

校正低阶像差的 9 点促动变形镜——设计与实验

陈新东^{1,2} 郑立功¹ 罗 霄¹ 张学军¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033
² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 设计一有效口径为 120 mm 的连续镜面、分立促动器的变形反射镜并进行了检测实验。以产生离焦、像散和彗差为目标,对变形镜的各项参数进行了优化,优化后的变形镜支撑有 9 个促动器和 3 个固定支撑点。固定点用于实现变形镜的定位,促动器用于镜面面形的控制。促动器采用了直线步进电机配合弹簧的结构,将电机的步进位移转换为力,在一定的线性范围内实现高精度的力促动。变形镜的检测设备采用了 4D 动态干涉仪,经响应函数的确定、校正力的求解和施加以及镜面再检测的步骤后,得到的实验结果表明变形镜能够产生高精度离焦、像散和彗差,且具有较大的动态范围。

关键词 变形镜;连续镜面;像差校正;响应函数

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0322001

A Deformable Mirror with 9 Actuated Points for Low Order Aberration Correction-Design and Experiments

Chen Xindong^{1,2} Zheng Ligong¹ Luo Xiao¹ Zhang Xuejun¹

¹ Key laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An effective aperture of 120 mm continuous face-sheet, discrete actuator deformable mirror (DM) is designed and experimentally tested. DM is aimed to correct defocus, astigmatism and coma, and the parameters of the DM are optimized, and it has nine actuated points and three fixed points. The fixed points are used to determine spatial position of the mirror and the actuated points are used to generate desired surface. Actuators are linear step motors with springs on the pushing end, which convert displacement to force. Test instrument used for DM is 4D dynamic interferometer. The test results show that the DM can generate defocus, astigmatism and coma with high accuracy, and it has a large dynamic correcting range.

Key words deformable mirror (DM); continuous face-sheet; aberration correction; influence function

OCIS codes 110.1080; 330.4460; 230.3990

1 引 言

变形反射镜作为一种波前校正器,在成像系统、激光光学和天文学中有着重要应用^[1~5]。传统的连续镜面、分立促动器的变形镜是研究最早、应用最为广泛的一种变形镜,具有校正动态范围大、技术成熟度高等优点。该种形式的变形镜主要由三部分组成:1)高精度加工的超薄镜面;2)促动器及其控制系

统;3)刚性的支撑底座^[6]。波前传感系统检测到光学系统的像差后,求解出促动器需要施加的信号并由控制系统控制促动器执行,变形镜镜面形成一定的面形校正整个光学系统的波前像差。国外从 20 世纪 70 年代开始变形镜的研究^[1,2,7],技术比较成熟。国内中国科学院光电技术研究所、北京理工大学、苏州现代光学所和中国科学院长春光学精密机

收稿日期: 2011-08-24; **收到修改稿日期**: 2011-09-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题。

作者简介: 陈新东(1982—),男,博士研究生,主要从事主动光学与自适应光学、光学加工检测等方面的研究。

E-mail: chenxd08@yahoo.cn

导师简介: 张学军(1968—),男,研究员,主要从事先进光学制造和空间光学技术等方面的研究。

E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

械与物理研究所等也开展了这方面的研究^[8~11]；大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)采用的镜厚比为44的变形镜能够校正低阶像差和一些高阶像差^[12,13]。

在实际的光学系统中,低阶像差往往是主要的像差^[14],特别是力、热等环境因素,会引起光学系统的低阶低频波前像差,因此设计一种针对低阶像差、采用较少促动器的低成本高精度变形镜具有现实的工程意义,在空间遥感相机、太空望远镜等光学系统中具有重要的潜在应用。本文设计了有效口径为120 mm、3点固定支撑、9点主动支撑的亚刚性变形反射镜,能够产生的离焦、像散和彗差形式的镜面面形。对变形镜的参数进行了设计和优化并进行了实验研究。

