

能动变形反射镜波面误差特性分析及实验研究

杨李成 凌 宁

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 对能动变形反射镜波面误差进行了理论分析和实验研究。在对能动变形反射镜波面误差进行理论分析和实验研究的基础上,利用有限元对 37 单元能动变形反射镜低频象差补偿能力进行了相关的分析和计算,结合相关实验确定了能动变形反射镜的主要参数,成功研制出了曲率半径 1926 mm、口径 300 mm 的 37 单元球面能动变形反射镜。经实验测定校正误差前、后镜面面形的 PV 值(波前峰谷差值)和 RMS 值分别为:0.545 λ 、0.081 λ 及 0.239 λ 、0.031 λ ,从实测结果可以看到取得了明显的校正效果。并且在研制过程中对镜面加工、驱动器极头粘接等技术和工艺问题进行了有效地探索和研究,从而为能动变形反射镜进一步的研制工作奠定了良好的基础。

关键词 能动变形反射镜(ADM);有限元法;影响函数;误差分析

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0569

Analysis on Wavefront Errors of Active Deformable Mirror

Yang Licheng Ling Ning

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Wavefront errors of the active deformable mirror are analyzed and experimentally studied. Based on the theoretical and experimental wavefront errors of the active deformable mirror, with key parameters gotten by the finite element method about compensating capabilities of the low-frequency errors for 300 mm aperture and 1926 mm radius of curvature, 37-element spherical active deformable mirror, has been fabricated. The peak-valley value and root-mean-square are 0.545 λ (λ , wavelength) and 0.081 λ before correction, while 0.239 λ and 0.031 λ are achieved after correction in experiments. The techniques and craftwork, such as mirror surface machining and actuator tip cementation, were explored.

Key words active deformable mirror(ADM); finite element method; influence function; error analysis

1 引 言

能动变形反射镜是大型光学系统的核心器件,可以通过对镜面后的驱动器上施加控制电压,产生推力使它产生所需要的镜面变形,从而改变所反射光束的波前相位。由于能动变形反射镜赋予能动光学系统能动可控的特性,这使得波前误差校正成为可能。驱动器上施加的电压与产生的镜面面形变化的关系,是反映能动反射镜性能的重要参数,它决定能动反射镜对波前误差的校正能力。在能动反射镜的设计中,可以设计特定的影响函数以满足特定的校正要求,通过适当的设计,从而使镜面的面形得以

控制^[1~3]。

在进行能动变形反射镜的设计时需要考虑诸如:系统的特点和限制条件、材料特征和工艺、元器件的分析设计、镜子的装配和调试、确定所要求的系统结构、选定合适的镜面材料和选取合适的驱动器等问题。系统结构包括:镜子的尺寸、需要的最大变形量、驱动器间距和排布形式、要求的通道数以及镜子的谐振特性等等。正因为以上诸多原因,就需要通过理论分析计算,根据系统的具体要求为系统选取合理的变形反射镜的参数。较为理想的方法是通过实验对变形反射镜的参数进行验证,但由于能动

反射镜设计较为复杂,制造难度大和造价高、研制时间周期短,不可能也没有必要对每一种设计方案进行实验^[4]。因此,在设计能动反射镜之前,切实可行的方法是利用有限元仿真软件如:Algor、Ansys 等通过计算机仿真,对所设计的能动变形反射镜的拟合相差、承受的最大应力等进行模拟分析和计算,确定能动反射镜诸如驱动器排布方式、数量、各作用点受力状况、镜面厚度等基本物理参数,取得较为可靠的理论依据,在此基础上辅之以用缩小的能动反射镜模型对理论分析结果进行验证,通过模型试验弄清有关工艺问题,从而为顺利地完 成能动反射镜的研制奠定基础。本文对能动反射镜波前误差补偿原理、37 单元能动反射薄镜模拟计算与分析以及能动变形反射镜研制和实验结果进行了介绍。

