

基于浮动支撑的 620 mm 薄反射镜面形主动校正

李宏壮 张振铎 王建立 刘欣悦 吴小霞 张丽敏 张斌 王亮

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 对口径 620 mm、厚 18 mm 的弯月形薄反射镜进行了面形误差的主动校正实验,通过浮动支撑方式保证了在校正过程中镜面空间位置不变。实验主镜的支撑结构由轴向 36 个主动支撑点和侧向 6 个被动支撑点组成,在轴向支撑点对称选择中圈 3 个点作为虚拟硬点,通过调整其他促动器的支撑力保证虚拟硬点受力始终为零来实现浮动支撑。系统采用哈特曼波前传感器作为面形检测设备,采用最小二乘法计算校正力。实验中测出系统的像差校正能力,选择中低频的 Zernike 像差参与校正,并进行了不同俯仰角下面形的闭环与开环校正,实验结果表明通过浮动支撑方式有效地控制了校正过程中镜面的平移和倾斜。在不同俯仰角下通过闭环校正,均可将镜面面形误差均方根(RMS)的初始值(约 0.6λ , $\lambda=632.8$ nm)校正到约 $\lambda/15$,开环面形校正精度的 RMS 达到 $\lambda/10\sim\lambda/14$ 。通过实验研究了俯仰角变化时的面形校正过程和校正力计算方法,并验证了采用浮动支撑方式控制镜面空间位置的可行性。

关键词 光学设计;主动光学;面形误差校正;薄反射镜;浮动支撑;最小二乘法

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0511001

Active Surface-Profile Correction of 620 mm Thin-Mirror Based on Flotation Support

Li Hongzhuang Zhang Zhenduo Wang Jianli Liu Xinyue Wu Xiaoxia
Zhang Limin Zhang Bin Wang Liang

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

Abstract For a meniscus mirror with 620 mm diameter and 18 mm thickness, active correction of surface-profile error is carried out. Through flotation support, the spatial position of the mirror is fixed. The support system of the mirror consists of 36 axial active supports and 6 lateral passive supports. Three points in the middle circle of axial supports are chosen symmetrically as dummy hard points, and the flotation support is achieved through adjusting the support forces of other actuators to null the dummy hard point forces at all times. The Hartmann wavefront sensor is used as testing equipment and the least square method is used to calculate the active corrective forces. In the experiment, the correction ability of the active supports is analyzed first and low-frequency Zernike terms are selected for correction finally. Then the close-loop and open-loop correction at different elevations is carried out, and the results show that through flotation support, the surface-profile error can be corrected effectively without piston and tilt. More than 0.6λ ($\lambda=632.8$ nm) root-mean-square (RMS) of surface-profile error of the initial state can be corrected to $\lambda/15$ at any elevation angles, and the RMS of correction precision of open-loop reaches $\lambda/10\sim\lambda/14$. Through the experiment the feasibility of correction process with varying elevation angle and the arithmetic of correction forces are discussed, and the control of mirror position through flotation support is approved.

Key words optical design; active optics; surface-profile error correction; thin mirror; flotation support; least square method

OCIS codes 110.1080; 330.4460; 230.3990

收稿日期: 2012-09-25; 收到修改稿日期: 2012-11-07

基金项目: 中国科学院第三期创新工程资助课题。

作者简介: 李宏壮(1980—),男,博士,副研究员,主要从事主动光学、大口径波前探测和光学设计与检测等方面的研究。

E-mail: jilinbayan@163.com

1 引 言

主动光学和自适应光学是新一代大口径望远镜研制中的关键技术。自适应光学是通过小的变形镜在高达几百甚至上千赫兹的校正频率下对大气湍流引起的误差进行校正,它可以作为一套独立的系统安装在望远镜焦面上。与其相比,主动光学与望远镜的研制是紧密联系的。主动光学直接对望远镜的主镜进行校正,校正对象主要是主镜由于重力、温度引起的变形误差以及加工误差,由于这些误差变化缓慢,因此校正频率达到 $0.01\sim 0.1$ Hz即可^[1]。目前世界上口径4 m以上的望远镜大多采用了主动光学技术,国内南京天文光池技术研究所于2005年研制成功的大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)同时采用了薄镜面主动光学和拼接镜主动光学技术,在国际上具有重要地位^[2~4]。

主动校正力的计算一般采用最小二乘法,但计算结果无法保证支撑点的合力与合力矩为0,即无法保证镜面不发生平移和倾斜,而主镜空间位置的保证在望远镜中是至关重要的。如果采用固定的硬点来约束,则会由于硬点上力值的不确定性而影响面形校正精度。因此在校正过程中既能够控制镜面的空间位置,又不影响面形的校正,是主动光学在望远镜系统中应用的关键。国内的主动光学研究中,多采用固定硬点对主镜空间位置进行约束,而对浮动支撑方式研究的较少;但在国外主动光学望远镜研制过程中,浮动支撑方式作为主动支撑结构中的重要部分被研究并应用^[5~9],例如Advanced Electro-Optical System(AEOS)望远镜、Discovery Channel Telescope(DCT)望远镜采用3个硬点,Starfire Optical Range Telescope(SORT)望远镜、Multiple Mirror Telescope(MMT)望远镜、Large Binocular Telescope(LBT)望远镜采用6个硬点来监视镜面相对于主镜室的位置变化,并做相应调整;Very Large Telescope(VLT)望远镜则采用被动液压支撑与主动机电促动器调节的两级支撑系统,将支撑点对称分成3个区域,通过区域内液压的连接形成3个虚拟硬点来确定主镜位置。