2 变形镜的参数设计与分析

变形镜校正的目标像差项是决定变形镜各参数的关键因素。本文变形镜设计的目标是校正离焦、像散和彗差。

2.1 变形镜镜面材料和厚度

对于薄片式的反射镜面(无轻量化结构),镜面材料和厚度决定了镜面的刚度,即镜面材料属性和厚度对促动器的镜面响应函数具有重要的影响。常用的镜面材料有K9玻璃、超低膨胀玻璃(ULE)、微晶玻璃(Zerodur)、金属铍和碳化硅等。在镜面厚度相等时,比刚度大的材料需要更大的校正力,因此变形镜中较多的采用比刚度较小玻璃材料^[15]。实验系统采用K9玻璃。镜面厚度较小时,促动器引起的镜面响应函数是可以近似为高斯函数形状的局部响应,包括较多的高阶像差,在促动器数量有限时,采用此种响应函数校正会引起校正力较大,甚至因为不能矫正而导致数值求解过程的畸变,因此镜面的厚度不能太小;随着镜面厚度的增加,镜面响应函数中的高阶项显著减小,但是校正力也随之增加,镜面中剪切应变也会增大,因此合适的径厚比在25~40之间。实验选取径厚比为30,反射镜本身具有一定的刚性,降低了支撑的难度。

2.2 促动器数量及其排布

研究表明,促动器的数量 K_m 应不小于待校正的像差项 k_z (Zernike项)^[16]。考虑旋转对称分布,要校正到彗差项至少需要9个促动器,促动器数量越大,校正的精度也越高。连续镜面分立促动器的镜面变形可表示为

$$\Delta^2 \varphi(x, y) = p(x, y)/D, \quad (1)$$

式中 D 为镜面刚度, Δ 为拉普拉斯算子, p 为促动器产生的压力。采用极坐标时,Zernike多项式可以表示为 $Z_n^{\pm m}(\rho, \theta)$ 。如果需要镜面产生某一像差,即令

$$\varphi = Z_n^{\pm m}(\rho, \theta), \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式可得

$$\Delta^2 \rho^{\frac{n \cos}{\sin}}(n\theta) = 0, \quad (3)$$

$$\Delta^2 \rho^{\frac{n \cos}{\sin}}(n-2)\theta = 0. \quad (4)$$

(3)式、(4)式说明镜面不能精确的产生所需像差^[14]。有限元分析表明,在孔径外分布促动器能够增强彗差的校正能力^[17]。因此设计的变形镜没有采用传统的四边形或六边形排布方式,而是将促动器排布在有效孔径外。采用口径为150 mm的反射镜,有效孔径不大于120 mm,镜面厚度为5 mm;考虑对称性将9个促动点分为内圈3个、外圈6个的分布形式,内圈的促动点分布半径为60 mm,外圈的半径为75 mm,即反射镜面的外边缘,在有效孔径外。此种新型的排布设计可以提高变形镜对彗差的校正能力^[17]。

3 变形镜的制作

3.1 薄反射镜的加工

径厚比大的薄反射镜刚度较小,能够承受的垂直镜面压力有限,在加工过程中和加工后容易产生变形,因此不能直接采用传统的小磨头加工方式进行抛光。为了达到高精度镜面面形,采用了如下的加工流程:首先采用传统加工抛光方法进行加工至镜面面形均方根(RMS)为 0.2λ ($\lambda=632.8$ nm),然后在反射镜的背面安装固定点,最后采用磁介质辅助抛光方法进行薄镜面的高精度加工。

磁性介质辅助抛光技术的剪切去除材料的特性,适合薄镜面的高精度加工。同时,在薄镜面的加工过程中,离焦和像散等易于校正的像差可以不进行加工去除,而由变形镜的促动器进行校正,这样也减小了加工难度,缩短了加工周期。薄镜面磁性介质辅助抛光前和抛光后的经Zygo干涉仪检测的镜面面形如图1所示。由于磁性抛光头的形状,镜面抛光后存在一定的中高频误差。去除离焦和像散后的面形PV为 0.187λ ,RMS为 0.026λ ,近 $\lambda/40$ ^[12]。

