

文章编号 1004-924X(2011)05-1022-08

620 mm 薄镜面的主动支撑结构及面形校正

陈夫林^{1,2}, 张景旭^{1*}, 吴小霞¹, 范磊^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了提高大口径薄镜面望远镜主镜在不同俯仰角度的支撑面形精度, 采用模态振型模式定标实时对主镜面形进行了主动校正。针对口径为 620 mm, 厚度为 18 mm, 底支撑采用 36 点主动支撑, 侧支撑采用 6 点切向被动支撑的薄镜面主动支撑系统, 分析了主镜自由振动时的模态振型; 在进行主动校正前将其前 10 阶模态振型的 RMS 值归一化为 1 000 nm, 定标出相应的校正力; 分析了不同俯仰角下主镜面形的变化, 并采用最小二乘法用模态振型为底基函数拟合了主镜面变形, 求解出主动校正力; 对比校正面形和原始面形的关系, 在二次主动校正之后分析了拟合残差和校正残差的关系。最终校正结果显示, 主镜垂直放置时, 用最大 2.23 N 的校正力可将其面形 RMS 从 27.62 nm 校正到 12.95 nm; 主镜水平放置时, 用最大 0.59 N 的校正力可将其面形 RMS 从 7.68 nm 校正到 2.84 nm。得到的结果验证了采用模态振型校正主镜面形的可行性。

关键词: 主动光学; 薄镜面; 面形校正; 支撑结构; 模态振型; 最小二乘法; 有限元

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1022

Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction

CHEN Fu-lin^{1,2}, ZHANG Jing-xu^{1*}, WU Xiao-xia¹, FAN Lei^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to improve the surface precision of a thin primary mirror in a large aperture telescope at different altitude angles, the active correction procedure based on vibration modal calibration was proposed. For a thin primary mirror with the 620 mm in diameter, 18 mm in thickness and the axial mounting in 36 points for the active support, the lateral mounting in 6 tangent points for the passive support, the free vibration mode of primary mirror was analyzed by finite element method and the first 10 vibration modes of the primary mirror were calibrated. Their RMS values were unified to 1 000 nm, also the calibration forces were calculated. Furthermore, the surface of the primary mirror with different altitude angles was analyzed, the deformations were fitted by the modal vibration mode using least square method, and the corrective forces were calculated. Finally, the corrected surface

收稿日期: 2010-06-25; 修订日期: 2010-09-09.

基金项目: 中科院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程专项基金资助项目

precision and initiative surface precision were compared, and the fitted surface precision and remanent surface precision were analyzed after the second active correction. Corrected results demonstrate that the deformation (RMS) of the primary mirror is corrected from 27.64 nm to 12.95 nm while it is vertically positioned by using the maximum corrective force of 2.23 N, and from 7.68 nm to 2.84 nm while horizontally positioned by using the maximum corrective force of 0.59 N. The simulation shows that the algorithm using modal vibration to actively correct the primary mirror surface is feasible.

Key words: active optics; thin primary mirror; surface calibration; supporting structure; modal vibration; least square method; finite element method

1 引 言

面形精度是大口径望远镜追求的重要精度指标之一。随着望远镜主镜径厚比不断增大,主镜刚度急剧下降,传统的被动支撑的方式已经不能满足望远镜主镜面形精度要求。为提高望远镜主镜的面形精度,国外早在 20 世纪 80 年代就开始研制主动光学望远镜,欧洲南方天文台成功研制 3.5 m NTT 主动光学望远镜,随后又成功建造了 4 架 8.2 m VLT 主动光学望远镜;日本也建造了 7.6 m JNLT 主动光学望远镜。国内的主动光学技术起步较晚,南京天文仪器厂进行了口径为 500 mm 的薄镜面主动光学实验,校正后面形精度为 20~40 nm,北京理工大学 230 mm 口径薄镜面主动光学试验主镜面形的 RMS 值校正到 21 nm;中科院长春光机与物理研究所的 400 mm 口径薄镜面主动光学试验将初始状态的面形 RMS 从 772 nm 校正到 76 nm;苏州大学的 500 mm 口径主动光学试验将主镜面形 RMS 校正到 31 nm,不难看出,主动光学技术已经成为大口径望远镜必须掌握的关键技术^[1-6]。