2 能动反射镜波前误差补偿原理

能动反射镜的工作特性是由置于其背面的驱动器工作时形成的影响函数决定的。影响函数是指仅当单个驱动器对镜面加力使之产生单位变形时,其它驱动器仅由内在弹力带动引起的镜面变形。它是由驱动器间距、镜面刚度、驱动器极头几何形状等因素所共同决定的。相邻驱动器位置上的镜面位移相对变化称为驱动器的交连,能动变形镜的面形是各个驱动器上影响函数加权后叠加所确定。严格的讲,镜面各个驱动器的影响函数都不相同,它是驱动器的位置函数,但除边缘驱动器外,其它驱动器的影响函数差别不大^[4~9]。

影响函数一般以高斯函数表示:

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{R}) = \exp\left[-\left(\frac{\mathbf{r}-\mathbf{R}}{\omega_0}\right)^\alpha\right] \quad (1)$$

式中 α 为高斯指数, ω_0 为特征宽度, \mathbf{r} 为采样点距

驱动器中心的距离, \mathbf{R} 为驱动器中心坐标, ω_0 和 α 的大小受驱动器间距、镜面刚度等因素的影响。

镜面要产生的表面变形 $S(r_i)$ 可以表示为

$$\sum_{i=0}^M S(r_i) = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [f(\mathbf{r}, \mathbf{R}_j) \cdot C_j] = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \left\{ \exp\left[-\left(\frac{|\mathbf{r}-\mathbf{R}_j|}{\omega_0}\right)^\alpha\right] \cdot C_j \right\} \quad (i \leq M, j \leq N), \quad (2)$$

其中 M 为镜面上采样点的数量, N 为驱动器的数量, \mathbf{r}_i 为镜面上第 i 个采样点的坐标, \mathbf{R}_j 为第 j 个驱动器的中心坐标, C_j 为第 j 个驱动器的驱动信号。以矩阵形式可以表示为

$$S_i = A_{ij} \times C_j. \quad (i \leq M, j \leq N) \quad (3)$$

在计算中 A_{ij} 为影响函数阵列,意义为第 j 个驱动器产生单位变形时对第 i 个点的影响,可解得驱动信号

$$C_j = [A_{ij}]^{-1} \times S_j = [C_1, C_2, \dots, C_n]^T \quad (i \leq M, j \leq N). \quad (4)$$

3 37 单元能动反射薄镜模拟计算与分析

3.1 基本参数与有限元计算模型

采用 Algor Feas 软件包,对能动反射镜利用了有限元计算方法进行计算机仿真,通过对不同厚度、驱动器间距、驱动极头尺寸等的分析计算,确定的能动反射镜基本物理参数(外形尺寸、通光孔径、驱动器数、镜面厚度、驱动头尺寸)如表 1 所示,图 1 为 37 单元能动反射镜的驱动器排布示意图,图 2 为建立的以三角形单元为基础能动反射薄镜面的有限元计算模型,37 单元能动反射薄镜模型划分成了 6652 个三角形单元,共 3532 个节点。

表 1 球面能动反射薄镜面模型基本参数

Table 1 The key parameters of spherical active deformable mirror (ADM)

Thickness /mm	Actuator span /mm	radius of curvature /mm	Pole diameter /mm	Mirror diameter /mm	Mirror material	Modulus of elasticity /Pa	Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Poisson ratio
8	46	1926	12	300	k_1	7.144×10^{10}	2.53×10^3	0.211

