

MEMS 微变形镜单元间耦合的优化控制研究

刘 勇, 许晓慧, 李保庆, 张晋弘, 褚家如

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230027)

摘要:通过计算 MEMS 微变形镜校正畸变波面后的残余误差, 研究不同单元间耦合情况对变形镜校正效果的影响. 针对连续镜面 MEMS 微变形镜单个致动器单元工作时, 相邻及以外的单元都会有一个变形量, 用耦合系数来表征单元工作时对相邻单元变形量的影响程度. 以单元间距为 3 mm 的 10×10 单元阵列 MEMS 微变形镜为例, 研究了变形镜校正不同畸变波面时, 最佳耦合系数与波面畸变因素对应关系. 当校正对象为前 20 阶 Zernike 多项式波面, 此变形镜的最佳耦合系数为 10%. 分析了单元间距分别为 2, 2.5, 3, 3.5, 4 mm 时, 10×10 单元阵列 MEMS 微变形镜校正效果的变化情况; 不同单元间距对应的最佳耦合系数分别为 12%, 11%, 10%, 9%, 8%.

关键词: MEMS; 变形镜; 影响函数; 耦合系数

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2010.04.011

Coupling control of actuators for MEMS-based deformable mirror

LIU Yong, XU Xiaohui, LI Baoqing, ZHANG Jinhong, CHU Jiaru

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Based on the correction of the residual error of wave-front correction, the relationship between the coupling of actuators and correction capability of MEMS-based deformable mirror (DM) is analyzed. When a single actuator of the continuous surface DM works, it creates a displacement at the other actuators, which is described using coupling coefficient (cc). For a MEMS-based DM with a 10×10 actuator array, with the distance between two adjacent actuators (b) being 3 mm, correcting the first 20 Zernike modes, the best coupling coefficient is 10%. Different distances between two adjacent actuators (b) correspond to different correction capabilities and different coupling coefficients. Corresponding to b of 2, 2.5, 3, 3.5, and 4 mm, the best coupling coefficient of the DM is 12%, 11%, 10%, 9%, and 8%, respectively.

Key words: MEMS; deformable mirror; influence function; coupling coefficient

0 引言

变形镜作为一种波前校正器, 是自适应光学系统的核心器件之一, 在军事及民用两方面都有很好

的应用前景^[1]. 然而, 传统的大型变形镜因其驱动电压高, 质量、体积大且成本高昂, 应用场合受到限制, 主要用于地基天文望远镜等大型设备中, 补偿大气扰动带来的波前畸变^[2]. MEMS 技术的发展, 为变

收稿日期: 2008-08-08; 修回日期: 2008-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(50605061)资助.

作者简介: 刘勇, 男, 1985年生, 硕士生. 研究方向: 变形镜性能分析, 微悬臂梁研究. E-mail: liuyong1@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 褚家如, 教授. E-mail: jrchu@ustc.edu.cn

形反射镜的设计制造提供了新的思路及方法,拓宽了变形镜的应用前景. MEMS 微变形镜因其小型化、集成化、低能耗等特点,可以用于人眼视觉成像校正^[3]、激光通讯信号补偿^[4]、星载光学系统成像校正^[5]等等. 以人眼视觉成像校正为例,虽然在十三世纪人们就开始用眼镜矫正离焦,十九世纪矫正散光,但直到目前,普通眼镜仅局限于校正离焦及散光^[6]. MEMS 变形镜用于人眼视网膜成像校正时,有望校正所有视觉像差,包括目前普通眼镜尚不能校正的球差、慧差及一些不规则像差.