本文针对口径620 mm、厚18 mm的弯月形薄反射镜进行了面形主动校正,该反射镜是正在研制的620 mm薄镜面主动光学望远镜的主镜部分^[10],校正过程中通过浮动支撑方式控制镜面的位置。为实现浮动支撑,在轴向支撑点的中圈对称地选择3个点作为虚拟硬点,根据虚拟硬点返回的力值调节其余促动器形成闭环,始终保证硬点受力为0。本文测出系统的像差

校正能力,并进行了浮动支撑方式下不同俯仰角的面形闭环校正与开环校正实验,通过实验研究了俯仰角变化时的面形校正过程和校正力计算方法,并验证了采用浮动支撑方式控制镜面空间位置的可行性。

2 校正力计算

根据主动光学原理,采用最小二乘法计算校正力^[2~4,11]。对单个促动器,镜面变形量与作用力的大小满足线性关系:

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n F_i w_i(x, y), \quad (1)$$

式中 F_i 为第 i 个促动器施加的作用力, $w_i(x, y)$ 为第 i 个促动器施加单位作用力时所引起的镜面变形,称为该促动器的响应函数, n 为促动器个数。由各促动器的响应函数组成的矩阵为该镜面的刚度矩阵。

根据Hook线性定律,各促动器引起镜面总的变形是单个促动器作用引起镜面变形的线性迭加,即如果用 $W_i(x, y)$ 表示第 i 个促动器所引起的镜面变形,则总的镜面变形量为

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i(x, y), \quad (2)$$

为了校正面形误差 W ,校正力 f 应满足

$$Cf = -W, \quad (3)$$

式中 C 为刚度矩阵。面形误差 W 用Zernike多项式表示^[12~14],写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial a_1}{\partial f_1} & \frac{\partial a_1}{\partial f_2} & \cdots & \frac{\partial a_1}{\partial f_n} \\ \frac{\partial a_2}{\partial f_1} & \frac{\partial a_2}{\partial f_2} & \cdots & \frac{\partial a_2}{\partial f_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial a_m}{\partial f_1} & \frac{\partial a_m}{\partial f_2} & \cdots & \frac{\partial a_m}{\partial f_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $a_i(i=1, \dots, m)$ 为校正的第 i 项Zernike系数,共校正 m 项。

用最小二乘法求(4)式的解为

$$f = -(C^T C)^{-1} C^T W, \quad (5)$$

为了对较大的解进行衰减,常采用阻尼最小二乘法:

$$f = -(C^T C + PI)^{-1} C^T w, \quad (6)$$

式中 P 是阻尼因子, I 为单位矩阵。 P 值对最终的校正效果影响不大,但 P 值越大,对解的衰减作用越强,校正次数越多;其值越小,则对力值的衰减效果越弱^[2]。实验中通过反复试取,选择 $P=0.1$,得到较理想的衰减效果,使计算出的校正力值控制在合适的范围内。

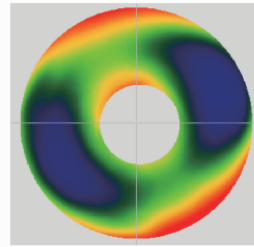
3 实验系统构成

实验系统硬件主要由薄反射镜、支撑结构、夏克-哈特曼波前传感器、力促动器与控制系统、转台与轴系、检测架与固定桁架等组成；主动校正软件由哈特曼波前采集与计算、校正力计算和促动器通讯的主控通讯等部分组成。

3.1 薄反射镜与支撑结构

待校正的主镜为口径为 620 mm、厚 18 mm 的半弯月球形面反射镜，径厚比为 34.4:1，曲率半径为 2841 mm，K9 材料，重 12.57 kg，中心孔直径为 170 mm。薄反射镜抛光下盘后的面形精度较低，其面形误差的均方根(RMS) (为 0.626λ , $\lambda=632.8$ nm)，峰谷值(PV)为 2.917λ ，面形轮廓如图 1 所示。

支撑结构包括 36 个由力促动器构成的轴向主



(PV: 2.917 λ , RMS: 0.626 λ)

图 1 主镜抛光后面形轮廓图

Fig. 1 Surface-profile of primary mirror after polishing
动支撑点和 6 个侧向被动支撑点^[15]。其中 36 个轴向支撑点按照 6、12、18 个分布在半径不等的三个圆周上；6 个侧支撑点等间隔地分布在主镜圆周上，侧支撑组件在轴向上具有柔性，避免对轴向的面形校正产生影响，如图 2 所示。