3.2 组件集成

集成后变形镜组件如图2(a)所示。采用的驱动器为直线步进电机。步进电机在非超载的情况下,电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数,而不受负载变化的影响。但步进电机的缺点是位移精度为微米量级,不能够满足高精度

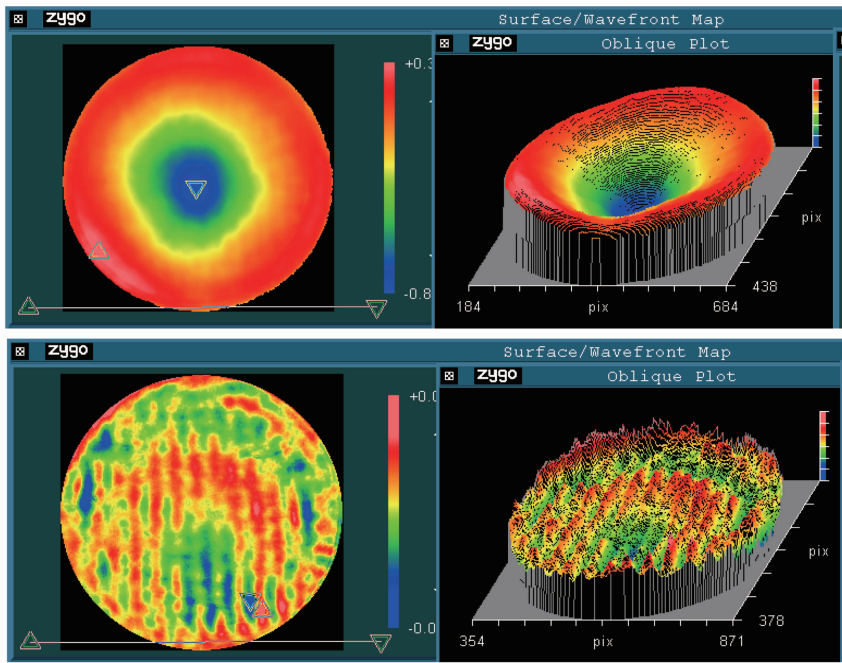


图1 磁性介质辅助抛光后的变形镜面形

Fig.1 Surface of deformable mirror after magnetic-media-assisted finishing

变形的要求。采用线性度好的弹簧,将电机的位移转换为力作用到镜面上,实际检测表明,这样的结构能够实现高精度的力。电机的控制器采用的是Pmac控制系统[图 2(b)],包括 PCI 接口的 Pmac

控制卡、扩展接口和电机驱动器。反射镜的检测设备是 4D 动态干涉仪[图 2(c)]。干涉仪采用瞬时移相技术,能够去除检测平台振动的影响,实现高精度的动态干涉检测。

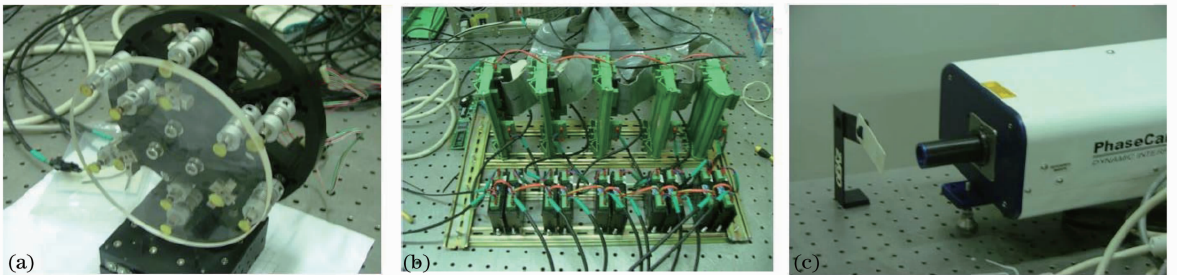


图2 变形镜组件(a),控制系统(b)与检测设备(c)

Fig.2 Deformable mirror with supporting (a), control system (b) and testing instrument (c)

