

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0062-05

基于 19 单元压电陶瓷变形镜的波前校正实验研究

柳 丛^{1,2} 马彩文¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 自适应光学系统在天文望远镜观测和激光传输过程中常用来补偿大气湍流引起的波前畸变, 压电陶瓷变形镜(PDM)是该系统常用的波前校正元件。在分析了 PDM 的性能参数, 包括: 适配误差、致动器的数目与空间布局、动态范围等基础上建立了基于 19 单元 PDM 的自适应光学实验系统。该系统采用 Zernike 模式法重构波前, 闭环负反馈实时控制 PDM 补偿由 Matlab 模拟的 3 种波前像差: 离焦、像散、彗差形成的波前畸变。实验结果表明, 压电陶瓷变形镜在负反馈闭环自适应光学系统中对波前畸变有较好的校正能力。

关键词 物理光学; 自适应光学; 压电陶瓷变形镜; 波前校正

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0062

Analysis of Wavefront Correction Experiment Based on 19-Channel Piezoelectric Deformable Mirrors

Liu Cong^{1,2} Ma Caiwen¹

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Piezoelectric deformable mirrors(PDM) is a widely-used wavefront corrector in the adaptive optics which is to compensate for the wavefront aberration generated by the atmosphere turbulence in astronomical telescopes and laser communication systems. Analyzing the performance parameters of PDM, like fitting error, actuators' number and spatial arrangement, dynamic range, we designed an experimental adaptive optic system based on 19-channel PDM. This system uses Zernike modal approach to reconstruct the wavefront and real-time control PDM to compensate three wavefront aberrations: defocus, astigmatism and coma simulated in Matlab in a negative feedback closed loop. The experimental results show that the piezoelectric deformable mirrors have good correction capability for wavefront aberration in negative feedback closed-loop adaptive optic system.

Key words physical optics; adaptive optics; piezoelectric deformable mirrors; wavefront correction

1 引言

巴布科克(H. W. Babcock)关于“自适应光学”的最初构想在 1953 年^[1]提出,但是直到 20 世纪 70 年代初期这一构想才真正蓬勃发展起来。其中很重要的一个原因就是缺失合适的波前校正器。波前校正器是自适应光学系统中的关键部件之一,它担负着校正由内、外因素引入的波前误差的任务,并补偿光路中各种因素引起的成像质量降低的问题。在众多种类的变形镜中,连续表面分立驱动式压电变形镜具有变形量大、表面变形无间断等优点,广泛应用于国内外的多个自适应光学系统^[2]。国内对于微机电系统(MEMS)技术变形镜的校正实验分析较多,

而对变形量更大且面形可伸可缩的压电陶瓷变形镜(PDM)的校正能力报道甚少。本文分析了 PDM 的性能参数,通过引入特定波前畸变采用闭环反馈控制回路验证 PDM 的波前实时校正能力。实验结果表明,应用于闭环反馈控制自适应光学系统中的 PDM 的波前校正能力较好。

2 PDM 的性能参数分析

通常反射镜只要求其镜面具有足够高的面形精度与反射率,但是对变形镜,则要求它在静止时完全具有普通反射镜的性能,同时还要求整个镜面能够可控地改变形状,而静止后要保证一定的位置精度,

作者简介: 柳 丛(1984—),女,硕士研究生,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: leobrows@163.com

导师简介: 马彩文(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光电精密跟踪测量技术方面的研究。

E-mail: cwma@opt.ac.cn

因此要求变形镜具有很高的静态与动态稳定性。变形镜性能参数主要参考以下几个方面^[3]。

1) 适配误差

一般情况下,变形镜无法彻底校正波面畸变,因此,每一种变形镜都有其适配误差

表 1 不同变形镜的适配系数取值

Table 1 Fitting coefficient a_F value of different deformable mirrors

Types of deformable mirrors	$a_F / (\text{rad}^2)$	Actuators per segment
Segmented mirror	Piston only(square segments)	1.26
	Piston only(circular segments)	1.07
	Piston plus tilt(square segments)	0.18
	Piston plus tilt(circular segments)	0.14
Continuous deformable mirror	0.28	1

在较好的观测地点可见光波长范围内, r_0 取值通常为 15~30 cm。实验中的 PDM 属于连续面形分立致动的变形镜,致动器间距为 7 mm,取 $r_0 = 15$ cm,根据表 1 查得 $a_F = 0.28$,由(1)式可计算出实验中 PDM 的适配误差为 0.0017 rad²。

2) 致动器数目和空间布局

致动器的数目或称作变形镜的自由度直接决定了波前校正器所能够校正的阶数。致动器的数目通常与 $(D/r_0)^2$ 成正比, D 为望远镜的口径大小。在采用模式法重构波前进行校正时,致动器的空间布局最好与波前探测器的采样布局匹配。例如:夏克-哈特曼波前传感器应采用矩形或正六边形的布局;而曲率波前传感器采用环形的布局。实验中采用夏克-哈特曼波前传感器对波前探测,PDM 有 19 个致动器,采用正六边形布局。

