

doi: 10.3788/gzxb20124105.0511

基于干涉仪测量的变形镜面形展平标定研究

林旭东, 刘欣悦, 王建立, 卫沛锋, 王富国

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 为了全面地了解变形镜的性能, 以便自适应光学系统更好地工作, 进行了基于干涉仪测量的变形镜面形展平标定研究. 首先, 给变形镜的压电陶瓷驱动器施加一半的控制电压; 再用 Zygo 干涉仪测得变形镜的面形, 计算对应各个驱动器位置的镜面高度, 并算得各个位置镜面高度相对平均镜面高度的偏差; 最后, 控制驱动器运动使偏差量为零. 测试及实验表明, 受压电陶瓷迟滞的影响, 上述过程需要迭代 4 到 6 次镜面面形才会收敛到希望的准确度; 对镜面周边无驱动器约束的 21 单元变形镜, 展平之后其 80% 口径的面形接近 $\lambda/20$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$); 对镜面周边有驱动器约束的 137 单元变形镜, 展平后的面形优于 $\lambda/50$. 在望远镜不同的观测条件下, 该技术可以快速地对变形镜进行展平标定, 以适应不同的工作环境.

关键词: 自适应光学; 变形镜; 展平标定; 干涉仪

中图分类号: P124; TB133

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)05-0511-5

0 引言

自适应光学技术已经广泛地应用于地基望远镜, 能够极大地提高了光学系统的高分辨率成像能力. 为了使自适应光学系统能够更好地工作, 需要对组成系统的各关键部件有全面的了解, 特别是实际校正大气波前扰动的变形镜^[1-5].

本文给出了一种基于干涉仪测量的对变形镜面形进行展平标定的技术, 并在自制的两个变形镜上进行了展平实验. 该技术无需知道镜面对单个压电陶瓷驱动器的响应(也就是响应函数), 利用一台相移干涉仪对变形镜的面形进行测量, 再用自研的软件对干涉仪测量的数据进行分析, 给出驱动器的控制信号, 使变形镜展平. 受压电陶瓷固有特性“迟滞”的影响^[6], 上述过程需要迭代进行, 实验发现一般经过 4 到 6 次迭代, 变形镜的面形就能到达稳定状态.

在望远镜不同观测时间, 变形镜所处环境温度变化较大的情况下, 可以利用上述方法对变形镜进行快速的展平标定. 而且, 在有时不需要自适应光学系统工作的情况下, 为了免去更换平面镜的麻烦, 也可以利用该方法对变形镜进行高准确度的面形展平^[7-8].

1 变形镜展平标定算法

基于干涉仪测量的面形展平标定方法, 主要包括以下步骤:

1) 根据事先测得的变形镜面形改变量相对于压电陶瓷驱动器所加电压的变化情况, 给所有的驱动器施加一定的控制电压, 把镜面先都推到一半的高度. 这是因为压电陶瓷驱动器位移随所加控制电压呈近似线性变化, 只有把镜面推到一定的高度才能实现对面形的推拉展平控制.

2) 用干涉仪测得这时的镜面面形, 在面形图中对应每个驱动器的位置分别取一个合适的窗口(窗口映射到实际变形镜上面应与驱动器的大小相当), 计算窗口内面形高度的平均值, 即是各驱动器处面形高度值 p_i^j , 其中 i 代表驱动器的编号, j 代表迭代的次数.

3) 计算各个驱动器位置面形高度值相对于所有位置面形高度值的平均值的差: $z_i^j = p_i^j - \sum_i p_i^j / N$.

4) 控制各驱动器运动 $-Z_i^j$ 的量, 用干涉仪测量变形镜的面形, 并从上述第 2 步开始迭代重复整个过程, 直到用干涉仪测得的面形稳定(两次迭代测量的面形差小于 $\lambda/100$).