与传统的大型变形镜一样, MEMS 微变形镜的镜面分为连续、分离两种形式. 分离镜面之间的间隙会丢失波前信息,镜面变形不是连续变形,这些对波前校正均不利. 连续镜面不存在镜面间隙,通过单元耦合调节,可以实现复杂光滑镜面外形. 目前研究的 MEMS 微变形镜驱动方式以静电驱动和压电驱动^[7]为主. 其中,研究静电驱动的以美国 Boston 大学^[8]、MEMS Optical 公司,荷兰的 Delft 大学和 OKO 公司等为代表;研究压电驱动的以美国 NASA 的 Jet Propulsion 实验室^[9]等为代表. 尽管驱动方式不同,但静电和压电驱动连续镜面变形镜的单元间耦合规律是相同的. 从目前文献报道来看,关于 MEMS 微变形镜的研究主要是器件加工工艺及器件性能测试,变形镜的结构参数设计缺乏相应的理论指导. 因此,本文以连续镜面 MEMS 微变形镜为对象,分析了单元间耦合关系对 MEMS 微变形镜校正效果的影响规律,从而对单元间耦合进行优化设计,为 MEMS 微变形镜的结构设计提供理论依据.

1 变形镜校正效果的评价方法

待校正波面经变形镜校正后的残余误差大小是变形镜的主要技术要求之一,校正残差小则镜面面形越接近待校正波面,变形镜的校正效果越好. 设 $w(x, y)$ 为待校正的波面, $m(x, y)$ 为重构后的镜面面形. 变形镜各单元致动器均独立致动, $m(x, y)$ 可表示为

$$m(x, y) = \sum_{j=1}^N a_j I_j(x, y) \quad (1)$$

其中, a_j 为第 j 个致动器的驱动力, $I_j(x, y)$ 为单个致动器在单位力驱动下的镜面面形影响函数, N 为致动器的个数. 用镜面面形 $m(x, y)$ 去匹配待校正波面 $w(x, y)$, 得到校正后的波前方差为

$$\sigma^2 = \int_A [w(x, y) - m(x, y)]^2 dx dy \quad (2)$$

将式(1)代入上式,得

$$\sigma^2 = \int_A [w(x, y) - \sum_{j=1}^N a_j I_j(x, y)]^2 dx dy \quad (3)$$

令 σ^2 最小, 即有

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial a_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

由式(4)可导出 N 个方程, 进而确定系数 a_j ($j = 1, 2, 3, \dots, N$)^[10-11].

变形镜单元驱动力存在上限, 即系数 a_j 存在最大允许值, 这就要求在计算中必须对 a_j 的值进行约束. 利用约束最小二乘法求解系数 a_j , 由于 $I_j(x, y)$ 已知, 镜面面形 $m(x, y)$ 由式(1)计算确定. 实际情况中, 待校正波面及重构出的镜面均为矩阵形式. 校正残差可表示为均方根的形式

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K [w(x_i, y_j) - m(x_i, y_j)]^2}{K^2}} \quad (5)$$

K 表示镜面一维方向上的数据点个数. 校正残差 r 越小, 变形镜校正效果越好. 本文通过调节单元间耦合关系, 分析不同耦合条件下校正残差的变化, 研究耦合条件变化对变形镜校正效果的影响.

2 单元间耦合对波面校正的影响

针对连续镜面 MEMS 微变形镜, 单个致动器单元工作时, 其他单元也会产生一个变形量. 我们以耦合系数来表征单元工作时对相邻单元变形量的影响程度. 本文以单阶 Zernike 多项式表示的波面作为待校正波面, 通过改变单元耦合系数和单元间距, 研究波面经变形镜校正后残余误差的变化, 得出 MEMS 微变形镜校正效果受耦合系数、单元间距影响的内在规律, 实现单元间耦合的优化设计.

2.1 面形影响函数和耦合系数

镜面随单个致动器推动而产生的面形变化所对应的数学表达称为面形影响函数, 传统变形镜的面形影响函数近似为高斯分布^[10]. 文献[12-13]给出了测量连续镜面 MEMS 微变形镜所得的面形影响函数, 笔者对文献中的面形影响函数进行了函数拟合, 拟合结果非常接近高斯分布. 此外, 利用有限元分析文献[14]中的微变形镜, 仿真计算出的面形影响函数近似为高斯分布. 在下面的数值计算中, MEMS 微变形镜的面形影响函数为

$$I(r) = coe \cdot e^{-rep \cdot r^2/b^2} \tag{6}$$

其中, coe 是单个致动器以单位力推动镜面时, 镜面的最大变形量; r 表示离开此致动器的距离; b 表示相邻致动器的间距; rep 是面形影响函数的参数.

