

文章编号: 0253-2239(2009)03-0587-07

# 一种提高波前空间校正能力的组合 变形镜自适应光学系统

杨华峰<sup>1,2</sup> 饶长辉<sup>2</sup> 张雨东<sup>2</sup> 姜文汉<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; <sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 提出了一种利用光学共轭关系, 实现多变形镜空间匹配从而提高波前空间校正能力的自适应光学系统方案。通过理论分析给出了组合变形镜的面形描述方法, 在此基础上建立了一套基于由两块相同方形排列变形镜构成的组合波前校正器的完整自适应光学实验系统。通过数值仿真研究了该系统对前 35 阶 Zernike 像差的校正效果, 并且通过实验对比了组合变形镜和单一变形镜对实际静态像差的闭环校正效果。结果表明组合变形镜可以等效为一多单元变形镜, 在直接斜率控制算法下正常稳定闭环工作, 校正效果明显优于单一变形镜。组合变形镜技术通过空间匹配实现了增加波前校正器驱动单元数和等效交连值, 有效地提高了对波前的空间校正能力, 因此可以代替高成本的单一多驱动器变形镜用于自适应光学系统中高阶像差的校正。

**关键词** 自适应光学; 组合变形镜; 光学共轭; 波前校正

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0587

## Adaptive Optics System Based on Combinational Deformable Mirror for Improving Wavefront Spatial Correction Capability

Yang Huafeng<sup>1,2</sup> Rao Changhui<sup>2</sup> Zhang Yudong<sup>2</sup> Jiang Wenhan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of  
Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China  
<sup>2</sup> Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences,  
Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract** A new kind of adaptive optics (AO) system, in which several deformable mirrors (DMs) with optical conjugation relationship are combined to improve wavefront spatial correction capability, is proposed. The surface displacement of combinational deformable mirror (CDM) is introduced. Based on theoretical analysis, the integrated AO system with CDM that consists of two same deformable mirrors with the square arrays is built. The correction performance for the first 35 order Zernike aberrations is calculated and its closed-loop effect for correcting real aberrations is validated experimentally. The results indicate that CDM in the AO system can correct aberrations effectively as the same as one single DM with more actuators by using the direct-gradient control algorithm steadily in closed-loop, and the correction capability of the CDM is better than that of only one DM. This design can improve wavefront spatial correction capability by increasing the number of actuators and the coupling coefficient. So it can be used for compensating high-order aberrations instead of one single costly DM with more actuators for the same performance.

**Key words** adaptive optics; combinational deformable mirror; optical conjugation; wavefront correction

## 1 引言

自适应光学 (Adaptive optics, AO) 是一门集科

学性和工程性为一体的综合学科, 它研究实时自动改善光波波前质量的理论、系统、技术和工程<sup>[1]</sup>, 主

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(60408005)资助项目。

作者简介: 杨华峰(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: windgreen\_2001@sina.com

导师简介: 饶长辉(1971—), 男, 研究员, 博士生导师, 目前主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

要应用于天文观测和激光大气传输领域减弱大气湍流的有害影响。近年来在激光器光束净化领域也得到广泛应用<sup>[2]</sup>。变形反射镜(Deformable mirror, DM)是自适应光学技术的关键器件,用于光学系统中校正系统自身或外部各种因素对光束造成的静态以及动态的波前误差<sup>[3]</sup>。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、表面变形没有间断等优点,已广泛应用于国内外的多个自适应光学系统。