图 1 中给出了用自研的变形镜展平控制软件提

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2011AAXX1003)资助

第一作者: 林旭东(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为自适应光学波前校正器技术. Email: linxudong_82@126.com

收稿日期: 2012-02-06; **修回日期:** 2012-03-22

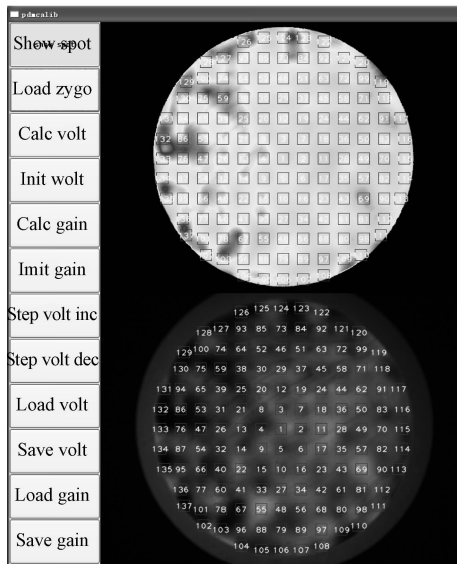


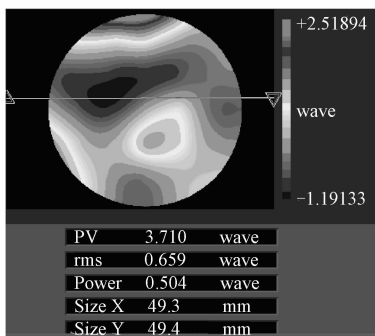
图 1 变形镜展平控制软件提取各驱动器位置镜面面形高度值的情况

Fig. 1 The height of the mirror surface at each actuator location by the flattening control software of the DM 取各驱动器位置镜面面形高度值的情况(为 137 单元变形镜展平过程中的截图),图中左侧为计算控制按钮,右侧下图为从干涉仪提取的所测面形的干涉图,右侧上图为波面图,其中小方框即为所开的窗口,每一个方框代表一个驱动器位置。

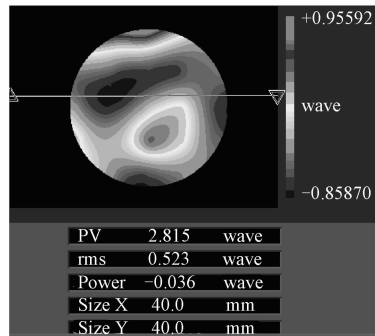
对上述的展平算法做适当的修改就可以控制变形镜产生任意的 Zernike 多项式面形,但由于变形镜对不同 Zernike 多项式的拟合能力不同,一般对低阶的 Zernike 多项式拟合误差较小,本文只讨论变形镜的展平. 变形镜对不同 Zernike 多项式的拟合能力另文讨论。

2 变形镜展平实验

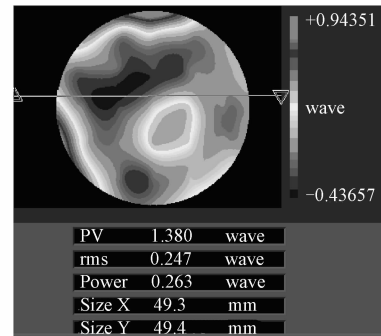
本文利用上述方法对自制的 21 单元和 137 单元变形镜进行了展平实验研究,实验是在对变形镜粘接之后的再抛光之前进行的。