耦合系数 cc 定义为: 当单个致动器工作时, 相邻致动器单元变形量与此致动器单元变形量的比值. 由式(6)得耦合系数 cc 的表达式

$$cc = \frac{I(b)}{I(0)} = e^{-rep} \tag{7}$$

上式表明耦合系数 cc 只取决于参数 rep .

2.2 耦合系数与校正效果的关系

本小节以 10×10 阵列的连续镜面 MEMS 微变形镜为研究对象, 相邻单元之间的中心距离为 3 mm. 面形影响函数中的 coe 参数取 $2 \mu\text{m}$, 这与 MEMS 微变形镜的实际参数接近^[8-9,14]. 在此, 为方便计算, 认为所有单元的面形影响函数一样, 仅仅是坐标上的平移^[12], 不考虑边缘单元受约束情况. 图 1 为耦合系数为 15% 时, 中心单元推动镜面得到的面形影响函数图.

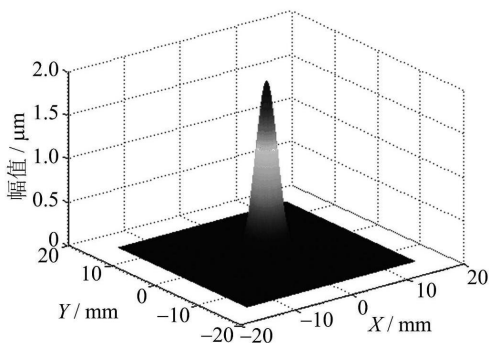


图 1 耦合系数为 15% 时的影响函数图

Fig.1 Influence function of DM with $cc = 15\%$

取 3 到 8 阶 Zernike 多项式, 归一化后分别作为待校正波面, 波面幅值为 $1 \mu\text{m}$. 采用第 2 节中的方法, 分别求出变形镜在校正归一化 3~8 阶 Zernike 多项式时的校正残差. 图 2 是处理后的 3~8 阶 Zernike 多项式的波面图. 图 3 是单元耦合系数为 15% 时, 变形镜校正图 2 波面所得到的镜面面形.

以下重点讨论当耦合系数在 5% 到 35% 之间, 变形镜校正 Zernike 多项式波面时校正残差的变化. 通过计算发现, 变形镜在校正入射波面时, 存在一个最优耦合系数使得校正残差最小, 不同入射波面对应的最优耦合系数不同. 图 4 是在不同耦合系数下, 变形镜校正不同入射波面的情况, 以第 3, 5, 7