理想情况下,一个自适应光学系统应该具有瞬间的时间响应和无限的空间带宽<sup>[4]</sup>。其中,变形镜波前的空间补偿能力通常决定于驱动器的数量,影响函数和排布方式,在波前探测器采样率足够时,直接决定了系统的空间带宽。为了达到对高阶像差校正的目的,满足大口径望远镜自适应光学系统的需要,必须增加变形镜驱动器数量。然而随着驱动器数量的增加,传统的连续表面分立驱动式压电变形镜的制造难度也随之增大。近年来,针对各种不同应用场合,多变形镜校正方案引人注目,但多为利用一定算法解耦使其分担不同的校正任务,或多级串连校正<sup>[5~7]</sup>。为缓解变形镜的制造压力,本文在立足现有变形镜制造技术的条件下,提出采用光学共轭方式将多个少驱动器变形镜匹配起来组合成一个多驱动器波前校正器的方法,并利用两块变形镜建立了基于此种方案的完整自适应光学实验系统,取得了较好的波前校正效果和远场图像。实验证明组合变形镜(Combinational-deformable-mirror, CDM)方式,利用光学方法自然地实现了驱动单元的增加,不需要复杂的解耦计算,利用已有单一变形镜系统控制方法就可以稳定工作,相比单一变形镜有效提高了波前空间校正能力,而且有利于变形镜自身面形误差的补偿。

## 2 组合变形镜波前校正的基本原理

一般认为使用连续表面分立驱动压电变形镜的整个自适应光学系统是一个空间线性系统,即在波前校正过程中,从变形镜的单个影响函数到镜面面形,再到对被校正波前的补偿都满足线性叠加原理<sup>[8]</sup>。因此系统闭环工作可以使用基于传递矩阵的线性积分控制方法。关于变形镜的非线性讨论参考文献<sup>[9]</sup>。

基于以上基本原理,设计将放置在  $4F$  光学系统中共轭位置的两个变形镜组合起来构成一组组合波前校正器,并都与系统入瞳共轭,其结构如图 1 所

示。根据光学共轭原理,在组合变形镜用于望远镜自适应光学系统时,那么通过入瞳(望远镜主镜)的光都能入射到每个变形镜镜面,入射的畸变波前得到两个变形镜的校正,组合变形镜对波前的校正量  $M_c(x, y)$  (称为组合变形镜总体面形)则为两个变形镜各自面形  $M_1(x, y), M_2(x, y)$  相加

$$M_c(x, y) = M_1(x, y) + M_2(x, y). \quad (1)$$

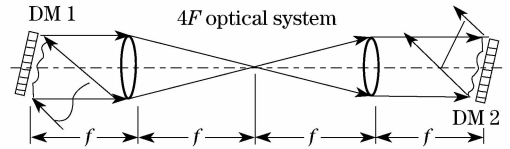


图 1 组合变形镜的结构示意图

Fig. 1 Structure of combinational DM

方案的关键部分是两变形镜空间横向位置的匹配关系。如果使用完全相同的变形镜并使驱动器一一对应排列,则可以得到两倍于单镜有效行程的校正效果;如果使用驱动器位置交错排列,则可以有效的提高空间补偿能力,用于高阶像差校正;甚至可以使用不同类型、不同布局的变形镜组合实现各种场合对波前校正的需求,避免制造难以实现的不规则排列、多校正单元的单一变形镜。在变形镜具有理想时间特性前提下,类似的还可以使用三个甚至更多变形镜进行空间组合,只要空间线性系统的假设满足,就可以等效为单一波前校正器进行控制。这种方案在现有变形镜基础上有效提高了波前校正能力,但同时对光路的调整提出了较高的要求。

这里主要分析使用组合变形镜提高空间校正能力的情况,即使各变形镜驱动器交错对称排列的方式。图 2 为满足对称要求时由两块正方形排列变形镜,和三块三角形排列变形镜进行空间组合时驱动器位置匹配关系示意图<sup>[10,11]</sup>。

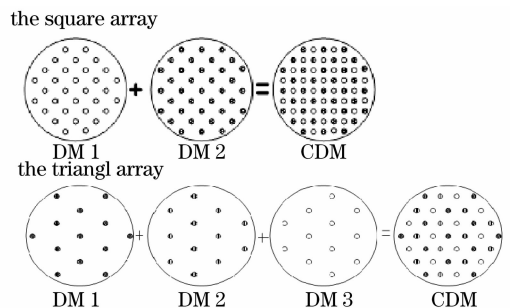


图 2 组合变形镜空间匹配示意图

Fig. 2 Spatial configuration of CDM

当单块变形镜的影响函数采用高斯模型<sup>[12]</sup>时,由两块相同的方形排布变形镜组成的组合变形镜的面形  $M_c(x, y)$  可以表示为<sup>[10]</sup>

$$M_c(x, y) = \sum_{n=1}^{N_1+N_2} A_n \cdot \exp\left[ \ln(\omega^{2^{-a/2}}) \left( \frac{\sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}}{d} \right)^a \right], \quad (2)$$