(a) Surface of DM before flatten scheme



(b) Surface of the 80% aperture of DM before flatten scheme

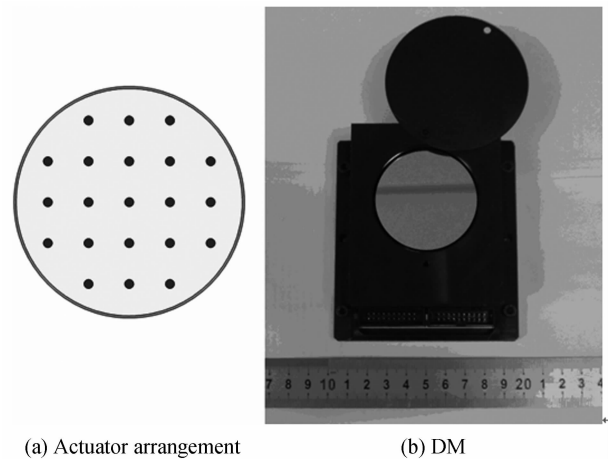


(c) Surface of DM after first iteration

2.1 21 单元变形镜的展平

其中 21 单元变形镜的薄镜片直径为 50 mm, 材料为 ULE 玻璃,基底采用与镜片一样的材料,可以降低温度对整个变形镜的影响。

驱动器采用 PZT 压电陶瓷驱动器,21 个驱动器采用 5×5 方形排列,去掉角上的 4 个,驱动器间距为 9 mm,图 2(a)为驱动器排列示意图,可见该变形镜的周围处于无驱动器支撑的自由状态,其 80% 口径内的镜面为有驱动器支撑的约束状态. 图 2(b)为变形镜实物图,图下方的接插件用于与高压放大器连接。



(a) Actuator arrangement

(b) DM

图 2 21 单元变形镜及其驱动器排列示意图

Fig. 2 The 21-elements DM and its actuator arrangement

根据上述展平方法,先给所有的驱动器加控制电压,使镜面到达一半的高度,测得这时的镜面面形如图 3(a),其 80% 口径内的面形如图 3(b). 峰值 (Peak Value, PV) 为 2.815λ , 均方根 (Root Mean Square, RMS) 值为 0.523λ 。

图 3(c)~(h) 依次给出了每次迭代之后的面形情况,可以看到经过 5 到 6 次迭代之后,镜面的面形基本稳定. 图 3(i) 给出对应图 3(h) 的 80% 口径的面形,可以看出在驱动器所约束的大概 80% 口径的镜