3) 动态范围

变形镜校正的动态范围又叫做变形镜的冲程,指变形镜在工作电压下能产生的最大位移量。它要求能够补偿畸变波前波峰与波谷间的变化值。实验中 PDM 的冲程为 8 μm ,能够校正最大约 12 个波长的畸变^[4]。

4) 光谱范围

波前校正通常在可见光范围(0.4~0.7 μm)内,PDM 变形镜在整个光谱范围内都可以对波前进行校正。

5) 变形镜的时间频率响应

湍流的频谱由大气风速廓线和其他大气参数决定。大气风速廓线在短时间内变化很大。因此变形镜的响应应快于大气相干时间 τ_0 。从系统设计的角度,它应是系统闭环带宽最大值的 10 倍以上。

6) 滞后性

$$\sigma_{\text{fitting}}^2 = a_F (d/r_0)^{5/3} \text{ rad}^2, \quad (1)$$

其中 a_F 是适配系数, d 是致动器间距, r_0 是大气湍流空间相干常数。表 1 列出了不同变形镜的适配系数取值。

连续表面分立致动变形镜的致动器由于采用锆钛酸铅(PZT)或镁铌酸铅(PMN)材料,就会显现出不同程度的滞后性^[5]。PZT 一般有 10%~20% 的滞后性,PMN 通常是 1%~3%。而采用 MEMS 技术制成的薄膜变形镜可达到零滞后性。实验所用 PDM 变形镜采用 PZT 材料,所以存在 7%~15% 的滞后性^[6]。但对于实验中的闭环自适应光学系统而言,PDM 的滞后可以通过增大负反馈环的增益来克服。

7) 致动器的影响函数

变形镜的任一个驱动器上变形量的分布称为变形镜的面型影响函数。影响函数的形状决定了变形镜补偿波前畸变的能力。实验中的 PDM 使用 Zygo 干涉仪测定了其每个电极施加不同电压时的面形数据并计算出其影响函数。

8) 功率耗散

变形镜工作过程中致动器的功率耗散会产生很多热量,这会影响到变形镜的镜面形状,影响其校正精度。实验中的 PDM 采用直流低压供电,可减小功率耗散。

3 实验原理

本实验系统主要由 He-Ne 激光器(632.8 nm)提供光源,扩束至 PDM 口径大小(30 cm)后由分束片透射到达变形镜,经其反射后经分束片缩束至夏克-哈特曼波前传感器(S-H WFS)口径大小(3.9 cm)进行波前探测。探测得到的波前信息在计算机中进行波前重构,重构后的波前与参考波前一起送入控制器(Controller)进行运算产生驱动变形镜的信号,再经数模转换(D/A)及高压放大模块(HVA)转换为电压驱动变形镜对波前进行校正。

整个实验系统如图 1 所示。

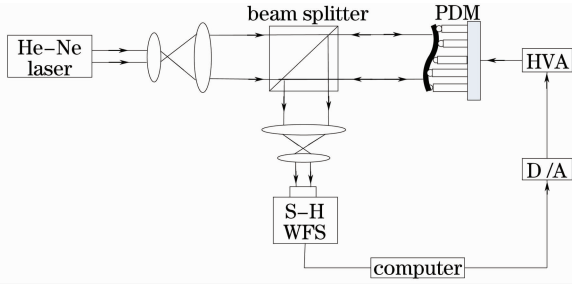


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

利用哈特曼传感器得到的波前斜率数据重构波前的方法主要有区域法和 Zernike 模式法,本实验采用后者。模式法重构波前是将全孔径内的波前相位展开成不同的模式^[7],如平移、倾斜、离焦、像散等,然后用全孔径内的测量数据求解各模式的系数,得到完整波前。

任何望远镜孔径内的相位畸变 $\varphi(x, y)$ 都可由有限的 Zernike 多项式的和来表示。定义为

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^N a_n Z_n(x, y), \quad (2)$$

a_n 是第 n 阶 Zernike 多项式的系数。Zernike 多项式按照 Noll 的定义^[8]表示如下

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{even}} &= \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \cos(m\theta), \\ Z_{\text{odd}} &= \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \sin(m\theta), \end{aligned} \right\} m \neq 0$$

$$Z = \sqrt{n+1} R_n^0(r), \quad m = 0 \quad (3)$$

其中

$$R_n^m(r) =$$

$$\sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! [(n-m)/2 - s]!} r^{n-2s}, \quad (4)$$

n 表示多项式阶数(radical order), m 表示角频率, n 和 m 取值为整数,且满足 $n \leq m, n - |m|$ 为偶数。

\mathbf{G} 表示哈特曼传感器测得的斜率矢量,待重构波前用矢量 Φ 表示,有

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}\Phi, \quad (5)$$

\mathbf{A} 是变形镜影响函数矩阵。由于 \mathbf{A} 的秩不完备,所以是奇异阵。由矩阵论的知识可知,(5)式的极小范数最小二乘解^[9]为

$$\Phi = \mathbf{A}^+ \mathbf{G}, \mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T = \mathbf{V} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{U}^T, \quad (6)$$

