

1.8 m 望远镜变形次镜波前拟合能力分析

樊新龙^{1,2,3} 官春林^{1,2} 饶长辉^{1,2}

(¹中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209
²中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; ³中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 波前拟合能力分析是变形次镜研制工作的重要组成部分, 是基于变形次镜的新型自适应光学系统研制的重要基础。以拟合误差为评价标准, 采用有限元计算所得驱动器影响函数对 1.8 m 望远镜变形次镜四个备选方案进行了泽尼克(Zernike)多项式、Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏拟合能力分析。结果表明 73 单元变形次镜波前拟合能力较强, 对前 44 项 Zernike 多项式拟合误差均小于 0.5, 对 10000 幅 Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏拟合误差均值为 0.0541。分析了变形次镜不同位置单个驱动失效条件下的波前拟合能力, 表明靠近通光口径边缘驱动器失效对变形次镜波前拟合能力影响较大。基于分析结果, 确定了变形次镜方案。

关键词 自适应光学; 望远镜; 大气湍流校正; 变形次镜; 有限元分析; 波前拟合能力分析

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0822002

Wave-Front Fitting Capability Analysis of 1.8 m Telescope's Adaptive Secondary Mirror

Fan Xinlong^{1,2,3} Guan Chunlin^{1,2} Rao Changhui^{1,2}

¹Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
²Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Wave-front fitting capability analysis is an important part of adaptive secondary mirror's design. Fitting capability simulation of 1.8 m telescope's adaptive secondary mirror based on finite element analysis (FEA) influence function is presented. Analysis results show that the 73-element adaptive secondary mirrors can fit the 44-term Zernike polynomials with lower fitting errors. Mean fitting errors of 10000 frames of Kolmogorov phase screens is about 0.0541. Invalidated actuators near pupil edge induce fitting capability to reduce fearfully. Since the 73-element adaptive secondary mirror has better fitting ability with an actuator broken, the scheme has been chosen as 1.8 m telescope's adaptive secondary mirror.

Key words adaptive optics; telescope; atmospheric-turbulence correction; adaptive secondary mirror; finite element analysis; wave-front fitting capability analysis

OCIS codes 220.1080; 080.1010

1 引言

自适应光学技术可以实时探测并校正波前畸变, 减少望远镜本身加工、装调误差, 避免由大气湍流导致的随机波前畸变引起的成像质量下降问题^[1]。传统自适应光学成像系统采用平面倾斜镜、变形镜作为波前校正器, 系统内辅助器件多, 光路结

构复杂, 光能利用率低且背景辐射大, 限制了望远镜对弱、红外目标的观测能力^[2]。

1989 年, 天文学家 Beckers^[3] 针对 NOAO 8 m 红外望远镜计划提出了将望远镜次镜作为波前校正器的新型自适应光学系统方案。该方案具有光能利用率高、背景辐射小等优点, 可极大地提高望远镜对

收稿日期: 2011-03-28; 收到修改稿日期: 2011-04-26

作者简介: 樊新龙(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: fanxl@china.com.cn

导师简介: 官春林(1965—), 男, 研究员, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: clguan@ioe.ac.cn

弱、红外目标的观测能力。这种新型自适应光学系统的最大特点是将次镜作为波前校正器,其实现难点在于新型波前校正器——变形次镜的研制及测试。国外,亚利桑那大学、欧洲南方天文台等机构已经针对多镜面望远镜(MMT)、大双筒望远镜(LBT)、甚大望远镜(VLT)、麦哲伦望远镜(MT)、大麦哲伦望远镜(GMT)等研制了相应的变形次镜及测试装置,以推动新型自适应光学系统研制^[4~8]。在关键器件研制的推动下,MMT于2002年完成了新型系统首次观测^[9],LBT于2010年完成了新型系统观测前的室内测试^[10]。