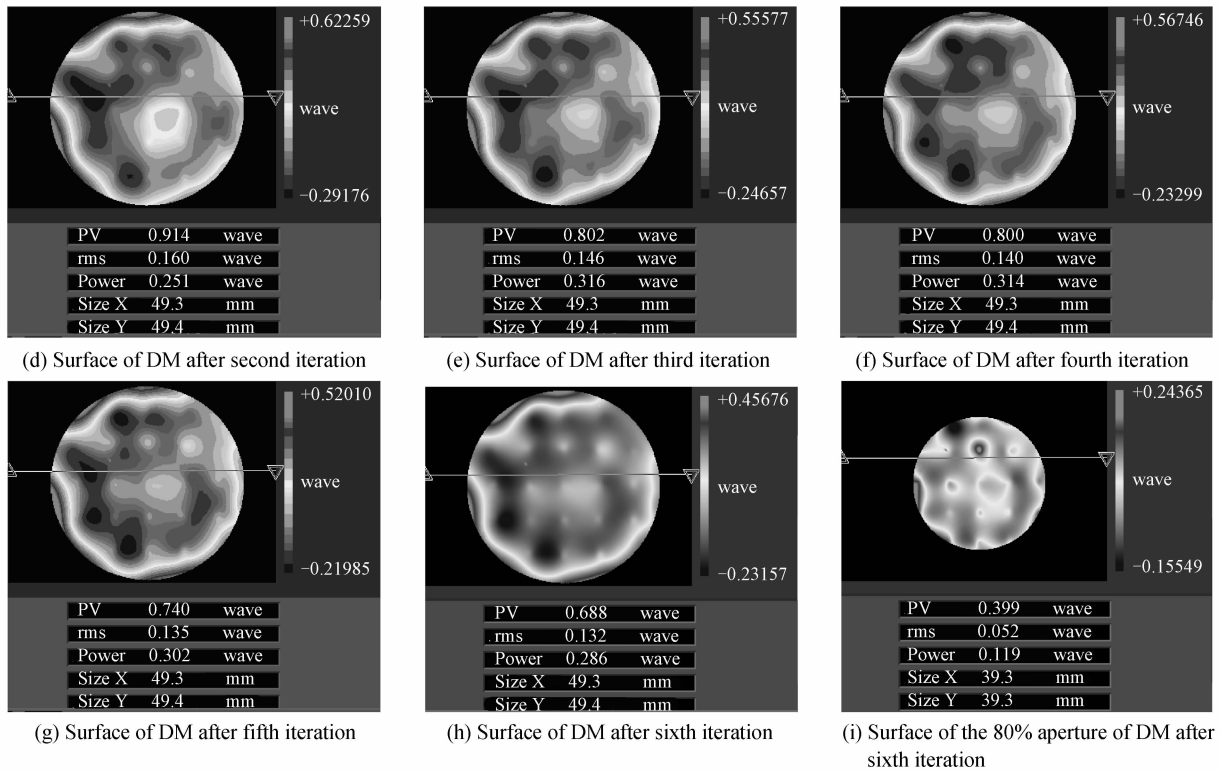


图 3 21 单元变形镜展平过程中测量的面形图

Fig. 3 The surface measurements in the flattening process of the 21 element deformable mirror

面内,经过展平,其面形 PV 值可以达到 0.399λ , RMS 值为 0.052λ .

2.2 137 单元变形镜的展平

对 21 单元变形镜的展平可以看出,由于其周围无驱动器控制,整体镜面的展平很难达到较好的效果.所以,在 137 单元变形镜的设计时,除了对变形镜的其它参量进行改进之外,还采用了整体驱动器粘接的形式,也就是镜面周围下方粘有一圈驱动器,如图 4(a).变形镜片材料与 21 单元变形镜相同,137 个 PZT 驱动器采用 13×13 方形排列,驱动器间距为 7 mm,图 4(b)为变形镜实物图,安装在一个二维倾斜调整台上.

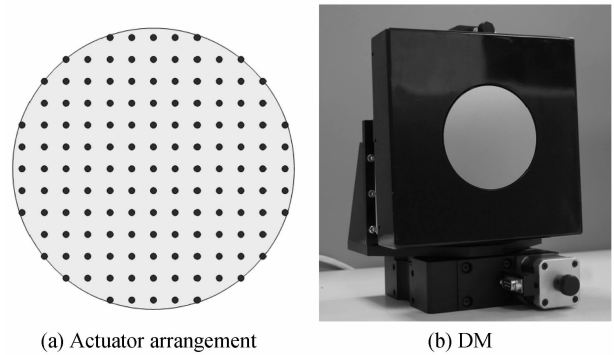
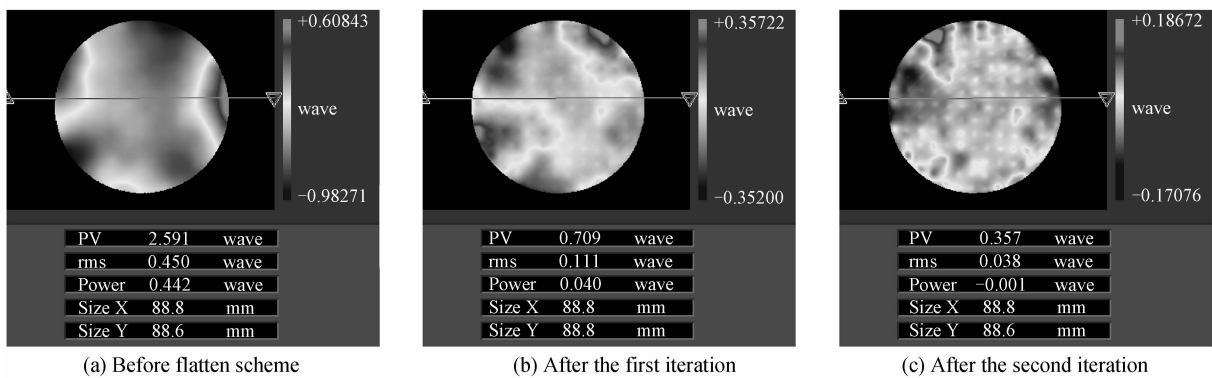