$\mathbf{U}, \mathbf{S}, \mathbf{V}$ 是 \mathbf{A} 的奇异值分解矩阵, \mathbf{A}^+ 为 \mathbf{A} 的广义逆阵。矩阵 \mathbf{U} 的列表示正交化的镜面变形(模式)。对角矩阵 \mathbf{S} 的值表示这些模式的增益。由(2),(6)式可以求出 Zernike 多项式的系数矩阵代入(2)式就可重

构出畸变波前。

在理想情况下,变形镜上每一点的变形量与单电极所施加电压的平方成线性关系,且每一点的变形量是各个电极单独作用时候的叠加^[10]。通过测试变形镜的影响函数矩阵从而得到控制电压矩阵来适配产生的波前畸变。将变形镜初始的面形作为参考面形,记作 φ_{ref} ,每次加入的畸变记作 φ_{abc} 。剩余畸变 $\varphi_{\text{res}} = \varphi_{\text{ref}} - \varphi_{\text{abc}}$,第 n 次循环后的剩余畸变为 φ_{res}^n , \mathbf{X}_n 为相应的控制电压信号,第 $n+1$ 次循环的控制电压信号 \mathbf{X}_{n+1} 可以表示为

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n - g \mathbf{A}^+ \varphi_{\text{res}}^n, \quad (7)$$

g 是闭环反馈系数,在(0,1)内变化。

4 实验结果与分析

整个实验系统要保证光束通过各个光学元件的准直性和各个光学元件的同轴性,这两点调整得不好,会引入诸如离焦、像散、彗差等低阶像差。往往在实际光路调节中很难将这些低阶像差完全消除,只能尽量减小这几种像差的幅值。通过多次调节测量 3 种像差的幅值大小均不超过 $1 \mu\text{m}$ 。因此在对 PDM 的校正能力进行研究时,主要选取离焦、像散、彗差这 3 种像差进行模拟仿真,且幅值都设定为 $1 \mu\text{m}$ 。实验中以 PDM 的初始面形作为参考波前。根据(3),(4)式用 Matlab 模拟离焦、像散、彗差时的波前如图 2 所示,引入光路。通过对 PDM 的实时控制,观测闭环回路的校正效果。校正后的波前轮廓图由波前分析软件绘制出,如图 3 所示。

对波前校正效果进行分析与评价常用的参数有:P-V(Peak-to-valley)值——表示表面波峰与波谷间的距离;均方根 RMS 值——通过测量表面各个点与理想情况下的标准偏移量计算得出,表示波前的均方根值;斯特里尔比(Strehl)——衡量自适应光学系统对相位失真补偿能力的重要指标,其值越大证明校正效果越好。表 2 列出了这几个参数在参考波前时的取值和在加入离焦、像散、彗差畸变后波前的取值以及通过 PDM 校正后波前的取值(其中 WF 代表波前, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。由表 2 看出,通过闭环回路校正后,波前的 P-V 值和 RMS 值明显减小,Strehl 比有很大提高,证明 PDM 波前校正方面的效果还是较好的。另外,表 2 还列出了加入不同畸变后的校正频率和当校正结果稳定后的闭环反馈次数。基本上校正频率在 30Hz 左右,闭环反馈不超过 600 次,波前校正的结果都达到了稳定。

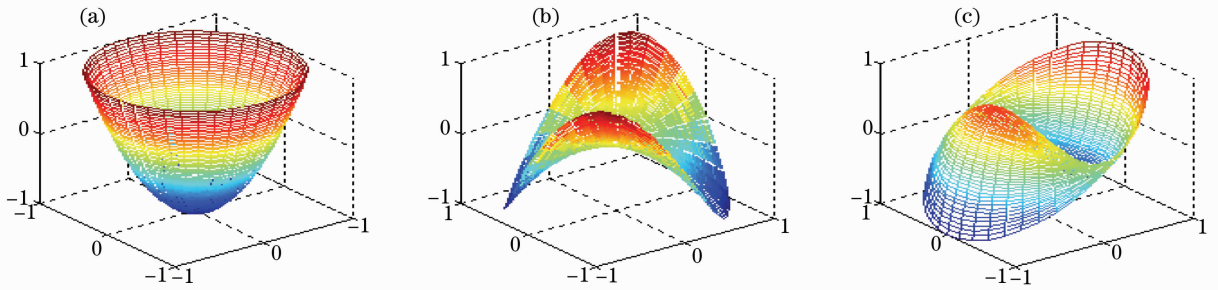


图 2 Matlab 模拟波前畸变。(a) 离焦；(b) 像散；(c) 彗差

Fig. 2 Simulated wavefront aberration in Matlab. (a) defocus; (b) astigmatism; (c) coma