4 镜面面形误差的校正方法

变形镜校正面形误差的基本过程是检测镜面误差、面形误差拟合、促动器所需校正力的计算以及校正力的施加。

4.1 镜面响应函数的确定

在一定的弹性范围内,镜面变形量与促动器作用力的大小满足线性关系,即

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n F_i w_i(x, y), \quad (5)$$

式中 F_i 为第 i 个促动器施加的作用力, $w_i(x, y)$ 为第 i 个促动器施加单位作用力时所引起的镜面变

形,称为该促动器的响应函数, n 为促动器个数。

确定促动器响应函数可以采用直接测量法,利用 4D 干涉仪分别测量出反射镜在该促动器施加单位作用力前后的镜面面形,这两个面形之差即为该促动器的响应函数。由各个促动器的响应函数组成的矩阵为该变形镜的镜面响应函数矩阵。

4.2 校正力的求解

校正力的求解可以采用波前方法、模态方法和区域算法^[9,13]。对于低阶像差的校正,模态方法是更好的一种方法,主要的原因是波前控制方法中会不可避免的校正或平衡高阶像差形式,这导致数值

计算的畸变和促动力增大。模态校正方法只校正被选择的低阶像差,能够避免畸变,而且提高了计算速度,减少了资源占用。采用模态校正方法时,误差的主要来源有尺度误差和耦合误差。

校正力的数值求解方法主要有最小二乘法、阻尼最小二乘法和自适应算法。采用 Matlab 软件实现上述算法并比较发现,在误差允许范围内最小二乘法与阻尼最小二乘法基本得到相同的结果,自适应算法只适用于响应矩阵数大于校正项的情况,不满足此条件时计算结果出现较大的误差。采用模态控制方法时需要注意的是所选择的多项式要满足正交性,例如 Zernike 多项式在离散的数据点上并不

正交,需要经过 G-S 正交化后再拟合。

4.3 实验与讨论

实验检测得到镜面响应函数如图 3 所示(去除平移和倾斜)。由于促动器分布的旋转对称性,9 个促动器共有三种类型的响应。第一种镜面响应函数[见图 3(a)]包括像散和彗差,后两种镜面响应函数[见图 3(b),(c)]主要的像差形式为像散。镜面响应函数的 Zernike 拟合的系数如表 1 所示。可以看到响应函数中包含了一定量的三叶像差及其高阶形式、二阶像散等像差(表格中蓝色行),这些像差的存在会影响镜面拟合“纯净度”,也就是镜面拟合残差的像差形式,由表中可以看到它们的系数值比较小。

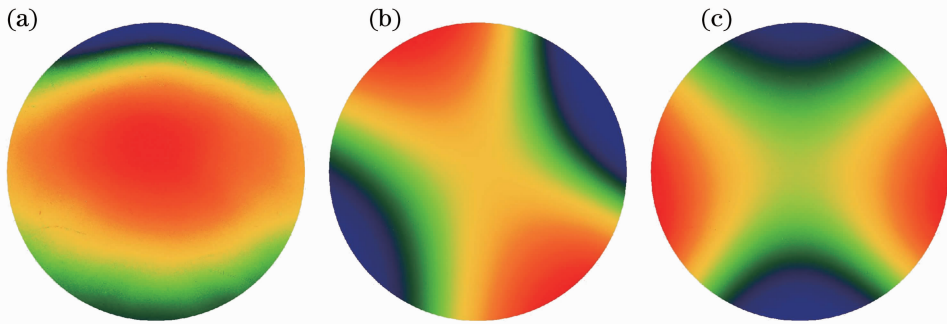


图 3 三种镜面响应函数

Fig. 3 Three surface response functions

表 1 镜面响应函数的 Zernike 系数

(前 24 项,去除平移和倾斜)

Table 1 Zernike coefficients of surface response functions (the first 24 terms, piston, tilt removed)

