

微机械薄膜变形镜自适应光学系统实验研究

李邦明¹ 廖文和¹ 童 桂² 梁 春¹

(¹ 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016
² 南京工程学院实验与训练中心, 江苏 南京 210016)

摘要 为求出自适应光学系统的最优校正电压, 提出了一种基于改进奇异值分解的闭环迭代控制算法。该算法可通过调节控制参量 g_1, g_2 和 ω , 优化模式的收敛速度, 使控制信号快速收敛到一个可靠的局部最优解。搭建基于微机械薄膜变形镜(MMDM)的自适应光学系统, 测量光学影响函数并验证单个电极电压和镜面变形之间的准平方线性关系, 以及各个驱动器电极响应之间的线性叠加性。分别采用模拟眼和人眼出射波前作为原始波前进行实验。实验结果表明, 改进算法能快速有效地对静态或动态畸变波前进行校正, 为基于 MMDM 的自适应光学系统提供了算法支持。

关键词 自适应光学; 波前校正; 奇异值分解; 微机械薄膜变形镜

中图分类号 TP273⁺.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0266

Experimental Study of Micromachined Membrane Deformable Mirror Adaptive Optical System

Li Bangming¹ Liao Wenhe¹ Tong Gui² Liang Chun¹

¹ College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

² Experimental and Training Center, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In order to obtain the optimal control voltages of adaptive optics system, an closed-loop iterative control algorithm based on improved singular value decomposition is proposed. By adjusting parameters g_1, g_2 and ω , the convergent velocity of model can be optimized, and the control signal can converge a reliable local optimal solution rapidly. An adaptive optical system based on micromachined membrane deformable mirror(MMDM) which optical influence functions of every actuator are measured is built. The quasi-square relationship between voltage and displacement of an actuator and the quasi-linear superposing among the actuators are experimentally verified. Wavefront from a model eye and a human eye are used respectively as the incident wavefront of adaptive optics system. Experimental results show that the improved algorithm can correct static and dynamic distorted wavefront aberration rapidly and effectively, is very suitable for adaptive optical system based on MMDM.

Key words adaptive optics; wavefront correction; singular value decomposition; micromachined membrane deformable mirror

1 引 言

自适应光学技术是以光学波前为研究对象的自动控制系统^[1~3], 通过对光学波前的实时测量-控制-校正, 使光学系统具有自动适应外界变化、始终保持良好工作状态的能力。变形镜是自适应光学系

统的核心部件之一, 在外加电压的控制下, 通过镜面形状的变化改变入射光束的波前, 改善系统成像或光束传输过程中的质量^[4]。随着微细加工技术的发展, 微机械薄膜变形镜(MMDM)因低成本、小型化等优点在民用自适应光学系统中得到广泛应

基金项目: 国家 863 计划(2006AA020804)资助课题。

作者简介: 李邦明(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: lbm0705123@163.com

导师简介: 廖文和(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事自适应光学和数字化医疗装备方面的研究。

用^[5~7]。但由于其本身结构和支撑特点,存在交连值大、控制电压非线性、只能单向变形和校正电压范围有限等问题,致使控制算法非常复杂。因此,如何快速稳定地求出最优的波前校正电压,实现对变形镜的最优控制是使用 MMDM 的关键。

2 微机械薄膜变形镜

系统采用的 MMDM 结构示意图如图 1 所示。MMDM 氮化硅薄膜的上表面镀有铝层,薄膜的下表面和电极的上表面镀金使之导电,主孔径为圆形,直径为 15 mm,每个驱动电极都是正六边形结构,数目为 37,分布如图 2 所示,控制电压不大于 275V,初始均方根(RMS)偏差小于 0.45 μm,响应频率小于 500 Hz,中心最大偏移量为 9 μm,给电极加控制电压时,在静电力的作用下,镜面薄膜会向下凹陷,产生面形变化。