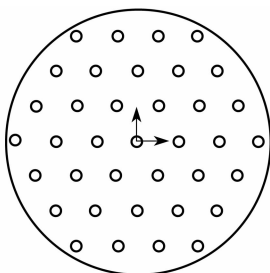


图 1 能动镜驱动器排布示意图

Fig. 1 The active actuators arrangement of ADM

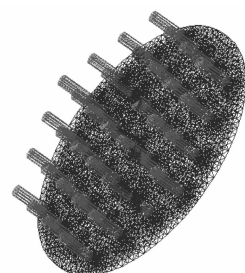
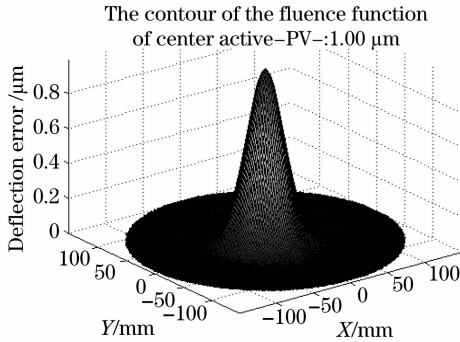


图 2 能动镜有限元计算模型

Fig. 2 The finite element model of ADM

通常要使能动反射镜对畸变波前进行有效地补偿,应选取一个合适的交连值,交连值太小,会使镜面不连续而引起高阶像差,交连值太大则会产生各个控制通道的交连。图 3 为计算获得的中心 01# 驱动器 01# 影响函数图的三维和截面图形,从图 3



影响函数中可以得到中心驱动器的交连值为 7.48%,这同通常应用中能动反射镜交连值一般控制在 5%~20%的经验数据相符,从而验证了表 1 能动反射镜模型的基本参数选择的正确性^[10~13]。

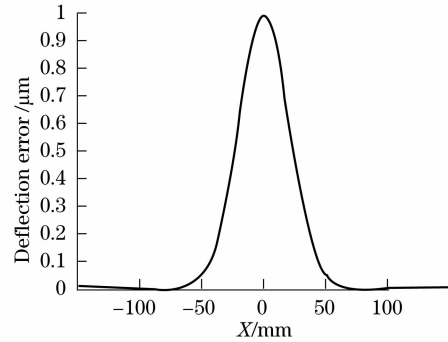


图 3 中心 01# 驱动器的影响函数图

Fig. 3 Influence function of centre 01# actuator

3.2 驱动器等边三角形排布方式下的能动反射镜对准 Zernike 像差的校正能力的分析

波前误差可以分解为准 Zernike 多项式的单独项(彗差、像散、倾斜等),由于支撑镜面的驱动器数目有限,对各个像差模式来说都存在拟合误差,镜面无法完全地补偿畸变波前,但可以用 Zernike 多项式的最小二乘法拟合变形表面来评价光学像质。要实现对低频像差的有效校正,可以重点考虑波前误差中 Def、Coma3、Ast3、Ast5 等低频像差,准 Zernike 多项式如表 2 所示。

在驱动器为等边三角形排布方式下,图 4 给出了经计算机模拟计算得出的全孔径范围内,采用表 1 参数的能动反射镜对低频像差离焦(Def)、三阶彗差 Coma3、三角彗差 Tri、三阶像散 Ast3、五阶像散 Ast5 等的校正能力,即拟合 Zernike 多项式前后像差和残差的三维图形,从图 4 可以得到对低频像差进行校正后,残差分别为原始像差的 PV 值的 12%,12%,6%,7%,20%。从而说明采用表 1 参数的能动反射镜具有对低频像差进行有效的能力。