Aberrations (Zernike terms)	Fig. 3(a)	Fig. 3(b)	Fig. 3(c)
Power	-36.88	-38.44	-5.932
Astig X	35.39	-146.4	234.1
Astig Y	-1.325	-238.4	4.301
Coma X	2.965×10^{-5}	-18.80	-5.624
Coma Y	-17.80	-8.482	1.026
Primary spherical	0.19517	-0.53138	0.0574
Trefoil X	-0.13073	-0.33586	-0.53106
Trefoil Y	11.42	-42.67	-41.95
Secondary astig X	6.200	7.112	-14.69
Secondary astig Y	1.805	9.332	1.944
Secondary coma X	-0.53796	-0.36586	-0.35625
Secondary coma Y	-0.91973	0.0620	-0.24808
Secondary spherical	-0.62059	0.39566	0.0461
Tetrafoil X	1.565	6.279	-14.02
Tetrafoil Y	0.43140	-13.10	0.0557
Secondary trefoil X	1.215	0.29169	1.133
Secondary trefoil Y	1.527	3.259	6.276
Tertiary astig X	-0.70228	-0.47817	-0.52738
Tertiary astig Y	-1.734	-0.0171	-0.51711
Tertiary coma X	0.26486	0.27812	0.34213
Tertiary coma Y	0.28166	0.23304	0.0141

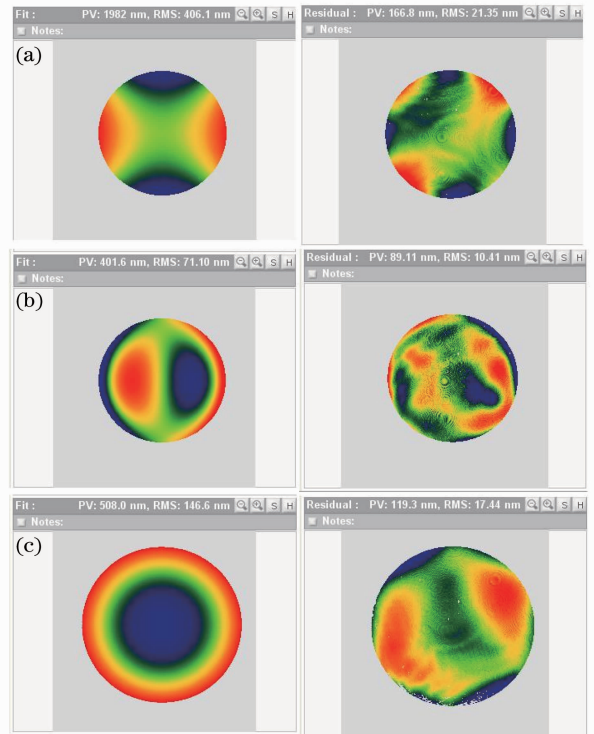


图 4 变形镜产生像散(a)、彗差(b)和离焦(c)及其残差分布
Fig. 4 Astigmatism (a), coma (b) and defocus (c) generated by DM and corresponding residual RMS (right column)

对于变形镜,镜面能够产生的像差形式也就是变形镜能够校正的像差。根据上述的方法,求解出变形镜产生(Zernike系数)2000 nm 像散、400 nm 的彗差和 500 nm 的离焦需要施加的促动器信号并通过控制系统促动电机,得到的镜面面形经 4D 干涉仪检测如图 4 所示,得到的像差系数与目标像差系数误差很小,而且镜面的残差均在 $\lambda/30$ 以内,变形镜能够高精度的实现这些像差的校正。

为了衡量变形镜的像差校正能力,将校正的结

果与 OKO 公司的 PDM37 变形镜进行了比较。OKO 公司的变形镜 400nm 彗差的仿真校正结果如图 5 所示,结果的比较如表 2 所示。可以看到,离焦和像散的拟合残差要明显高于 OKO PDM37,但是彗差的拟合能力二者基本接近,这与设计时特别针对彗差的校正而优化促动器排布相关。对于 9 点的变形镜,比较结果说明设计的有效和合理性,特别是对彗差这种难于校正的像差取得了较好的效果。

