

基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展

林旭东 刘欣悦 王建立 王亮 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 为了开展自适应光学技术研究, 研制了一系列的基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜, 促动器控制单元数分别为 21、97、137 和 961。利用变形镜作为自适应光学波前校正器, 进行了多个室内、室外的自适应光学校正实验, 取得了很好的实验效果, 其中 137 单元变形镜在 1.23 m 望远镜上面的自适应光学系统中取得了 0.2" 双星的校正效果, 在 700~900 nm 波段接近望远镜的衍射极限。介绍了变形镜的基本结构, 各变形镜的主要参数测试及关键性能指标, 列举了各变形镜在自适应光学系统中的应用情况。最后对变形镜的研制进展及应用进行了展望。

关键词 自适应光学; 光学设计; 变形镜; 压电陶瓷促动器; 连续镜面; 波前校正器

中图分类号 P124; TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.090003

Progress of the Continuous Surface Deformable Mirror Based on Piezo-Ceramic Actuator

Lin Xudong Liu Xinyue Wang Jianli Wang Liang Wei Peifeng

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

Abstract In order to carry out the research of adaptive optics (AO), we develop a series of continuous surface deformable mirrors (DM) based on piezo-ceramic actuator, and the controllable number of the actuators of each DM is 21, 97, 137 and 961, respectively. Many in- and out-door AO correction experiments are carried out, in which the DM is used as the wavefront corrector of the AO system, and the experiments reach the expectation. With the 137-element AO system for the 1.23-m telescope, the close-loop correction of the 0.2" binary star is attained, which approaches the diffraction limit of the 1.23-m telescope at 700~900 nm band. The basic structures of the DM, the testing of each main parameters and key performance of each DM are presented. The applications of each DM in the AO system are also showed. The development and application progress of the DM are presented.

Key words adaptive optics; optical design; deformable mirror; piezo-ceramic actuator; continuous surface; wavefront corrector

OCIS codes 010.1080; 010.1285; 230.4040; 220.4610

1 引言

自适应光学(AO)系统主要由波前校正器、波前传感器、高速波前处理器等组成, 能够实现对波前误差的实时测量和校正, 提高光学系统的成像质量。随着相关技术的不断发展, 自适应光学技术在天文望远镜、激光大气传输、眼底成像、高分辨率显微镜等方面的应用越来越广泛^[1]。波前校正器能够实现对畸变波前的主动校正, 是自适应光学系统中的关键部件, 文献[2]对目前的波前校正器发展现状进行了详细的综述。

基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜是通过压电陶瓷促动器对薄镜片进行推拉作用而快速改变镜面面形, 实现对光波前相位的改变。因为响应速度快、对波像差拟合能力好、可靠性高等优点, 目前这种变形镜仍是天文望远镜、激光大气传输等的自适应光学系统中应用最多的波前校正器^[3-4]。

收稿日期: 2014-03-26; 收到修改稿日期: 2014-04-18; 网络出版日期: 2014-08-07

基金项目: 国家 863 计划(2011AAXXX1003)、中国科学院三期创新基金

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技术的研究。

E-mail: linxudong_82@126.com

近年来,本课题组一直致力于基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜(简称压电变形镜)的研制及应用研究,突破了变形镜研制的关键技术,在多套自适应光学系统中都取得了较好的应用效果。本文从这种变形镜的基本原理及性能指标要求出发,给出所研制变形镜的主要性能参数测试结果,列举了这些变形镜在自适应光学系统中的应用情况,介绍了目前的研究工作进展及今后的发展展望。

2 压电变形镜

压电变形镜的基本结构如图1所示。压电陶瓷促动器的一端安装在玻璃基底上面,另一端与薄镜片固定。通常要求基底的刚度足够大,从而使促动器的作用都能够施加在刚度小的薄镜片上面;同时,要求基底的温度膨胀系数小,以适应变形镜的工作环境条件。薄镜片材料一般要求具有较高的抗屈强度和较强的抗推拉疲劳能力,以延长工作寿命^[6]。

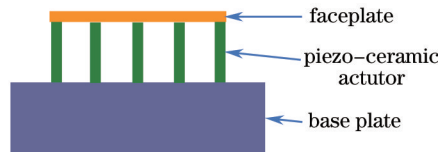


图1 压电陶瓷促动器连续镜面变形镜的基本结构

Fig.1 Construction of a continuous faceplate deformable mirror with piezo-ceramic actuators