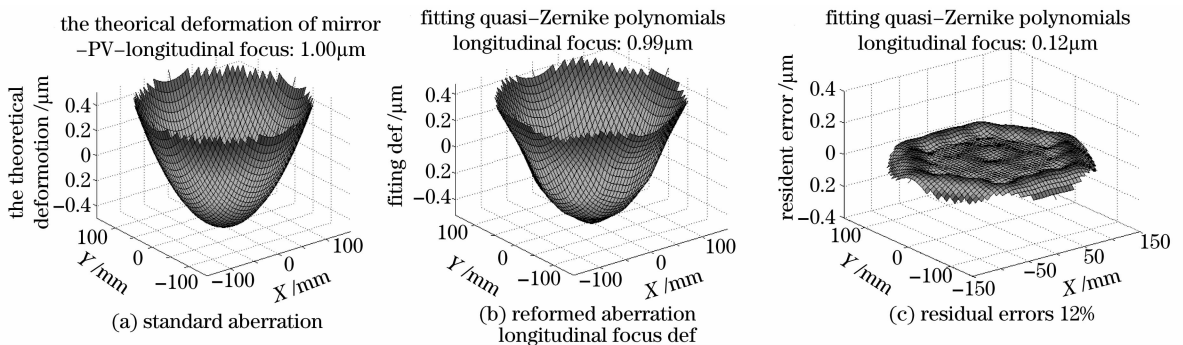
表 2 准 Zernike 多项式低频项表达式

Table 2 Low-frequency quasi-Zernike polynomial

Wavefront aberration	$W = k\rho^m \cos(n\varphi + q\theta)$	
$W = c\rho^2$	Longitudinal focus	Def
$+d\rho^3 \cos(\varphi + \theta_1)$	Decentering coma	Coma3
$+h\rho^3 \cos(\varphi + \theta_3)$	Triangular coma	Tri
$+g\rho^2 \cos(2\varphi + \theta_2)$	3rd order astigmatism	Ast3
$+j\rho^4 \cos(2\varphi + \theta_5)$	5th order astigmatism	Ast5

4 能动变形反射镜研制和实验结果

为了进一步弄清能动变形反射镜研制相关的工艺和技术问题,在前期进行模型镜研制的基础上,结合文献[6]对薄镜面的仿真分析和相关理论^[7],参照仿真分析中 37 单元能动变形反射镜驱动器排布等结构参数,研制了口径 $\phi 300$ mm 37 单元球面能动变形反射镜。目的是为了对能动变形反射镜的工作状况作进一步了解,检验研制的驱动器的性能及作用在薄镜面上的效果,对大口径超薄镜面的加工、高分辨率驱动器和控制电源的研制,驱动器与镜面