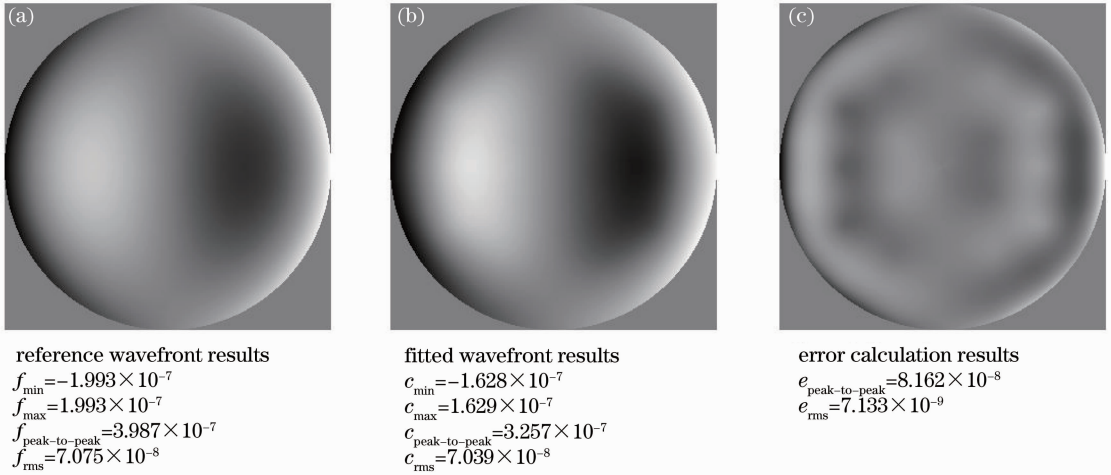


图 5 OKO 公司的 PDM 37 变形镜拟合彗差结果(单位:m)

Fig. 5 Coma and residual map generated by OKO's PDM 37 deformable mirror (unit: m)

表 2 DM9 与 OKO PDM37 的拟合校正能力比较

Table 2 Comparison of simulated correcting ability: DM9 and OKO PDM 37

	Defocus	Astigmatism	Coma
Coefficients to be generated /nm	500	2000	400
OKO PDM37 PV/RMS /nm	499/5.1	1963/3	326/7.13
DM 9 PV/RMS /nm	508/17.4	1982/21.4	401.6/10.4

变形镜的校正范围不仅仅受到拟合精度的影响,还决定于促动器的最大促动力(或位移)。为考察变形镜的校正范围,测试了促动器的促动范围检测,直线步进电机在 8000 步以内时,镜面的响应具有良好的线性度,同时恢复后镜面也没有产生不可恢复的变形,变形在镜面的弹性范围内。利用变形镜产生了 PV 4540 nm、RMS 为 980 nm 的像散(图 6)。在步进电机超过 8000 步时,继续施加驱动信号,镜面检测结果面形没有发生改变,及达到了电机促动力的极限。

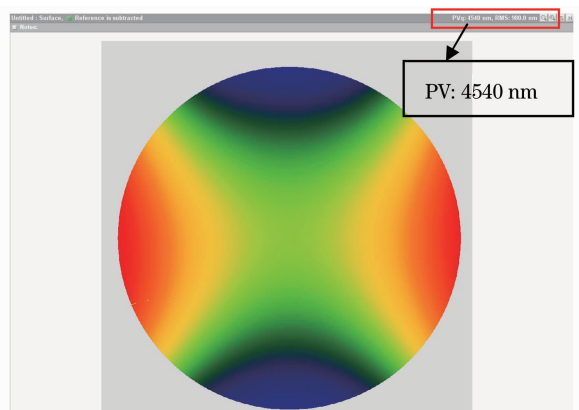


图 6 变形镜产生的像散

Fig. 6 Astigmatism generated by DM 9

5 结 论

针对低阶的离焦、像散和彗差设计一 $\Phi 150$ 、有效口径为 120 mm 的变形镜。采用低成本的直线步进电机作为促动器,优化了变形镜的各项参数。依据设计参数制作了变形镜并进行了检测实验。实验结果表明变形镜能够高精度的产生离焦、像散和彗差,也具备较大的动态校正范围。

目前的变形镜还存在一些不足,由于缺乏力促动器,不能精确的确定作用于镜面的力的值,也导致了促动器之间的存在耦合;由于采用三点固定支撑,使得变形镜装调时要求较高的工艺,否则容易产生不能矫正的三叶像差;由于位置偏差,实验结果与设计有偏差;变形镜还处于开环状态,实现检测与校正的闭环还需要一定的硬件及软件编程支持。下一步设计和研究中将看点解决这些问题。

参 考 文 献

- 1 R. H. Freeman, J. E. Pearson. Deformable mirrors for all seasons and reasons [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(4): 580~588
- 2 J. Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998
- 3 A. W. Dreher, J. F. Bille, R. N. Weinreb. Active optical depth resolution improvement of the laser tomographic scanner [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(4): 804~808
- 4 H. Hofer, L. Chen, G. Y. Yoon *et al.*. Improvement in retinal image quality with dynamic correction of the eye' aberrations[J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(11): 631~643
- 5 B. Hermann, E. J. Fernández, A. Unterhuber *et al.*. Adaptive optics ultrahigh resolution optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(18): 2142~2144
- 6 J. H. Burge, J. R. P. Angel, B. Cuerden *et al.*. Lightweight mirror technology using a thin facesheet with active rigid support [C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 690~701
- 7 A. Buffington, F. S. Crawford, A. J. Muller *et al.*. Active image restoration with a flexible mirror[C]. *SPIE*, 1976, **75**: 90~96
- 8 Yan zhaojun, Li Xinyang. Neural network prediction algorithm for control voltage of deformable mirror in adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 911~916
- 颜召军, 李新阳. 基于神经网络的自适应光学系统变形镜控制电压预测方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 911~916
- 9 Ning Yu, Yu Hao. Experimental research on spatial fitting capability to Zernike aberrations of 20-element bimorph deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1756~1760
- 宁 禹, 余 浩. 20 单元双压片变形镜对 Zernike 像差空间拟合能力实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1756~1760
- 10 Yang Licheng, Ling Ning. Analysis on wavefront errors of active deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 569~574
- 杨李成, 凌 宁. 能动变形反射镜薄面误差特性分析及实验研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 569~574
- 11 Zhou Hong, Ning Yu, Guan Chunlin. Design and fabrication of prototype for bimorph deformable mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1437~1442
- 周 虹, 宁 禹, 官春林. 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
- 12 Xiangqun Cui, Yeping Li, Xiaoyu Ni *et al.*. The active support system of LAMOST reflecting Schmidt plate [C]. *SPIE*, 2002, **4837**: 628~636
- 13 Zhang Shengtao, Zhang Zhenchao, Wang You. Control and network system of force actuators for deformable mirror active optics in LAMOST [C]. *SPIE*, 2007, **6721**: N-1~N-8
- 14 Gleb Vdovin, Oleg Soloviev. Correction of low order aberrations using continuous deformable mirrors[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 2859~2866
- 15 Mark A. Ealey, John A. Weliman. Deformable mirrors: design fundamentals, key performance specifications, and parametric trades[C]. *SPIE*, 1991, **1543**: 36~51
- 16 M. Loktev, D. W. De Lima Monteiro, G. Vdovin. Comparison study of the performance of piston, thin plate and membrane mirrors for correction of turbulence-induced phase distortions[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **192**(1-2): 91~99
- 17 Chen Xindong, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Design and analysis of a novel actuator topology of deformable mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s116007
- 陈新东, 郑立功, 张学军. 一种新型的变形镜促动器排布方式-设计与分析 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s116007
- 18 R. N. Wilson, F. Franza, L. Noethe. Active optics I. [J]. *J. Mod. Opt.*, 1987, **34**(4): 485~509

栏目编辑: 谢 婧