对 Zernike 多项式的拟合能力直接反映了其对波像差的校正能力。利用算法控制变形镜分别产生对应不同 Zernike 多项式的像差。图 10 为 961 单元变形镜所产生的像差情况,从上到下依次分别对应 2 阶到 7 阶的 Zernike 多项式。由于高阶像差会在局部表现出较陡峭的面形,所以对于高阶的 Zernike 多项式,对其所施加的系数要稍微小一点,以免因局部干涉条纹过密而使干涉仪不能分辨。图 11 和图 12 分别为 137 单元变形镜和 961 单元变形镜对 $z(6,0)$ 和 $z(7,1)$ 多项式的拟合波面图,从图中可以看出,137 单元变形镜可以拟合较为高阶多项式,但是受促动器单元数的限制,其拟合的能力较理想

情况有一定差距;但 961 单元变形镜由于空间分辨率高,拟合结果接近理想的情况。所以从 Zernike 多项式模式法校正的角度考虑,希望自适应光学系统中波前校正器的单元数越高越好。

3.5 面形展平测试

受镜片厚度、促动器支撑等条件的限制,很难把薄镜片抛光到很高的面形精度,图 13 为 961 单元变形镜初始薄镜面面形。

从图 13 中可以看出,变形镜面面形的 PV 值为 2.141λ ,RMS 值为 0.480λ ,其中 $\lambda=632.8\text{ nm}$,而且大部分的面形误差为像散。

在变形镜面的主动展平测试中,镜面的面形展平结果从另一个方面反映了变形镜面形的精确控制

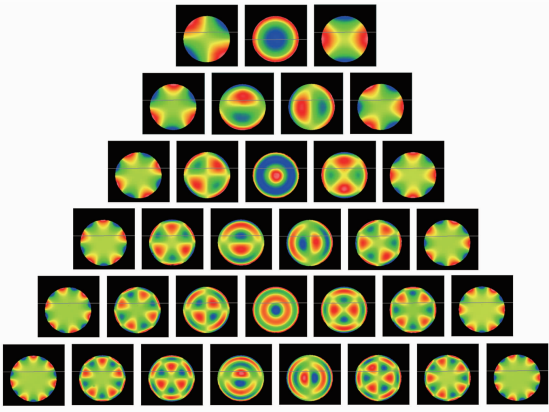


图 10 变形镜的 Zernike 多项式拟合
Fig. 10 Zernike polynomial fitting of the 961-element DM

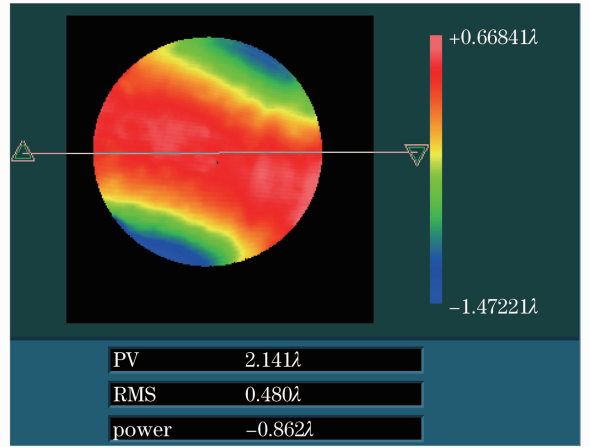


图 13 再抛光之后的薄镜面面形
Fig. 13 Surface map of the DM after re-polishing

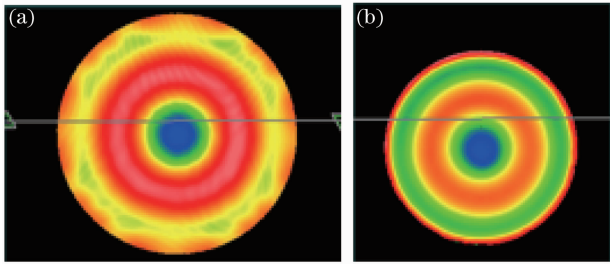


图 11 (a) 137 单元和(b) 961 单元变形镜对 $z(6,0)$ 多项式拟合对比

Fig. 11 Fitting comparison of $z(6,0)$ polynomial between (a) 137-element and (b) 961-element DM

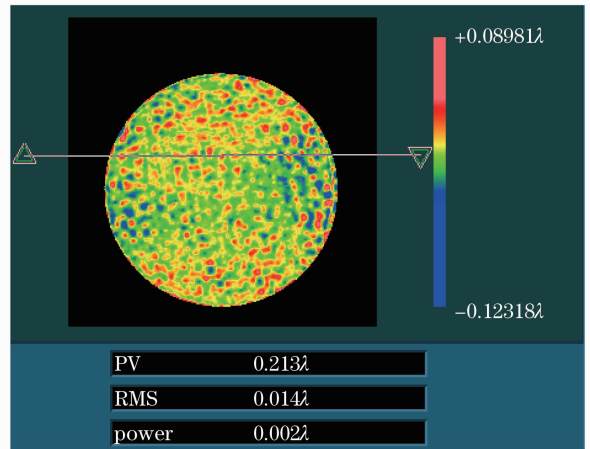


图 14 展平之后的面形
Fig. 14 Surface map of DM in the flattening scheme

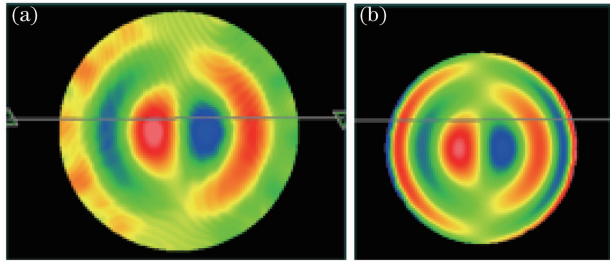


图 12 (a) 137 单元和(b) 961 单元变形镜对 $z(7,1)$ 多项式拟合对比

Fig. 12 Fitting comparison of $z(7,1)$ polynomial between (a) 137-element and (b) 961-element DM