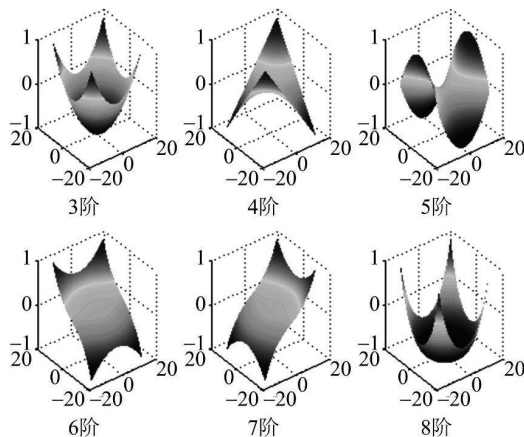


图 2 归一化后 3~8 阶 Zernike 多项式波面

Fig.2 The first 3~8 normalized Zernike modes

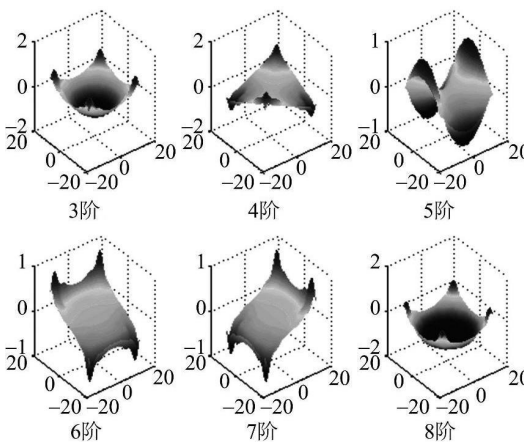


图 3 拟合出的镜面面形

Fig.3 The mirror shape according to Fig.2

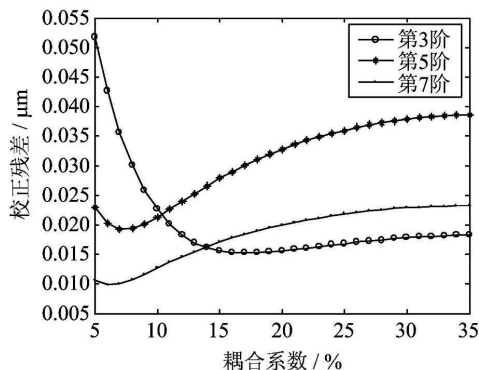


图 4 不同波面校正残差与耦合系数关系

Fig.4 Relationship between residual error and cc for different wavefronts

阶 Zernike 多项式为例.

不同阶 Zernike 多项式对应不同性质的波面误差, 如第 3 阶对应离焦误差、第 4 阶对应像散误差等

等. 表 1 列出了 MEMS 微变形镜在校正 Zernike 多项式波面时, 入射波面与最优耦合系数的对应关系. 从表 1 数据可以看出, 在校正不同波面误差时, 最佳的耦合系数是不同的. 因此, 在设计变形镜时要考虑其应用场合, 根据变形镜校正的波面误差的性质的不同, 相应地调节变形镜单元的耦合系数, 以达到最佳校正效果.

表 1 不同入射波面对应不同最优耦合系数

Tab. 1 Optimal coupling coefficients according to different wavefronts

入射波面 (Zernike)	3 阶 (离焦)	4 阶 (象散)	5 阶 (象散)	6 阶 (慧差)	7 阶 (慧差)	8 阶
最优耦合 系数/%	17	9	7	6	6	22

实际情况中, 变形镜的校正对象往往不是单一的波面误差, 而是多种波面误差的综合. 利用以上算法, 我们分析了在不同耦合系数下, 变形镜校正前 20 阶 Zernike 多项式波面的校正残差, 并对相同耦合系数下的校正残差求平均, 找出最小平均残差值对应的耦合系数, 作为 MEMS 微变形镜的最优耦合系数^[11]. 平均校正残差计算如下:

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^{20} r_i}{20} \quad (8)$$

其中, r_i 为变形镜校正第 i 项 Zernike 多项式时的校正残差. 经计算, 当耦合系数为 10% 时, 平均校正残差最小, 变形镜综合校正效果最佳.

2.3 单元间距与校正效果的关系

影响变形镜校正效果的另一个重要参数是相邻单元间距. 在此, 我们仍然以 10×10 阵列的 MEMS 微变形镜为对象, 研究了相邻致动器单元间隔 b 分别为 2, 2.5, 3, 3.5, 4 mm 时, 变形镜校正效果的变化情况. 校正对象是前 20 阶 Zernike 多项式波面, 间距校正残差是各阶 Zernike 多项式波面经校正后残差的平均值. b 不同会导致变形镜镜面面积不同, 校正的波面大小也不同, 由于式(5)采用均方根计算, 结果仍具有可比性. 图 5 是几种单元间距的变形镜在不同耦合系数下的校正情况.

由图 5 可知, 相邻单元间隔越小, 校正残余误差越小, 变形镜校正效果越好. 在加工工艺允许条件下, MEMS 微变形镜的单元间距应该尽量设计的比较小. 单元间距发生变化时, 尽管校正对象相同, 最佳耦合系数也会发生变化. 如表 2 所示, MEMS 微

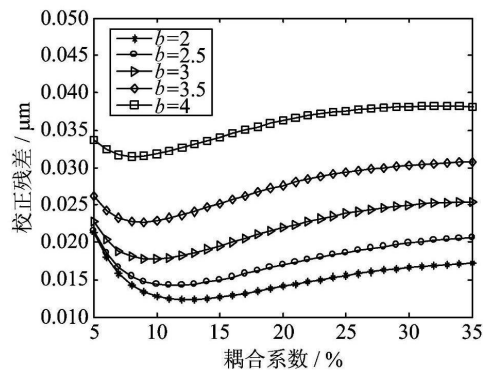


图 5 不同单元间距下的校正情况

Fig. 5 Relation between residual error, coupling coefficient and b

表 2 最优耦合系数与单元间距对应关系

Tab. 2 Optimal coupling coefficients according to different b

单元间距/mm	2	2.5	3	3.5	4
最优耦合系数/%	12	11	10	9	8

变形镜单元间距越大, 最佳耦合系数越小.

