

文章编号 1004-924X(2013)02-0267-07

137 单元变形镜的性能测试及校正能力实验

林旭东*, 刘欣悦, 王建立, 王富国, 卫沛锋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 自制了一个 137 单元分立促动器的连续镜面式变形镜, 用于自适应光学相关技术的研究。首先, 利用 Zygo 激光干涉仪对变形镜的静态性能进行了测试, 包括面形测试、单个促动器的响应测试和耦合测试; 然后, 针对变形镜的校正能力, 分别进行了 Zernike 多项式拟合和展平测试, 并利用自适应光学实验平台实验验证了变形镜的校正能力; 最后, 利用搭建的快速响应测量平台测试了变形镜及其驱动电路的动态响应性能。测试及实验表明, 137 单元变形镜静态展平后的面形 RMS 值优于 $\lambda/50$, PV 值优于 0.18λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$); 能够对前 7 阶 Zernike 多项式进行较好的拟合和校正; 变形镜及其高压驱动器的动态响应优于 1 kHz; 该变形镜能使系统的 Strehl ratio 从小于 0.1 提高到优于 0.9, 明显改善了系统的成像能力。

关键词: 自适应光学; 变形镜; 性能测试; 校正能力; 动态响应

中图分类号: O439; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0267

Performance test and experiment of correction capability of 137-element deformable mirror

LIN Xu-dong*, LIU Xin-yue, WANG Jian-li, WANG Fu-guo, WEI Pei-feng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: linxudong_82@126.com

Abstract: A 137-element Deformable Mirror(DM) was manufactured by ourselves to carry out the research on the adaptive optics. First, a Zygo interferometer was used to test the static characteristics of the DM, which included figure tests, response tests of single actuators and coupling tests. Then, Zernike polynomial fitting and surface flattening were performed to test the correction capability of the DM, respectively, and the correction capability was also verified experimentally at an adaptive optics test-bed. Finally, a fast response measurement system was built up to test the dynamic response abilities of the DM and its drive electronics. The tests and experiments show that the surface of the DM after flatten calibration has the RMS and PV better than $\lambda/50$ and 0.18λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), respectively. Furthermore, the DM can fit and correct the first 7 order Zernike polynomials reasonably. The dynamic responses both of the DM and its high voltage driver are faster than 1 kHz. The tests in the indoor adaptive optics system show that the DM improves the system's Strehl ratio from less than 0.1 to better than 0.9, which enhances the imaging capability of the system greatly.

收稿日期:2011-12-11; 修订日期:2012-02-16.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AAXX1003)

Key words: adaptive optics; deformable mirror; performance test; correction capability; dynamic response

1 引言

自适应光学技术因为能够实时校正大气湍流引起的动态波前误差,提高光学系统的成像质量而越来越多地被应用到大口径天文望远镜系统中^[1]。波前校正器是自适应光学系统中的关键部件,目前主要的实现形式有:分立促动器连续镜面变形镜^[2,12]、分块拼接式变形镜^[3]、双压电变形镜^[4]、薄膜变形镜^[5]、MEMS 变形镜^[6]、基于液晶技术的空间光调制器^[7]和自适应次镜^[8]等。其中,拼接式变形镜由于其结构及控制的复杂,目前已经基本不用;双压电变形镜和薄膜变形镜适合校正大幅值的低阶像差;MEMS 变形镜是近年来发展很快的一项技术,但是其材料、工艺等还需要进一步研究,才能实现它在自适应光学系统中的成熟应用^[9];液晶空间光调制器作为波前校正器在中科院长春光机所得到了充分的研究并获得了良好的应用效果^[7];自适应次镜是针对大口径望远镜的特殊需求而实现的技术;分立促动器连续镜面变形镜具有响应速度快、对波像差的拟合能力好等优点,因此它仍是天文望远镜中应用最多的波前校正器。

本文在现有技术的条件下,根据工程研制需求及自适应光学系统的设计指标,自制了一个 137 单元的分立促动器连续镜面式变形镜,用于进行自适应光学相关技术的研究。为了解变形镜的性能指标,提高波前校正的水平,本文对变形镜进行了详细的测试。测试分为静态测试和动态测试^[13],静态测试主要包括面形测试、促动器响应测试、耦合测试和整体的校正能力测试等;动态测试主要是对变形镜及其驱动电路进行快速响应的测试,用于构建对应的控制系统模型,方便控制算法的设计。

2 137 单元变形镜

对于分立促动器连续镜面的变形镜,文献^[1]中构建了模型并详细介绍了其设计要点。本文在前期设计、有限元分析和实验的基础上确定了

137 单元变形镜的基本参数,其中薄镜片直径为 90 mm,材料为 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 PZT 压电陶瓷促动器,137 个促动器采用 13×13 方形排列,去掉角上的 32 个,相邻促动器的间距为 7 mm,图 1 为促动器排列示意图。图 2 为变形镜实物图,安装在一个二维倾斜调整台上。

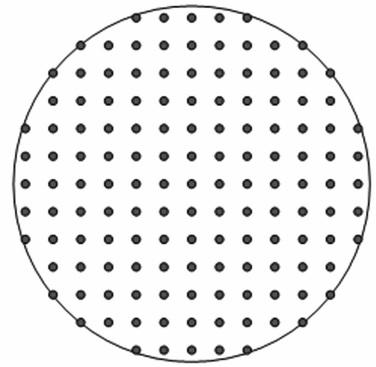


图 1 137 单元变形镜促动器排列示意图
Fig. 1 Actuator arrangement of 137-element DM

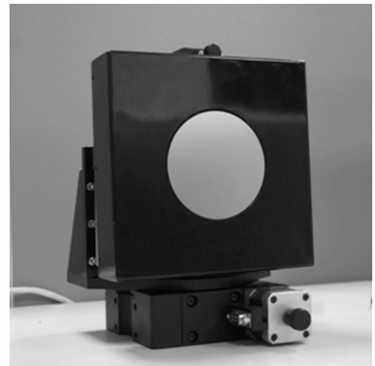


图 2 137 单元变形镜
Fig. 2 137-element DM

3 变形镜的静态性能测试

本节所述的静态是指对单个 PZT 陶瓷促动器加不同电压的间隔时间较长,且测试主要采用干涉仪。

3.1 促动器响应及耦合测试

第一个测试是促动器响应测试,以确认 137 个 PZT 促动器都能够受控,且镜面面形随之改变。方法是依次对每个促动器施加一定的电压,同时用 Zygo 干涉仪测量镜片的面形是否发生相应的改变。实验测试表明,所有的促动器及其控制器都工作良好。

促动器在镜面处的响应是通过用干涉仪测量对一个促动器施加电压后的镜面面形,然后减去施加电压之前的面形得到的,如图 3 所示。

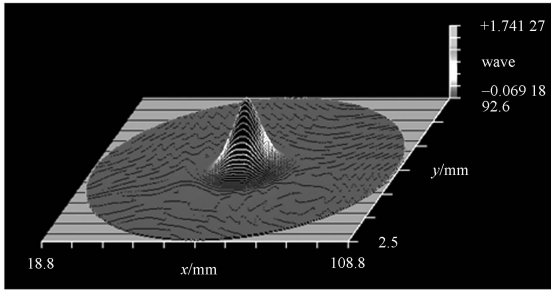


图 3 单个促动器的面形响应

Fig. 3 Surface influence of single actuator

实验发现,单个促动器运动所产生的影响不只是在其所在位置发生镜面变形,在其相邻促动器位置也会产生镜面变形,这就是耦合现象。本文对耦合量进行了测量,图 4 给出了耦合量的测量情况,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,由图中数据可以算得该耦合量为 25.7%。

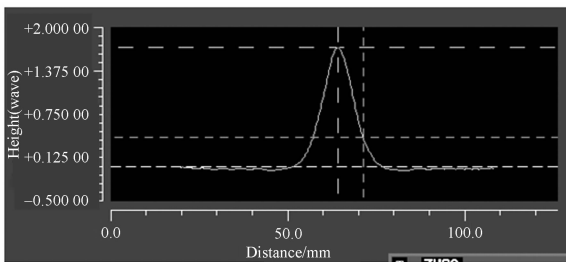


图 4 耦合量的测量

Fig. 4 Measurement of coupling

3.2 校正能力测试

3.2.1 Zernike 多项式拟合测试

由于通常用 Zernike 多项式来描述大气扰动引起的波像差,所以变形镜对 Zernike 多项式的

拟合能力直接反应了它对波像差的校正能力。本文利用算法控制变形镜分别产生系数为 1 个波长的对应不同 Zernike 多项式的像差,并计算其残余像差的 RMS 值。该控制算法的过程是:在变形镜上建立归一化的坐标系,事先测得变形镜对促动器的响应,针对所要产生的 Zernike 多项式面形算得各促动器的控制量,并施加到变形镜上面。图 5 中给出了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。由于干涉仪测量所用 Zernike 多项式阶数的不同,图 6 依次给出了对应 $Z(2,0)$ 、 $Z(2,+2)$ 、 $Z(2,-2)$ 、 $Z(3,+1)$ 、 $Z(3,-1)$ 、 $Z(4,0)$ 、 $Z(3,+3)$ 、 $Z(3,-3)$ 、 $Z(4,+2)$ 、 $Z(4,-2)$ 、 $Z(5,+1)$ 、 $Z(5,-1)$ 、 $Z(6,0)$ 、 $Z(4,+4)$ 、 $Z(4,-4)$ 、 $Z(5,+3)$ 、 $Z(5,-3)$ 、 $Z(6,+2)$ 、 $Z(6,-2)$ 、 $Z(7,+1)$ 、 $Z(7,-1)$ 、 $Z(5,+5)$ 、 $Z(5,-5)$ 、 $Z(6,+4)$ 、 $Z(6,-4)$ 、 $Z(7,+3)$ 、 $Z(7,-3)$ 多项式残余像差的 RMS 值。

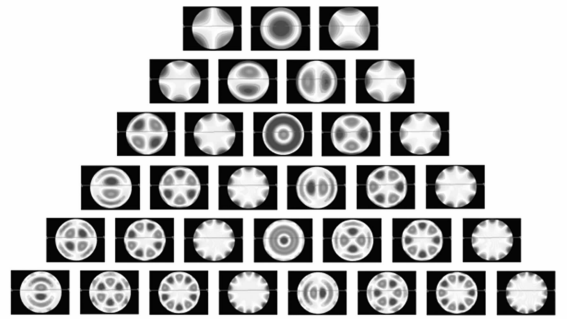


图 5 变形镜的 Zernike 多项式拟合

Fig. 5 Zernike polynomial fitting of 137-element DM

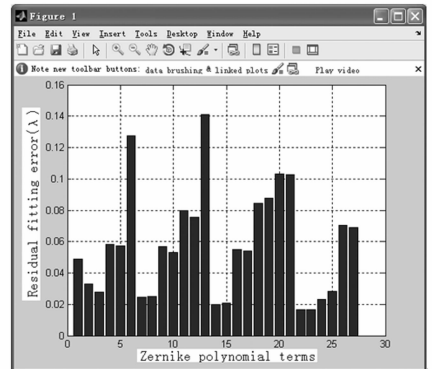


图 6 变形镜的 Zernike 多项式拟合误差

Fig. 6 Zernike polynomial fitting errors of 137-element DM

从图 5、图 6 可以看出,137 单元变形镜对 7 阶以内的像差都能够较好的拟合,且残余像差较小。由于干涉仪测量多项式分解阶数的不同,残余像差的测量目前不能给全,下一步工作期望用高精度的 Shack-Hartmann 传感器对变形镜进行测量并计算残余像差。

3.2.2 面形展平测试

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能力及自适应光学系统工作时所能达到的最高精度。展平标定测试在粘接完薄片之后,薄片再抛光之前进行,本文采用迭代控制方法^[10]对变形镜的面形进行展平测试,在面形没有进一步改善之后迭代终止。

因为面形展平要对镜面进行推/拉控制,所以先给所有的压电陶瓷促动器加控制电压到其控制范围的一半,测得这时的镜面面形如图 7 所示(PV 值为 2.591λ , RMS 值为 0.450λ , $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

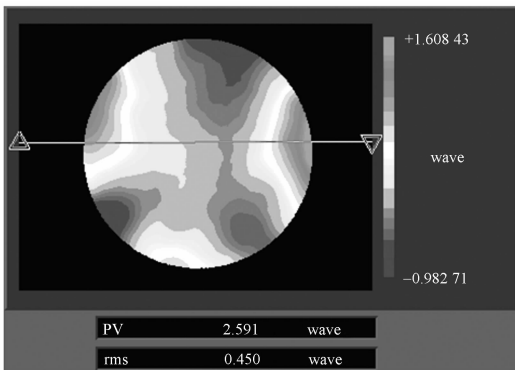


图 7 展平之前的面形

Fig. 7 Surface of DM before flattening

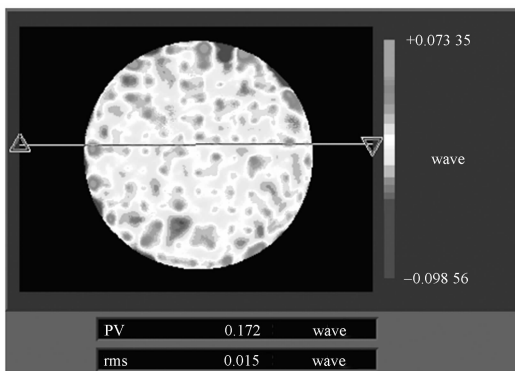


图 8 展平之后的面形

Fig. 8 Surface of DM after flattening

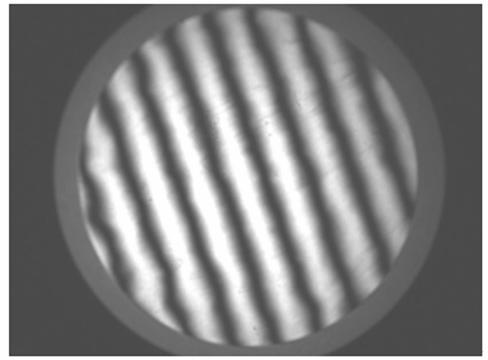


图 9 展平之后的面形干涉图

Fig. 9 Interferogram of DM after flattening

图 8 给出了迭代收敛之后干涉仪测得的镜面面形(PV 值为 0.172λ , RMS 值为 0.015λ , $\lambda = 632.8 \text{ nm}$),图 9 给出了展平之后的面形干涉图。

从图 8、图 9 中可以看出,在展平标定之后,镜面的面形精度优于 $\lambda/50 \text{ rms}$,这反映了变形镜、陶瓷促动器及标定算法具有精确控制的能力。

3.2.3 室内自适应光路中的测试

为了验证变形镜对实际光学系统成像的改进效果,课题组在室内搭建了一个自适应光学实验平台,如图 10 所示。

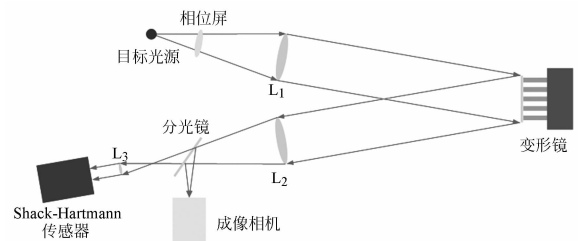


图 10 自适应光学实验光路图

Fig. 10 Optical layout of adaptive optics experiment

光路中主要有目标光源、相位屏、透镜 L_1 、 L_2 、 L_3 、变形镜、分光镜、Shack-Hartmann 传感器和成像探测器,要求目标光源和变形镜共轭放置,变形镜和 Shack-Hartmann 传感器共轭放置。其中,相位屏用于在光路中产生一定大小的相位扰动,Shack-Hartmann 传感器用于对系统波前误差进行测量并反馈给变形镜进行波前相位校正,成像探测器用于观察变形镜校正前后系统的成像效果。本实验先验证变形镜对系统静态像差(包括变形镜、相位屏及系统中其它光学元件的面形误差)的校正效果,对于动态扰动像差的校正结果将在后续的文章中给出。

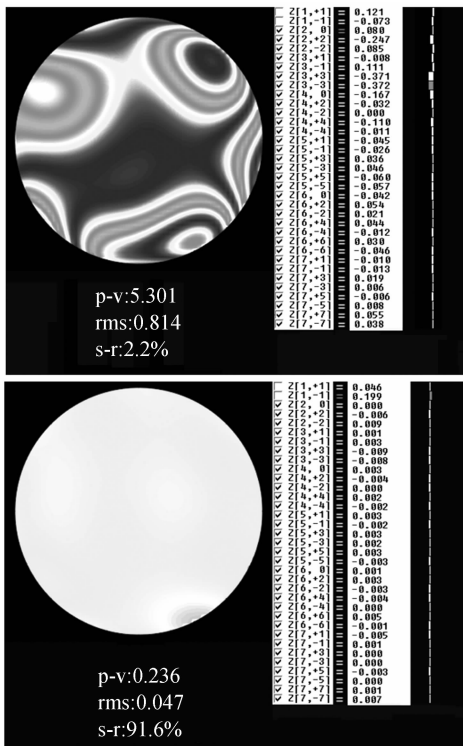


图 11 变形镜校正前后的系统波像差

Fig. 11 System wave-front errors before and after corrections

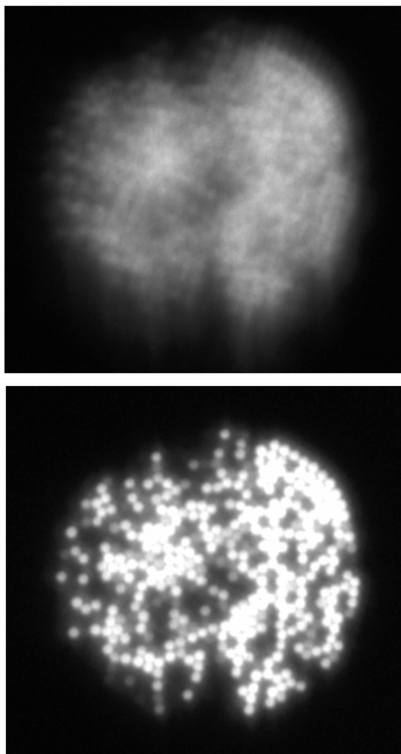


图 12 变形镜对光纤束目标的校正效果

Fig. 12 Correction of a fiber target with DM

图 11 为实验中变形镜校正前后 Shack-Hartmann 传感器测得的系统波像差,图中左边显示的是波面干涉图,右边为对应波面的 Zernike 多项式系数。

从图 11 中数据可以看出,校正前系统波前误差的 PV 值为 5.301λ ,RMS 值为 0.814λ ,系统 Strehl ratio 小于 0.1;启动变形镜校正后,波前误差 PV 值为 0.236λ ,RMS 值为 0.047λ ,Strehl ratio 提高到 0.916。而且从图中右侧的 Zernike 多项式系数数据可以看出,校正后各阶像差的系数明显变小,系统波像差得到了明显改善,这也可以从图 12 系统对光纤束目标的成像效果中看出。

4 变形镜的动态性能测试

为了验证变形镜是否能在高频情况下稳定工作,需要对变形镜的动态性能进行测试。课题组构建了一个测试系统^[11]用于对变形镜及其驱动放大器的动态响应性能进行测试,分别进行了 100 Hz~2 kHz 方波和 100 Hz~12 kHz 正弦波的扫频测试。其中,方波测试是为了尽量与变形镜的实际工作情况(接收信号一般为阶跃信号)类似,可以测得变形镜及其驱动放大器的动态响应性能;正弦波测试是为了了解变形镜整体的谐振特性。

图 13 中给出了促动器在其控制电压频率为 1 kHz 方波,幅值为使变形镜片变形 $3\mu\text{m}$ 的情况下测得的对应该镜片变形的亮度变化。图中蓝线为高压放大器的输入信号,黄线为测得的镜面变形信号(彩图见期刊电子版)。由此可以测出在 1 kHz 时,变形镜及其驱动器的响应只有很小($<4\%$)的增益衰减和相位延迟,在自适应控制系统

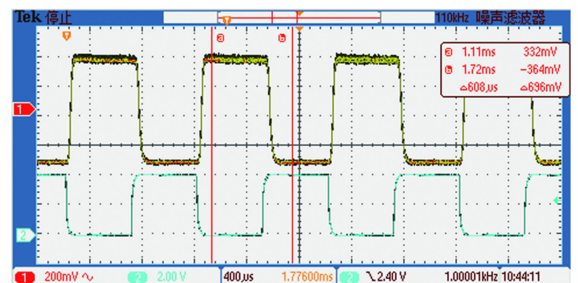


图 13 驱动信号为 1 kHz 时的响应波形

Fig. 13 Response waveforms with drive signal frequency of 1 kHz

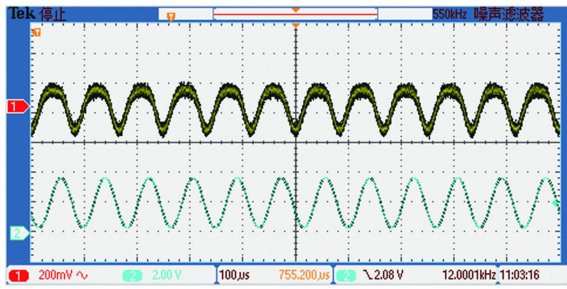


图 14 驱动信号为 12 kHz 时的响应波形

Fig. 14 Response waveforms with drive signal frequency of 12 kHz

中可以作为一个比例环节,方便了控制算法的设计和实现。

图 14 为正弦扫频到 12 kHz 时系统的输入和镜面变形的输出信号,扫频频率按 10 Hz 递增。从图中可以看出,虽然镜面变形信号(图示中的黄线)发生失真(这是由高压驱动器的增益带宽积约

束造成的),但是仍然能够判断出变形镜此时并没有发生谐振(而且此前的所有频率点都没有发生谐振现象),因此可以判断变形镜的谐振频率优于 12 kHz,符合使用要求。

5 结 论

本文对自制的 137 单元压电变形镜进行了静态性能和动态性能的测试。静态测试结果表明,该变形镜的面形经展平之后 RMS 值优于 $\lambda/50$, PV 值优于 0.18λ ,可以较好地校正 7 阶及以下的波前扰动;在室内的自适应光路中变形镜可以使系统的 Strehl ratio 从 0.1 提高到 0.9 以上,系统成像效果得到了明显改善。动态测试表明,变形镜的谐振频率优于 12 kHz,工作频率在 1 kHz 时可以等效为一个比例环节。后续的实验将围绕变形镜在望远镜上对大气扰动的校正效果展开。

参考文献:

- [1] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [2] LOWREY W H, WYNIA J L, EALEY M A. Characterization of three advanced deformable mirrors [J]. *SPIE*, 1998, 3433:388-393.
- [3] PRICE T R, EALE M A. Adaptive tertiary mirror for segmented mirror control [J]. *SPIE*, 2004, 5166:157-164.
- [4] 宁禹. 双压电片变形反射镜的性能分析与应用研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
NING Y. *Performance test and application study of a bimorph deformable mirror* [D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [5] HAMELINCK R, ROSIELLE N, KAPPELHOF P, *et al.*. Large adaptive deformable membrane mirror with high actuator density [J]. *SPIE*, 2004, 5490: 1482-1492.
- [6] COMELISSEN S A, BIERDEN P A, BIFANO T G. A 4096 element continuous facesheet MEMS deformable mirror for high-contrast imaging [J]. *SPIE*, 2008, 6888: 68880V.
- [7] CAO ZH L, MU Q Q, HU L F, *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.
- [8] GALLIENI D, ANACLERIO E, GLAZZARINI P, *et al.*. LBT adaptive secondary units final design and construction [J]. *SPIE*, 2003, 4839:765-772.
- [9] PATERSON C, MUNRO I, DAINTY C. A low cost adaptive optics using a membrane mirror [J]. *Optics Express*, 2000, 6:175-185.
- [10] SIVARAMAKRISHNAN A, OPPENHEIMER B R. Deformable mirror calibration for adaptive optics systems [J]. *SPIE*, 1998, 3353:910-916.
- [11] 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.
LIN X D, LIU X Y, LI H W, *et al.*. Study on the dynamic response test of the deformable mirror and its driver [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(11): 659-662. (in Chinese)
- [12] 凌宁. 自适应光学波前校正器 [J]. *光学技术*, 1998,

3:12-16.

LING N. Wave-front correctors of adaptive optics[J].

Optical Technology, 1998, 3:12-16. (in Chinese)

[13] OPPENHEIMER B R, PALMER D, DEKANY

R, *et al.*. Investigating a xinetics inc deformable

mirror [J]. *SPIE*, 1997, 3126:569-579.

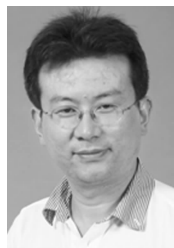
作者简介:



林旭东(1982—),男,福建莆田人,博士,助理研究员,2010年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事主动光学技术的研究。E-mail: linxudong_82@126.com



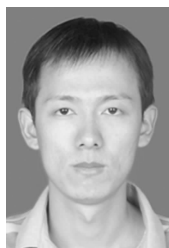
刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,2006年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事图像处理与分析方面的研究工作。E-mail: sirliuxy@sina.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,工学博士,研究员,博士生导师,2002年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间目标探测技术,地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ci-omp.ac.cn



王富国(1979—),男,山东单县人,博士,副研究员,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大型望远镜支撑设计和仿真方面的研究。E-mail:wfg@163.com



卫沛锋(1984—),男,山西运城人,工学硕士,助理研究员,2009年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事自适应光学、大气光学的研究。E-mail: weipeifeng@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)