国内,中国科学院光电技术研究所1.8 m望远镜取得观测结果^[11]的基础上,开始针对该望远镜研制变形次镜及相应的测试装置,为新型自适应光学系统在1.8 m望远镜上的应用准备条件。目前,已经完成了变形次镜^[12]及测试装置设计工作^[13]。本文介绍该变形次镜研制工作的主要内容——变形次镜波前拟合能力分析。本文从单项泽尼克(Zernike)多项式、Kolmogorov湍流大气畸变相位屏拟合以及不同位置个别驱动器失效状态Kolmogorov湍流大气畸变相位屏拟合方面,对1.8 m望远镜变形次镜四个备选方案的波前拟合能力进行了分析,根据分析结果确定了变形次镜最终方案。

2 变形次镜影响函数计算

变形次镜波前拟合能力分析的首要问题是获得变形次镜驱动器影响函数。目前,变形镜驱动器影响函数主要有两种形式:1)基于实测影响函数,采用二维超高斯函数^[14]或者径向调制超高斯函数^[15]拟合,获得的高斯型影响函数,主要目的是把影响函数函数化,用于系统仿真、初步驱动器排布优化^[16]等;2)基于有限元计算的影响函数^[17~19],可以真实地反映变形镜边界条件,计算精度较高,尤其适用于变形镜设计阶段,本文分析中所有驱动器影响函数采用有限元计算(FEA)结果。

1.8 m望远镜变形次镜基本方案发源于传统分立驱动式连续表面变形镜,主要由高刚度底座、层叠式压电驱动器阵列、球壳镜面等部件构成^[12]。本文分析中所有备选方案驱动器影响函数均采用有限元计算,有限元计算的主要步骤包括:建立有限元模型、施加载荷和边界条件、求解结果、结果评价与分析。考虑到变形次镜模型结构较为复杂,分析中首先在三维建模软件中建立简化后变形次镜的三维模型,通过有限元软件提供的数据接口导入、划分网格

(如图1所示)、加载边界条件后进行分析。

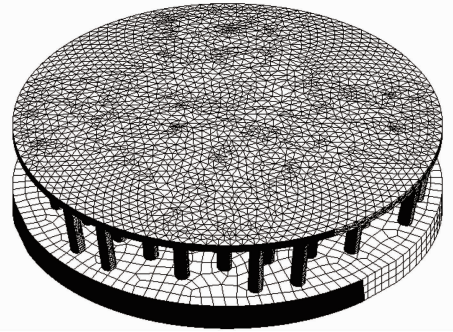


图1 变形次镜有限元模型

Fig. 1 FEA model of adaptive secondary mirror

表1 变形次镜材料参数列表

Table 1 Material parameters of adaptive secondary mirror

Component	Materials	Young's modulus /Gpa	Poisson's ratio	Density / (10 ³ kg/m ³)
Mirror, base plate	Glass	71	0.21	2.5
Actuator	PZT	75	0.3	7.6

计算中刚性底座底面固定,驱动器与镜面接触面粘接。计算第*i*个驱动器影响函数时,在驱动器底面沿该驱动器轴线方向施加单位位移(1 μm),其余驱动器与刚性底座接触面粘接,输出镜面光轴方向变形量即为驱动器*i*的影响函数。由于有限元分析时不同变形次镜方案网格划分不同,结果处理时将计算所得驱动器影响函数根据镜面位置坐标作线性插值,以保证所有的影响函数采样点位置相同,插值后每个驱动器的影响函数都为一个方阵。本文分析中将变形次镜通光口径内插值采样点数定为256 pixel×256 pixel,与之相对应变形次镜驱动器影响函数、待拟合波前都采用256 pixel×256 pixel的方阵描述。图2为图1所示变形次镜模型中心驱动器影响函数。