国内的主动光学试验系统校正主镜面形的方法都是通过求主镜变形相对于校正力变化的响应函数得出主镜的刚度矩阵,然后根据镜面变形求校正力,但相关报道并没有给出校正力的数值^[2-4]。本系统采用模式定标法求解主动校正力,建立了主镜支撑系统的有限元模型,定标分析了主镜前 10 阶模态振型,并给出相应的定标力,用模态振型拟合了镜面变形,用自由谐振模式法校正了主镜面形,给出了主动校正过程中校正力的大小;在讨论主镜的校正时考虑了侧支撑结构对主动支撑系统的影响,并对比了拟合残差和校正残差;最后,对此主动光学系统的性能进行了评价。

2 自由谐振模式校正原理

薄镜面主动光学利用支撑镜面的力促动器使主镜形状发生改变,从而实现镜面面形的校正^[1,6,9]。薄镜面主动光学校正的误差源自望远镜本身的光学、机械加工、装校等系统误差和望远镜光学和机械部件的重力变形以及温度梯度引起的热变形,它们都是低频误差。

薄镜面主动光学常用的波面拟合的底基函数分为两种^[10-11]模式:一种模式侧重光学像质表达,如 Zernike 多项式;另一种模式侧重机械结构特性,如主镜的自由谐振模式。波面拟合的方法不同,求解校正力的方法也不同。

本文采用自由谐振模式定标法,该方法预先确定出主动支撑系统对应于各个模态振型所需的校正力的分布,将主镜变形分解成各个模态振型的叠加,然后根据模态振型校正力的分布求解镜面变形的校正力,使主镜产生弹性变形以获得理想的镜面变形。

主镜自由谐振模式拟合波面变形的为^[7]:

$$W(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \Psi_k(x, y), \quad (1)$$

式中 a_k 为镜面变形 $W(x, y)$ 在基底向量 $\Psi_k(x, y)$ 的系数, $\Psi_k(x, y)$ 代表模式定标时,模态振型为 k 时 (x, y) 点的位移值。

校正主镜变形 $W(x, y)$ 所施加的校正力为:

$$F_{\text{cor}} = - \sum_{k=1}^m a_k F_k, \quad (2)$$

F_k 为模式定标时,当模态振型为 k 时促动器施加给主镜的定标力。论文采用模态振型拟合镜面变形求解校正力从而校正镜面面形的流程,如图 1 所示。

论文理论分析基于 Hooke 定律、收敛定律和正交定律 3 点假设。Hooke 定律用来表述主镜变形符合线性叠加规律；收敛定律解释了随着空

间频率的增加,弹性模式幅值的收敛特性;正交定律是模态振型拟合主镜变形的依据,某项模态振型的校正对其他项不产生影响。

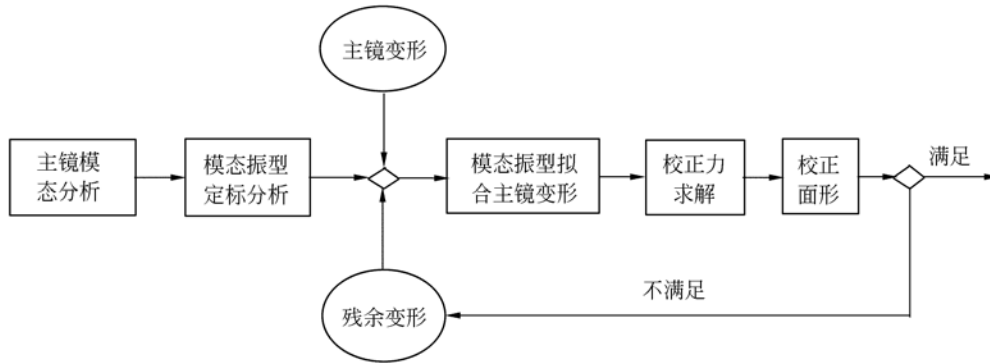


图 1 主动校正镜面变形流程图

Fig. 1 Flow chart of active correction of primary mirror

3 主动校正

3.1 主动支撑系统模型

主动光学试验系统中所采用的主镜材料为 K9 玻璃,主镜参数如下:

直径 D : 620 mm

中心孔 D_0 : 170 mm

厚度 t : 18 mm

曲率半径 SR : 2 841.2 mm

弹性模量 E : 90600 MPa

泊松比 ν : 0.26

密度 ρ : $2.53 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$

主镜质量 m : $12.75 \times 10^{-3} \text{ t}$

主动支撑结构底支撑采用 3 圈 36 点主动支撑,当主镜水平放置时,每个支撑点理论承重为 3.474 N。根据水平状态下每个支撑点承受相同重力分量原则,有限元分析优化支撑点的位置和支撑半径^[7-8,12]如图 2 所示。表 1 给出了各支撑圈半径和支撑点数目以及支撑圈上的支撑力大小。水平放置时镜面面形的 RMS 可以达到 3.67 nm。

表 1 主动支撑点位置优化结果

Tab. 1 Optimized location of active support points

支撑圈	支撑点数目	支撑圈直径/mm	方位角间隔/(°)	支撑力分布/N
1	6	224	60	3.470
2	12	369	30	3.474
3	18	548	20	3.477

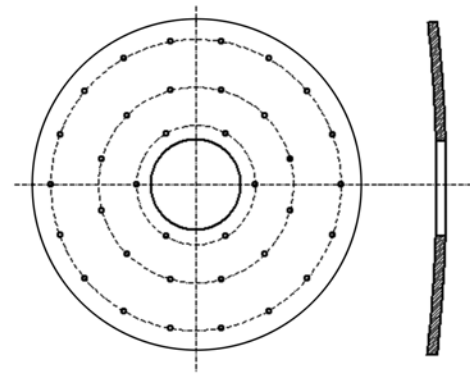


图 2 主镜形状及其支撑点位置

Fig. 2 Primary mirror and its active support points

侧向支撑结构采用 6 个均匀分布的切向被动支撑,美国 4.2 m SOAR 望远镜曾采用过这样的侧支撑结构^[13]。图 3 给出了主镜支撑系统的结构及其有限元模型。被动的侧支撑结构会对底支撑力产生一定的影响,特别是靠近侧支撑结构的最外圈的底支撑力会发生一定的波动。图 4 为主镜水平放置时的侧支撑结构引起底支撑力的变化,水平放置时主镜的 RMS 值降为 7.68 nm。

在进行主动校正时每个促动器施加在主镜上的力 F_i 可以分为两部分,即

$$F_i = F_{i, \text{gra}} + f_{i, \text{cor}}, \quad (3)$$

式中 $F_{i, \text{gra}}$ 为支撑力,用于支撑主镜重量, $f_{i, \text{cor}}$ 为校正力,用于校正主镜面形。

$F_{i, \text{gra}}$ 随着主镜俯仰角度变化有如下关系:

$$F_{i, \text{gra}}(\theta) = F_{i, \text{gra}}(0) \cos \theta, \quad (4)$$

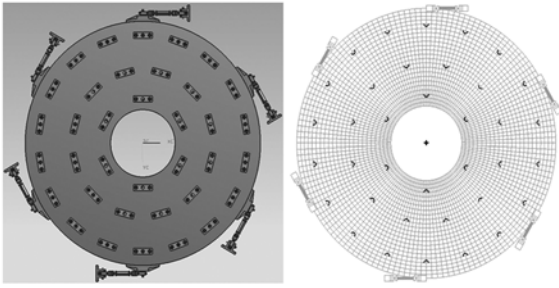


图 3 主镜支撑单元模型及其有限元模型

Fig. 3 Active support of primary mirror and its FE model

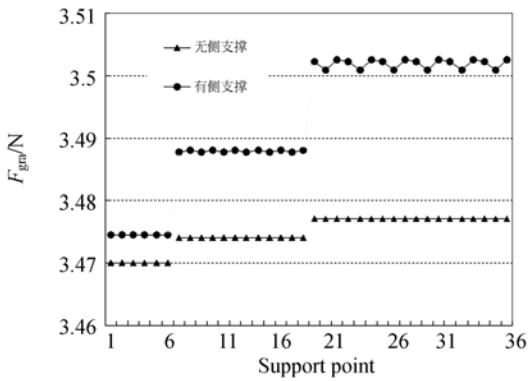


图 4 水平放置时侧支撑结构对底支撑力的影响

Fig. 4 Impact of lateral support on axial support force

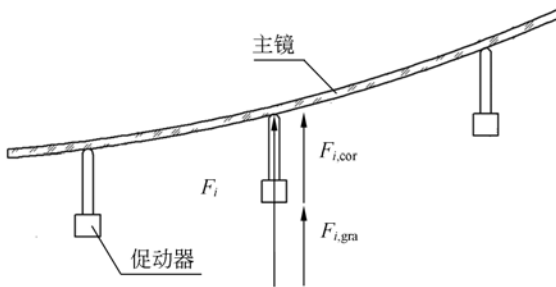


图 5 促动器施加在主镜上的力 F 分解图

Fig. 5 Decomposition of applied actuator force

θ 为主镜的俯仰角,主镜水平放置时 $\theta=0^\circ$, 竖直放置时 $\theta=90^\circ$ 。主镜水平放置时 36 个支撑点支撑力满足:

$$\sum_{i=1}^{36} F_{i,gra}(0) = G, \quad (5)$$

即支撑力之和等于主镜重力 G ,图 4 带圆点的曲线即为各个支撑力 $F_{i,gra}(0)$ 的大小。

主动校正要求促动器给主镜的校正力之和满足:

$$\sum_{i=1}^{36} F_{i,cor} = 0. \quad (6)$$

通过式(2)可知,每个点的校正力都是模态振型标定力的线性组合,表 3 的定标结果表明,所有模态振型的定标力之和为零,从而保证了校正力之和为零。

3.2 主镜自由谐振模式分析

在无约束条件下对主镜模型进行模态分析,有限元模型采用薄壳单元模型做分析。去除刚体模态后,对前 10 阶自由谐振模式进行了计算。表 2 列出了主镜采用壳单元分析后的前 10 阶固有谐振频率以及相应的径向变化数和旋转对称数。

表 2 主镜前 10 阶模态

Tab. 2 The first 10 modes of primary mirror

模态	径向变化数	旋转对称数	谐振频率/Hz
1	2	2	256.52
2	2	0	517.64
3	3	3	630.18
4	3	1	962.65
5	4	4	1101.5
6	4	2	1601.1
7	5	5	1667.6
8	4	0	2283.2
9	6	6	2323.5
10	5	3	2451.4

图 6 给出了主镜面自由振动的前 10 阶自由谐振模式模态振型,按振型由低到高排列。可以

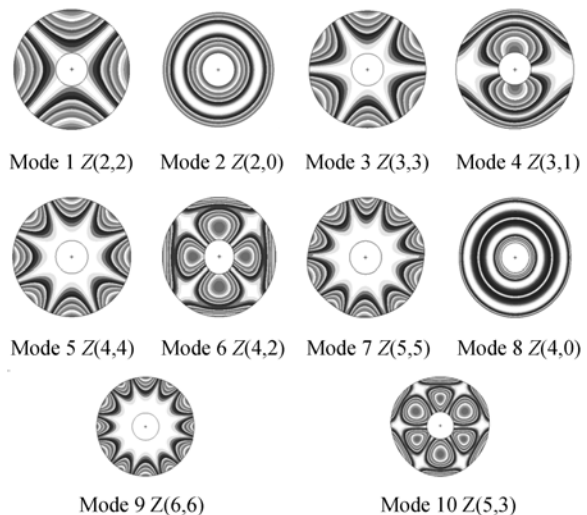


图 6 10 阶初级相差模式的模态振型

Fig. 6 The first 10 modes of primary mirror similar to optical aberration

看出:主镜的自由谐振动模式与通常的光学检测中使用的 Zernike 多项式像差模式十分相像,根据其环域内的正交性和完备性,从最低阶项开始选取,取的项数足够多的话,可以作为底基函数描述光学波前误差。

