

文章编号 1004-924X(2016)08-1965-08

中型主镜的柔性半运动学支撑

范磊, 张景旭*, 赵勇志, 李宏壮, 司丽娜

(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:针对中型反射镜提出了一种柔性半运动学支撑方式,以便简化主镜的支撑结构,降低安装应力对主镜的影响,以及提高主镜支撑对温度变化的适应性。对比小口径主镜的刚性半运动学支撑,详细阐述了柔性半运动学支撑的特点和优势。运用该原理对一口径为 710 mm 的主反射镜的支撑进行了设计、分析和检测,其中反射镜的轴向采用 6 点带有柔性细杆的 Whiffletree 支撑,径向采用带有柔性环的中心轴支撑。然后,利用有限元方法进行了详细的结构优化设计。最后,利用 4D 干涉仪对主镜竖直和水平两个工况进行了检测。检测结果显示:反射镜的支撑面形与加工面形误差分别为 8.7 nm 和 8.4 nm,与有限元分析结果基本吻合,验证了文中有限元建模和分析方法的合理性。提出的柔性半运动学支撑很好地保证了主镜面形精度,综合性能良好,达到了设计预期,为中型主镜的支撑设计提供了重要的参考。

关键词:中型主镜;半运动学;柔性支撑;优化设计;有限元法

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.1965

Flexible semi-kinematic support for middling primary mirror

FAN Lei, ZHANG Jing-xu*, ZHAO Yong-zhi, LI Hong-zhuang, SI Li-na

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese academy of sciences, Changchun 130033, China)

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

Abstract: A flexible semi-kinematic support was proposed for a middle-sized mirror to simplify the support structure of the primary mirror, reduce its assembled difficulty and improve its adaptability to temperature variation. By compared with rigid semi-kinematic support for a small-sized mirror, the features and merits of the flexible semi-kinematic support were expatiated. Based on these features and merits, a support structure for the primary mirror with an aperture of 710 mm was designed, analyzed and tested, in which the axial support was Whiffletree with 6 flexible bars and the radial support was a center shaft with a flexible ring. Then, the finite element analysis was used to optimize the designed support structure. Finally, the mirror surface was tested by a 4D interferometer in vertical and horizontal states. The results show that the error between tested and machined is 8.7 nm and 8.4 nm, respectively, very proximity to the results of finite element analysis, which verifies the rationality of proposed modeling and analysis methods. In conclusion, the flexible semi-kinematic support maintains high surface figure accuracy and excellent combination property, so it provides an important value for middling mirror support.

收稿日期:2016-03-10;修订日期:2016-04-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11403023)

Key words: middling primary mirror; semi-kinematic; flexible support; optimum design; Finite Element Method(FEM)

1 引言

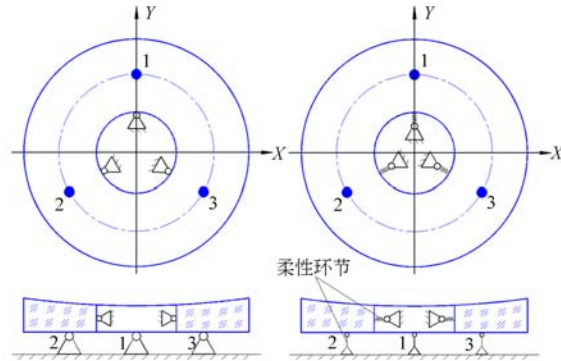
随着光学加工能力的不断提高,地基光学探测器口径越来越大。国外 2 m 及以下口径的光学探测技术已非常成熟^[1];国内自主研发的 2 m 口径的光学望远镜还处于研制阶段,1 m 口径的望远镜也刚投入使用^[2],应用更广泛的多为 1 m 以下的中等口径光学探测器。目前该类探测器多作为独立的成像镜头进行捕获跟踪成像^[3-5],将来也可作为辅助探测器固定在大口径或超大口径地基望远镜上,完成相应的探测功能,应用前景广泛。

主镜作为中等口径地基光学镜头的重要部件,对其支撑设计至关重要。小口径反射镜由于口径较小,可采用运动学或刚性半运动学支撑^[6-8];大口径反射镜由于重量大,定位和面形要求较高,因此采用运动学定位、浮动支撑和柔性支撑相结合的复杂支撑形式^[1,6,9]。对于中等口径反射镜支撑,国内一般参考大口径反射镜支撑方式。孙宁等对 600 mm 口径主镜支撑进行了设计^[3];范李立等对 700 mm 极轴式望远镜主镜支撑系统进行了介绍^[4];谭凡教等设计分析了 630 mm 经纬仪主镜的支撑^[5]。上述中型主镜的支撑均采用基于运动学原理的轴向 9 点 Whiffletree 形式,径向采用刚性中心轴定位和外边缘两组杠杆平衡重浮动支撑组合支撑形式,三者的区别主要在于侧向浮动支撑点数和分布形式不同,支撑结构相对复杂。为进一步简化主镜支撑结构;减小装调时安装应力导致的镜面变形;提高主镜对环境温度的适应性,本文采用柔性半运动学支撑原理,借助有限元分析软件,对口径 710 mm 的主镜支撑进行了详细的分析和优化,并搭建检测光路,对各工况下主镜的面形进行了检测。

2 主镜的柔性半运动学支撑形式

小口径主镜的刚性半运动学支撑通常是轴向采用 3 点,径向采用中心轴,限制主镜的 5 个自由度,通过轴向 3 点与主镜黏接实现主镜 6 个自由度的完全约束。特别当光轴竖直时,轴向 3 点完全支撑主镜;当光轴水平时,中心轴完全支撑主

镜。图 1(a)所示为刚性半运动学定位支撑原理图。



(a) 刚性半运动学支撑形式 (b) 柔性半运动学支撑形式
(a) Rigid semi-kinematic support (b) Flexible semi-kinematic support

图 1 刚性半运动学与柔性半运动学支撑示意图

Fig. 1 Principle of rigid semi-kinematic and flexible semi-kinematic support

由于轴向 3 点与主镜背部黏接,一定程度上限制了主镜的径向移动,主镜与中心轴装配时容易引入应力无法释放,从而影响主镜面形;另外当环境温度发生较大变化时,中心轴材料与反射镜材料热胀系数的一致,使得这种支撑方式下的主镜无法自由热变形,从而破坏主镜面形^[1]。对于中等口径主镜,轴向支撑点的增加必会进一步增大上述情况的影响,因此同时在轴向支撑和中心轴处设置一定的柔性环节,保证主镜不过定位的同时,减小安装应力和温度等对主镜面形的影响,根据文献^[6-8],称这种支撑方式为柔性半运动学支撑,图 1(b)所示为柔性半运动学支撑原理图。

3 $\Phi 710$ mm 主镜支撑优化设计

3.1 主镜支撑方案

本文研究对象为中型地基光学探测器中口径 710 mm 的主镜。主镜采用外边缘轻量化结构形式,外形尺寸如图 2 所示,主镜材料为熔石英 7980,轻量化后质量约为 50 kg。

该主镜工作俯仰角为 $0 \sim 90^\circ$,主镜要求加工后镜面面形 RMS 值小于 0.05λ (检测波长 $\lambda =$

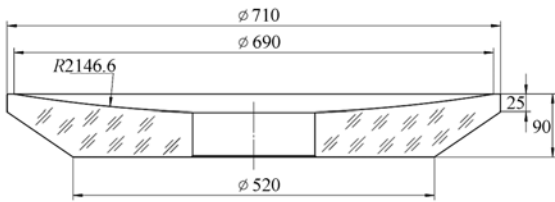


图 2 主镜外形尺寸

Fig. 2 Dimensions of primary mirror

633 nm);带支撑后镜面面形 RMS 值小于 0.067 λ。

根据主镜外形尺寸及柔性半运动学支撑原理,该主镜轴向采用带有柔性细杆的 Whiffletree 支撑;径向采用带有柔性环的中心轴支撑。

3.2 轴向支撑优化设计

根据 Hindle 最少支撑点理论公式^[10]:

$$N = \left(\frac{1.5r^2}{t} \right) \left(\frac{\rho g}{E\delta} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

式中: r 为主镜半径; E 为材料弹性模量; δ 为镜面变形值,取 λ/15(λ=633 nm); ρ 为材料密度; g 为重力加速度; t 为镜子厚度。

经计算最少支撑点 N=5,根据 Whiffletree 支撑点数增加规律^[1],确定该主镜支撑点数为 6,分布在一个支撑圈上。图 3 所示为主镜轴向支撑点分布图,由最底部的 3 点,通过等臂杠杆将支撑点扩展为 6 点,且均布在一个支撑圈上。因此,为了求得轴向支撑下主镜面形的最优值则只需优化支撑点所在支撑圈的半径 R。

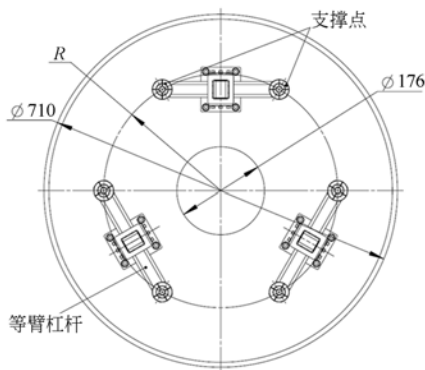


图 3 轴向支撑点分布

Fig. 3 Distribution of axial support points

图 4 所示为主镜有限元模型图,为保证模型质量,模型全部采用六面体单元;边界约束如下:

建立 Whiffletree 支撑点的轴向约束方程 $\sum_{i=1}^n UZ_i = 0$ ^[11],并在 120°对称面设置对称约束,设支撑

圈半径 R 为优化设计变量,镜面变形 RMS 值为目标函数,利用有限元分析软件 ANSYS 的 OPT 优化模块进行优化,最终结果为当 R=235 mm 时,镜面面形最优为 9 nm。图 5(a)所示为支撑圈半径优化曲线图,图 5(b)所示为对应镜面变形云图。

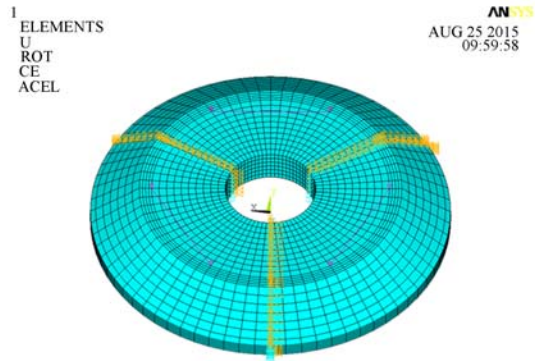
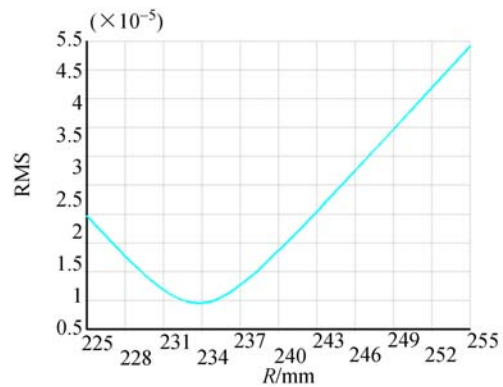


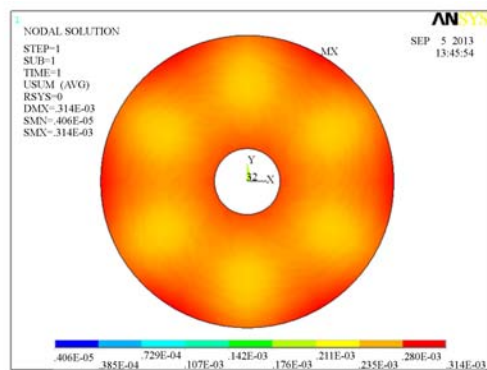
图 4 主镜有限元模型

Fig. 4 FE model of primary mirror



(a) 支撑圈半径优化曲线

(a) Optimization of support-ring radius



(b) 主镜裸镜轴向支撑变形云图

(b) Mirror deformation nephogram in axial support

图 5 轴向支撑优化结果

Fig. 5 Optimization of axial support

柔性半运动学支撑需要在支撑点处设置对应的柔性环节。轴向支撑的目的是提供主镜光轴方向的支撑力,而不与径向支撑产生耦合。为此,采用柔性细杆支撑方式。图 6 所示为轴向支撑单元的机械结构,每个支撑单元由 1 个等臂杠杆、1 个回转轴组件、2 个支撑点组成,其中每个支撑点由支撑盘、柔性细杆和调节螺钉组成。借助柔性细杆轴向刚度大,侧向刚度小的特点,即可实现轴向支撑和径向支撑的解耦。

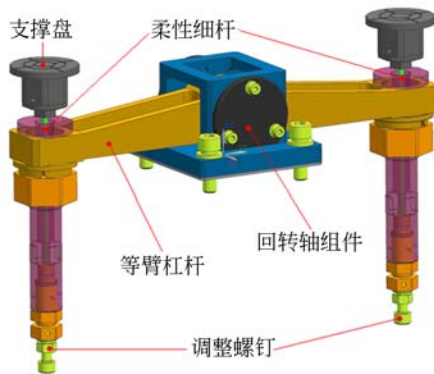


图 6 轴向支撑单元结构

Fig. 6 Structure of axial support cell

柔性细杆的长径比(长度和直径的比值)是一个重要的参数,理论上在等直径情况下,柔性细杆越长越好,但受制于细长压杆的屈曲效应、主镜支撑系统的结构尺寸和机械加工的能力,选择合适的长径比非常重要。根据压杆屈曲变形的临界载荷通式:

$$F_{\text{per}} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}, \quad (2)$$

式中: F_{per} 为压杆屈曲变形临界压力; μl 为有效长度; μ 为长度系数; E 为弹性模量; I 为横截面主惯性矩。

由于轴向支撑中细杆采用了两端固定的方式,因此取有效长度 $\mu l = 0.5l^{[1]}$ 。

设柔性细杆的长径比为: $\alpha = \frac{\mu l}{i}$, 其中 i 为压杆横截面的惯性半径。根据临界应力公式和最小临界力公式(3),推导细杆应力校验公式如式(4)所示:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{cr}} = \frac{F_{\text{per}}}{A} < \sigma_p \\ F_{\text{per}} = \frac{\pi^2 EI}{(0.5l)^2} \end{cases}, \quad (3)$$

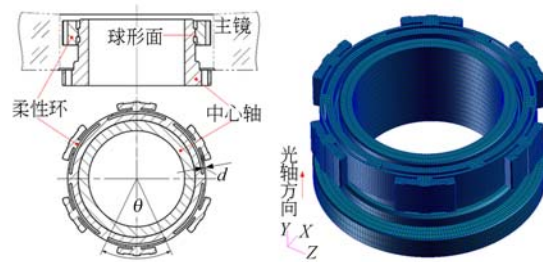
$$\sigma_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E}{\alpha^2} < \sigma_p, \quad (4)$$

式中: σ_{cr} 为临界应力; σ_p 为比例极限应力; A 为细杆横截面面积。

取细长杆材料为 65 Mn, 根据主镜重量, 每个支撑点轴向支撑力约为 82 N, 取 3 倍安全系数, 即取临界压力 $F_{\text{per}} = 246$ N。根据实际加工情况取细杆直径为 3 mm, 计算得柔性细杆的长度 $l \leq 520$ mm, 根据实际尺寸要求, 取杆长为 102 mm, 对应的长径比为 34, 经校核满足临界应力要求。

3.3 径向支撑设计

柔性半运动学径向支撑需要在中心轴处设置柔性环节, 从而抵消安装和温度变化导致的应力。如图 7 所示, 该主镜径向支撑采用带有柔性环的中心轴结构。柔性环通过光学环氧树脂胶与主镜黏接; 柔性环内环面与中心轴的球形面成小间隙配合, 从而限制主镜的平移自由度但容许其绕光轴自由旋转。



(a) 柔性环结构 (b) 径向支撑有限元模型

(a) Flexible ring structure (b) FE model of radial support

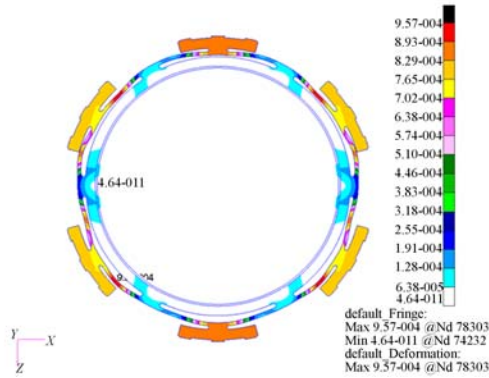
图 7 径向支撑单元结构

Fig. 7 Structure of radial support cell

柔性环作为径向支撑的关键部件, 其结构柔度非常重要。结构柔度越大, 抵消热变形能力越强, 但主镜在重力作用下的刚体偏心量也会增大; 结构柔度小虽能保证主镜的刚体偏心量小但对热变形的补偿能力降低。因此合适的结构柔度是必要的。

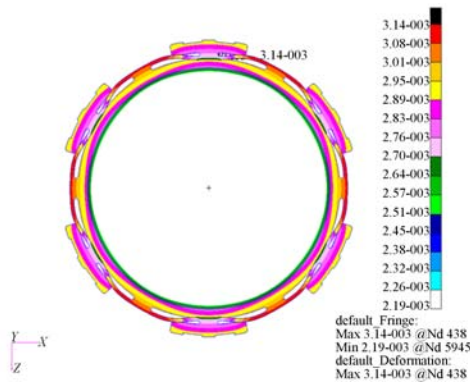
光学设计要求主镜和次镜的同轴度小于 0.02 mm, 且温差为 50 °C 时, 镜面面形满足设计要求。因此, 将上述两点作为柔性环柔度设计的约束条件, 将柔性环支撑片厚度 d 和圆周角度 θ 作为优化设计变量, 通过反复组合迭代设计, 并综合考虑加工能力, 最终确定支撑片厚度 $d = 1.8$ mm, 对应 $\theta = 50^\circ$ 。图 8(a) 所示为光轴指向水平时柔性环的变形云图 (y 为光轴方向), 对应主镜

变形 RMS 值为 8.2 nm,主镜下沉量为 0.9 μm。图 8(b)所示为 -30 °C(参考温度 20 °C)柔性环变形云图(y 为光轴方向),对应主镜变形 RMS 值为 4 nm。



(a)光轴水平时柔性环变形云图

(a)Flexible ring deformation in vertical



(b) -30 °C 时柔性环变形云图

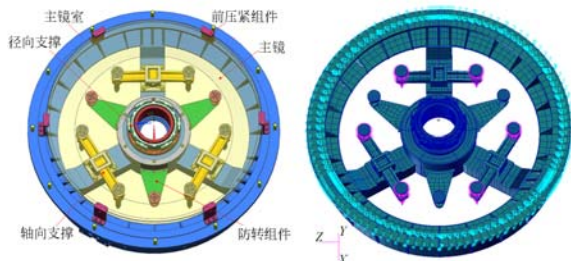
(b)Flexible ring deformation in -30 °C

图 8 柔性环变形分析

Fig. 8 Deformation analysis of flexible ring

3.4 主镜支撑系统分析

主镜支撑系统除了上述的主镜轴向支撑和径



(a)结构模型 (b)有限元模型

(a)Structure model (b)FE model

图 9 主镜支撑系统模型

Fig. 9 Primary mirror support system

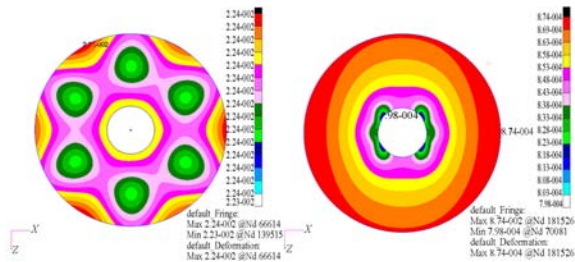
向支撑外,还有主镜防转组件、前压紧组件和主镜室,图 9(a)所示为主镜支撑系统的三维结构图,建立系统的有限元模型如图 9(b)所示。

分析主镜在不同工况下的镜面变形,计算结果如表 1 所示,对应的变形云如图 10 所示。计算主镜支撑系统的一阶谐振频率为 130 Hz,其振型如图 11 所示。

表 1 不同工况下的主镜变形误差

Tab. 1 Mirror deformation error in different load cases

工况类型	镜面变形 RMS 值/nm
光轴竖直	8.9
光轴水平	8.2
-30 °C 热变形	4.1

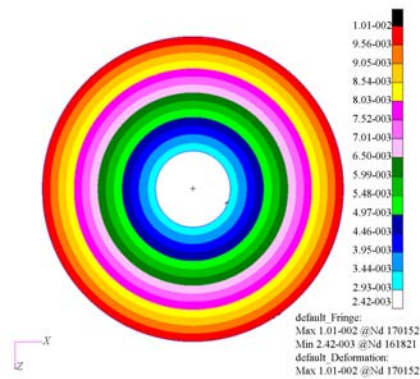


(a)主镜竖直变形云图

(b)主镜水平变形云图

(a)Mirror deformation in vertical

(b)Mirror deformation in horizon



(c) -30 °C 主镜变形云图

(c)Mirror deformation in -30 °C

图 10 不同工况下主镜变形云图

Fig. 11 Primary mirror deformation in different load cases

结果显示在各种极限工况下,主镜均能满足设计要求,且裕度较大,验证了柔性半运动学支撑的合理性,也为支撑系统的装调提供了参考。

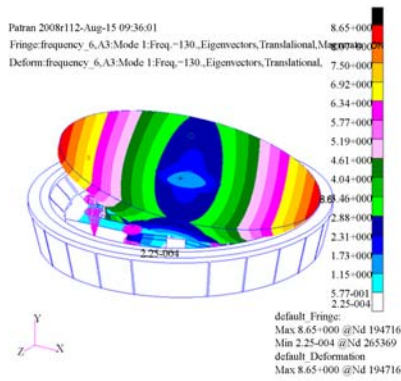
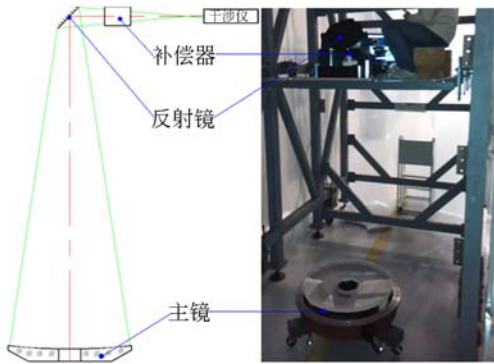


图 11 主镜支撑系统一阶振型图

Fig. 11 First-order mode of primary Mirror support system

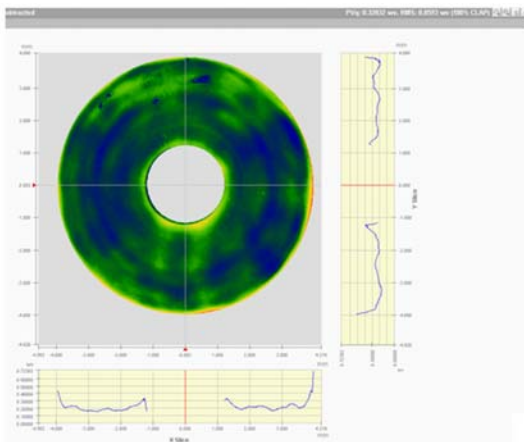
4 主镜面形检测与分析

为了验证该主镜支撑的实际效果,分别搭建了竖直和水平两种检测光路,并利用 4D 干涉仪对主镜面形进行了检测,图 12 和 13 所示分别为



(a) 竖直检测装置

(a) Device of vertical measuring

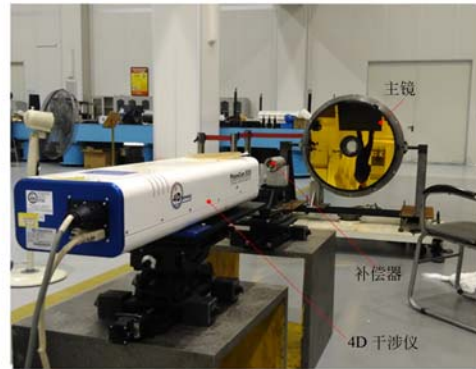


(b) 竖直检测结果

(b) Result of vertical measuring

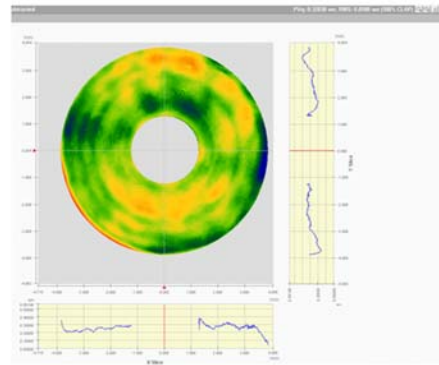
图 12 主镜竖直检测

Fig. 12 Primary mirror vertical measuring



(a) 水平检测装置

(a) Device of horizontal measuring



(b) 水平检测结果

(b) Result of horizontal measuring

图 13 主镜水平检测

Fig. 13 Primary mirror horizontal measuring

检测光路及面形检测结果。

结果显示光轴竖直时,镜面面形为 $0.059\ 3\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$);光轴水平时,镜面面形为 $0.058\ 8\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),结果均满足设计要求。加工方提供的主镜加工面形为 $0.045\ 5\lambda$,与光轴竖直和水平两种工况下检测面形之差分别为 $0.013\ 8\lambda$ (约 8.7 nm)和 $0.013\ 3\lambda$ (约 8.4 nm),与之前有限元分析的结果基本吻合,误差率均小于 5% 。验证了有限元模型建模与分析的准确性。

5 结论

本文对比了小口径和大口径反射镜支撑,针对中型反射镜提出了柔性半运动学支撑。运用该支撑原理,对 710 mm 主反射镜支撑进行了详细的设计、分析、优化和检测。

结果表明对于中型反射镜采用柔性半运动学

支撑是可行和合理的;对比现有中型主镜支撑结构,该结构实现了较大的简化;主镜装调过程中没有使用特殊的装调工艺,但从检测结果可以看出安装应力对主镜面形的影响较小;检测结果同有限元分析结果吻合度较高,也表明有限元建模和

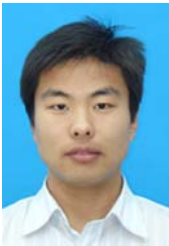
分析方法合理。但由于实验条件限制,还未对主镜支撑受温度变化的影响进行验证,还需在后面的工作中完成。提出的柔性半运动学支撑对于中型反射镜的支撑具有参考价值。

参考文献:

- [1] 范磊. 2m级地基望远镜 SiC 主镜轻量化设计及支撑技术研究[D]. 中国科学院大学:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2013. 5.
FAN L. *Research on the lightweight design and support of the 2m-SiC primary mirror for ground-based telescope* [D]. University of Chinese Academy of Sciences: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, May 2013 (in Chinese)
- [2] 韩光宇,曹立华,高云国,等. 1 m 望远镜主反射镜的支撑和装配[J]. 光学精密工程,2012, 20(9): 1921-1928.
HAN G Y, CAO L H, GAO Y G, *et al.*. Supporting and assembling for primary mirrors of 1 m aperture telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):1921-1928. (in Chinese)
- [3] 孙宁,从俊峰. 基于有限元法及干涉仪检测的 600 mm 口径主镜面形精度分析[J]. 现代工业经济和信
息化 2014,82(11):53-55.
SUN N, CONG J F. Accuracy analysis of primary mirror with 600mm-aperture based on FEM and interferometry [J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*. 2014, 82(11):53-55. (in Chinese)
- [4] 范李立,张景旭,杨飞,等. 极轴式望远镜主镜支撑结构对镜面变形的影响[J]. 红外与激光工程 2012, 41(1):173-177.
FAN L L, ZHANG J X, YANG F, *et al.*. Impact of support of primary mirror in equatorial telescope on its surface deformation [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2012, 41(1):173-177. (in Chinese)
- [5] 谭凡教,乔彦峰,李耀斌,等. 光电经纬仪主镜面形变化的有限元分析[J]. 光学学报,2008,28(4):756-762.
TAN F J, QIAO Y F, LI Y B, *et al.*. Finite element analysis for surface shape deformation of photo-electronic theodolite primary mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4):756-762. (in Chinese)
- [6] YODER P R. *Opto-mechanical systems design* [M]. CRC Press, 2006.
- [7] 范磊,赵勇志,曹玉岩. 红外离轴系统金属反射镜设计与分析[J]. 红外技术,2015,37(5):374-379.
FAN L, ZHAO Y ZH, CAO Y Y. Design and analysis of metal mirror for infrared off-axial system [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(5):374-379. (in Chinese)
- [8] 刘昌华,吴小霞,赵勇志. 小孔径平面反射镜的半运动学支撑结构设计及共面装调[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2014,37(5):7-15.
LIU C H, WU X X, ZHAO Y ZH. Semi-kinematics support structure design of small aperture plane mirror and coplanar alignment [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(5):7-15. (in Chinese)
- [9] 邵亮,吴小霞,陈宝刚,等. SiC 轻量化主镜的被动支撑系统[J]. 光学精密工程 2015, 23(5): 1380-1386.
SAO L, WU X X, CHEN B G, *et al.*. Passive support system of light-weighted SiC primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1380-1386. (in Chinese)
- [10] PAUL R. YODER. *Opto-mechanical systems design* [M]. CRC Press,2006. 505-506.
- [11] 范磊,张景旭,邵亮,等. 采用液压 Whiffle-tree 的大口径主镜轴向支撑[J]. 红外与激光工程 2013, 42(8):2126-2131.
FAN L, ZHANG J X, SHAO L, *et al.*. Axial support for large aperture primary mirror based on hydraulic whiffletree [J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2013, 42(8):2126-2131. (in Chinese)
- [12] 辛宏伟,刘巨,刘磊,等. 小型光学遥感器主镜室的光机结构[J]. 光学精密工程 2015, 23(4): 1027-1033.
XIN H W, LIU J, LIU L, *et al.*. Support structure of primary mirror for small optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):1027-1033. (in Chinese)
- [13] 张岩,张景旭,陈宝刚,等. 消旋 K 镜反射镜支撑结

- 构设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 062203(52):255-260.
- ZHANG Y, ZHANG J X, CHEN B G, *et al.*. Design of support structure for K mirror [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 23(4):255-260. (in Chinese)
- [14] 杨帅, 沙巍, 陈长征, 等. 大口径离轴长条形反射镜的检测支撑机构[J]. 光学精密工程 2015, 23(10):2835-2841.
- YANG SH, SHA W, CHEN CH ZH, *et al.*. Detection support structure of large-aperture off-axis rectangular mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):2835-2841 (in Chinese)
- [15] 徐伟, 张丽敏, 刘昌华. 基于运动学原理的三镜支撑设计及支撑位置优化研究[J]. 机电工程 2014, 31(12):1574-1577.
- XU W, ZHANG L M, design of M3 based on the kinematic method and optimization of the support position[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*. 2014, 31(12):1574-1577. (in Chinese)
- [16] 齐光, 王书新, 李景林. 空间遥感器高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件设计[J]. 中国光学 2015, 8(1):99-106.
- QI G, WANG SH X, LI J L. Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor [J]. *Chinese Optics*. 2015, 8(1):99-106. (in Chinese)

作者简介:



范磊(1986—),男,内蒙古凉城县人,博士,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事精密光机结构设计和仿真分析。E-mail: fanlei1995@sina.com.cn



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年于长春光机所获得博士学位,主要从事大型光电望远镜结构总体技术研究。E-mail: Zhangjx@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)