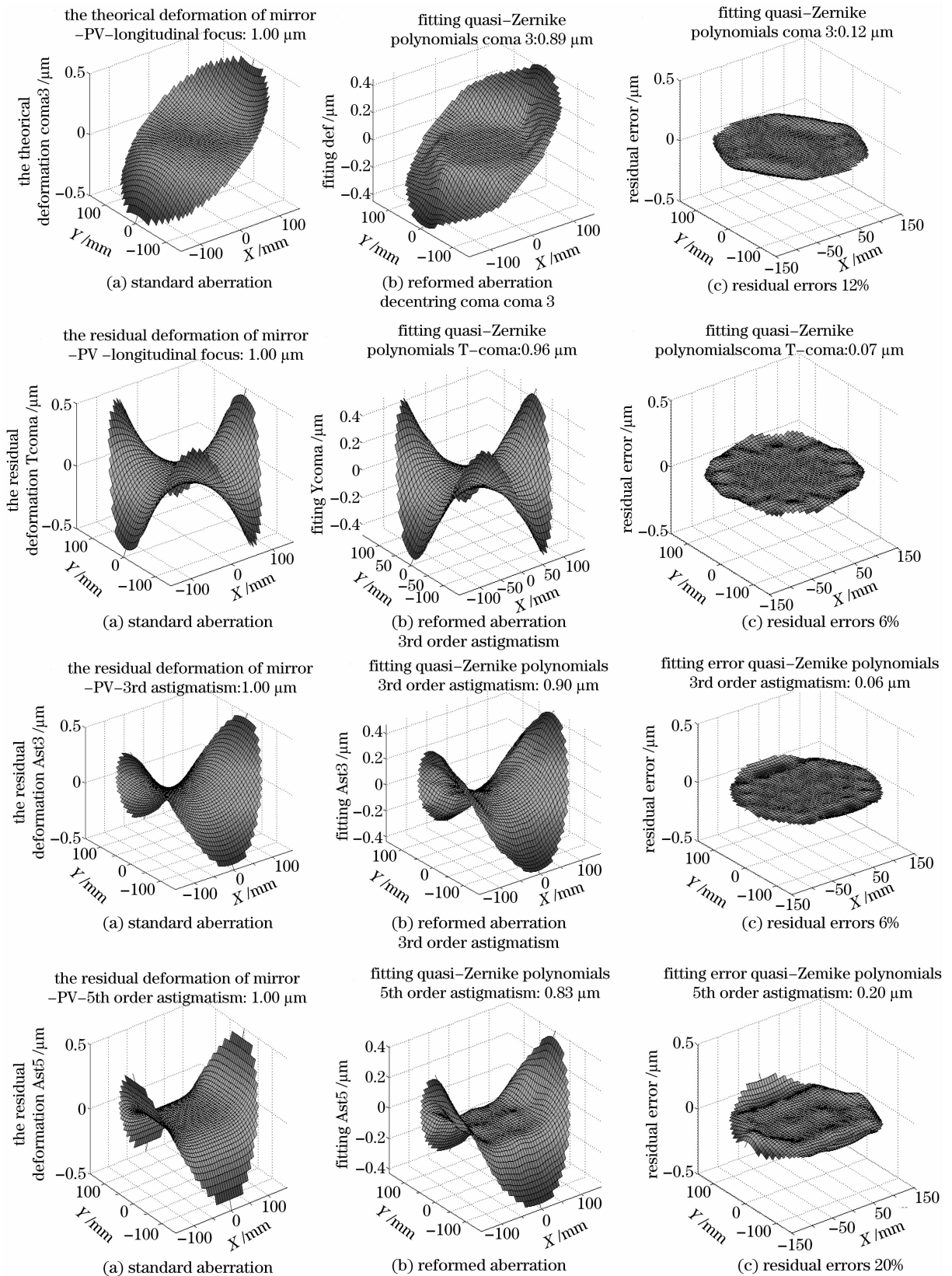


图 4 能动镜对低频误差的补偿能力

Fig. 4 Compensating capabilities of ADM for the low-frequency aberrations

的联结等工艺和设计问题进行深入探索和研究,为下一步研制更大口径的能够应用于航天探测器光学系

统的超大口径能动变形反射镜作好技术探索和准备。口径 $\phi 300\text{ mm}$ 37 单元球面能动变形反射镜的各项结

构参数如表 3 所示,图 5 为研制的口径 $\phi 300$ mm 37 单元球面能动变形反射镜的实物照片。

表 3 口径为 $\phi 300$ mm 37 单元球面能动变形反射镜参数

Table 3 Frame and parameters of the active deformable mirror model with 300 mm aperture

Actuator number	Mode of arrangement	Mirror diameter /mm	Radius of curvature /mm	Mirror material	Range of drivers / μm	Pole diameter /mm
37	equilateral triangle	$\Phi 300$	1926	K_1	± 5	12

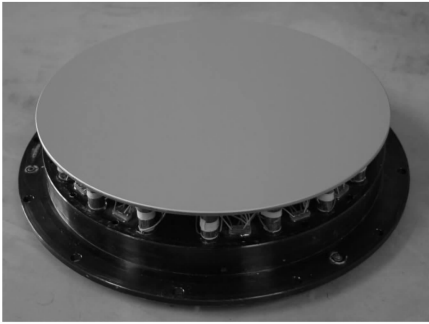


图 5 能动变形反射镜实物照片

Fig. 5 Photoactive deformable mirror

能动变形反射镜面形检测结果:图 6 和图 7 为在 VEECO 干涉仪上对 37 单元球面能动变形反射镜进行测试后,获取的校正前后镜波面图;从图 6 中可以看到校正前镜面面形已具有较高精度,PV 值约为 0.545λ ,RMS 值约为 0.081λ 。