图3为变形次镜四个备选方案。这四个备选方

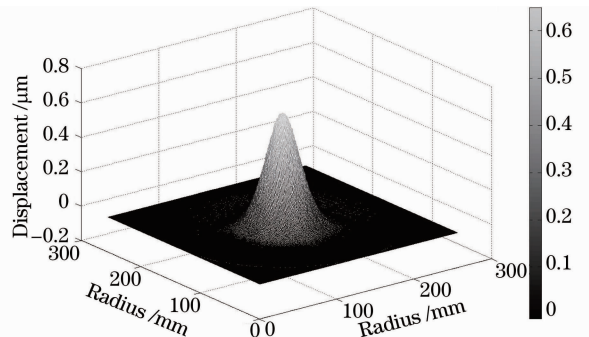


图2 变形次镜中心驱动器影响函数

Fig. 2 Influence function of the central driver of adaptive secondary mirror

案由前期若干初级方案选择得到。所有备选方案均经过结构优化,在保证工艺可行性的前提下,满足 1.8 m 望远镜系统对变形次镜校正行程及影响函数形状的要求。如图 3 所示,四个备选方案中驱动器均采用正三角形排布,图 3(a)~(d)分别为四个备选方案,各子图中小圆圈表示驱动器,圈内数字为驱动器编号;灰色阴影区域表示变形次镜上光束覆盖范围,光束覆盖范围直径即变形次镜通光口径恒为

270 mm;外圈粗实线为镜面外沿,镜面外沿与最外圈驱动器外沿相切,随驱动器间距、数目变化而调整。图 3(a)所示方案 1 内驱动器间距为 38 mm,镜面口径约为 320 mm;图 3(b)所示方案 2 内驱动器间距为 35.2 mm,镜面口径约为 320 mm;图 3(c)所示方案 3 内驱动器间距为 41 mm,镜面口径约为 350 mm;图 3(d)所示方案 4 内驱动器间距为 38 mm,镜面口径约为 350 mm。

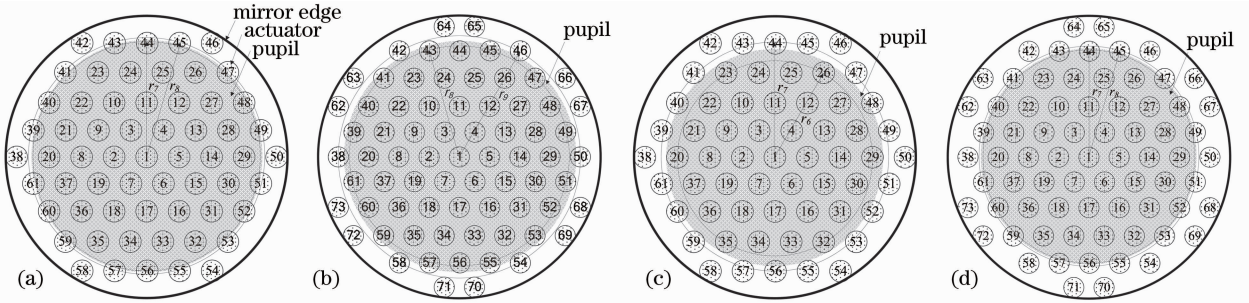


图 3 变形次镜备选方案。(a) 61 单元,驱动器间距 38 mm; (b) 73 单元,驱动器间距 35.2 mm; (c) 61 单元,驱动器间距 41 mm; (d) 73 单元,驱动器间距 38 mm

Fig. 3 Candidate schemes of adaptive secondary mirror. (a) 61-element with actuator distance 38 mm; (b) 73-element with actuator distance 35.2 mm; (c) 61-element with actuator distance 41 mm; (d) 73-element with actuator distance 38 mm

由图 3 中各子图对比可以看出:方案 2 相当于将方案 1 内驱动器间距调小,保证镜面口径不变的前提下,外围增加 12 个驱动器;方案 3 相当于将方案 1 内驱动器间距调大;方案 4 相当于在方案 1 基础上,外圈再增加 12 个驱动器。由于变形次镜四个备选方案中驱动器均为周期性结构排布,有限元分析时每个备选方案只计算其中 1/6 驱动器的影响函数,通过矩阵旋转、对称操作得到所有驱动器影响函数。