图 4 137 单元变形镜及其驱动器排列示意图

Fig. 4 The 137-elements DM and its actuator arrangement



(a) Before flatten scheme

(b) After the first iteration

(c) After the second iteration

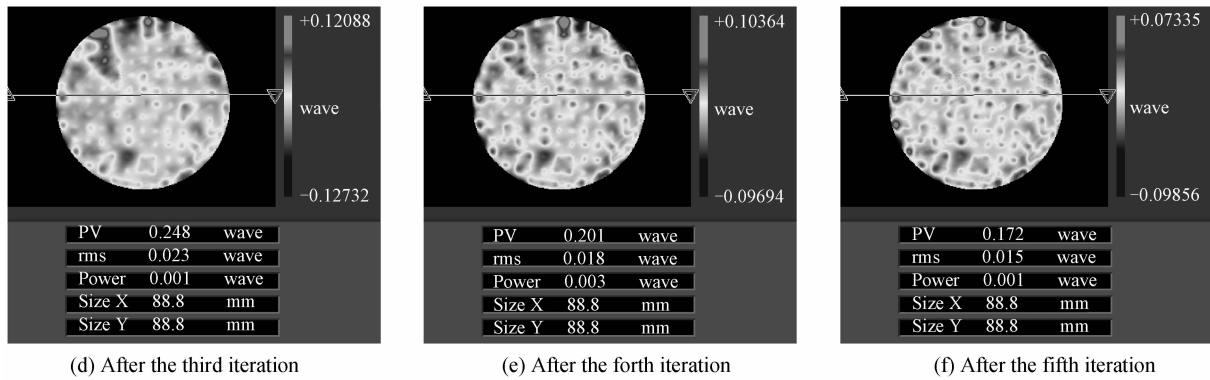


图5 137单元变形镜展平过程中测量的面形图

Fig. 5 The surface measurements in the flattening process of the 137 element deformable mirror

仍然采用上述的基于干涉仪测量的展平方法,图5(a)是给所有的驱动器施加控制电压,使镜面到达一半的高度时用干涉仪测得的镜面面形,由于变形镜面尚未进行再抛光,所以这时的面形不是很好,其PV值为 2.591λ ,RMS值为 0.450λ 。

图5(b)~(f)依次给出了五次展平迭代时干涉仪测得的面形,可以看出展平算法很快趋于稳定,而且由于改进了变形镜参量设计,镜面采用了整体粘接驱动器支撑的形式,展平后的镜面面形得到明显提高,从图5(f)展平之后的全口径面形可以看出其PV值为 0.172λ ,RMS值为 0.015λ (优于 10 nm)。

从137单元变形镜的展平实验,既可以看出改进设计提高了变形镜的性能,又看出上述的基于干涉仪测量展平的进一步效果,验证了该展平技术的能力。

3 结论

本文针对自适应光学技术研究中的实际问题,进行了基于干涉仪测量的变形镜面形展平标定技术研究,并在两块变形镜上进行了展平实验,其中对137单元变形镜,镜面面形准确度展平到优于 $\lambda/50$ RMS.这种基于干涉仪测量的迭代的展平算法因为没有矩阵运算而处理得较快,而且无需知道镜面对驱动器的响应函数,适用于那种需要在观测中多次对变形镜进行展平的自适应光学系统中。

参考文献

- [1] HARDY J W. Adaptive optics for astronomical telescopes [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
 [2] WEI Wei, HU Xiao-yun, XIE Yong-jun. Aberration correction using MEMS-DM [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5):

1163-1166.