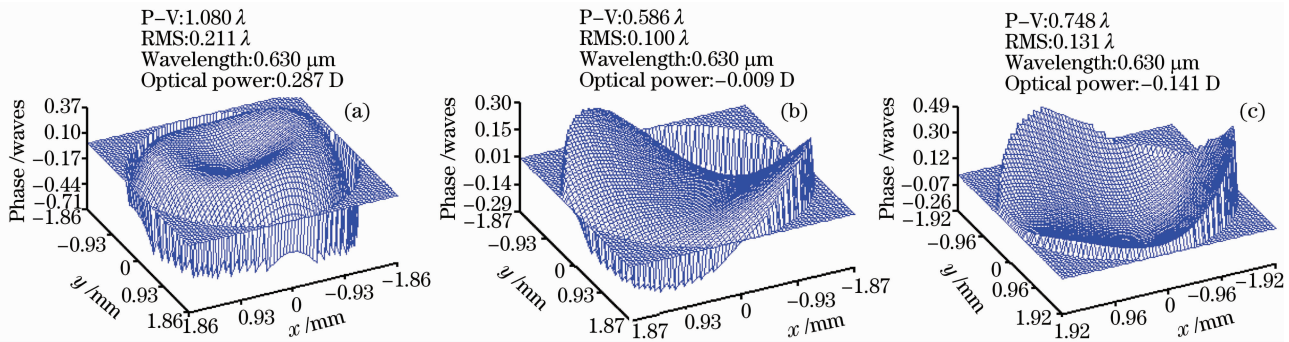


图 3 校正后波前轮廓图。(a) 离焦；(b) 像散；(c) 彗差

Fig. 3 Corrected wavefront surface. (a) defocus; (b) astigmatism; (c) coma

表 2 校正前后波前信息对比

Table 2 Comparison of aberrated wavefront and corrected wavefront

	P-V value / λ	RMS value / λ	Strehl	Correction frequency /Hz	Iteration
Reference WF	0.629	0.115	0.506	0	0
WF with defocus	2.115	0.503	0.022	0	0
Corrected WF with defocus	1.080	0.211	0.229	29.68	540
WF with astigmatism	2.942	0.546	0.016	0	0
Corrected WF with astigmatism	0.586	0.100	0.599	28.89	360
WF with coma	2.123	0.444	0.006	0	0
Corrected WF with coma	0.748	0.131	0.430	28.75	460

5 结 论

对 19 单元的 PDM 进行了性能分析并将其应用在自适应光学系统中,用 Matlab 模拟了 3 种畸变(离焦、像散和彗差)引入实验中,通过模式法重构波前,采用闭环负反馈控制进行波前校正,对比校正前后波前的 P-V 值, RMS 值和 Strehl 比,结果表明,压电陶瓷变形镜在波前校正方面有较好的校正能力,并且采用闭环负反馈控制能够使整个系统的实时性和稳定性都得到提高。

参 考 文 献

1 John W. Hardy. Adaptive optics: a progress review[C]. *SPIE*, 1991, **1542**: 4879

2 Yang Huafeng, Liu Guilin, Rao Changhui *et al.*. Spatial frequency analysis of wavefront compensation capabilities of deformable mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11): 1845~1848
 杨华峰, 刘桂林, 饶长辉等. 变形镜波前补偿能力的空间频域分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(11): 1845~1848
 3 John W. Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998. 176~212
 4 19-Channel Piezoelectric Deformable Mirror System Technical Passport[M]. Wetherlands: OKO Technologies, 2007
 5 Francois Roddier. Adaptive Optics in Astronomy [M]. Wetherlands: Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 57~90
 6 Adaptive Optics Guide[M]. Wetherlands: OKO Technologies, 2007
 7 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Adaptive Optics Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 294~309
 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论 [M]. 北京理工大学出版社, 1996. 294~309

- 8 Robert J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *Optical Society of America*, 1976, **66**(3): 207~211
- 9 Cheng Yunpeng, Zhang Kaiyuan, Xu Zhong. Duction [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006. 334~343
程云鹏,张凯院,徐 仲. 矩阵论[M]. 西北工业大学出版社, 2006. 334~343
- 10 Fang Di, Chen Haiqing, Li Jun *et al.*. The measurement of some important parameters of MEMS deformable mirrors[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(3): 21~26
方 迪,陈海清,李 俊 等. 微变形反射镜主要性能测试研究 [J]. 光学仪器, 2005, **27**(3): 21~26