3.3 自由谐振模式定标

为了预算主镜轴向主动支撑系统的主动校正能力,对前 10 阶自由谐振模式下的主镜变形进行了有限元模拟^[9,14],同时为了便于用模态振型拟合镜面变形,将前 10 阶模式面形的 RMS 归一化为 $\lambda=1\ 000\ \text{nm}$ 作为参考波面。表 3 总结了这 10 种模式下主镜的主动光学性能, $F_{1\max}$, $F_{2\max}$, $F_{3\max}$ 为各个支撑圈上的最大定标力。模态振型由主镜结构计算得到,符合主镜的变形特性,它们都是最

小弯曲模式,拟合波面得到的残余误差也小^[8]。

从定标分析结果来看:初阶模态振型的定标结果好,校正力小,定标误差小;随着模态振型的增加,定标效果逐渐下降,校正力增大,定标误差也增大。高阶模态定标效果并不理想,这是由于促动器位置和数量的限制引起的,当主镜模态振型的变化比促动器排布间隔更紧密时定标效果急剧下降,符合收敛定律。

根据模态振型定标原理,每阶模态振型的定标力之和应为 0,才能保证主动校正时施加在主镜上的校正力之和为零。定标结果显示:主动定标力误差之和的最大值发生在第 10 阶模态,定标力之和的最大值小于 0.05 N。

表 3 镜面 RMS 值归一化为 1 000 nm 时的定标分析结果

Tab. 3 Calibration of primary mirror while modal vibration RMS value is unified to 1 000 nm

模式	归一化数值		定标结果					定标误差	
	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm	$F_{1\max}/\text{N}$	$F_{2\max}/\text{N}$	$F_{3\max}/\text{N}$	$\sum F$	/%
1	4 828	1 000	4 680	998.2	-4.53	3.48	6.92	0.000	0.18
2	3 109	1 000	2 880	957.0	-19.39	-7.77	11.76	-0.017	4.30
3	5 320	1 000	5 051	981.2	3.05	-1.28	20.45	0.000	1.88
4	4 292	1 000	4 183	964.6	23.85	-24.10	14.29	0.000	3.54
5	5 767	1 000	5 205	952.6	-5.99	5.55	-47.92	-0.005	4.74
6	3 791	1 000	3 344	866.3	57.94	-83.15	40.07	0.000	13.37
7	6 088	1 000	5 187	895.0	10.37	27.67	98.76	0.000	10.50
8	3 419	1 000	2 648	741.6	119.40	-105.26	31.09	0.025	25.84
9	6 363	1 000	4 525	805.8	1.61	-1.28	-162.57	0.000	19.42
10	3 945	1 000	3 161	793.4	-68.30	123.57	59.17	-0.046	20.66

3.4 第一次主动校正

为验证主动支撑系统的校正性能,本文分析了主镜随俯仰角 θ 变化的变形规律,以 15° 为一个间隔,分析了主镜从水平放置到竖直放置的镜面变化规律,同时采用自由谐振模式定标的方法一次主动校正了镜面面形。表 4 给出了主镜随俯仰角变化的镜面面形的 RMS 值、校正后镜面的 RMS 值以及每个支撑圈上的最大支撑力。

可以发现:主镜水平放置时,面形精度较好,主动校正效果并不十分明显,这是因为水平放置时底支撑力分布较为均匀,镜面面形好,镜面 RMS 值小,但促动力的变化引起被动侧支撑力变化,从而影响了主镜镜面面形,主镜水平放置时其 RMS 值从 7.68 nm 校正到 4.20 nm,并没有达到