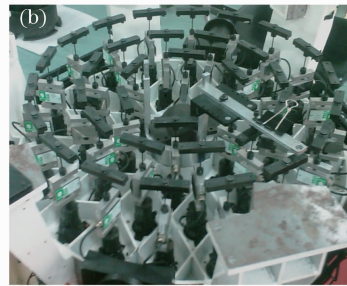
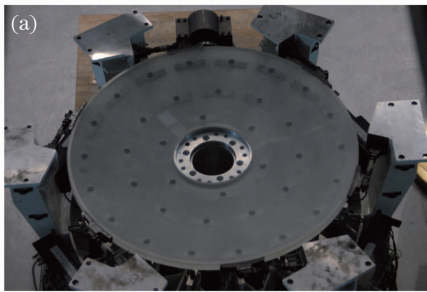


图 2 主镜支撑结构

Fig. 2 Support structure of primary mirror

3.2 哈特曼波前传感器

实验中采用自行研制的多功能模块化哈特曼波前传感器，包括光源模块、准直镜模块、分光棱镜模块、微透镜模块及相机模块^[16]。模块间具有通用接口，便于拆卸更换。通过标准波面标定，可将加工、调整等过程中引起的系统误差去除，从而提高测量精度，传感器如图 3 所示。传感器测出的波前误差采用 36 项 Zernike 多项式拟合。通过与 Zygo 干涉仪对比，以 Zygo 干涉仪为基准，传感器的测量精度的 RMS 优于 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm)，PV 优于 $\lambda/6$ ；重复精度，即灵敏度的 RMS 优于 $\lambda/200$ ，PV 优于 $\lambda/30$ 。

实验中使用的是子孔径为 $300 \mu\text{m}$ 、焦距为 7 mm 的大动态范围微透镜阵列，哈特曼波前传感器在反射镜上的采样点数为 272 个。

3.3 力促动器与控制系统

支撑结构中的轴向主动支撑点由力促动器构成，力促动器由位移促动器和力传感器组成^[17,18]，如图 4 所示，其中位移促动器采用步进电机与螺母丝杠结构，力传感器采用 STC-S 10 kg 型测力传感

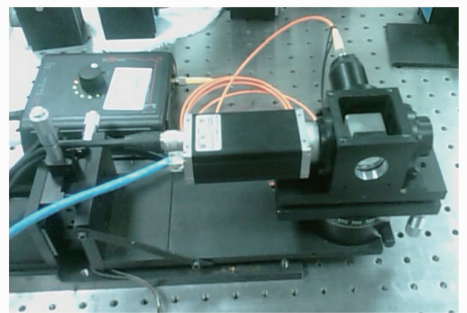


图 3 用于元件面形检测的哈特曼波前传感器

Fig. 3 Hartmann wavefront sensor used for testing surface-profile of component

器。通过比例-积分-微分 (PID) 闭环控制，促动器可在 ± 100 N 变化范围内达到小于 ± 0.05 N 的力输出精度，具体参数如表 1 所示。

3.4 主动校正软件系统

主动校正软件由哈特曼波前采集与计算、校正力计算、促动器通讯和主控通讯等部分组成。通过多线程编程技术，使软件能够在同一台计算机上进行指定频率下哈特曼波前数据采集计算、5 个通道

36 个促动力值的读出与发送、轴系编码器信号采集以及校正力计算等操作,且各操作之间互不影响

协调工作。软件结构和界面如图 5 所示。

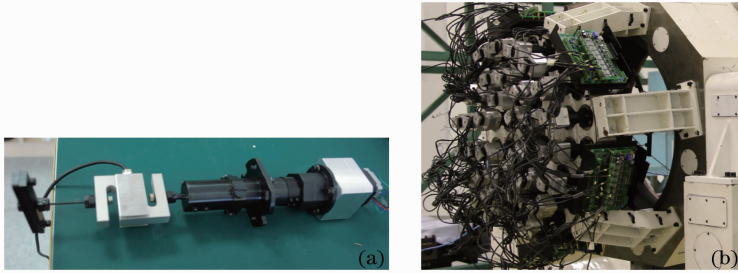


图 4 (a)力促动器及(b)控制电路

Fig. 4 (a) Force actuator and (b) control circuit

表 1 力促动器技术指标

Table 1 Technical index of force actuator

Output force range /N	Displacement range /mm	Fluctuation range /N	Response time /s	Force resolution /mN	Force precision /N
±100	10	$\Delta F_{pull} < 0.04$, $\Delta F_{push} < 0.05$	<5	<1	<±0.05

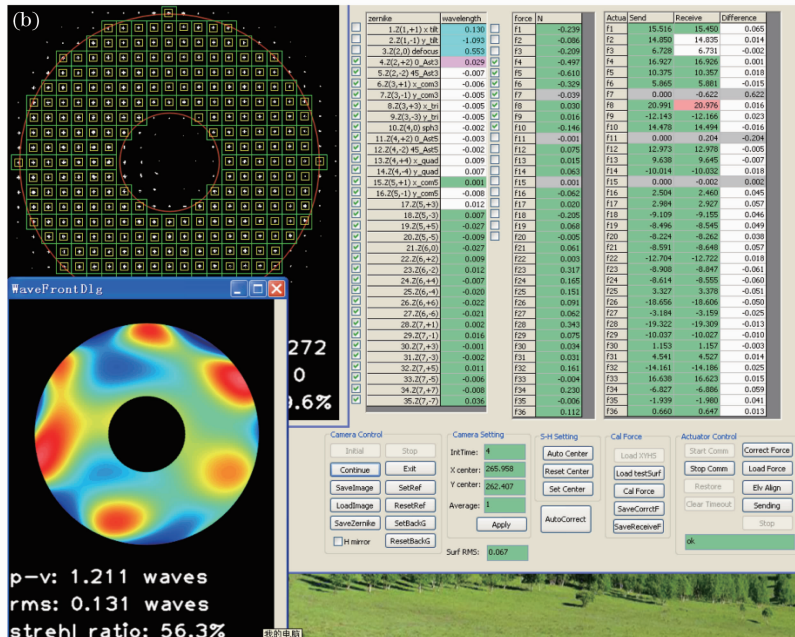
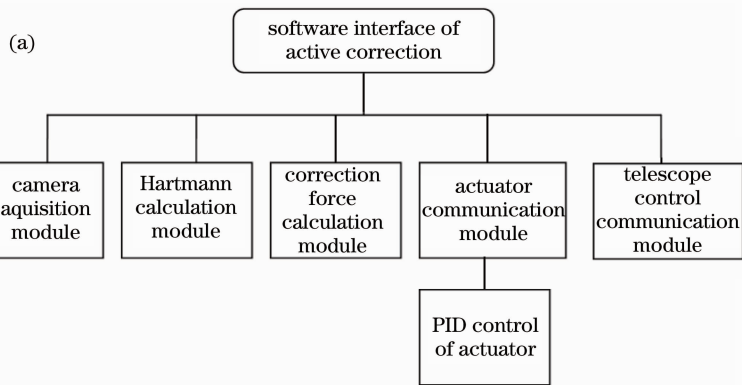


图 5 软件(a)结构和(b)界面

Fig. 5 (a) Configuration and (b) interface of software

3.5 浮动支撑的实现

主动光学浮动支撑定义为通过所有支撑力的调节,使主动支撑点的力始终与重力保持平衡,保证镜子所受的净力和净力矩为 0,不使固定支撑点(硬点)承受额外的力或力矩,从而保证镜面不发生平移和倾斜,镜子就像浮在固定点上一样。通过这种方式既能实现对镜面位置的约束又不影响对面形的改变。

为实现浮动支撑,在轴向主动支撑点的中圈对称选择 3 个点作为虚拟硬点,通过其反馈的力值作为镜面位置调整的依据。在浮动支撑下的面形校正可以分为三个闭环:1)通过力传感器的读出值对促动器输出力值的精确控制构成的光学闭环;2)通过虚拟硬点返回的力值对镜面位置的控制构成的光学闭环;3)通过哈特曼传感器测得的面形误差和促动器输出力的控制构成的光学闭环。三个闭环用于进行主镜面形误差的校正。而在实际中将后两个闭环通过算法融合在一起,同时完成镜面空间位置调整和面形校正。

轴向主动支撑点所受的力可分解为三部分:1)重力 G ,由于镜子重力在轴向的分量随俯仰角 z 变化,因此这部分力也要根据俯仰角度来计算;2)面形校正力 F ,这部分力要根据哈特曼传感器测出的面形误差计算;3)调整镜面位置的力,根据三个虚拟硬点反馈的力值 E 以及促动器与硬点之间的影响系数 K 计算,系数 K 通过实验测出。因此主动支撑点的力为

$$f_m = G_m \cos z + F_m + \sum_n K_{mn} E_n, \quad (7)$$

式中 m 为主动支撑点个数, $m=1, \dots, 33$; n 为虚拟硬点个数, $n=1, 2, 3$ 。

其中调整镜面位置的力根据三个虚拟硬点返回的力值 E 实时变化,并最终收敛为 0,使促动器的力值闭环到重力和校正面形力之和上,此时虚拟硬点受力为 0,实现了浮动支撑。由于在浮动支撑状态下,虚拟硬点的力始终维持不变,其刚度相当于无穷大,因此必须对三个虚拟硬点的初始位置进行调整,使其处于最佳位置。

4 实验过程及结果

将哈特曼波前传感器通过固定桁架和 5 自由度调整平台固定在主镜曲率中心位置,在不同俯仰角下进行闭环与开环的校正实验,实验装置如图 6 所示。

实验中首先要测出各主动支撑点的响应函数,方法是使单个促动器增加单位作用力(为提高响应函数

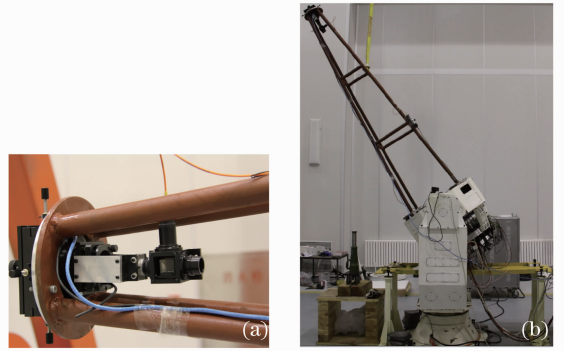


图 6 不同俯仰角下的闭环与开环校正实验装置图
Fig. 6 Experimental setup of close-loop and open-loop correction with varying elevation angle

的信噪比,单位力选为 3 N),并将加力后面形的 Zernike 像差系数变化作为该主动支撑点的响应函数,则 33 个主动支撑点的响应函数组成刚度矩阵。

4.1 校正能力分析

参与校正的 Zernike 像差项数要根据当前系统的校正能力来进行选择,校正能力与被校正镜的径厚比、促动器个数及位置分布有关^[14]。为了分析系统的校正能力,通过主动校正试图产生单位量的单项 Zernike 像差,实验中共分析了 16 项中低频 Zernike 像差,更高频的像差由于促动器个数和镜面径厚比的限制,对其校正需要很大的力,因此不加入校正范围。

图 7 为校正能力分析柱面图,其中每一个柱形图代表通过主动校正试图产生单位量的某项像差,图中横坐标为前 16 项 Zernike 像差的序号,纵坐标为归一化的结果面形中的前 16 项 Zernike 像差值。如果各项像差能得到完全校正,则除了红色柱形值为 1 外,其他均应为 0。图中 defocus(2,0)为离焦, $0^\circ \text{ast}3(2,2)$ 、 $45^\circ \text{ast}3(2,-2)$ 为两个方向的 3 阶像散, $x\text{-com}3(3,1)$ 、 $y\text{-com}3(3,-1)$ 为两个方向的 3 阶彗差, $x\text{-tria}(3,3)$ 、 $y\text{-tria}(3,-3)$ 为两个方向的三叶像差, $\text{sph}3(4,0)$ 为 3 阶球差, $0^\circ \text{ast}5(4,2)$ 、 $45^\circ \text{ast}5(4,-2)$ 为两个方向的 5 阶像散, $x\text{-quad}(4,4)$ 、 $y\text{-quad}(4,-4)$ 为两个方向的四叶像差, $x\text{-com}5(5,1)$ 、 $y\text{-com}5(5,-1)$ 为两个方向的 5 阶彗差, $(5,+3)$ 、 $(5,-3)$ 为两个方向的高阶三叶像差。

可见,defocus(2,0)、 $\text{ast}3(2,\pm 2)$ 、 $\text{com}3(3,\pm 1)$ 、 $\text{tria}(3,\pm 3)$ 、 $\text{ast}5(4,\pm 2)$ 和 $\text{quad}(4,\pm 4)$ 的产生效果较好,即系统对其校正能力较强;而产生 $\text{sph}3(4,0)$ 时会产生较大的 defocus(2,0),产生 $\text{com}5(5,\pm 1)$ 、 $(5,\pm 3)$ 的同时分别会产生较大的 $\text{com}3(3,\pm 1)$ 和 $\text{tria}(3,\pm 3)$,即 $\text{sph}3(4,0)$ 与 defocus(2,0)之间、 $\text{com}3$

和 com5 之间、(5, ±3) 与 tria(3, ±3) 之间有较强的耦合关系, 耦合的产生是由促动器个数和镜面经厚比

所限制的系统校正能力所决定的, 校正过程中尽量不要让互相耦合的像差成对地加入校正范围。

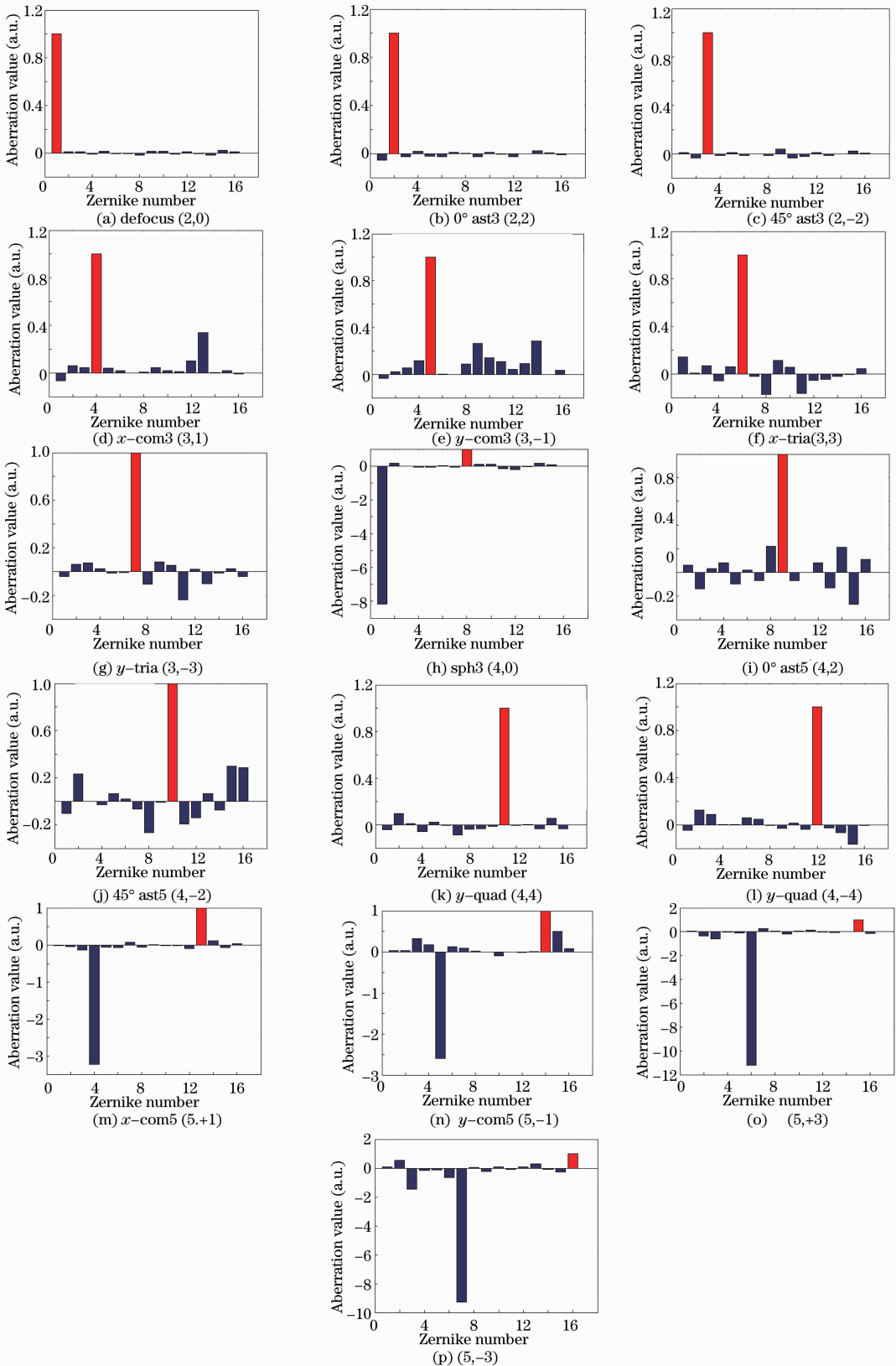


图 7 校正能力分析柱面图

Fig. 7 Cylinder figure of correction ability analysis

在校正实验中,一般将中低频的 ast3(2, ±2)、com3(3, ±1)、tria(3, ±3)、sph3(4, 0)、ast5(4, ±2)、quad(4, ±4) 共 11 项 Zernike 像差作为初始的校正范围,当未校正的某项像差在校正过程中达到较大值时,再将其加入校正范围,同时将其耦合的像差项去掉。

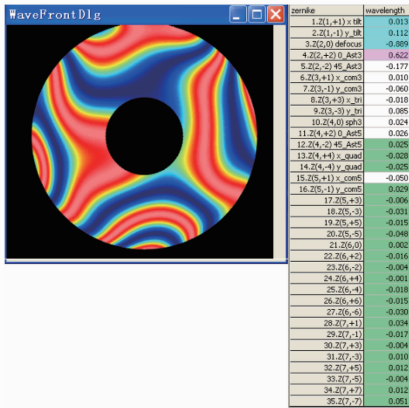
4.2 面形变化与俯仰角关系

为了找出重力对主镜面形的影响范围,实验中首先测试主镜面形与俯仰角度的关系。首先在俯仰

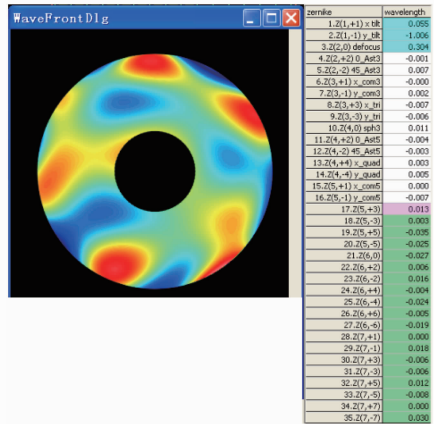
角为 0°(光路水平,镜面竖直)时对镜面进行主动校正,通过 2~3 次闭环校正,将初始状态面形误差的 RMS(约 0.6λ)校正到约 λ/16,如图 8 所示。由面形的 Zernike 像差系数可见,已将加入校正范围的低频像差都减小到接近于 0。由于受薄反射镜加工精度的限制,面形中存在一定量的中高频误差,而且由促动器个数和镜面径厚比所决定的系统校正能力有限,没有将其加入校正范围,因此最终的校正精度受上述残余中高频误差的限制。



(a) experimental setup



(b) before correction PV: 3.31λ, RMS: 0.56λ



(c) after correction PV: 0.6λ, RMS: 0.062λ

图 8 俯仰角为 0°时的面形校正及结果

Fig. 8 Surface correction and result when elevation angle is 0°

然后观察俯仰角度变化时面形变化的变化情况,如图 9 所示。可见俯仰角从 0°变化到 80°,面形误差的 RMS 从 λ/15 增加到约 λ/3,面形中的 0°ast3(2, -2)像差几乎呈线性增加,如图 10 所示。这是引起面形误差增大的主要原因,其他像差所引起的面形增

大并不明显。因此随着俯仰角的变化,要校正的像差主要是 3 阶像散,而这正是主动光学校正能力最强的像差项之一,因此在俯仰角不同时系统的校正精度应该都是接近的。

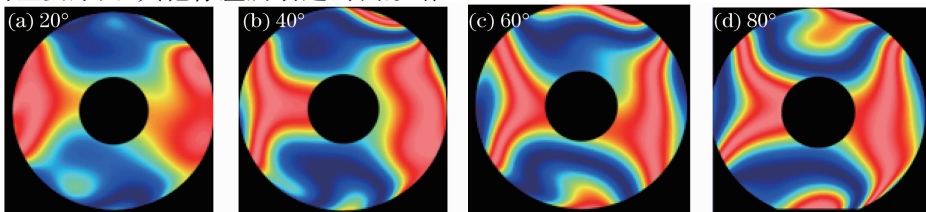


图 9 不同俯仰角下的面形轮廓图

Fig. 9 Surface-profile figure at different elevation angles

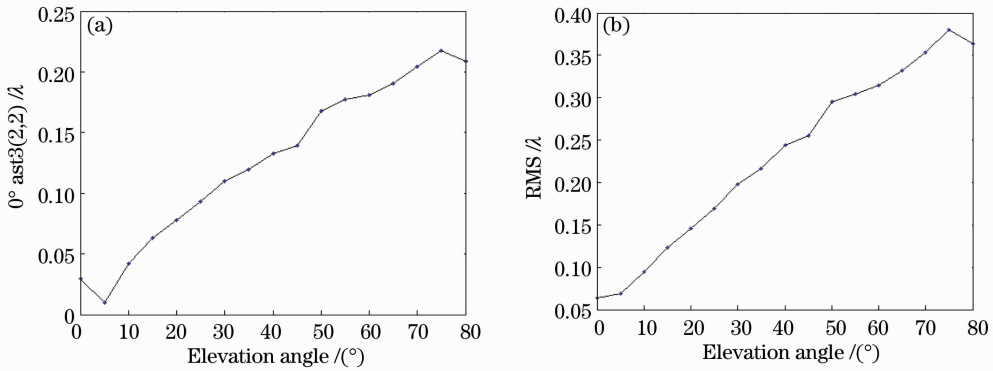


图 10 (a) $0^\circ \text{ast}3(2,2)$ 与(b)面形误差 RMS 随俯仰角的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of (a) $0^\circ \text{ast}3(2,2)$ and (b) surface-profile error RMS with elevation angle

4.3 不同俯仰角下的闭环校正

实验中俯仰角从 $0^\circ \sim 83^\circ$ 每隔 10° 做一次闭环校正。当不采用(7)式所描述的浮动支撑方式(即不对三个虚拟硬点力进行控制)时,每次面形校正后哈特曼波前传感器中的点斑整体位置将发生较大的不确定方向的移动,甚至超出哈特曼波前传感器的相机靶面,使测量无法进行。

当采用浮动支撑方式时,校正过程中三个硬点的力值始终保持在 0 附近,哈特曼波前传感器中的点斑整体位置变化远小于一个微透镜子孔径尺寸;从 Zernike 像差系数可以看出,由于镜面倾斜引起的波前倾斜误差小于 λ 。可见校正过程中镜面没有发生显著的倾斜和平移,通过浮动支撑方式有效地

保证了镜面的空间位置。

同时面形校正精度与不采用浮动支撑时相当,不同俯仰角下校正面形精度的 RMS 与镜面水平位置时的校正精度的 RMS 接近,达到约 $\lambda/15$,影响各俯仰角下闭环校正精度的是未加入校正范围的主镜加工后残余的中高频误差。

4.4 开环校正性能测试

将各俯仰角下的闭环校正力制成表,当俯仰角每变化 10° 时,更新一次轴向支撑力,对系统的开环校正性能进行测试,力的施加同样在浮动支撑状态下进行,以保持主镜空间位置不变。开环校正后的面形轮廓如图 11 所示,可见通过开环校正可以在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 范围内维持面形精度的 RMS 为 $\lambda/10 \sim \lambda/14$ 。

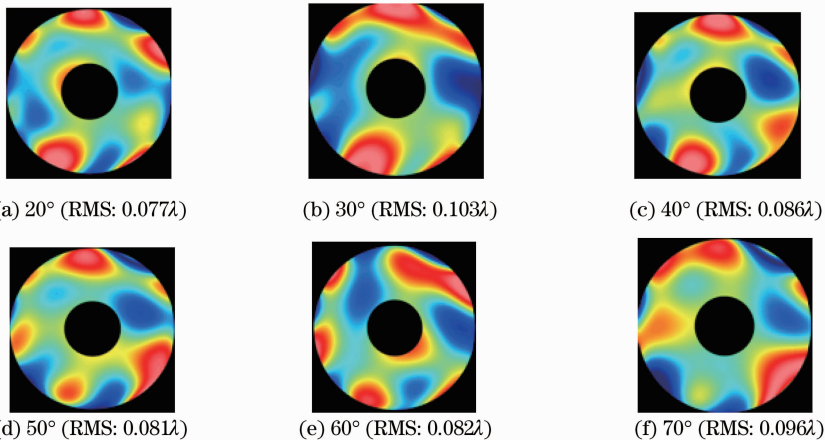


图 11 开环校正后的面形轮廓图

Fig. 11 Surface-profile figure after open-loop correction

影响开环校正精度的主要因素是侧向被动支撑的受力变化、轴向支撑的重复性以及重力引起的传感器测量误差。望远镜工作时应该以一定周期重新标定开环校正力。

5 结 论

针对正在研制的 620 mm 薄镜面主动光学望远镜的主镜进行了面形校正实验,通过浮动支撑方式保证了校正过程中镜面的空间位置。实验中首先测出系统的校正能力,选择中低频的 Zernike 像差参

与校正；而后在浮动支撑状态下，进行了不同俯仰角下的闭环和开环校正实验，通过观察哈特曼波前传感器的测试结果和硬点力传感器的读出值，验证了浮动支撑方式对保持主镜空间位置的有效性。不同俯仰角下面形闭环校正精度的 RMS 可达到 $\lambda/15$ ，被校正的低频误差都减小到接近于 0，残余误差主要是未加入校正范围的中高频的主镜加工误差；开环校正下面形精度的 RMS 可维持在 $\lambda/10 \sim \lambda/14$ 。通过实验发现对于中小口径的主动光学望远镜，通过 3 个硬点完全可以确定主镜的空间位置，保证镜面不发生平移和倾斜。即使口径达到 8 m，只要将轴向硬点数增加至 6 个，采用类似的控制方法即可。通过实验研究了俯仰角变化时的面形主动校正过程以及校正力计算方法，并验证了采用浮动支撑方式控制镜面空间位置的可行性，为下一步主动光学望远镜的研制与实验提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Su Dingqiang, Cui Xiangqun. Active optics — key technology of the new generation telescopes [J]. *Astronomy Evolution*, 1999, **17**(1): 1~14
苏定强, 崔向群. 主动光学——新一代大望远镜的关键技术[J]. *天文学进展*, 1999, **17**(1): 1~14
- 2 Su Dingqiang, Jiang Shengtao, Zou Weiyao *et al.*. Experiment system of thin-mirror active optics [C]. *SPIE*, 1982, **2199**: 609~621
- 3 Su Dingqiang, Cui Xiangqun, Wang Yanan *et al.*. Large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) and its key technology [C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 76~90
- 4 Cui Xiangqun, Su Dingqiang, Li Guoping *et al.*. Experiment system of LAMOST active optics [C]. *SPIE*, 2004, **5489**: 974~985
- 5 J. E. Kimbrell, D. Greenwald. AEOS 3.67 m telescope primary mirror active control system [C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 400~411
- 6 H. M. Martin, S. P. Callahan, B. Cuerden *et al.*. Active supports and force optimization for the MMT primary mirror [C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 412~423
- 7 T. A. Sebring, E. Dunham, R. L. Millis. The discovery channel telescope: a wide field telescope in northern Arizona [C]. *SPIE*, 2004, **5489**: 658~666
- 8 H. M. Martin, B. Cuerden, L. R. Dettman *et al.*. Active supports and force optimization for the first 8.4 m LBT mirror [C]. *SPIE*, 2004, **5489**: 826~837
- 9 M. Schneermann, X. Cui, D. Enard *et al.*. ESO VLT III: the support system of the primary mirrors [C]. *SPIE*, 1990, **1236**: 920~928
- 10 Li Hongzhuang, Han Changyuan, Liu Xinyue *et al.*. Optical design of 600 mm diameter telescope based on spheric components [J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(4): 509~516
李宏壮, 韩昌元, 刘欣悦等. 基于球面的 600 mm 望远镜光学系统设计 [J]. *光学技术*, 2010, **36**(4): 509~516
- 11 Li Hongzhuang, Lin Xudong, Liu Xinyue *et al.*. Experiment system of 400 mm thin mirror active optics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(9): 2077~2083
李宏壮, 林旭东, 刘欣悦等. 400 mm 薄镜面主动光学实验系统 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(9): 2077~2083
- 12 R. N. Wilson, F. Franza, L. Noethe. Active optics 1: a system for optimizing the optical quality and reducing the costs of large telescopes [J]. *J. Modern Optics*, 1987, **34**(4): 485~509
- 13 L. Noethe, T. Franza, P. Giordano *et al.*. Active optics 2: results of an experiment with a thin 1 m test mirror [J]. *J. Modern Optics*, 1988, **35**(9): 1427~1457
- 14 M. Iye, T. Noguchi, Y. Torii *et al.*. Active optics experiments with a 62 cm thin mirror [C]. *SPIE*, 1990, **1236**: 929~939
- 15 Wu Xiaoxia. Design research on tangent lateral support of thin meniscus mirror [J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2011, **34**(1): 53~56
吴小霞. 弯月薄镜的切向侧支撑设计研究 [J]. *长春理工大学学报*, 2011, **34**(1): 53~56
- 16 Li Hongzhuang, Wang Zhichen, Liu Xinyue *et al.*. Application of Shack-Hartmann wavefront sensor in optical testing [J]. *J. Applied Optics*, 2012, **33**(1): 134~138
李宏壮, 王志臣, 刘欣悦等. Shack-Hartmann 波前传感器在光学检测中的应用 [J]. *应用光学*, 2012, **33**(1): 134~138
- 17 Zhang Limin, Zhang Bin, Yang Fei *et al.*. Design and test of force actuator in active optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(1): 38~44
张丽敏, 张斌, 杨飞等. 主动光学系统力促动器的设计和测试 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(1): 38~44
- 18 Tang Jinlong, Zhang Jun, Wang Shaobai *et al.*. Pneumatic force actuator for telescope primary mirrors support [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0623005
唐金龙, 张俊, 王少白等. 望远镜主镜气压力驱动器设计 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0623005

栏目编辑：张 腾