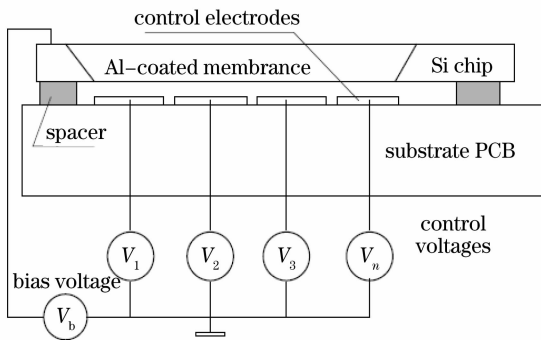


图 1 MMDM 结构示意图

Fig. 1 Structure scheme of MMDM

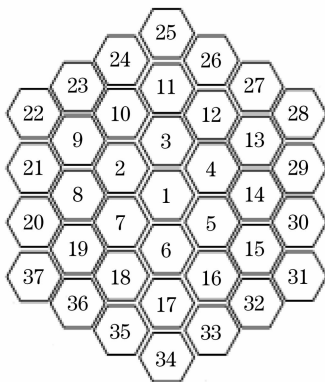


图 2 MMDM 驱动电极分布

Fig. 2 Distribution of MMDM actuators

根据文献^[8~9]可知, MMDM 镜面形状变化和单个驱动电极电压之间近似成平方关系,各个驱动电极响应之间近似成线性叠加性。MMDM 的镜面形状采用常用的 Zernike 多项式表示^[10, 11], 设模

式项数为 N , 镜面形状为 $W(x, y)$, 则 $W(x, y) = \sum_{k=1}^N b_k Z_k(x, y)$, b_k 为模式系数, $Z_k(x, y)$ 为第 k 项 Zernike 多项式。在驱动电极 1 上分别加电压 $V_1 = 68.75 \text{ V}$, $V_2 = 206.25 \text{ V}$ 后, 设镜面形变对应的模式系数分别为 B_1, B_2 , $B_i = [b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{iN}] (i = 1, 2)$, 在图 3 中, $b_k = b_{ik} / V_i^2, k = 1, 2, \dots, 35$ 。从图 3 可见, 两种情况下 b_k 接近重合。图 4 中虚线表示同时在电极 1, 电极 4 和电极 7 上加电压 200 V 时镜面形变对应的模式系数的折线图, 实线是分别在电极 1, 电极 4 和电极 7 上单独加电压 200 V 时, 三种情况镜面形变对应的模式系数叠加和的折线图, 可见两条曲线相差很小。上述实验结果验证了文献^[8, 9]中的结论。

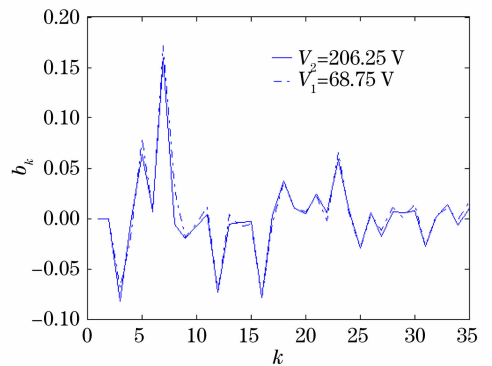


图 3 1 号驱动电极加不同电压时 b_k 的值
Fig. 3 b_k when adding different voltages to the first actuator

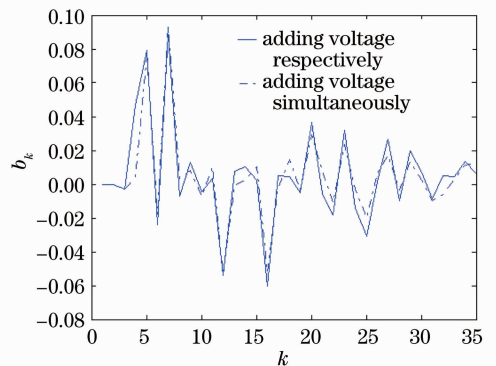


图 4 1, 4 和 7 号电极加电压时 b_k 的值
Fig. 4 b_k when adding voltages to the first, fourth and seventh actuators