其中  $N_1$  和  $N_2$  分别为两变形镜上的有效驱动器数,  $a$  为高斯指数,  $\omega$  是单块镜面上的交连值,  $d$  为等效的组合镜面上驱动器间距,  $(x_n, y_n)$  是等效的组合镜面上第  $n$  个驱动器的中心位置坐标,  $A_n$  为第  $n$  个驱动器的权重系数, 它正比于驱动器上所施加的电压。

设待校正波前相位为  $\phi(x, y)$ , 系统中通常由波前传感器的数据得到, 令

$$\phi(x, y) = M_c(x, y), \quad (3)$$

联立方程(2)(3), 利用最小二乘方法, 可以求解出  $A_n$ , 从而得到镜面对波前的最佳拟合面形, 其残余误差  $\phi_e$  可以表示为

$$\phi_e(x, y) = \phi(x, y) - M_c(x, y), \quad (4)$$

其大小直接反映了变形镜对像差的空间补偿能力, 这样就可以从理论上计算组合变形镜对给定畸变波前的校正效果。

### 3 组合变形镜实验系统

利用实验室条件, 基于上面的原理我们建立了一套由两块 32 单元方形排列连续表面分立压电驱动变形镜组合构成的自适应光学实验系统。系统由平行光源, 波前探测, 波前控制, 波前校正和远场监视几部分组成, 如图 3 所示。准直平行光经变形镜 1、变形镜 2 反射, 穿过分光镜进入成像系统; 经分光镜反射的光携带光学通道上的像差信息被哈特曼波前传感器(HSWFS)探测; 波前斜率信号进入计算机处理, 输出控制信号经 D/A 转化进入高压放大器, 驱动两变形镜工作校正光路上存在的像差; 同时记

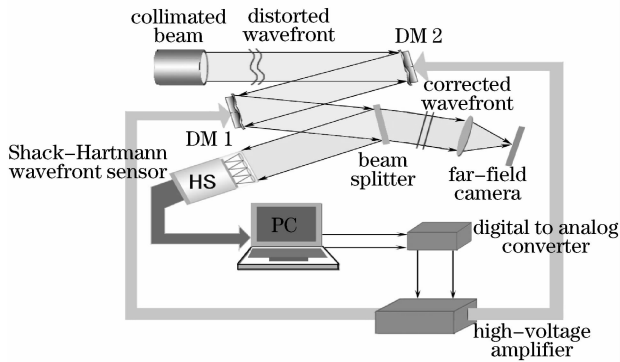


图 3 组合变形镜自适应光学实验系统示意图  
Fig. 3 The CDM adaptive optics system scheme

录波前和远场光斑。

两块 32 单元方形排列变形镜其驱动器交错排列构成组合波前校正器, 通光孔径为其公共部分内切圆, 有效驱动器各自 26 个, 空间匹配布局和坐标系选取如图 4 所示。实验目的主要为验证组合变形镜空间校正能力, 因此波前探测部分使用了高分辨率哈特曼波前传感器, 子孔径数为  $30 \times 30$  内切圆(有效孔径 692 个), 变形镜驱动器和哈特曼子孔径对应关系如图 5 所示, 对系统时间特性则没有特别要求。

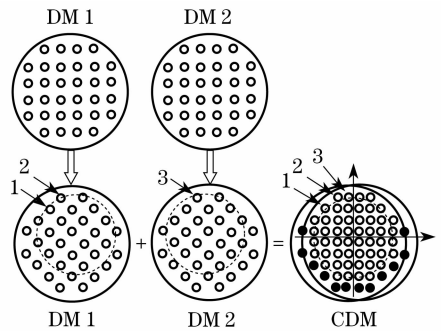


图 4 实验系统组合变形镜驱动器空间布局  
Fig. 4 The actuator configuration of DM1, DM2 and CDM in experiment

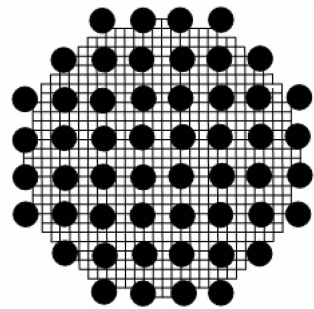


图 5 实验系统哈特曼子孔径(方格)和变形镜驱动器(实心圆)空间对应关系

Fig. 5 The configuration of sub-apertures (squares) and actuators (filled circles) of CDM AO system

实验系统的各部分主要参数如表 1 所示。

需要说明的是本实验室系统中, 主要考察对平行光源的高阶静态像差校正, 分离了倾斜引起的光束整体漂移, 衍射理论分析可以证明对于近似平行光的小像差波前近距离传输时波前变化误差很小, 因此为简化系统可以省去  $4F$  系统连接, 而使两变形镜就近放置, 对于实际目标成像系统则必须考虑  $4F$  系统连接。

表 1 实验系统主要参数

Table 1 The main parameters of the experimental system

Wavelength	632.8 nm	Available aperture diameter	112 mm
Deformable mirror		Hartmann wavefront sensor	
The number of available actuator	26+26	The number of sub-apertures	30×30, 692 (available)
Adjacent actuator interval in single DM	23 mm	Sample frequency	25 Hz
Coupling coefficient in single DM	5%	Sub-aperture size (W×H)	16×16 /pix.
Max displacement in single DM	±4 μm/±400 V	Sensitiveness	0.1λ /pix. /sub-aperture
		Wavefront reconstruct precision	First 65 <sup>th</sup> order Zernike polynomials
The digital to analog converters		The far-field image system	
Voltage output ranges	±5 V	Focus	3666.2 mm
Differential linearity error	<0.01%	Digitization	14 bit
The high voltage amplifier		Pixel size	8 μm
Voltage gain	100		

系统闭环工作之前,在实验光路中插入标准平面镜,仔细调节,观察远场获得近衍射极限光斑时对哈特曼波前传感器进行定标。标定波前 100 帧平均 PV 值  $0.1142\lambda$ , 均方根误差 (RMS 值)  $0.0171\lambda$ 。系统闭环工作时,两变形镜将等效为一 52 单元变形镜,因此可以使用经典的基于线性原理和斜率探测的直接斜率控制法<sup>[13]</sup>。首先测量实验布局下变形镜驱动器到哈特曼波前传感器的斜率响应矩阵,然后计算电压控制矩阵作为系统传递函数。实验中组合变形镜控制矩阵条件数为 14.2,可以满足系统稳定工作,闭环使用简单积分控制。

## 4 仿真计算和实验结果

### 4.1 实验系统对单阶像差校正能力的仿真计算结果

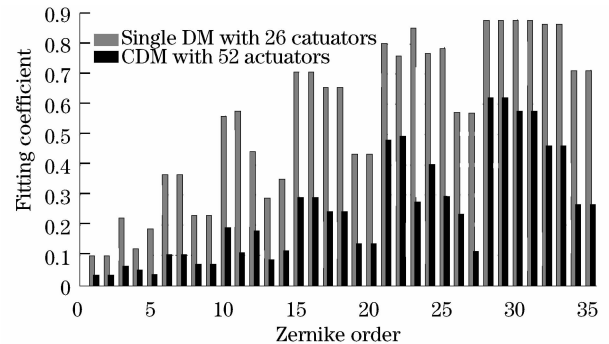
首先在 32 单元变形镜参数的基础上(其中高斯指数 2.6,交连值 5%,极间距 23 mm),利用(2)~(4)式,对系统中单块 26 单元变形镜(图 4 虚线部分)及由两块组成的 52 单元组合变形镜校正前 35 阶 Zernike 像差的情况进行了仿真计算。由于 Zernike 像差和变形镜驱动器排布的对称性和反对称性,变形镜 1 和 2 单独校正时,对单阶像差的拟合精度是相同的,因此只需将变形镜 1 和组合变形镜的校正结果作为对比。

定义拟合精度系数  $\beta$  为拟合波前残差的 RMS (均方根值)与原始波前的 RMS 的比值,可以表示为

$$\beta_j = \left[ \iint \varphi_{ij}^2(x,y) dx dy \right]^{1/2} / \left[ \iint Z_j^2(x,y) dx dy \right]^{1/2}, \quad (5)$$

其中  $j$  为 Zernike 序数,采用文献[1]中顺序,  $Z_j$  为第  $j$  阶 Zernike 像差,  $\beta$  越小对波前的拟合效果就越

好。计算结果如图 6 所示。可以看到由于校正单元和等效交连值的增加,组合变形镜大大提高了波前的空间校正能力。



6 组合变形镜和单一变形镜对 Zernike 像差拟合精度比较  
Fig. 6 Fitting coefficients of CDM and single DM for Zernike aberrations

### 4.2 实验系统对静态像差的实际校正结果和讨论

由于制作工艺缺陷,变形镜面形并不理想,加之其他光学元件不完美和位置调节误差,光路中存在较大的静态系统像差,闭环实验中就以此作为校正对象。

利用哈特曼传感器得到的波前数据,根据衍射知识可以方便地计算出近场和远场光束质量,并与真实远场对比。校正前系统像差波前数据及计算和测量得到的远场光斑如图 7 所示。

同一光路中进行了变形镜 1(有效校正单元 26)单独校正和组合变形镜(有效校正单元 52)校正两组实验作为对比。具体方法是:单一变形镜校正时,仅变形镜 1 工作,变形镜 2 只做为反射镜使用;组合变形镜校正时,两变形镜同时工作;这样可以保证对比实验中校正对象的一致性。多次实验表明系统按

照前面设想的直接斜率控制法可以成功闭环工作，受制于哈特曼采样频率和波前控制计算速度，系统闭环带宽不足 10 Hz，但对静态像差可以稳定校正，重复性良好，已经满足对空间校正能力研究的需要。

最终波前数据采用稳定后 100 帧平均，远场数据采用 20 帧平均。同时利用方程(2)~(4)结合变形镜参数可以计算得到针对初始波前的理论最佳校正效果作为参考对比，实验结果见表 2。

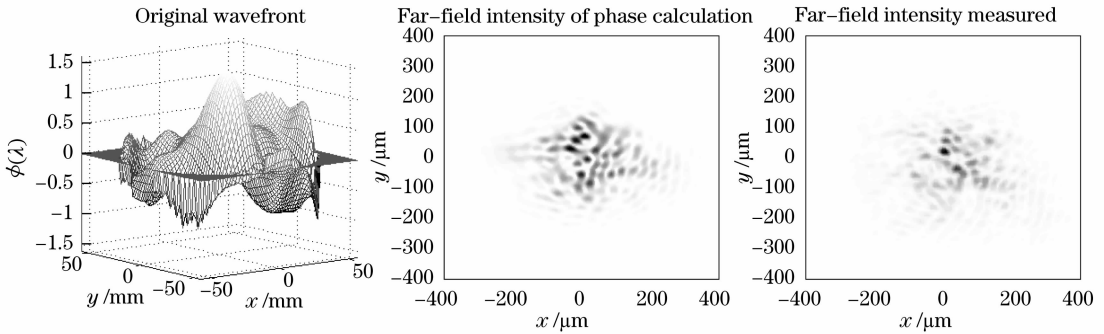


图 7 校正前系统像差和计算与测量的远场光斑

Fig. 7 Original wavefront and far-field image without correction

表 2 系统像差校正结果

Table 2 The correction results for system aberration

	Without correction	DM1 correcting (Measured)	DM1 correcting (In theory)	CDM correcting (Measured)	CDM correcting (In theory)
PV /λ	2.6660	1.3768	1.4019	0.8101	1.0943
RMS /λ	0.4744	0.1712	0.1581	0.1005	0.0831
Strehl ratio	0.0388	0.3457	0.4103	0.6761	0.8141

图 8 为理论最佳校正的残余波前和实验中波前传感器测量得到的残余波前数据。

曼测量的波前残差计算得到的远场光强分布以及成像系统测量得到的真实远场光斑。

图 9 为由理论最佳校正的波前残差和实际哈特

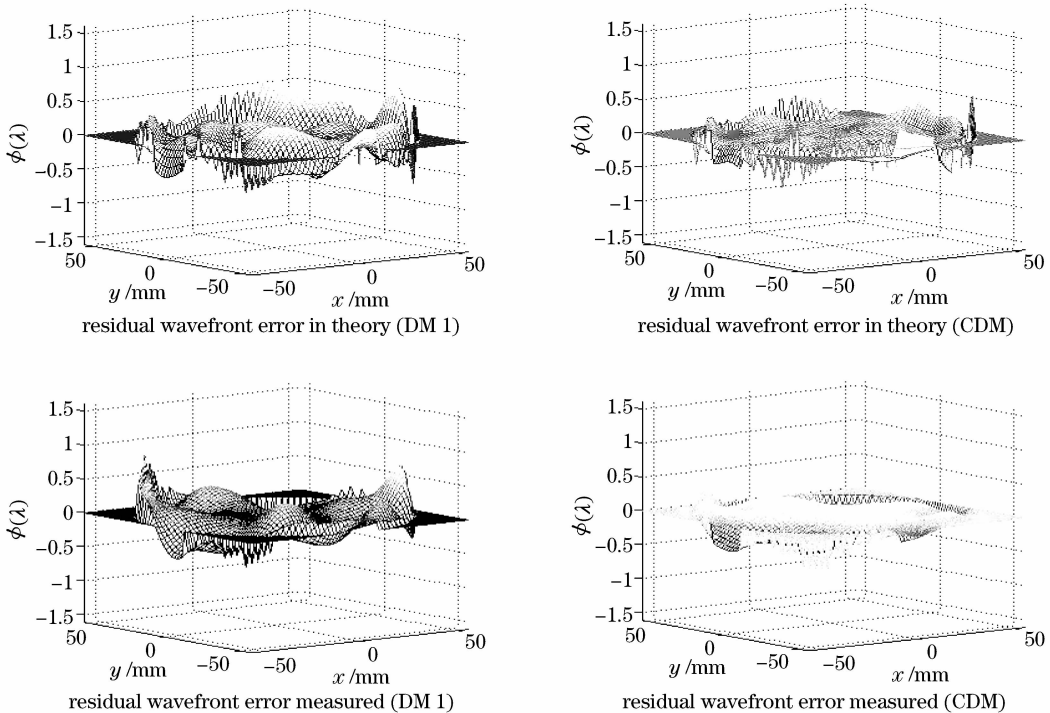


图 8 变形镜 1 和组合变形镜闭环校正的理论和实验测量残余波前

Fig. 8 The residual wavefront error in theory and measured

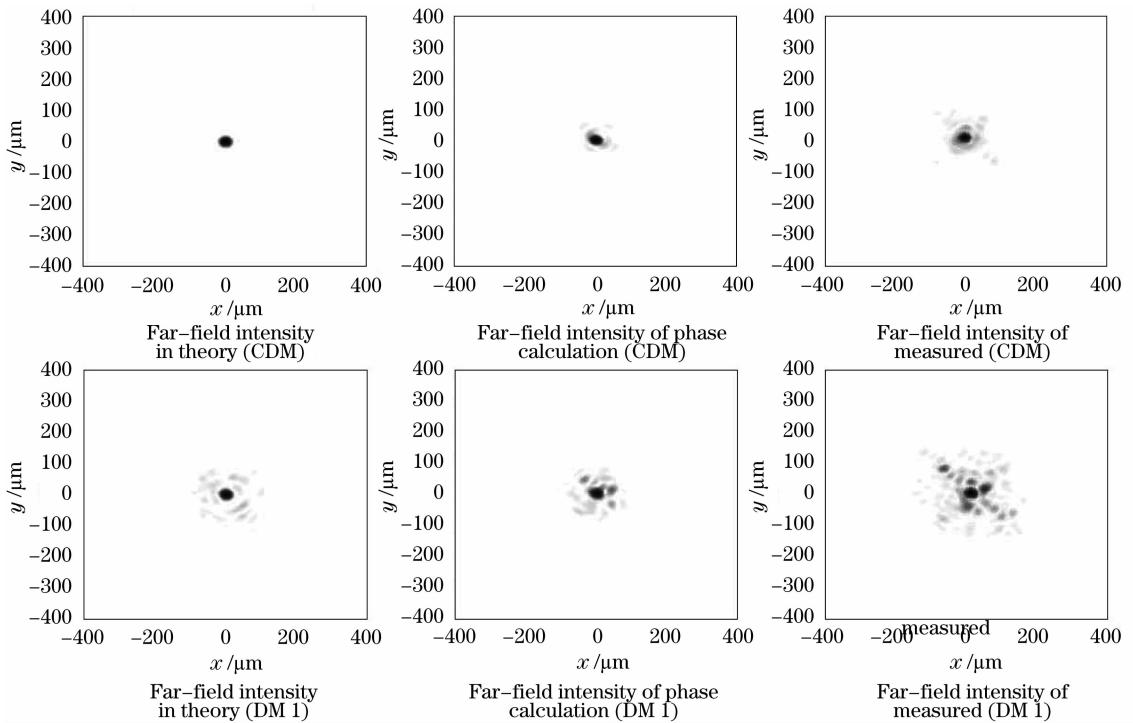


图 9 由理论校正波前、测量波前计算及成像系统获得的变形镜 1 和组合变形镜校正后远场光斑

Fig. 9 The far-field images in theory, of wavefront calculation and measured

实验结果表明由两变形镜组合成的波前校正器可以有效的提高像差的空间校正能力,远场像质明显优于单变形镜校正的情况,能量集中度大大提高,进一步计算可得光束质量  $\beta$  因子可以小于 4。实验得到的波前和远场数据与理论模型校正的效果基本一致,变形镜基本达到了对该像差的校正极限,证明了组合变形镜完全可以等效为一个多单元波前校正器在系统中按照单镜方法控制和工作,(2)式基本成立。组合变形镜空间校正能力的提高主要来自该方法有效的增加了校正单元,这有利于高阶像差的校正;增加了交连值,这有利于低阶像差的校正。

同时也看到实验结果还是低于理论校正能力,其误差主要来自以下几个方面:1)对哈特曼传感器,存在平行光的标定误差;2)分光镜的反射透射相位误差;3)两变形镜的位置匹配误差;4)光强变化引起的控制传递函数的测量和计算误差;5)环境气流和震动的影响;6)理论校正中使用的高斯影响函数模型与真实变形镜并不完全相同;7)变形镜面形存在非线性响应;8)实验中发现对单一变形镜部分理论上本应可以校正的自身面形误差却难以通过自身驱动器电压调整得到补偿,特别是当室温较低变形镜面形较差时,这是由变形镜自身应力结构所决定的制造缺陷,是残余波前的主要来源,而使用两镜时一定程度上可以互相补偿。其中 1)、2)、8)是

造成误差的主要方面。对初始面形的互相补偿这是简单仿真不能发现的。相信如果使用面形更好,单元数更多的变形镜将达到更好的校正效果。

## 5 结 论

在分析组合变形镜校正能力的基础上首次建立了基于多变形镜空间匹配波前校正器的完整自适应光学系统,实现了闭环波前校正,并且得到了良好的近场和远场校正效果。实验证明组合变形镜可以等效为单一多驱动器变形镜利用直接斜率法闭环控制校正,可以预见适用于单变形镜的其他各种控制算法同样也适用于通过光学共轭方式组合成的波前校正器,如研究较多的各种基于优化选择的无波前传感器自适应光学系统控制方法<sup>[14,15]</sup>相信基于其结构特点还可以发展出新的方法。组合变形镜有效地提高了波前校正单元数,扩大了单个变形镜参数的变化范围,而且可以对自身面形误差实现互补,这些都有利于在现有变形镜技术条件下使系统实现更好的空间像差校正性能。该方法的优势在于可以避免制造难于实现的高驱动器密度和高表面质量的变形镜,同时使各类变形镜的配合使用更加灵活多样。侧重研究了组合变形镜的空间校正能力,而对于系统结构带来的时间特性,空间匹配误差,非线性相加误差,以及 4F 系统连接引入的像差等还有待更加深入的研究。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun *et al.*. *Adaptive Optics*[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1996  
周仁忠, 阎吉祥, 赵达尊等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 2 Yang Zhengang, Chen Haiqing, Li Jie *et al.*. Lasers aberration compensation using an intra-cavity adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12):2205~2208  
杨振刚, 陈海清, 李捷等. 内腔自适应光学系统校正激光器畸变[J]. 光学学报, 2007, **27**(12):2205~2208
- 3 Hardy J. W, Lefebvre J. E, Koliopoulos C. L. Real-time atmospheric compensation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1977, **67**(3):360~369
- 4 Rao Changhui, Jiang Wenhan. Effectiveness analysis of adaptive optics system compensating atmosphere turbulence[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(4):469~475  
饶长辉, 姜文汉. 自适应光学系统对大气湍流补偿的有效性分析[J]. 强激光与粒子束, 1996, **8**(4):469~475.
- 5 Hu Shijie, Xu Bing, Wu Jian *et al.*. Aberration decoupling analysis for double deformable mirrors adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1687~1692  
胡诗杰, 许冰, 吴健等. 双变形镜自适应光学系统像差解耦研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(12):1687~1692
- 6 M. C. Roggemann, D. J. Lee. Two-deformable-mirror concept for correcting scintillation efforts in laser beam projection through the turbulent atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21):4577~4585
- 7 Diana C. C, Steven M. J, Dennis A. S *et al.*. High-resolution adaptive optics scanning laser ophthalmoscope with dual deformable mirrors[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(5):1305~1312
- 8 Yang Huafeng, Liu Guiling, Rao Changhui *et al.*. Spatial frequency analysis of wavefront compensation capabilities about the 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
- 9 Wu Yi Wang Yingjian, Gong Zhiben. Analysis of the residual wavefront variance influenced by the nonlinear response of deformable mirror in wavefront correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(8):1028~1031  
吴毅, 王英俭, 龚知本. 变形镜波前校正非线性响应剩余位相方差分析[J]. 光学学报, 1995, **15**(8):1028~1031
- 10 Yang Huafeng, Liu Guiling, Rao Changhui *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
- 11 Liu Guiling, Yang Huafeng, Rao Changhui *et al.*. Experimental verification of combinational-deformable-mirror for phase correction [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10):559~562.
- 12 Rao Xuejun, Ling Ning, Jiang Wenhan. Experiment of measuring influence function of deformable mirror using digital interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(10):1446~1451  
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):1446~1451
- 13 Jiang Wenhan, Li Huagui. Hartman - Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm [C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1271**:103~108
- 14 Yang Huizhen, Chen Bo, Li Xinyang *et al.*. Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):205~210  
杨慧珍, 陈波, 李新阳等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究 [J]. 光学学报, 2008, **28**(2):205~210
- 15 Yang Ping, Xu Bing, Jiang Wenhan *et al.*. Study of a genetic algorithm used in an adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1628~1632  
杨平, 许冰, 姜文汉等. 遗传算法在自适应光学系统中的应用 [J]. 光学学报, 2007, **27**(9):1628~1632