从图 7 可以看到校正后镜面面形的 PV 值和 RMS 值分别为 $0.239\lambda, 0.031\lambda(\lambda/30)$ 。图 8 为利用干涉仪对能动变形反射镜进行检测,人工对驱动器施加必要的控制电压,从而对 37 单元球面能动变形反射镜进行校正;在 VEECO 干涉仪上获取的校正前后前 36 阶 Zernike 系数对比曲线和数据。从对比曲线和数据中可以清楚地看到,取得了较为明显的校正效果;例如:对 4,8,9,10 阶 Zernike 项,其系数从校正前 $-0.095, -0.059, 0.13, 0.069$,变化为校正后 $-0.00186, 0.00037, 0.002, 0.00001$,校正效果较为明显。但应当看到,由于采用手动方式进行校正,没有用波前传感器进行闭环所以对 Zernike 多项式的某些系数项的校正效果不太理想;但若利用采用先进控制算法的专用控制器,相信校正结果会得到进一步的改善。

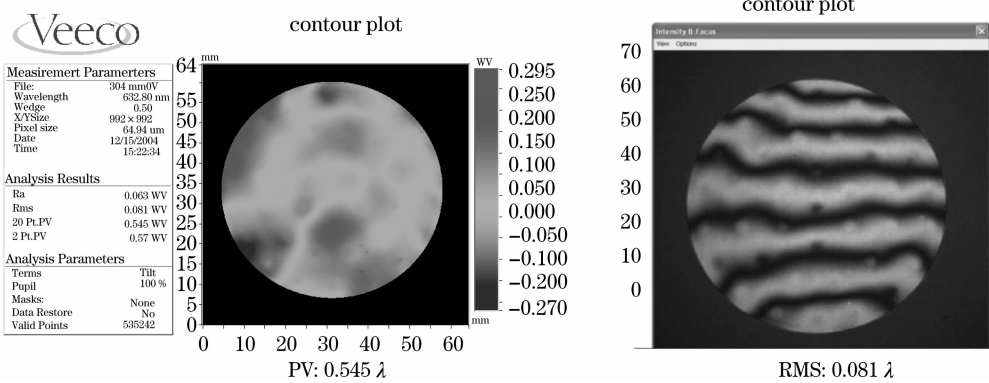


图 6 校正前面形

Fig. 6 Uncorrected profile

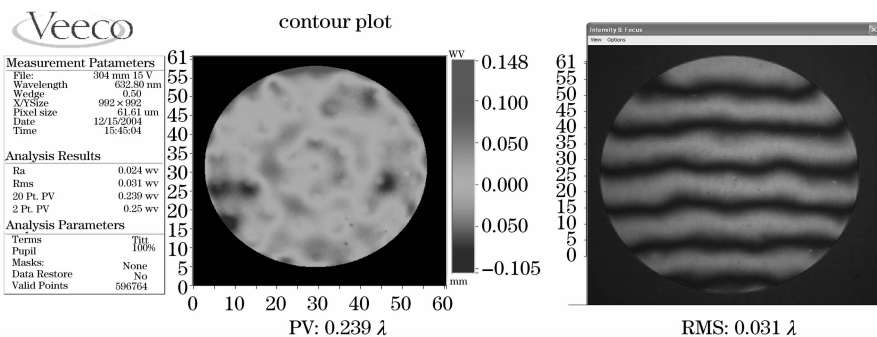


图 7 校正后面形

Fig. 7 Corrected profile

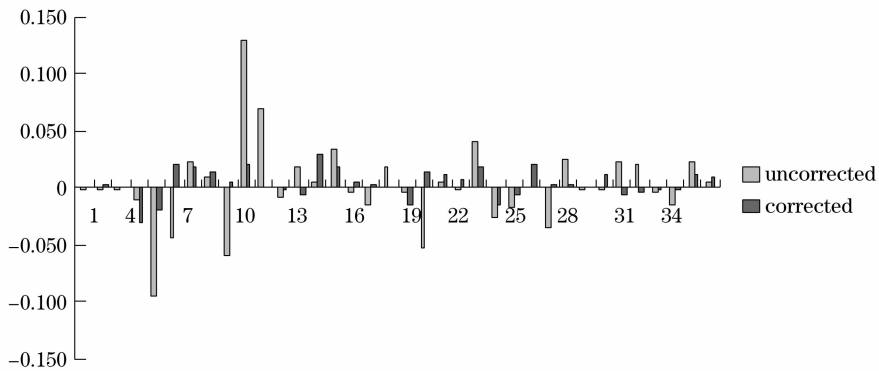


图 8 校正前后前 36 阶 Zernike 系数对比

Fig. 8 Comparison of the first 36 order Zernike coefficients before and after correction

5 结 论

通过理论分析、实验研究,成功研制了口径 300 mm、曲率半径 1926 mm 的 37 单元球面能动变形反射镜。经实验测定校正前、后镜面面形误差的 RMS 值和 PV 值(波前峰谷差值)分别为:0.081 λ 、0.545 λ 及 0.031 λ 、0.239 λ 取得了明显的误差校正的效果。结果证明,研究工作取了较为理想的成果。而且通过对薄镜面加工、驱动器极头粘接等技术和工艺问题的探索和研究。为能动变形反射镜进一步的研制工作奠定了良好的基础。

参 考 文 献

- 1 J. W. Hardy. Instrumental limitations in adaptive optics for astronomy[C]. *SPIE*, 1989, **1114**: 2~13
- 2 R. K. Tyson. *Principles of Adaptive Optics* [M]. Academic Press, 1991, 200~202
- 3 Wenhan Jiang, Ning Ling, Xuejun Rao *et al.*. Fitting capability of deformable mirror[C]. *SPIE*, 1991, **1542**: 130~139
- 4 Mark A. Ealey, John Wellman. Litton/Itek Optical Systems[C]. *SPIE*, 1989, **1167**: 65~85
- 5 A K Saxena, J P Lancelot, J P A Samson. Development of an optics system for 27 inch thin mirror[C]. *SPIE*, 1993, **2003**: 88~97
- 6 Luc Arnold. Optimized mirror supports, active primary mirrors and adaptive secondaries for the Optical Very Large Array (OVLA)[C]. *SPIE*, 1994, **2199**: 239~250