2.1 压电陶瓷促动器

变形镜中利用的是压电陶瓷促动器的逆压电效应,给压电陶瓷施加一定的电场,压电陶瓷就会产生相应的机械形变^[6]。如图2所示,用压电常数 d_{33} 描述上述逆压电效应,压电陶瓷片的变形量 Δl 可以表示为

$$\frac{\Delta l}{l} = d_{33}E = d_{33}\frac{V}{l}, \quad (1)$$

式中 V 为在压电陶瓷片上面所施加的电压, E 为施加电压在陶瓷两端形成的电场强度, l 为压电陶瓷片的厚度。

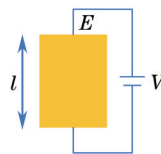


图2 逆压电效应示意图

Fig.2 Schematic of inverse piezoelectric effect

为了确保变形镜的校正量,一般通过陶瓷片堆叠的方式增大压电陶瓷促动器的行程^[7],促动器在空载情况下的最大机械行程为

$$\delta = Nd_{33}V, \quad (2)$$

式中 N 为堆叠的陶瓷片数量。

2.2 压电变形镜主要性能指标要求

压电变形镜的研制需要综合考虑多方面的影响因素,包括促动器的弯曲刚度、薄镜片的刚度、机械谐振特性、温度特性等^[8]。在这里的研制过程中,应用了薄臂梁理论和有限元方法,得到了与实际测量较为一致的分析结果。

2.2.1 变形量

变形量是衡量变形镜性能指标的最重要参数之一,可以分为变形镜整体可变形量、单个促动器作用下的变形量和相邻促动器间的变形量。其中,整体可变形量指的是变形镜产生低频像差(离焦、像散)幅值大小的能力,一般能够达到(2)式所表示的量级。而单个促动器作用下的镜面变形量受镜面、相邻促动器等的约束,不会达到(2)式所表示的变形量,镜面越厚、促动器间距越小,则变形量也越小。相邻促动器间的最大变形量反映了变形镜校正高频像差的能力,同样受镜面厚度、促动器间距等条件的约束。可以用干涉仪直接对镜面的上述变形量进行测量。目前,本课题组研制的变形镜的低频变形量能够达到 $10 \mu\text{m}$, 单个促动器作用下的变形量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$, 相邻促动器间镜面的推拉变形量可达 $4 \mu\text{m}$ 。

2.2.2 耦合系数

耦合系数 C 定义为相邻促动器位置的镜面变形量 δ_1 相对于所加电促动器位置镜面变形量 δ_0 的比值

$$C = \frac{\delta_1}{\delta_0}. \quad (3)$$

耦合系数的大小可以用干涉仪直接测得,图3为单个促动器作用下的镜面变形情况。由测得的相邻促动器位置的变形量 δ_1 除以变形量 δ_0 ,即可求得耦合系数。

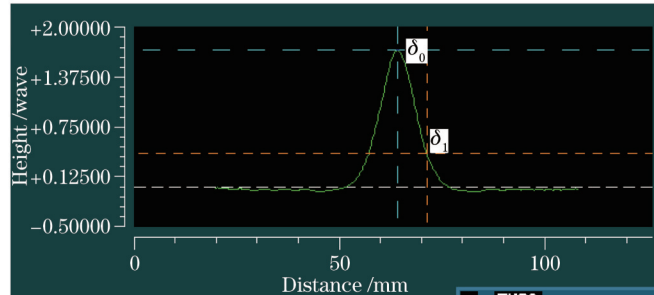


图3 耦合量的测量

Fig.3 Measurement of coupling

促动器之间的间距、薄镜片材料特性、促动器材料特性、促动器与薄镜片的连接方式等因素决定了耦合系数的大小。耦合系数的大小又决定了变形镜对波像差的校正能力,耦合系数太小,变形镜对低阶像差的拟合能力就弱;而耦合系数太大,则对高阶像差的拟合能力就差,而且影响控制系统的稳定性。根据材料特性,利用有限元仿真可以优化变形镜设计,确定合理的耦合系数。

