

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0427-05

# 微加工薄膜变形镜电压解耦

李恩德<sup>1,2</sup>, 戴云<sup>1</sup>, 史国华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)  
(<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 针对微加工薄膜变形镜的交连值很大而且存在多级交连的特性,通过对连续面形变形镜拟合像差原理的理论分析,根据最小二乘原则,以模式法建立了微加工薄膜变形镜的电压解耦模型。测量并用高斯函数拟合了微加工薄膜变形镜的面形影响函数,计算出高斯指数、特征宽度和交连值分布。依据模式法电压解耦模型,实现对前 10 阶 Zernike 多项式的拟合并分析了拟合残差。结果表明,模式法可以作为微加工薄膜变形镜的电压解耦模型。为搭建基于微加工薄膜变形镜的自适应光学系统提供了算法支持。

**关键词** 自适应光学; 微加工薄膜变形镜; 电压解耦; 模式法

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

## Voltage Decoupling of Micromachined Membrane Deformable Mirror

LI En-de<sup>1,2</sup>, DAI Yun<sup>1</sup>, SHI Guo-hua<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** Due to the coupling of micromachined membrane deformable mirror (MMDM) is much larger than that of the common deformable mirror. The voltage-decoupling model for a 37-channel MMDM is established through theoretically and experimentally analyzing the principle of fitting aberration of a continuous-surface deformable mirror. The fitting error for the first 10-order Zernike mode is carried out by means of the measured influence function of and coupling among actuators. The index and width of Gaussian function which is used for fitting the influence function is calculated. The experiment result demonstrate that Zernike mode can be act as the control voltage decoupling algorithm for the adaptive optics system based on MMDM.

**Key words** adaptive optics; micromachined membrane deformable mirror; voltage decoupling; Zernike mode

## 1 引 言

自适应光学系统应用于不同领域时,研究的侧重点各有不同,大气校正自适应光学系统是对湍流引起的波前像差进行校正,由于像差实时变化的特点,闭环控制带宽和像差校正能力需同时满足一定的技术指标才能达到期望的校正效果。民用领域应用的自适应光学系统,不追求最高的校正效果,而是追求系统能够在有限成本条件限制下满足应用需要,如人眼眼底成像<sup>[1,2]</sup>、光纤耦合<sup>[3,4]</sup>、光开关<sup>[5]</sup>、激光光束像差校正<sup>[6,7]</sup>等工业应用的自适应光学系统,若能校正这些系统中重复出现的静态像差或随时间变化缓慢的像差,即能满足一定的应用需要,因

此时域闭环带宽的设计要求可以相对弱化。但如何针对波前像差空间分布特点优化波前校正器、波前传感器设计,最大限度发挥波前校正器的校正能力,提高自适应系统性价比,对于自适应技术向民用领域推广具有重要的实用意义。

变形镜是自适应光学系统的三大核心之一,目前自适应光学系统采用的变形镜主要有:压电陶瓷、微加工薄膜变形镜(MMDM)、液晶等,工程应用较多的是压电陶瓷变形镜,因此以其为对象进行的研究较多,但成本昂贵。相反,微加工薄膜变形镜早在 1977 年就研制成功,近年来由于微细加工技术的发展,工艺日趋成熟,使微加工薄膜变形镜在低成本、

**基金项目:** 中国科学院光电技术研究所所长基金和中国科学院研究生院社会实践类基金资助课题。

**作者简介:** 李恩德(1976—),男,四川平昌人,中国科学院光电技术研究所助理研究员,博士研究生,主要从事自适应光学相关工作的研究。E-mail: li\_ende@yahoo.com.cn

小型化的自适应光学系统中的应用成为可能。但相对于常见的变形反射镜,微加工薄膜变形镜的交连值大而且存在多级交连,因此,如何实现微加工薄膜变形镜的电压解耦关系到能否实现对其有效控制,同时也是搭建基于微加工薄膜变形镜的自适应光学系统的前提。文献[8]用叠代法实现了微加工薄膜变形镜的电压解耦,并用 Zernike 多项式为基函数分析了微加工薄膜变形镜的拟合能力。

根据最小二乘法原理,以模式法建立了微加工薄膜变形镜的电压解耦模型,实际测量并用高斯函数拟合了微加工薄膜变形镜的面形影响函数,分析了交连值分布,依据模式法电压解耦模型,实现了对前 10 阶 Zernike 模式的拟合,经过分析拟合残差后指出模式法可以作为微加工薄膜变形镜的电压解耦模型,为搭建基于微加工薄膜变形镜的自适应光学系统提供了控制算法。

## 2 微加工薄膜变形镜电压解耦

### 2.1 连续表面变形镜驱动器面形影响函数

连续面形变形镜是目前自适应光学系统广泛采用的波前校正器,它通过向驱动器施加控制电压,产生需要的镜面变形,改变入射光束的波前相位。驱动器上施加电压与产生面形变化的关系由变形镜产生变形的机理、制作工艺等因素决定,通常用面形影响函数描述,表示为控制电压和变形镜面位置坐标的函数,即

$$g_i(x, y) = u_i(V_i) f_i(x, y), \quad (1)$$

式中  $i$  为变形镜驱动器的序号,  $u_i(V_i)$  是关于控制电压的函数,对微加工薄膜变形镜,  $u_i(V_i)$  是关于控制电压平方的函数。  $f_i(x, y)$  是面形影响函数。文献[9]分析了分立驱动连续面形压电陶瓷变形镜影响函数可用如下高斯函数表示:

$$g_i(x, y) = k \times \exp[-(\sqrt{x^2 + y^2}/w_0)^a], \quad (2)$$

式中  $a$  为高斯指数,  $w_0$  为特征宽度,  $\sqrt{x^2 + y^2}$  为变形反射镜表面上各点相对于驱动器中心的距离。文献[5]等的研究表明:微加工薄膜变形镜的面形影响函数均具有类似的表达式。

变形镜对于任意像差的拟合,实际上是通过组合不同驱动器的控制电压实现,即

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^N g_i(x, y) = \sum_{i=1}^N u_i(V_i) f_i(x, y), \quad (3)$$

同时,  $\varphi(x, y)$  可以展开成 Zernike 多项式的线性组合,即

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^K a_n Z_n(x, y), \quad (4)$$

式中  $\varphi(x, y)$  为被拟合波前,  $N$  为变形镜驱动器单元数,  $K$  为 Zernike 多项式项数。

### 2.2 模式法

模式法的定义由哈特曼传感器模式法波前重构引出,是研究较多的一种算法。电压解耦过程分为两步:

首先根据哈特曼测量的斜率,应用模式算法将被测波前展开为一组模式函数序列的线性组合,常用的模式函数是 Zernike 多项式,拟合准则可表示为

$$\sum \left[ \left( G_{nx} - \sum_{k=1}^h a_k Z_{nkx} \right)^2 + \left( G_{ny} - \sum_{k=1}^h a_k Z_{nky} \right)^2 \right] \rightarrow \min, \quad (5)$$

其中  $Z_{mnx}, Z_{mny}$  是第  $n$  阶 Zernike 多项式在第  $m$  个子孔径  $x, y$  方向的偏导数,  $h$  为展开的 Zernike 阶数。哈特曼测量的波前像差为:

$$\varphi(x, y) = \sum a_i \cdot Z_i(x, y), \quad A = Z_{xy}^+ G, \quad (6)$$

$A = (a_1, a_2, \dots, a_h)^T$  是 Zernike 多项式系数,  $Z_{xy}$  是根据各阶多项式在子孔径上的偏导数生成的矩阵。

第二步,将求得的波前模式和已知的变形镜影响函数代入各驱动器的控制电压函数。式中

$$\phi = \begin{bmatrix} (f_1, \varphi) \\ (f_2, \varphi) \\ \dots \\ (f_N, \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f_1, Z_1) & (f_1, Z_2) & \dots & (f_1, Z_h) \\ (f_2, Z_1) & (f_2, Z_2) & \dots & (f_2, Z_h) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (f_N, Z_1) & (f_N, Z_2) & \dots & (f_N, Z_h) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_h \end{bmatrix} = F_Z \cdot A = F_Z \cdot Z_{xy}^+ G, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_N \end{bmatrix} = F \cdot \phi = \begin{bmatrix} (f_1, f_1) & (f_1, f_2) & \dots & (f_1, f_N) \\ (f_2, f_1) & (f_2, f_2) & \dots & (f_2, f_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (f_N, f_1) & (f_N, f_2) & \dots & (f_N, f_N) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} (f_1, \varphi) \\ (f_2, \varphi) \\ \dots \\ (f_N, \varphi) \end{bmatrix} = F \cdot F_Z \cdot Z_{xy}^+ \cdot G. \quad (8)$$

从模式法电压解耦的算式可以看出,模式法实质上是两次应用最小二乘准则,先根据斜率测量值估计相位的模式函数表达式,再根据相位函数和面形影响函数估计驱动器控制电压函数。在实际应用时,(8)式中的矩阵  $F$  由变形镜驱动器影响函数确定,  $F_z$  由变形镜驱动器影响函数和重构模式函数确定,  $Z_{xy}^+$  由重构模式函数和哈特曼子孔径布局确定,均可离线标定、计算,因此闭环时控制电压根据(8)式能够直接计算,无需分步进行。

### 3 实验及结果

#### 3.1 面形影响函数测量

当仅由单一驱动器推动时,镜面所产生的形状称为该变形镜的面形影响函数。该函数与变形镜驱动器之间的距离、镜面材料刚度、驱动器刚度以及驱动器配置形状有关。图 1 和图 2 分别是微加工薄膜变形镜的初始面形和 1 号驱动器加电压为 180 V 时的面形(单位:1  $\mu\text{m}$ )。

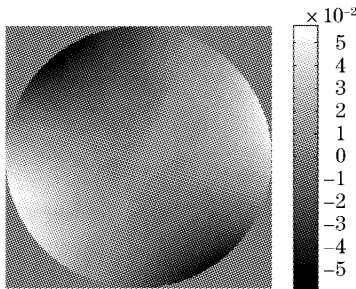
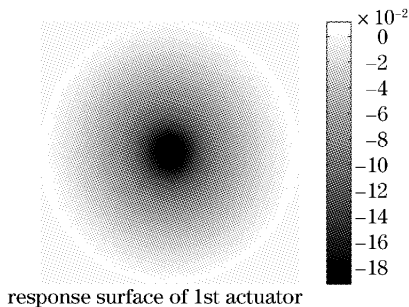


图 1 原始面形

Fig. 1 Initial mirror surface



response surface of 1st actuator

图 2 1 号驱动器的影响函数

Fig. 2 Influence function of No. 1 channel

图 3 为 1 号驱动器的面形影响函数横方向截线图。依据最小二乘准则,用高斯函数拟合结果为:  $g(r) = -0.226 \times \exp[-(|r|/95.04)^{1.27}]$ , 其中, 95.04 单位为像素,1 像素 = 22.7  $\mu\text{m}$ , -0.226 单位为  $\mu\text{m}$ 。

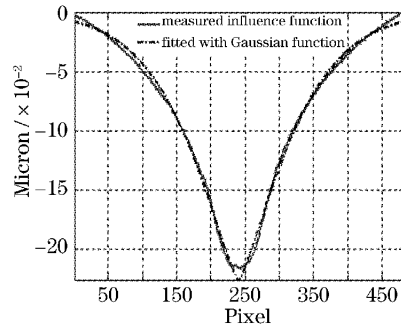


图 3 影响函数及其高斯拟合

Fig. 3 Influence function and the result fitted with Gaussian function

#### 3.2 交连值测量

对于连续面形变形镜,当单一驱动器推动时,其相邻的驱动器由于受到镜面的内应力作用而发生的形变和主驱动器的形变之比,称为交连值,其值与变形镜的极间距和镜面材料有关。交连值表征的是驱动器之间的关联程度,交连值太小,会引入高频像差,而交连值太大,则无法拟合高阶像差,因此,将交连值一般控制在 4%~12%。

但是对于微加工薄膜变形镜,其交连值很大,图 4 是测量的中心 1 号驱动器的交连值分布,随极间距离的变大,交连值分别为 64%, 41%, 30%, 14% 和 7.5%。相对于用压电材料制作的变形镜,其交连值大很多,这主要是由于极间距很小,材料的刚度较小以及固定方式不同所致。其结果降低了变形镜的有效空间分辨率,使控制系统更加复杂。

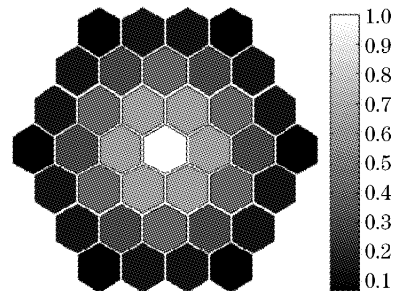


图 4 1 号驱动器的交连值

Fig. 4 Coupling of No. 1 channel

#### 3.3 拟合残差

拟合残差是指对给定模式和实际拟合的模式之间的差异,常用它们的峰谷差(PV)以及均方根(RMS)之间的差异来表征拟合残差大小。结合(4)式和(8)式,对于任意组合的模式系数,可以计算出对应的控制电压,据此用微加工薄膜变形镜拟合了

前 10 阶 Zernike 模式,图 5 显示了实际拟合的前 10 阶 Zernike 模式和理想的模式之间的峰谷差及均方根对比,对前 10 阶 Zernike 模式,峰谷差值的平均残差为 10.25%,均方根的平均残差为 9.8%。图 6

列举了拟合的第六阶及第七阶模式的情况(理想面形、实际面形、残差分布以及电压分布)。显然,对前 10 阶模式,拟合残差比较小,说明微加工薄膜变形镜能较好地拟合前 10 阶 Zernike 模式。

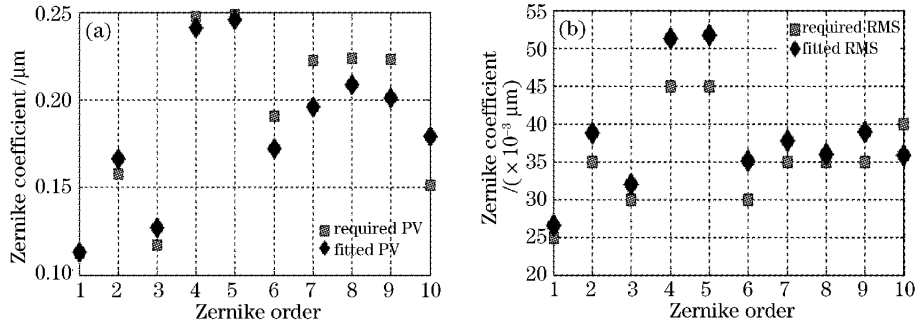


图 5 实际和理论拟合的前 10 阶 Zernike 模式的 PV 和 RMS 值对比

Fig. 5 Difference between required and obtained values of both peak-to-valley (PV) and root-mean-square (RMS) for the first 10-order Zernike mode

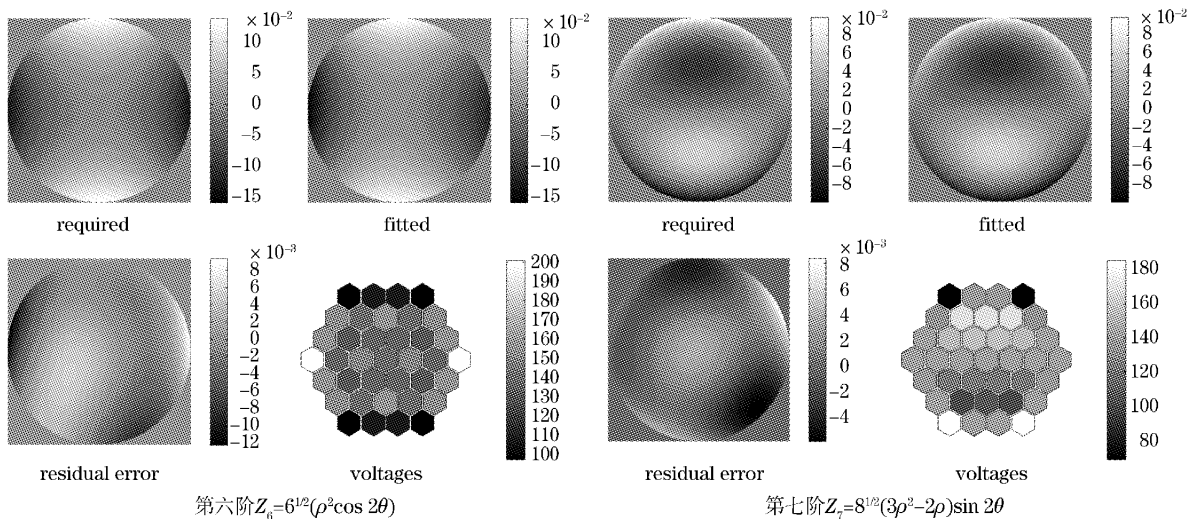


图 6 拟合第六、七项 Zernike 模式

Fig. 6 Fitted 6th and 7th parts of Zernike mode

### 4 结 论

通过对连续面形变形镜拟合像差原理的理论分析,根据最小二乘原则,以模式法建立了微加工薄膜变形镜的电压解耦模型。测量并用高斯函数拟合了微加工薄膜变形镜的面形影响函数,计算出高斯指数、特征宽度和交连值分布。依据模式法电压解耦模型和实际测量的每个驱动器的面形影响函数,实现了对前 10 阶 Zernike 多项式的拟合并分析了用峰谷差和均方根表示的拟合残差。实验结果表明:模式法可以作为微加工薄膜变形镜的电压解耦模型。为搭建基于微加工薄膜变形镜的自适应光学系统提供了算法支持。

致谢 感谢杨梅高工和官春林研究员对实验的支持和帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Lijun Zhu, Pang-Chen Sun, Dirk Uwe Bartsch *et al.*. Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38** (1): 168~176
- 2 Enrique J. Fernandez, Ignacio Iglesias, Pablo Artal. Closed-loop adaptive optics in the human eye [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(10): 746~748
- 3 Mark L. Plett, Pierre R. Barbier, David W. Rush. Compact adaptive optical system based on blind optimization and a micromachined membrane deformable mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(3): 327~330

- 4 Frederic Gonte, Alain Couteville, Rene Dandliker. Optimization of single-mode fiber coupling efficiency with an adaptive membrane mirror [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(5): 1073~1076
- 5 Frederic Gonte, Yves-Alain Peter, Hans-Peter Herzig *et al.*. Massive free-space optical  $1 \times N$  fiber switch using an adaptive membrane mirror [C]. *SPIE*, 2002, **4493**: 64~70
- 6 Gleb Vdovin, Vadim Kiyko. Intracavity control of a 200-W continuous-wave Nd:YAG laser by a micromachined deformable mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(11): 798~800
- 7 Erik Zeek, Kira Maginnis, Sterling Backus *et al.*. Pulse compression by use of deformable mirrors [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7): 493~495
- 8 Enrique J. Fernandez, Pablo Artal. Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(9): 1056~1069
- 9 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