- 7 Frank B. Ray, Yungtseng Chung. Surface Analysis of an actively controlled Telescope Primary Mirror[J]. *Appl. Opt.*, 1985,

24(4): 564~569

- 8 Yang Licheng, Ling Ning, Zeng Zhige. Analysis on compensating capabilities of the low frequency aberrations for active deformable mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **10**(4): 581~586
- 杨李成, 凌 宁, 曾志革 等. 能动反射镜低频误差补偿能力分析[J]. *强激光与离子束*, 2004, **10**(4): 581~586
- 9 Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan. Controlling Of He-Ne Laser beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(4): 581~586
- 曾志革, 凌 宁, 姜文汉. He-Ne 激光束的焦斑形态控制[J]. *强激光与离子束*, 1998, **10**(4): 581~586
- 10 Zeng Zhige, Ling Ning, Rao Xuejun. Simulation and Analysis of Active thin mirrors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(1): 88~94
- 曾志革, 凌 宁, 饶学军. 能动薄主镜技术模拟研究[J]. *强激光与离子束*, 1996, **8**(1): 88~94
- 11 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometric[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1281~1285
- 陈洪芳, 丁雪梅, 钟 志 等. 激光外差干涉检偏器旋转误差对非线性误差的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1281~1285
- 12 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Method to Reduce First Harmonic Nonlinearity in Laser Heterodyne Interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1027~1030
- 陈洪芳, 丁雪梅, 钟 志 等. 减小外差干涉一次谐波非线性误差的方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1027~1030
- 13 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and Analysis of Stochastic Parallel Gradient Descent Control Algorithm for Adaptive Optics System [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1355~1360
- 杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. *光学学报*, 2007, (8): 1355~1360