2.2.3 频率响应

为了满足自适应光学大气校正的带宽要求,需要变形镜及其控制系统的频率响应足够快。材料及结构形式决定了变形镜的频率响应,这里在仿真分析的基础上,通过反复实验确定了材料及结构形式,并构建了测试系统对变形镜的频率响应进行测试^[9],从测试结果可以知道,变形镜的谐振带宽优于 12 kHz,变形镜及其高压放大器控制系统在 1 kHz 工作频率时可以等效为一个线性比例环节。

2.2.4 拟合能力及面形误差

变形镜的拟合能力反映了对大气扰动波像差的校正能力,一般用变形镜对 Zernike 多项式的拟合来分析,Zernike 多项式的模式按照其径向和方位频率进行排列。变形镜的单元数、促动器间耦合系数是决定变形镜拟合能力的关键因素。本课题组目前单元数最多做到了 961 单元(促动器 35×35 排列),因为随着 Zernike 多项式模式的增加,各个模式的幅值按 $f^{-8/3}$ (f 为各模式的空间频率)规律(Kolmogorov 功率谱)下降,如果应用模式法进行校正,那么由下式可以估算该变形镜将会校正超过 99.5%的原始波前误差^[8]:

$$\sigma_N^2 \approx 0.2944 N^{-\sqrt{3}/2} \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (4)$$

式中 D 表示望远镜主镜的通光口径, r_0 为大气相干长度。

在一些应用中,变形镜不需要动态工作,但又要求有较高的面形精度。可以通过主动展平的方法,使变形镜维持一个很好的面形,本课题组目前的技术可以确保变形镜在主动展平^[10]后的面形优于 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$,下同)。

2.2.5 其他指标

除了上述指标外,变形镜的迟滞、工作寿命、功耗、工作波段范围等也是重要的指标。虽然可以通过增大闭环控制增益的方法以降低变形镜迟滞的影响,但是从增大控制系统相位裕度的角度,还是希望迟滞越小越好,从对变形镜的测量可知,变形镜的迟滞小于 5%。

研制难度及成本要求尽可能地提高变形镜的工作寿命,实验室内的测试及望远镜机上的实际使用表明本课题组的变形镜的工作寿命优于 10 亿次(指促动器对变形镜片的推拉次数)。

在本课题组的系统中,压电陶瓷促动器为低容性负载,功耗不大。控制变形镜的高压放大器消耗了大部分的能量,产生较多的热量,但是放大器一般离变形镜较远,对光学系统的环境情况影响不大。

作为反射式光学元件,压电变形镜的 optical 工作波段可以做得比较宽。目前针对望远镜高分辨率成像应用,变形镜一般工作在 $0.4\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 波段。

3 21 单元压电变形镜

最初研制的 21 单元变形镜 DM21-1,如图 4、5 所示^[11]。薄镜片采用了圆周浮动的支撑方式,即薄镜片的最外围没有促动器支撑控制,处于自由状态。促动器采用正方形排列方式,间距为 $9\ \text{mm}$,薄镜片的直径为 $50\ \text{mm}$ 。

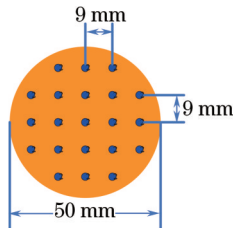


图 4 21 单元变形镜(DM21-1)促动器排列示意图

Fig.4 Actuator arrangement of 21-elements DM (DM21-1)

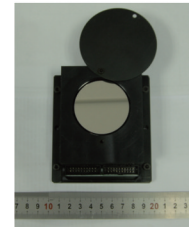


图 5 21 单元变形镜(DM21-1)

Fig.5 21-elements DM (DM21-1)

通过对变形镜 DM21-1 的主动展平发现,这种圆周浮动状态下,变形镜的边缘因为约束条件的不同而难以实现较好的控制。面形展平的结果如图 6 所示,受促动器约束的约 80%口径的镜面面形的均方根误差 (RMS)可以达到约 $0.04\ \lambda$,而整个镜面的面形 RMS 只能达到 $0.088\ \lambda$ 。