主镜无侧支撑结构时的面形 RMS 值 3.68 nm,这也是侧支撑采用被动支撑的一个缺点。随俯仰角的增大,主镜面形的 RMS 越来越大,主动校正效

表 4 镜面变形及一次校正后的面形 RMS 值

Tab. 4 RMS of mirror surface before and after corrections

俯仰角	变形 RMS	$F_{1\max}$	$F_{2\max}$	$F_{3\max}$	校正 RMS
	/nm	/N	/N	/N	
0	7.68	1.221	-1.221	-0.090	4.20
15	10.30	1.238	-1.274	-0.622	5.18
30	15.33	1.171	-1.322	-1.227	7.51
45	20.27	1.034	-1.354	-1.701	9.76
60	24.23	0.797	-1.048	-2.214	11.90
75	26.75	0.523	-0.805	-2.492	13.10
90	27.62	0.231	-0.637	-2.524	13.42

果越来越明显,主镜垂直放置时可以将其面形 RMS 值从 27.62 nm 校正到 13.42 nm。

为了评析主动支撑系统的校正能力,本文对校正后面形的 RMS 值与拟合残差的面形值做了对比,如图 7 所示。可以看出:校正残差与拟合残差相一致,证明了主动支撑系统的主动校正能力,说明此主动光学系统能够校正绝大部分的拟合波面。

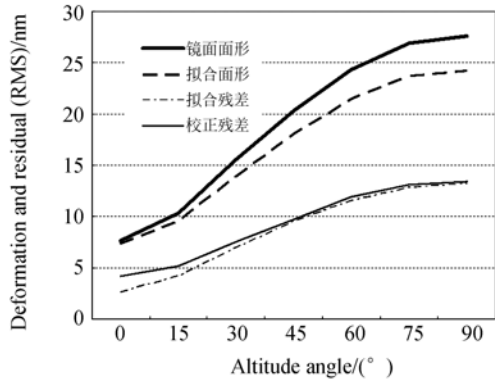


图 7 第一次校正后校正面形与拟合面形,拟合残差与校正残差的 RMS 对比

Fig. 7 Comparison between fitted surface and mirror deformation, fitted residual and corrected residual with different altitude angles after the first correction

3.5 第二次主动校正

为了评析此主动光学系统是否已经达到校正极限,本文又对第一次校正后的波面进行拟合,重新计算了校正力,用于进一步校正主镜面形。

第二次校正各支撑点的校正力大小为:

$$F_{i,cor}^2 = F_{i,cor}^0 + F_{i,cor}^1 \quad (7)$$

$F_{i,cor}^0$ 的上标 0 表示第一次主动校正求的校正力,1 表示第二次面形拟合求得的校正力,2 表示第二次主动校正施加在主动支撑点上的校正力。

本文同时对比了第二次校正后的镜面面形 RMS 值与拟合后的残差面形值,如图 8 所示。可以看出,拟合残差随着镜面面形的增大而增大,拟合面形的 RMS 值相比镜面面形较小,这是因为第二次拟合的波面是第一次主动校正后的波面,其误差项都是高频项,很难用低阶项拟合。同时,校正残差和拟合残差的变化趋势也一致,进一步验证了此系统的主动校正性能。

3.6 校正结果分析

图 9 给出了两次主动校正后的主镜面形变化

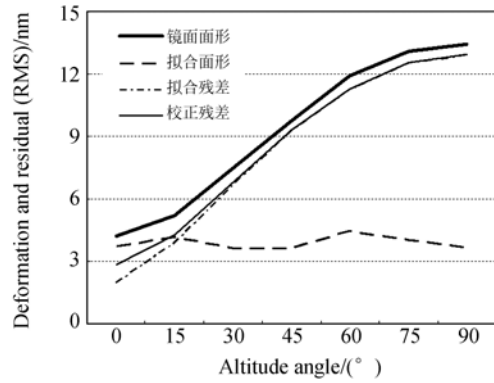


图 8 第二次校正后校正面形与拟合面形,拟合残差与校正残差的 RMS 对比

Fig. 8 Comparison between fitted surface and mirror deformation, fitted residual and corrected residual with different altitude angles after the second correction