3 光学影响函数

MMDM 的光学影响函数表示当仅有一个驱动电极作用而其他驱动电极仅由弹性力约束时镜面的变形。通过依次给各个驱动电极加电压, 然后测量

对应的面形变化可得光学影响函数。由光学影响函数和畸变波前的模式系数,可计算得到校正电压。

设变形镜未加电压之前,镜面的初始面形为 $W_0(x, y)$, 在第 i 个驱动电极加电压 V_i 后, 镜面形状为 $W_i(x, y)$, 则驱动电极 i 的光学影响函数 $\varphi_i(x, y)$:

$$\varphi_i(x, y) = [W_i(x, y) - W_0(x, y)]/V_i^2 \quad (i = 1, 2, \dots, 37), \quad (1)$$

令(1)式的结果为 $\Delta W_i(x, y)$, $\Delta W_i(x, y)$ 表示第 i 个电极施加单位电压时面形的变化, 可表示为

$$\Delta W_i(x, y) = \sum_{k=1}^N \Delta b_{i,k} Z_k(x, y), \quad (2)$$

式中, $\Delta b_{i,k}$ 为驱动电极 i 加单位电压时引起的镜面形变对应的第 k 项模式系数。在实际测量时一般取模式项数 $N = 35$, 即取前 35 项 Zernike 多项式。

由测量得到的 $\Delta b_{1,k}, \Delta b_{2,k}, \dots, \Delta b_{37,k}$ 可组成 MMDM 的光学影响函数矩阵 F

$$F = \begin{bmatrix} \Delta b_{1,1} & \cdots & \Delta b_{37,1} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta b_{1,35} & \cdots & \Delta b_{37,35} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

假设波前探测器测得某畸变波前的模式系数为 C , $C = [C_1, C_2, \dots, C_{35}]^T$, 令 $V = [V_1^2, V_2^2, \dots, V_{37}^2]^T$, 据相位共轭原理和波前补偿原理^[12~14], 有

$$FV + C = 0. \quad (4)$$

由(4)式可求得

$$V = -F^+ C, \quad (5)$$

式中, F^+ 为基于奇异值分解的广义逆矩阵, 即 $F^+ = QS^{-1}U^T$, $U^T U = I \in R^{35 \times 35}$, $Q^T Q = I \in R^{37 \times 37}$ 。

4 基于改进奇异值分解的闭环迭代控制算法

为保证波前校正的效果, 采用闭环迭代控制算法, 在每次校正完毕以后重新测量波前校正的残余误差, 再次校正, 直到波前的 RMS 值达到衍射极限为止。设 V^n 为第 n 次校正时 MMDM 各驱动电极电压的平方组成的向量, C^n 为第 n 次校正后残余波前对应的模式系数向量, V^{n+1} 为第 $n+1$ 次校正时 MMDM 各驱动电极应该施加的校正电压平方组成的向量, 则

$$V^{n+1} = V^n - F^+ C^n. \quad (6)$$

但在实际波前校正时, 由于 MMDM 结构和支

撑的特点, 很容易出现以下问题: MMDM 本身驱动器行程有限, 交连值较大, 变形镜对各阶模式像差校正能力不同, 对像散、离焦等低阶像差拟合残差较小, 对高阶模式像差拟合残差比较大^[15]; 由于 MMDM 的校正电压范围有限, (5), (6) 式计算出的电压直接加到变形镜上, 易出现电压“饱和”现象; 考虑到实验中噪声(测量误差、电压偏差等)的影响, 波前校正的步长太大, 算法不稳定, 且收敛速度下降。为解决以上出现的问题, 算法中增加控制参量 g_1, g_2 和 ω , (6) 式改写为