魏伟,胡晓云,谢永军.利用可变形镜进行像差校正研究[J].光子学报,2009,**38**(5): 1163-1166.

- [3] ANDREI T, BROOLE G, HUGO E S, *et al.* A visible-light AO system for the 4.2m SOAR telescope [C]. *SPIE*, 2003, **4839**: 673-680.
 [4] HUANG L H, RAO CH H, JIANG W H. Modified Gaussian influence function of deformable mirror actuators [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(1): 108-114.
 [5] RAO C H, JIANG W H, ZHANG Y D, *et al.* Performance on the 61-element upgraded adaptive optical system for 1.2m telescope of Yunnan Observatory [C]. *SPIE*, 2004, **5639**: 11-20.
 [6] JEAN C S, JEAN M L, CLAUDE G. Deformable mirror technologies for astronomy at CILAS [C]. *SPIE*, 2008, **7015**: 70150O1-70150O12.
 [7] GLEB V, OLEG S, ALEXANDER S, *et al.* Correction of low order aberrations using continuous deformable mirrors [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(5): 2859-2866.
 [8] Van DAM M A, MIGNANT D L, MACINTOSH B A. Performance of the Keck Observatory adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(29): 5458-5476.
 [9] RAO Chang-hui, JIANG Wen-han, ZHANG Yu-dong, *et al.* 61-element adaptive optical system for 1.2m telescope of Yunnan Observatory [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 295-302.
 饶长辉,姜文汉,张雨东,等.云南天文台1.2m望远镜61单元自适应光学系统[J].量子电子学报,2006,**23**(3): 295-302.
 [10] LIN Xu-dong, LIU Xin-yue, LI Hong-wen, *et al.* Study on the dynamic response test of the deformable mirror and its driver[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(11): 659-662.
 林旭东,刘欣悦,李洪文,等.变形镜及其驱动器的动态响应测试研究[J].红外技术,2011,**33**(11): 659-662.
 [11] ZHOU Chao, YANG Hong-bo, WANG Fu-guo, *et al.* Finite element analysis on the capability of fitting aberration of deformable mirrors [J]. *Acta Photonica Sinica*. 2010, **39** (8): 1461-1465.
 周超,杨洪波,王富国,等.变形镜像差拟合能力的有限元仿真[J].光子学报,2010,**39**(8): 1461-1465.

Flatten Calibration of Deformable Mirror Based on the Measurement of the Interferometer

LIN Xu-dong, LIU Xin-yue, WANG Jian-li, WEI Pei-feng, WANG Fu-guo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to make the adaptive optical system function well, it needs to have a full understanding of the performance of the deformable mirror, so a technique for the flatten calibration of the deformable mirror based on the measurement of the interferometer is presented. Firstly, all the PZT actuators are set to the midrange of their control voltage; and then, the height of the mirror surface with the ZYGO interferometer is measured, the height of mirror surface at each actuator is calculated, and the differences between the height of the mirror surface at each actuator and the average height of the mirror surface are figured out; finally, the actuators are controlled to reduce the differences to zero. The results show that affected by the hysteresis of the PZT actuator, the mirror surface needs 4 to 6 iterative processes showed above to reach the same preset desired flatness; for the 21-elements deformable mirror, which without the actuators under the periphery of the mirror, an rms surface figure near $\lambda/20$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) at its 80% aperture is achieved; for the 137-elements deformable mirror, which has actuators under the periphery, the rms surface figure is better than $\lambda/50$. Under different observation conditions of the telescope, this technique can flat the deformable mirror rapidly in the adaptive optical system, in order to adapt to changing working conditions.

Key words: Adaptive optics; Deformable mirror; Flatten calibration; Interferometer