曲线对比,细实线代表主镜面形 RMS 值随俯仰角度的变化,圆点标识的细实线代表第一次校正后面形的 RMS 值变化,粗实线代表第二次校正后面形的 RMS 值。可以看出第二次校正的主镜面形 RMS 值比第一次的值都要小。具体来说:主镜的面形值在水平时有较大的改善,RMS 值从 4.20 nm 降低到 2.84 nm,优于无侧支撑结构的镜面变形 3.68 nm,这是因为主镜水平放置时,各个点的支撑力基本上相差不大,当进行第一次主动校正时校正力较大,引起了被动侧支撑结构较大的约束反力,使主镜面形精度变差;第二次校正后时校正力明显减小,使得侧支撑结构的约束反力也较小,面形精度变好。随俯仰角度的增大,第

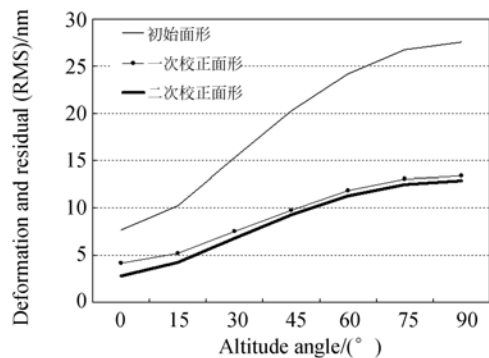


图 9 校正面形与被动支撑主镜面形随角度变化的 RMS 值

Fig. 9 Deformation (RMS) of primary mirror with different altitude angles before and after corrections

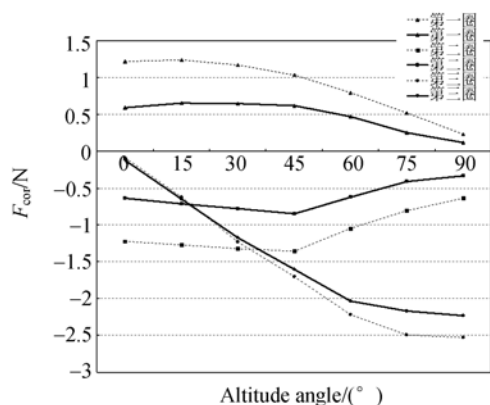


图 10 各个支撑圈上的最大支撑力随俯仰角度的变化

Fig. 10 Maximum correction force on different rings with different altitude angles

二次校正效果并不十分显著。

图 10 给出了各个支撑圈上最大校正力随俯仰角度变化的曲线。三角形标注的为第一圈,正方形标注的为第二圈,圆形标注的为第三圈。虚线为第一次校正时各个支撑圈上的最大校正力,实线为第二次校正时的各支撑圈上的最大校正力。可以看出第二次校正时各个支撑圈上的主动

参考文献:

- [1] RAY F B. Active optics technology—an overview [J]. *SPIE*, 1991, 1532: 188-206.
- [2] 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.
- YU Y, CAO G R. A study on the corrective capability and optimization of active mirrors[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(2): 229-233. (in Chinese)
- [3] 曾春梅, 郭培基, 余景池. 0.5 m 超薄镜主动支撑面形校正及实验[J]. *光学精密工程* 2010, 18(3): 570-578.
- ZENG C M, GUO P G, YU J C. Deformation and analysis on Correction of 0.5m ultra-thin mirror with active supports [J]. *Optics Precision Eng.*, 2010, 18(3): 570-578. (in Chinese)
- [4] 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.
- LI H Z, LIN X D, LIU X Y, *et al.*. Experiment system of 400mm thin mirror active optics [J].