3 变形次镜波前拟合能力分析

变形次镜波前拟合能力分析的基本思想是采用变形次镜驱动器影响函数模拟波前。1.8 m 望远镜系统要求变形次镜对 Zernike 多项式前 35 项具有较好的拟合能力。鉴于该变形次镜以大气湍流导致的随机波前畸变为校正对象,分析中,分别给出了四个变形次镜方案对 Zernike 多项式前 45 项及 Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏拟合能力。另外,考虑到变形次镜在使用过程中可能存在个别驱动器失效的问题,对不同位置单个驱动器失去校正能力条件下变形次镜对 Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏的拟合能力进行了分析。

3.1 基本原理

取变形次镜第 i 个驱动器影响函数为 $I^{(i)}$,驱动电压为 $V^{(i)}$ 。基于线性叠加原理可得变形次镜镜面

面型

$$S = \sum_{i=1}^N I^{(i)} \cdot V^{(i)}, \quad (1)$$

(1) 式中变形镜面型 S 、驱动器影响函数 $I^{(i)}$ 均为方阵。将两者按照相同的转换规则变换为列向量 S_1 、 $I_1^{(i)}$,则

$$S_1 = \sum_{i=1}^N I_1^{(i)} \cdot V^{(i)} =$$

$$[I_1^{(1)}, I_1^{(2)}, \dots, I_1^{(N)}] \cdot \begin{bmatrix} V^{(1)} \\ V^{(2)} \\ \vdots \\ V^{(N)} \end{bmatrix} = M \cdot V, \quad (2)$$

(2) 式中 M 为影响函数矩阵,其中第 i 列对应变形次镜第 i 个驱动器的影响函数, V 为驱动器控制电压向量。

由(2)式得,当需要变形次镜产生面型为 S_2 时,驱动电压为

$$V' = M^{-1} \cdot S_2, \quad (3)$$

(3) 式中 M^{-1} 为变形次镜影响函数逆矩阵。由于变形次镜影响函数矩阵 M 内各影响函数非正交,影响函数矩阵无严格意义上的逆矩阵,分析中影响函数逆矩阵为采用奇异值分解(SVD)方法求解所得影响函数 M 的广义逆。

则拟合误差波前:

$$\Delta S = S_2 - \mathbf{M} \cdot \mathbf{V}'. \quad (4)$$

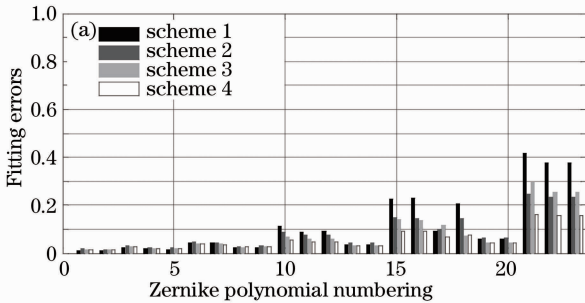
在自适应光学研究中一般采用拟合误差波前均方根与待拟合波前均方根之比,即拟合误差 f_{FE} 作为变形镜波前拟合效果评价标准,表示为

$$f_{FE} = \frac{\sigma_{\Delta S}}{\sigma_{S_2}} = \frac{\left\{ \iint [\Delta S(x, y) - \overline{\Delta S}]^2 \right\}^{1/2}}{\left\{ \iint [S_2(x, y) - \overline{S_2}]^2 \right\}^{1/2}}. \quad (5)$$

(5)式可得 f_{FE} 越小,拟合精度越高,变形镜校正能力越强。采用拟合误差作为拟合效果评价标准。

3.2 波前拟合能力分析

波前畸变可以用一系列正交多项式的线性组合表示。Zernike 多项式在圆域内正交,所代表的波前畸变可以与传统光学系统像差相对应,是应用最为广泛的波前畸变描述方式。目前,针对人眼像差、大气湍流相位扰动及光学元件加工误差描述等具体应用领域有不同的排序规则。本文研究变形次镜对大气湍流的校正效果,采用 Noll 等^[20]所述的排序方式。