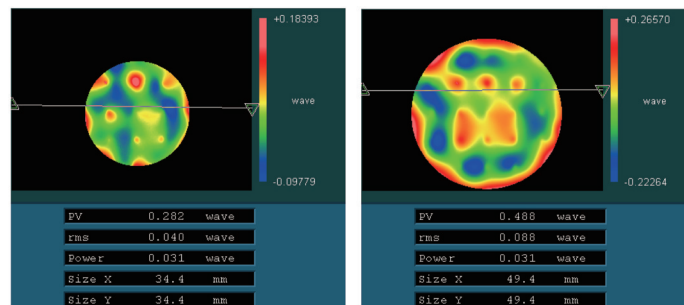


图 6 DM21-1 展平后 80%口径与全口径面形

Fig.6 Surface of 80% aperture and full aperture of DM21-1 after active flattening

为了减小变形镜通光口径,改善对薄镜片边缘的控制效果,新研制了 21 单元的压电变形镜 DM21-2,如图 7 所示。薄镜片口径为 $35\ \text{mm}$,促动器仍采用正方形排列方式,间距为 $7\ \text{mm}$,最外面一圈促动器基本处于薄镜片的边缘。

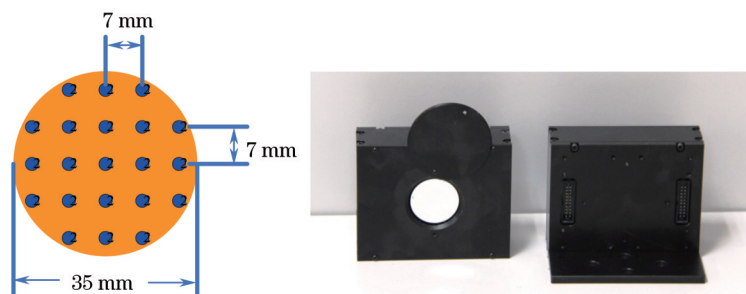


图 7 21 单元变形镜(DM21-2)促动器排列及实物照片

Fig.7 Actuator arrangement and photo of DM21-2

对该变形镜的主动展平结果,如图 8 所示,主动展平后,镜面面形 RMS 值达到了 $0.018\ \lambda$,最高点与最低点差值(PV 值)为 $0.146\ \lambda$,比 DM21-1 有明显的提高,表现出了很好的镜面边缘控制能力。

因为单元数的限制,21 单元变形镜只能对低阶的几项 Zernike 多项式进行较好的拟合,图 9 中给出了变形镜 DM21-1 所拟合的像差情况,依次分别对应离焦、 x 方向像散、 y 方向像散、 x 方向彗差、 y 方向彗差、球差、 x 方向三叶像差、 y 方向三叶像差,对应的残余像差的 RMS 值由图 10 给出。