$$V^{n+1} = V^n - g_1 F^+ \omega C^n \cdot g_2, \quad (7)$$

(7) 式中, 控制参量 $g_1 \in [0, 1]$ 为像差校正的步长, 当 $g_1 = 0$ 时, 对校正后的剩余波前不进行校正, 当 $g_1 = 1$ 时, 对剩余波前进行全部校正, 考虑到变形镜对部分模式校正能力较差, 波前校正时进行全部校正容易出现不稳定, 所以 g_1 取较小的值, 实验中取 0.2, 用以控制整体模式的收敛速度。控制参量 g_2 有助于优化各阶模式的收敛速度, 取 $g_2 = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{35}]^T$, θ_i 对应于各阶模式的收敛速度, 表征了各阶 Zernike 模式像差在单位圆上的均方根, 其中 $\theta_i = \sqrt{\int_s |Z_i(x, y)|^2 ds}$, 通过调整参数 g_2 , 变形镜的控制电压能够快速收敛到一个可靠的局部最优解。

为进一步提高 MMDM 波前校正的稳定性和防止校正电压出现“饱和”现象, 对波前校正器影响函数进行奇异值分解, 即 $F = U\Sigma Q^T$, 其中 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$, $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_n$ 。由于小的奇异值对应着大的校正电压, 定义一阈值 η , 分别计算 $\sigma_i/\sigma_1 < \eta, i = 1, 2, \dots, n$, 如果成立, 将 σ_i 置 0, 相反则保持 σ_i 不变, 实验证明当 $\eta = 0.5$ 时效果较理想。经过模式优化处理, MMDM 对于难以控制复原的组合像差模式做了适当滤除, 有利于 MMDM 实时校正的稳定, 从而建立了影响函数正交模式组合优选控制矩阵 $W \in R^{35 \times 37}$:

$$W = \begin{bmatrix} E_q & B \\ A & C \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 E_q 为 q 阶的单位矩阵, q 为模式项数控制参量, A, B, C 为所有项都为 0 的矩阵。

因为(7)式中有多个控制参量可调节波前校正的收敛速度和控制精度, 所以该算法适应度大, 调整灵活, 适用于 MMDM 的波前复原问题。

5 实验与结果分析

基于 MMDM 和 哈特曼-夏克(H-S)波前传感器的自适应光学实验系统如图 5 所示。系统包含有几个重要部分:信标光源、分光准直系统、孔径匹配系统和自适应光学核心器件。系统中光学元器件轴线应基本重合,在同一水平位置,为减少棱镜或透镜等光学器件镜面反光对波前探测的影响,光学路径在波前校正器处有一个适当转角,减少由于分光镜镜面反射带来的杂散光。采用连续工作的 F-P 腔激光器作为待测光源,波长 $\lambda = 785 \text{ nm}$, 激光点光源是系统中的信标光源,同时也是自适应光学系统中待校正的畸变波前光源。

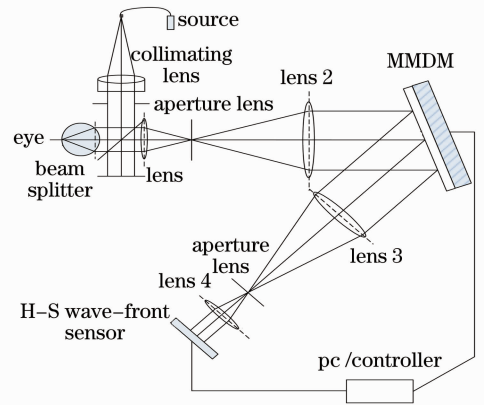


图 5 自适应光学系统

Fig. 5 Adaptive optical system

5.1 静态模拟眼像差闭环校正实验测试

实验中利用模拟眼引入一波前畸变,引入畸变后,波前的峰-谷值(PV)为 1.143λ , 均方根(RMS)值为 0.259λ ; 闭环校正后,波前的 PV 为 0.343λ ,