能力^[14,15]。

图 14 为主动展平之后干涉仪测得的镜面面形 (PV 值为 0.213λ , RMS 值为 0.014λ , $\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 图 15 为展平之后的面形干涉图。从这两幅图中, 都可以看见由于粘接胶的局部应力使镜面面形出现点状毛刺。

另外在展平标定之后, 镜面的面形精度的 RMS 值优于 9 nm , 反映了变形镜、陶瓷促动器及标定算法的精确控制能力。

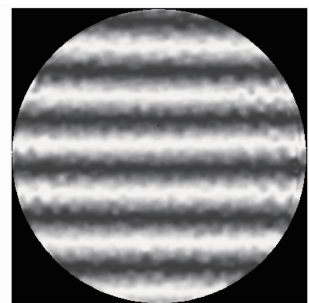


图 15 展平之后的面形干涉图
Fig. 15 Interferogram of DM in the flattening scheme

4 结 论

在前期研制 137 单元变形镜的基础上, 对自制的 961 单元压电变形镜进行了较为全面的测试, 测试表明该变形镜在单个促动器作用下的最大变形量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$, 相邻促动器间的推拉变形量为 $4 \mu\text{m}$, 促动器间耦合为 23%, 且因为校正单元数的增加,

变形镜对 Zernike 多项式的拟合能力比 137 单元变形镜有很大的提高,变形镜面形经展平之后面形精度的 RMS 值优于 9 nm。变形镜的测试结果符合大口径望远镜自适应光学系统的设计指标要求,可以应用在自适应光学系统中。

参 考 文 献

- 1 J. W. Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes [M]. New York: Oxford University Press, 1998. 176~192
- 2 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui *et al.*. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900106
姜文汉, 张雨东, 饶长辉等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900106
- 3 Lin Xudong, Xue Chen, Liu Xinyue *et al.*. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(4): 337~351
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, **5**(4): 337~351
- 4 Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli *et al.*. Performance test and experimental study of the correction capability of the 137-element deformable mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(2): 258~264
林旭东, 刘欣悦, 王建立等. 137 单元变形镜性能测试及校正能力的实验研究[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(2): 258~264
- 5 Lin Xudong, Liu Xinyue, Li Hongwen *et al.*. Study on the dynamic response test of the deformable mirror and its driver[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(11): 659~662
林旭东, 刘欣悦, 李洪文等. 变形镜及其驱动器的动态响应测试研究[J]. *红外技术*, 2011, **33**(11): 659~662
- 6 M. A. Ealey, J. A. Wellman. Deformable mirrors: design fundamentals, key performance specifications, and parametric trades [C]. *SPIE*, 1991, **1543**: 36~51
- 7 J. C. Siquin, J. M. Lurcon, C. Guillemard. Deformable mirror technologies for astronomy at CILAS [C]. *SPIE*, 2008, **7015**: O1~O12
- 8 W. G. Thorburn, L. Kaplan. A low voltage electrodistortive mirror system for wavefront control [C]. *SPIE*, 1991, **1543**: 52~63
- 9 W. H. Lowret, J. L. Wynia, M. A. Ealey. Characterization of three advanced deformable mirrors [C]. *SPIE*, 1998, **3433**: 388~393
- 10 L. Haung, C. H. Rao, W. H. Jiang. Modified Gaussian influence function of deformable mirror actuators [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(1): 108~114
- 11 J. M. Spinhirne, J. G. Allen, G. A. Ameer *et al.*. The starfire optical range 3.5 m telescope adaptive optical system [C]. *SPIE*, 1998, **3353**: 22~33
- 12 Zhou Hong, Ning Yu, Guan Chunlin *et al.*. Design and fabrication of prototype of bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1437~1442
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
- 13 Fan Xinlong, Guan Chunlin, Rao Changhui. Wave-front fitting capability analysis of 1.8 m telescope's adaptive secondary mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822002
樊新龙, 官春林, 饶长辉. 1.8 m 望远镜变形次镜波前拟合能力分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0822002
- 14 Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli *et al.*. Study on the flatten calibration of the deformable mirror based on the measurement of the interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 511~515
林旭东, 刘欣悦, 王建立等. 基于干涉仪测量的变形镜面形展平标定研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 511~515
- 15 A. Sivaramakrishnan, B. R. Oppenheimer. Deformable mirror calibration for adaptive optics systems [C]. *SPIE*, 1998, **3353**: 910~916
- 16 B. R. Oppenheimer, D. Palmer, R. Dekany *et al.*. Investigating a Xinetics Inc. deformable mirror [C]. *SPIE*, 1997, **3126**: 569~579
- 17 Wang Zongyang, Wang Bin, Wu Yuanhao *et al.*. Calibration of non-common path static aberrations by using phase diversity technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0701007
汪宗洋, 王 斌, 吴元昊等. 利用相位差异技术校准非共光路静态像差[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0701007

栏目编辑: 王晓琰