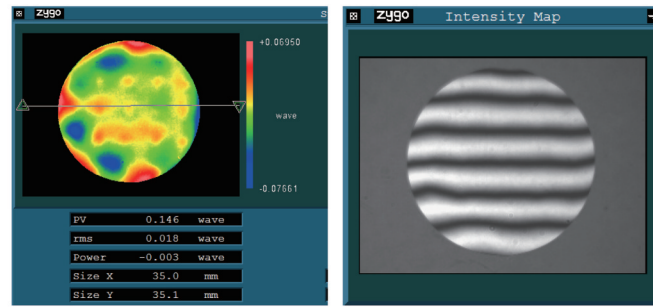


图8 21 DM21-2展平后面形及干涉图

Fig.8 Surface and interferogram of DM21-2 after active flattening

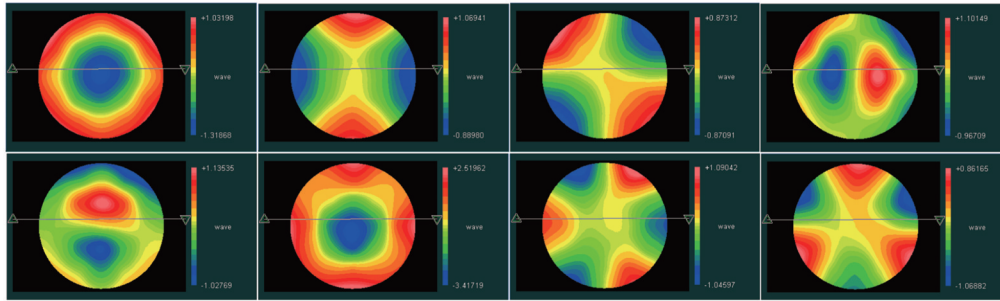


图9 DM21-1的Zernike多项式拟合

Fig.9 Zernike polynomial fitting of DM21-1

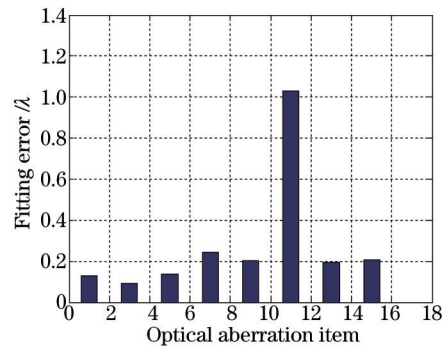


图10 DM21-1的Zernike多项式拟合误差

Fig.10 Zernike polynomial fitting errors of DM21-1

从图9与图10中可以看出变形镜对除了球差之外的低阶像差都能够较好的拟合。实际上,因为促动器的方向排列方式,21单元变形镜对 $Z(4, \pm 2)$ 这两项Zernike多项式也能较好的拟合校正。从空间频率看,变形镜DM21-2相比于DM21-1,只是在拟合精度上有提高。表1给出了变形镜DM21-2的性能指标。

表1 DM21-2的性能指标

Table 1 Characteristics of DM21-2

Number of elements	21
Pupil diameter /mm	35
Type of actuator	LVPZT
Arrangement of actuator /mm	7
Actuator spacing	Square 5×5
Stroke / μm	± 2.5
Inter-actuator stroke / μm	3
Hysteresis /%	<5
Coupling /%	24
Optical quality after flattened / λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)	<0.02
Optical bandwidth /nm	400~900
Reflectivity /%	>95

基于变形镜 DM21-2, 构建了一套自适应光学演示系统, 如图 11、12 所示。其中, Shack-Hartmann(S-H)传感器用于对从光源到变形镜反射过来的光线进行波前测量, 从而控制变形镜进行波前校正, 成像相机用于对校正前后的光源目标进行成像测量。利用该系统除了进行有波前传感器的自适应光学技术研究外, 还可以进行无波前传感器的自适应光学技术的研究工作。

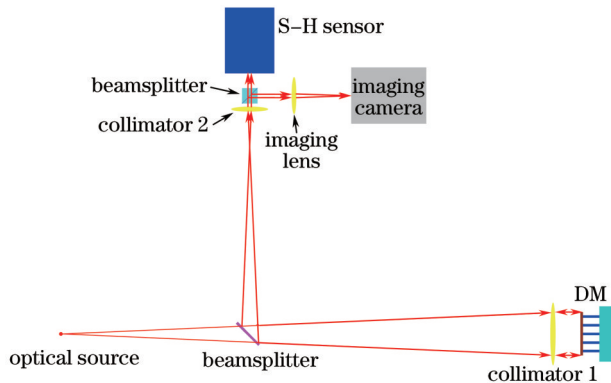


图 11 21 单元自适应光学演示系统光路布局图

Fig.11 Optical layout of 21-elements AO demonstration system

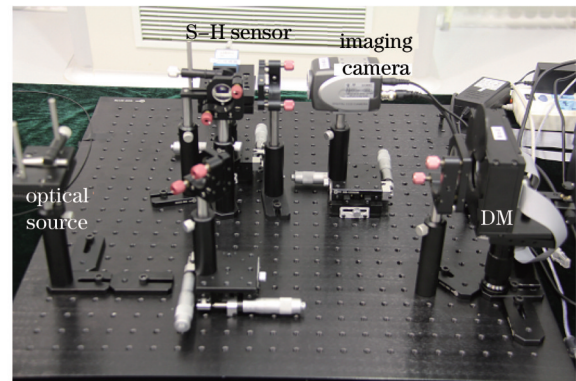


图 12 21 单元自适应光学演示平台

Fig.12 Demonstration platform of the 21-elements AO system

在演示平台上面对一些目标进行了 AO 校正演示实验。图 13 给出了灯丝作为目标光源, 进行 AO 校正前后, 成像相机上面获得的灯丝目标图像。也可以在光路中人为加入一些动态扰动, 控制 AO 系统进行对目标的动态扰动校正实验等。

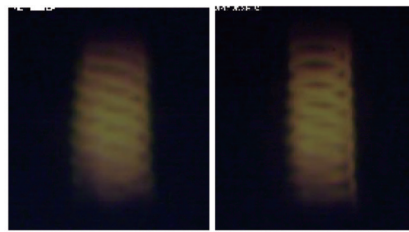


图 13 灯丝目标 AO 校正效果

Fig.13 AO correction of filament object

4 97 与 137 单元压电变形镜

在完成 21 单元变形镜研制及详细测试的基础上, 本课题组很快就研制了 97 单元压电变形镜, 如图 14 所示。其促动器也是正方形 11×11 的排列方式, 促动器间距为 6.5 mm, 变形镜面口径为 70 mm。

该变形镜的测试结果给出, 变形镜相邻促动器间耦合系数为 4.8%, 主动展平之后的面形 RMS 为 0.041λ , 能够对前 7 阶 Zernike 多项式进行较好的拟合, 变形镜谐振频率测得优于 12 kHz。

之后, 根据 1.23 m 望远镜自适应光学系统设计的要求, 研制了 137 单元的变形镜, 如图 15 所示, 变形镜安装在一个二维调整台上。促动器采用 13×13 的正方形排列方式, 间距为 7 mm, 镜面口径为 90 mm, 薄镜片与基底都采用超低膨胀(ULE)玻璃材料。

137 单元变形镜相邻促动器间耦合系数约 26%, 促动器校正量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$, 面形主动展平 RMS 精度优于

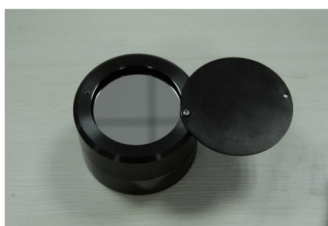


图 14 97 单元变形镜

Fig.14 97-elements DM

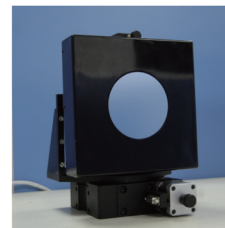


图 15 137 单元变形镜

Fig.15 137-elements DM

$\lambda/50$, 能够对前 7 阶 Zernike 多项式进行高精度的拟合, 测得变形镜谐振带宽优于 12 kHz。关于该变形镜的详细性能测试等见文献[12]。表 2 中给出了 97 单元、137 单元变形镜的性能测试结果。

表 2 97、137 单元变形镜的性能指标

Table 2 Characteristics of 97-element DM and 137-element DM

Number of elements	97	137
Pupil diameter /mm	70	90
Type of actuator	LVPZT	LVPZT
Arrangement of actuator	Square 11×11	Square 13×13
Actuator spacing /mm	6.5	7
Stroke / μm	± 2.7	± 2.5
Inter-actuator stroke / μm	>3	>3
Hysteresis /%	<5	<5
Coupling /%	4.8	26
Resonance frequency /kHz	>10	>12
Optical quality after flattened / λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)	0.346 (PV) 0.041 (RMS)	0.236 (PV) 0.018 (RMS)
Optical bandwidth /nm	400~900	400~900
Reflectivity /%	>95	>95

基于上述 21、97、137 单元压电变形镜的自适应光学系统分别在 1.23 m 望远镜上面进行了天文等目标的自适应光学校正实验, 取得了理想的自适应光学校正效果。其中, 137 单元变形镜及其控制系统在望远镜上面运行了两年多, 经历环境温度范围从低于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到高于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 目前变形镜工作良好, 可靠性及工作寿命等指标得到了有效验证。图 16 中给出了 1.23 m 望远镜上 137 单元自适应光学系统对 0.2" 双星的校正效果, 在 700~900 nm 波段接近 1.23 m 望远镜的衍射极限性能。

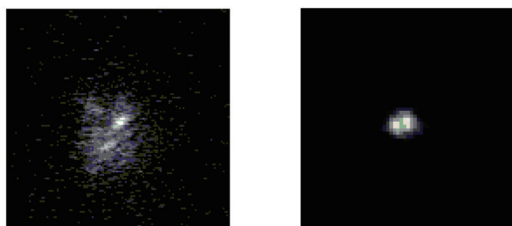


图 16 0.2" 双星目标的自适应光学开闭环图像

Fig.16 Open-and close-loop images of 0.2" binary star

5 961 单元压电变形镜

为了满足大口径天文望远镜自适应光学系统的设计要求, 需要研制千单元量级的变形镜。美国的先进光电系统(AEOS)和星火光学望远镜(SORT)中应用的 941 单元变形镜都是基于分离压电促动器的连续镜面变形镜^[13-14]。法国的 Cilas 公司给包括 Gemini 在内的多个望远镜提供的千单元量级附近的变形镜都是采用分离压电促动器连续镜面变形镜技术^[4]。现在, 国外在更多单元量级的压电变形镜研制方面采用的是高密度的阵列式陶瓷促动器技术, 其技术难点主要是高密度陶瓷促动器的切割与电连接技术, 目前促动器间间距可以做到 1 mm, 成功应用的变形镜可以做到 4356 单元^[15-16]。

基于目前的技术现状和研制经验, 这里的千单元变形镜仍采用分离促动器的连续镜面变形镜技术。这是一个极具挑战性和风险性的工程, 相对于前述的几个变形镜, 其难度不单单是数量倍数的增长, 至少需要解决以下几个方面的问题:

- 1) 异型超大径厚比(100 以上)的薄镜片加工及抛光技术;
- 2) 高稳定性、轻量化基底加工技术;
- 3) 高密度压电陶瓷促动器电连接技术;
- 4) 高一一致性、高控制精度的压电陶瓷促动器及其控制器技术;
- 5) 高精度的模块集成与控制技术。

经过项目团队共同攻关,本课题组于2012年研制成功了961单元压电变形镜,如图17所示。

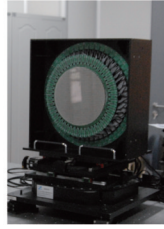


图17 961单元变形镜

Fig.17 961-elements DM

薄变形镜面口径为243 mm,促动器为35×35的方形排列方式,间距为7 mm。单个促动器作用下的变形量为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$,相邻促动器间的推拉变形量为 $3 \mu\text{m}$,促动器间耦合系数为23%。变形镜主动展平后的面形RMS优于10 nm。关于961单元变形镜静态测试的情况可以参考文献[17]。

表3中给出了这里的961单元变形镜与国外同类型变形镜的性能指标对比,其中941DM是美国Xinetics公司为美国的3.67 m口径AEOS望远镜研制的压电变形镜,已得到了成功应用;SAM1377是法国CILAS公司为欧洲南方天文台的8 m口径甚大望远镜(VLT)研制的压电变形镜。这两个变形镜代表了国际上分离促动器连续镜面变形镜的最高水平,从表中可以看出,本课题组的变形镜达到(在一些指标方面甚至超过)了国际同类变形镜的最高水平。

表3 千单元变形镜性能对比

Table 3 Performance comparison between some thousand-elements DMs

	961-elements DM	941DM AEOS	SAM1377
Number of elements	961	941	1377
Pupil diameter /mm	243	288	188
Type of actuator	LVPZT	PMN	PZT
Actuator spacing /mm	7	9	4.5
Stroke / μm	± 2.5	± 2.4	± 2
Inter-actuator stroke / μm	3	4	3
Hysteresis /%	<5	<1.5	<5
Coupling /%	23		10~30
Resonance frequency /kHz	>12	>12	>14
Optical quality after flattened /nm	<150 (PV) <15 (RMS)	<16 (RMS)	20 (RMS)
3Db bandwidth of amplifier /kHz	>7.5		5
Optical bandwidth /nm	400~900		600~15000
Reflectivity /%	>95		97
Working temperature / $^{\circ}\text{C}$	-20~40		-10~30
Manufacture	CIOMP	Xinetics Inc.(USA)	CILAS(France)

目前,本课题组正在对基于961单元变形镜的室内自适应光学系统进行静、动态性能的测试,已取得了一些进展,将在后续的文章中报道。

6 压电变形镜性能指标综合

从这些年的变形镜研制及应用情况可以确定,本课题组目前的压电促动器变形镜技术能够提供稳定且可靠的变形镜解决方案。综合变形镜的分析、设计、加工及上述的测试结果,可以给出压电变形镜的性能指标,如表4所示。可以实现大到300 mm口径的光学变形镜面,校正单元数可大于1000,促动器可以根据设计进行排列,而且为了满足一定强度下的高功率激光应用,可以对变形镜镀高反射率的介质膜。

表4 压电变形镜性能指标

Table 4 Performance summary of our DMs

Number of elements	21 to more than one thousand
Pupil diameter /mm	Up to 300
Type of actuator	LVPZT
Arrangement of actuator	Square or hexagon
Actuator spacing /mm	6~12
Stroke / μm	$>\pm 3$
Inter-actuator stroke / μm	4
Hysteresis /%	<5
Coupling /%	5~25
Resonance frequency /kHz	>12
Optical quality after flattened / λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)	<0.02 (RMS)
Optical bandwidth /nm	400~900
Reflectivity /%	>95
Working temperature / $^{\circ}\text{C}$	-20~40

7 总结及展望

压电变形镜及其电控系统的研制涵盖了陶瓷材料、精密机械、精密光学、材料力学、建模仿真、高压信号控制与处理等多种学科,研制难度大、过程复杂、风险高。经过团队近些年的努力,解决了许多关键问题,取得了一些应用成果。为了拓展变形镜的应用范围,提高系统性能,还需要进行多方面的研究工作:

1) 高功率激光系统用的主动制冷变形镜技术及相关自适应光学控制技术,以提高激光发射系统的出射光束质量;

2) 医学自适应光学成像用大行程、较高密度、小型化变形镜技术;

3) 用于超高分辨率成像的高密度压电陶瓷阵列变形镜及自适应光学技术;

4) 自由曲面自适应变形镜及相关技术;

5) 开环、高精度压电陶瓷位置控制的驱动器技术。

参考文献

- 1 R K Tyson. Principles of Adaptive Optics[M]. 3th edition. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- 2 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.
- 3 Paul H Merritt, John R Albertine. Beam control for high-energy laser devices[J]. Opt Eng, 2013, 52(2): 021005.
- 4 Jean-Christophe Sinquin, Jean-Marie Lurçon, Claude Guillemard. Deformable mirror technologies for astronomy at CILAS[C]. SPIE, 2008, 7015: 70150O.
- 5 M A Ealey, J Wellman. Fundamentals of deformable mirror design and analysis[C]. SPIE, 1989, 1167: 66-84.
- 6 G Vdovin, M Loktev, A Simonov. Low-cost deformable mirrors: technologies and goals[C]. SPIE, 2005, 5894: 58940B.
- 7 Ling Ning. Wave-front correctors of adaptive optics[J]. Optical Technology, 1998, (3): 12-16.
凌 宁. 自适应光学波前校正器[J]. 光学技术, 1998, (3): 12-16.
- 8 Hardy J W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Lin Xudong, Liu Xinyue. Development report of 21-element deformable mirror[R]. Inner file of CIOMP, 2008.

- 林旭东, 刘欣悦. 21单元变形镜研制报告[R]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所内部资料, 2008.
- 12 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*, 2012, 15(2): 267-273.
- 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*, 2012, 15(2): 267-273.
- 13 Rene Abreu, David Chadwick, Rick D'Amico, *et al.*. AAO adaptive optics system[C]. SPIE, 2000, 3931: 272-283.
- 14 James M Spinhime, George A Ameer. Adaptive optics using the 3.5 m starfire optical range telescope[C]. SPIE, 1997, 3126: 257-268.
- 15 Mark Ealey. High density deformable mirrors to enable coronagraphic planet detection[C]. SPIE, 2004, 5166: 172-179.
- 16 Richard Dekny. Innovative Deformable Mirror for Palomar Observatory[OL]. <http://spie.org/x39226.xml>, 2010.
- 17 Lin Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Development and performance test of the 961-elements deformable mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601001.
- 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 961单元变形镜研制及性能测试[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0601001.
- 18 William H Lowrey, John L Wynia, Mark A Ealey. Characterization of three advanced deformable mirrors[C]. SPIE, 1998, 3433: 388-393.
- 19 D Gallieni, E Anaclerio, P Glazzarini, *et al.*. LBT adaptive secondary units final design and construction[C]. SPIE, 2003, 4839: 765-772.
- 20 B R Oppenheimer, D Palmer, R Dekany, *et al.*. Investigating a xinetics inc deformable mirror [C]. SPIE, 1997, 3126: 569-579.
- 21 Wei Kai, Zhang Xuejun, Xian Hao, *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.
- 22 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zeping, *et al.*. Deformable mirror control algorithm based on the phase correction at the actuator position[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0311001.
- 郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0311001.