RMS 值为 0.049λ , 已达到衍射极限(0.071λ), 校正效果比较明显。校正前后对应的波形图如图 6 (a), (b)所示。

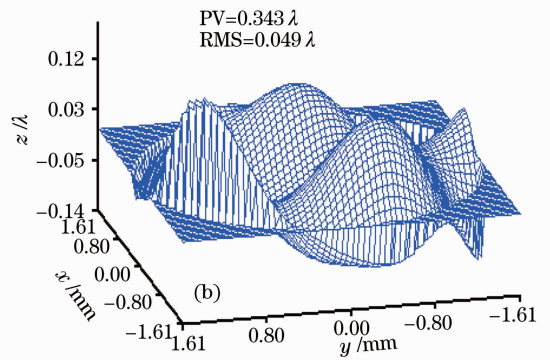
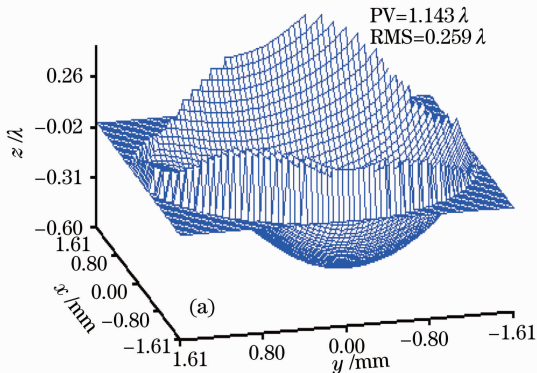


图 6 模拟眼校正前(a), 后(b)波前图

Fig. 6 Wavefront of model eye before correction (a) and after correction (b)

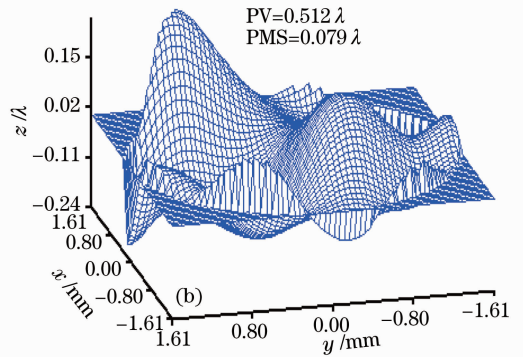
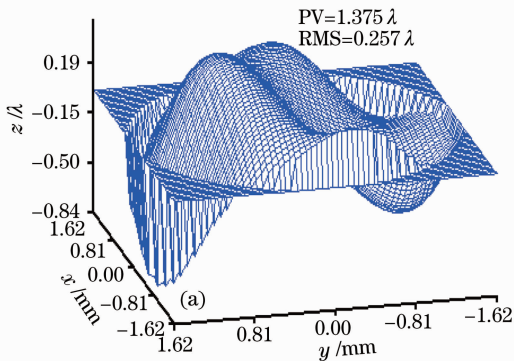


图 7 人眼校正前(a), 后(b)波前图

Fig. 7 Wavefront of human eye before correction (a) and after correction (b)

5.2 动态人眼像差闭环校正实验测试

采用人眼出瞳波前为系统的入射畸变波前, 检验上述自适应系统对动态畸变波前的校正情况。图 7(a), (b)分别为某人眼校正前后的波形图。表 1 中

列举了 6 组人眼入射波前校正前后的 PV 和 RMS 值。通过数据可见, 动态人眼波前像差经系统校正后, PV 和 RMS 值都下降明显, 校正结束后 RMS 值均接近衍射极限, 说明搭建的自适应光学系统能根

据外界的变化始终保持良好工作状态,同时说明改进算法对不同动态人眼像差具有稳定的校正能力。

表1 人眼波前像差校正重复性试验

Table 1 Repetitive experiments of human eye aberration correction

Number	PV / λ			RMS / λ		
	Original system	After importing distortion	After closed-loop calibration	Original system	After importing distortion	After closed-loop calibration
1	0.357	1.375	0.512	0.057	0.257	0.079
2	0.389	1.427	0.524	0.061	0.278	0.083
3	0.324	1.356	0.498	0.048	0.263	0.081
4	0.405	1.527	0.543	0.063	0.324	0.089
5	0.376	1.496	0.516	0.059	0.246	0.073
6	0.425	1.503	0.527	0.067	0.304	0.087

6 结 论

针对MMDM的特点,给出了一种基于改进奇异值分解的闭环迭代控制算法。该算法可调节参量 g_1 减少扰动信息的影响、控制模式的整体收敛速度;调节参量 g_2 使控制信号能够快速收敛到一个可靠的局部最优解;调节参量 ω 滤除影响函数中噪声信息和特征不明显的模式。实验结果表明,改进算法的精度高,能快速有效地对静态和动态畸变波前进行校正,为实时微型自适应光学系统中使用低成本微机械薄膜变形镜提供了一种合理可行的解法。

参 考 文 献

- 1 Y. J. W. Hard. Adaptive Optics for Astronomical Telescope [M]. New York: Oxford, 1998, 178~194
- 2 Jiang Wenhan. Modern Scientific Instrument Technology and Design[M]. Beijing: Science Press, 2003, 1049~1114
姜文汉. 现代仪器仪表技术与设计[M]北京: 科学出版社, 2003, 1049~1114
- 3 Zhou Renzhong. Adaptive Optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996, 1~8
周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996, 1~8
- 4 G. Vdovin, P. M. Sarro, S. Middelhoek. Technology and application of micromachined silicon adaptive mirrors[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **23**(3): 225~237
- 5 Donald Owens, Michael Schoen, Keith Bush. MEMs deformable mirror embedded wavefront sensing and control system [C]. *SPIE*, 2006, **6113**: 1~12
- 6 J. A. Perrault, T. G. Bifano, B. M. Levine *et al.*. Adaptive

optic correction using microelectromechanical deformable mirrors [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(3): 561~566

- 7 Nathan Doble, David R. William. The application of MEMs technology for adaptive optics in vision science[J]. *IEEE*, 2004, **10**(3): 629~636
- 8 Fang Di, Chen Haiqing, Li Jun *et al.*. The measurement of some important parameters of MEMs deformable mirror[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(5): 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]. *光学学报*, 2005, **5**(5): 21~26
- 9 Chen Ke, Zhao Dazun, Yu Xin. Measurement and study for optical influence function matrix of micromachined membrane deformable mirrors[J]. *High Technology Letters*, 2000, (9): 22~26
陈珂, 赵达尊, 俞信. 微机械薄膜变形镜光学影响函数矩阵的测试与研究[J]. *高技术通讯*, 2000, (9): 22~26
- 10 J. A. Perrault, T. G. Bifano, B. M. Levine *et al.*. Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirror [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(3): 561~566
- 11 G. Vdovin. Optimization-based operation of micromachined deformable mirrors[C]. *SPIE*, 1998, **3353**: 902~909
- 12 H. W. Babcock. The Possibility of Astronomical Seeing[M]. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1953, 65
- 13 R. B. Leighton. Concerning the problem of making sharper photographs of the planets[J]. *Scientific Amer.*, 1956, **194**: 157
- 14 B. Sicheistiel, W. Waters, T. Wild. Self-focusing array research model[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 1964, **12**(2): 150~154
- 15 Li Ende, Duan Haifeng, Dai Yun *et al.*. Analysis of characteristics of micromachined membrane deformable mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(7): 1099~1103
李恩德, 段海峰, 戴云等. 微加工薄膜变形镜特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(7): 1099~1103