综上, 变形镜的校正效果由耦合系数及单元间距共同决定, 且耦合系数与单元间距对校正效果的影响存在相互关联. 因此, 在设计 MEMS 微变形镜结构时, 需同时调节耦合系数及单元间距, 方能使得变形镜校正效果达到最佳.

3 结论

本文以 Zernike 多项式波面作为输入波面, 分析了单元耦合系数及单元间距对 MEMS 微变形镜校正效果的影响. 以单元间距为 3 mm 的 10×10 阵列 MEMS 微变形镜为例, 分析了不同畸变波面与最优耦合系数的对应关系: 以前 20 阶 Zernike 多项式波面为校正对象, 耦合系数为 10% 时, 变形镜的综合校正效果最佳. 单元间距分别为 2, 2.5, 3, 3.5, 4 mm 时, 10×10 单元阵列 MEMS 微变形镜对应的最佳耦合系数分别为 12%, 11%, 10%, 9%, 8%. 通过以上分析, 本文为 MEMS 微变形镜校正效果的优化提供了理论指导, 从而为 MEMS 微变形镜结构参数设计提供了理论基础.

参考文献 (References)

- [1] Tyson R K. Principles of Adaptive Optics [M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 1998: 37-48.

- [2] Hulburd W G, Sandler D G. Segmented mirrors for atmospheric compensation [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(10): 1 186-1 190.
- [3] Liang Junzhong, Williams D R, Miller D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics [J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14:2 884-2 892.
- [4] Menn S, Cornelissen S A, Bierden P A. Advances in MEMS deformable mirror technology for laser beam shaping [J]. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2007, 6663: 66630M-1-13.
- [5] Zhang Zhiwei, Ma Jun, Yu Xin. Micro adaptive optics and its application in air-borne optical remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29: 49-52. 张志伟, 马骏, 俞信. 微小型自适应光学系统及其在星载光学遥感器上的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2000, 29: 49-52.
- [6] Rubin M L. Spectacles: Past, present and future [J]. *Survey of Ophthalmology*, 1986, 30: 321-327.
- [7] Lu Jian, Chu Jiaru. Preparation of strongly (100) oriented $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}, \text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ (PZT) film by sol-gel method [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2002, 32(6): 748-753. 鲁健, 褚家如. 高取向 PZT 铁电薄膜的溶胶-凝胶法制备 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2002, 32(6): 748-753.
- [8] Owens D, Schoen M, Bush K. MEMS deformable mirror embedded wavefront sensing and control system [J]. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2006, 6 113: 61130V-1-12.
- [9] Hishinuma Y, Yang E H. Piezoelectric unimorph microactuator arrays for single-crystal silicon continuous membrane deformable mirror [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15: 370-379.
- [10] 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: 252-256.
- [11] Yu Yang, Cao Genrui. A Study on the Corrective Capability and Optimization of Active Mirrors [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(2): 229-233. 于洋, 曹根瑞. 主动光学反射镜面形的校正能力及其优化设计 [J]. *北京理工大学学报*, 2003, 23(2): 229-233.
- [12] Wallace B P, Hampton P J, Bradley C H, et al. Evaluation of a MEMS deformable mirror for an adaptive optics test bench [J]. *Optics Express*, 2006, 14: 10 132-10 138.
- [13] Bush K, German D, Klemme B, et al. Electrostatic membrane deformable mirror wavefront control systems: design and analysis [J]. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2004, 5 553: 28-38.
- [14] XU Xiaohui, LI Baoqing, FENG Yan, et al. Design, fabrication and characterization of a bulk-PZT-actuated MEMS deformable mirror [J]. *J Micromech Microeng*, 2007, 17: 2 439-2 446.