分析中,将待分析变形次镜的影响函数按照(2)式表述的方式排布得到影响函数矩阵 \mathbf{M} ,进而采用 3.1 节所述方法对 Zernike 多项式前 45 项进行拟合,结果如图 4 所示。从方案 1 和方案 2 以及方案 3 和方案 4 对比可得:镜面外口径不变的前提下,调整驱动器间距、增加驱动器数目可以减小变形次镜拟合误差,拟合误差最多降低大约 0.3(第 29 项)。从方案 1 和方案 3 对比可以看出:微量调整驱动器间距可以降低变形次镜波前拟合误差,拟合误差最多降低大约 0.1(第 21 项)。从方案 1 和方案 4 的对比可以看出,在通光口径外加入驱动器,可以减小变形次镜拟合误差,拟合误差最多降低大约 0.35(第 31 项)。总体来看:四个备选方案对 Zernike 多项式前 35 项拟合结果都比较好,只有方案 1,3 对个别 f_{FE} 大于 0.5;方案 2,4 对前 44 项 f_{FE} 均小于 0.5,方案 4 对第 45 项 Zernike 多项式的 f_{FE} 约为 0.55。

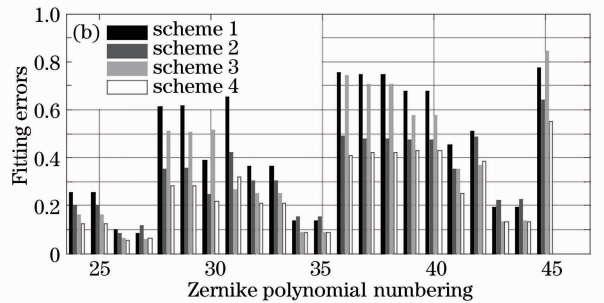


图 4 备选方案对 Zernike 多项式拟合结果对比。(a) 1~23 项 Zernike 多项式拟合误差;
(b) 24~45 项 Zernike 多项式拟合误差

Fig. 4 Fitting errors for Zernike polynomial of schemes. (a) 1~23 items; (b) 24~45 items

在分析各备选方案变形次镜对单项 Zernike 多项式拟合能力的基础上,分析了各备选方案对 10000 幅 Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏拟合结果。分析中取 $D/r_0 = 15$,考虑到低阶 Zernike 模式占据了湍流能量的绝大部分,采用前 65 项 Zernike 多项式生成随机相位屏^[21]。拟合结果统计分布如图 5 所示,图中横坐标为拟合误差值,纵坐标为 Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏数目,四条曲线分别表示不同备选方案中相位屏数目随拟合误差变化关系,峰值所对应拟合误差越接近 0、峰值越高,则拟合能力越强。由图 5 中曲线可以看出四个备选方案中拟合能力从强到弱依次为:方案 4、方案 2、方案 3、方案 1。四个备选方案对 10000 幅 Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏拟合误差均值分别为:0.078, 0.0632, 0.0697, 0.0541,与统计分布比较结果相符。方案 4 对 Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏具有最

好的拟合能力。

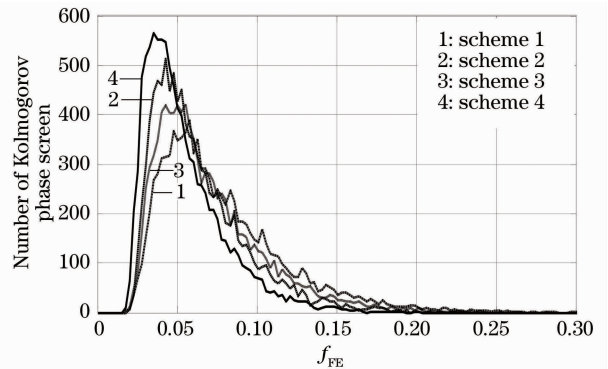


图 5 备选方案对 10000 幅随机相位屏拟合效果统计分布对比

Fig. 5 Fitting errors for phase screen of blue prints

由上述 Zernike 多项式及 Kolmogorov 湍流大气畸变相位屏拟合结果对比可得方案 4 具有最好的波前拟合能力。

3.3 个别驱动器失效状态下波前拟合能力

变形次镜结构复杂,加工难度大,应用中可能出现个别驱动器失效的情况。如果设计过程中就对这一情况进行分析,并采取相应措施,可降低其导致的时间、经费成本,保证望远镜观测效率。考虑到驱动器失效发生概率较小,只分析不同位置单个驱动器失效状态下变形次镜波前拟合能力。分析中假设失效驱动器丧失驱动作用,对镜面只有位移限制作用,作为“死点”存在。

本文所有变形次镜备选方案驱动器均为正三角形排布,按照驱动器与镜面中心的距离可以分为9圈(方案1、3)或者10圈(方案2、4),如图6所示。图6为变形次镜方案1中驱动器排布分圈表示示意图。其中, $r_i (i=1,2,\dots,N)$ 表示第*i*圈驱动器所在圆的半径,每圈有6或者12个驱动器。分析中在每圈上选择一个驱动器模拟不同位置驱动器失效状态,按照3.1节所述流程进行。

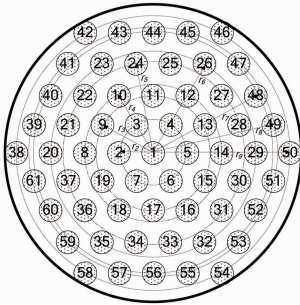


图6 变形次镜驱动器排布

Fig. 6 Actuator arrangement of adaptive secondary mirror

图7为单驱动器失效情况下变形次镜波前拟合能力对比图,其中横坐标为失效驱动器所在圈号,纵坐标为10000幅Kolmogorov湍流大气畸变相位屏拟合误差的均值。由图7可得,驱动器失效导致变

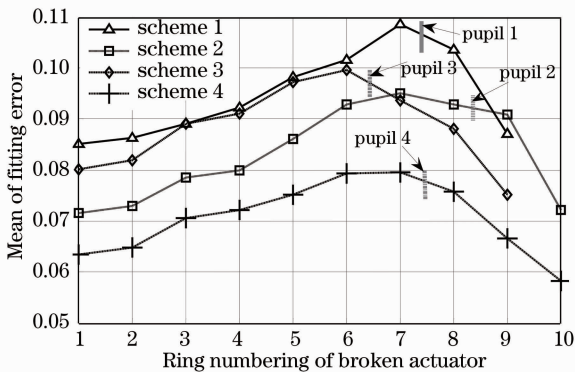


图7 单驱动器失效情况下变形次镜波前拟合能力对比

Fig. 7 Wave-front fitting capability of adaptive secondary mirror with a broken actuator

形次镜波前拟合误差增大;变形次镜波前拟合误差随着失效驱动器所在圈数增加先增大后减小;变形次镜波前拟合误差在镜面通光口径边缘驱动器失效状态下较大。

总体而言,在单驱动器失效状态下,方案4所述变形次镜可保证10000幅Kolmogorov湍流大气畸变相位屏拟合误差均值小于0.08,具有较强的抗驱动器失效能力。

4 结 论

由Zernike多项式以及Kolmogorov湍流大气畸变相位屏拟合分析结果可以看出,四个备选变形次镜方案波前拟合能力从强到弱依次为:方案4、方案2、方案3、方案1。从各备选方案驱动器排布对比可以看出,增加驱动器数目、调大驱动器间距均增强了通光口径边缘的控制,可以提高变形次镜的波前拟合能力。不同位置驱动器失效分析表明驱动器失效会增大拟合误差,通光口径边缘驱动器失效使得变形次镜镜面边缘控制能力降低,拟合误差增大较多。

方案4具有相对最较的波前拟合能力和抗驱动器失效能力,成为变形次镜最终方案。

致谢 感谢姜文汉院士审阅本文并提出宝贵的修改意见。

参 考 文 献

- Jiang Wenhan. Adaptive Optics[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
- Michael Lloyd-Hart. Thermal performance enhancement of adaptive optics by use of a deformable secondary mirror[J]. *Astronomical Society of the Pacific*, 2000, **112**: 264~272
- J. M. Beckers. The NOAO 8-m telescope technical description [J]. *Association for University Research in Astronomy*, 1989, Vol. 2
- T. K. Barrett, D. G. Bruns, T. J. Brinkley *et al.*. Adaptive secondary mirror for the 6.5-m MMT[C]. *SPIE*, 1998, **3353**: 754~763
- A. Riccardi, G. Brusa, P. Salinari *et al.*. Adaptive secondary mirrors for the large binocular telescope[C]. *SPIE*, 2003, **5169**: 159~168
- R. Arsenault, R. Biasi, D. Gallieni *et al.*. A deformable secondary mirror for the VLT[C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 62720V-1
- Laird M. Close, Victor Gasho, Derek Kopon *et al.*. The Megellan telescope adaptive secondary AO system[C]. *SPIE*, 2008, **7015**: 70150Y
- R. Biasi, D. Veronese, M. Andrighttoni *et al.*. GMT adaptive secondary design[C]. *SPIE*, 2010, **7736**: 77363O
- Francois P. Wildi, Guido Brusa, Michael Lloyd-Hart *et al.*. First light of the 6.5-m MMT adaptive optics system [C]. *SPIE*,

- 2003, **5169**: 17~25
- 10 Simone Esposito, Armando Riccardi, Luca Fini *et al.*. First light AO (FLAO) system for LBT: final integration, acceptance test in Europe, and preliminary on-sky commissioning results[C]. *SPIE*, 2010, **7736**: 773609
- 11 Kai Wei, Xuejun Zhang, Hao Xian *et al.*. First light on the 127-element adaptive optical system for 1.8-m telescope[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1019~1021
- 12 Guan Chunlin, Fan Xinlong, Rao Changhui *et al.*. Piezoelectric actuated adaptive secondary mirror[P]. Chinese Patent, 2010, 201010244785.9
官春林,樊新龙,饶长辉等. 基于压电驱动器的变形次镜[P]. 中国专利,2010,申请号:201010244785.9
- 13 Fan Xinlong, Guan Chunlin, Rao Changhui. Testbed for an adaptive secondary mirror of 1.8 m telescope[C]. *SPIE*, 2010, **7849**: 784928
- 14 Rao Xuejun, Ling Ning, Jiang Wenhan. Experiment of measuring influence function of deformable mirror using digital interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15** (10): 1447~1451
饶学军,凌 宁,姜文汉. 用数字干涉仪测量变形镜影响函数的实验研究[J]. 光学学报, 1995, **15**(10): 1447~1451
- 15 L. H. Huang, C. H. Rao, W. H. Jiang. Modified Gaussian influence function of deformable mirror actuators [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(1): 108~114
- 16 Huafeng Yang, Guilin Liu, Changhui Rao *et al.*. Combinational deformable mirror adaptive optics system for compensation of high-order modes of wavefront [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8): 435~437
- 17 Ning Yu, Zhou Hong, Guan Chunlin *et al.*. Finite element analysis and measurement of a 20-element bimorph deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1638~1642
宁 禹,周 虹,官春林等. 20单元双压电片变形反射镜的影响函数有限元分析和实验测量[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1638~1642
- 18 A. Riccardi, M. Xompero. Fitting error analysis for the VLT deformable secondary mirror[C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 62724O
- 19 Zhou Hong, Ning Yu, Guan Chunlin *et al.*. Design and fabrication of prototype for bimorph deformable mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1437~1442
周 虹,宁 禹,官春林等. 双压电变形反射镜样镜的设计与研制[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1437~1442
- 20 R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1976, **66**(3): 207~211
- 21 Li Fei, Rao Changhui. Least square phase retrieval algorithm based on defocusing grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2813~2820
李 斐,饶长辉. 基于离焦光栅的最小二乘波前复原算法[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2813~2820