校正力均比第一次校正时要小,第一圈和第二圈上校正力都减小了约 0.5 N,最外圈校正力最初变化不明显,当俯仰角变大时触动力明显减小。

综上所述,第一次主动校正改善了主镜的面形精度,第二次主动校正对主镜面形精度改善不明显,但各个支撑圈上的最大主动校正力都有了不同程度的减小。

4 结 论

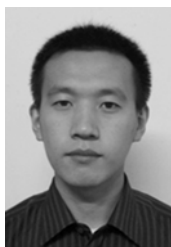
本文完成了主镜前 10 阶自由谐振模式的定标,分析了不同俯仰角下重力引起的镜面变形;并利用定标结果,采用主镜的自由谐振模式对主镜变形拟合,对不同俯仰角下的主镜变形进行校正。最终校正结果显示,当主镜水平放置时,可将重力引起的主镜镜面变形 RMS 值由 7.68 nm 校正为 2.84 nm;当主镜竖直放置的时候,面形 RMS 值可从 27.62 nm 校正为 12.95 nm。文中完成的定标计算和薄镜各个状态的主动校正模拟为该试验系统的主动光学校正实验提供了一定的理论参考。

Optics Precision Eng., 2009, 17(9): 2077-2083. (in Chinese)

- [5] 王富国, 杨洪波, 李宏壮, 等. 主动光学技术在薄镜面中的应用及算法研究[J]. *红外技术* 2007, 29(12): 704-707.
- WANG F G, YANG H B, LI H Z, *et al.*. Application and algorithm research of active optics in thin mirrors [J]. *Infrared Technology* 2007, 29(12): 704-707. (in Chinese)
- [6] 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.
- SU D Q, CUI X Q. Active optics — key technology of the new generation telescope [J]. *Progress in Astronomy* 1999, 17(1): 1-14. (in Chinese)
- [7] 闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J]. *光学精密工程* 2008, 16(8): 1533-1539.
- YAN Y, JIA J Q, JIN G. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support [J]. *Optics Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1533-1539. (in Chinese)
- [8] 郭疆, 何欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J]. *光学精密工程* 2008, 16(9): 1642-1647.
- GUO J, HE X. Design of support for primary mir-

- ror of space remote sensing camera [J]. *Optics Precision Eng.*, 2008,16(9):1642-1647. (in Chinese)
- [9] 崔向群. 采用主动光学的大口径单块薄镜面支撑系统[D]. 南京:中科院南京紫金山天文台,1995.
CUI X Q. *Support System of Large Aperture Thin primary Mirror with Active Optics* [D]. Nanjing: Nanjing observatory, Chinese Academy of Sciences, 1995. (in Chinese)
- [10] NEOTHE L. Use of minimum-energy modes for modal-active optics corrections of thin meniscus mirrors [J]. *Journal of Modern Optics* 1991, 38 (6):1043-1066.
- [11] SCHIPANI P, PEROTT F, AEROTTA L M. Active optics correction force for the VST 2.6m primary mirror [J]. *SPIE*, 2006 6273:62733A-1-12.
- [12] XAVIER B, JEAN L C, RENAUD M Y, *et al.*. Optimization methods aimed at designing a force control active mirror II : actuator pattern optimization [J]. *SPIE*, 1997,3126:366-377.
- [13] DOUGLAS R N, VICTOR K, JOHN A, *et al.*. Active tangent link system for transverse support of large thin meniscus mirrors[J]. *SPIE* 2007, 6665 66650F-1-12.
- [14] MYUNG K C, RONALD S P, II K. Optimization of the ATST primary mirror support system[J]. *SPIE*, 2006,6273:62731E-1-12.

作者简介:



陈夫林(1985—),男,山东泰安人,博士研究生,2006年于烟台大学获得学士学位,主要从事薄镜面主动支撑的研究。E-mail: ocean_fulin@hotmail.com



吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,博士,助理研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径薄镜面主动支撑系统设计和计算机辅助设计的研究。E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com



范磊(1986—),男,内蒙古凉城人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事大口径望远镜主镜支撑结构设计和分析的研究。E-mail: fanlei1995@sina.com.cn

导师简介:



张景旭(1964—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,1990年于北京邮电学院获得硕士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大型光电望远镜结构总体技术的研究。E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn