

文章编号 1004-924X(2015)05-1380-07

SiC 轻量化主镜的被动支撑系统

邵 亮*, 吴小霞, 陈宝刚, 李剑锋, 明 名

(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:针对热膨胀率较大的 SiC 反射镜, 设计了结合 A-Frame 柔性切向杆侧向支撑结构和机械式 Whiffletree 轴向支撑结构、具有良好热解耦能力的 1.2 m SiC 轻量化主镜被动支撑系统。为研究 A-Frame 柔性侧向支撑机构对主镜支撑面形、热解耦和系统刚度的影响, 利用 Ansys 软件对支撑系统的支撑效果进行了有限元分析, 而后对实际的支撑系统进行了相关试验测试。测试显示在光轴竖直和水平两种状态下, 使用提出的支撑机构的支撑系统引起的主镜镜面变形误差 RMS 的变化小于 13 nm; 在实验室温度 14~23℃ 下, 检测得到主镜面形 RMS 最大差异为 1.9 nm。利用模式分析仪对该主镜及支撑系统进行的动态测试表明: 系统的一阶固有频率为 52.7 Hz, 而理论分析为 63 Hz, 且前 6 阶模态振型与分析一致。得到的分析和测试结果都表明该被动支撑系统支撑效果良好, 且具有较高的支撑刚度和良好的热解耦能力。

关键词:空间望远镜; SiC 轻量化主镜; 有限元分析; 面形检测; 热变形实验; 模态测量

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1380

Passive support system of light-weighted SiC primary mirror

SHAO Liang*, WU Xiao-xia, CHEN Bao-gang, LI Jian-feng, MING Ming

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

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

Abstract: For a SiC mirror with larger thermal expansion coefficients, a passive support system for light-weighted SiC primary mirror with thermal decoupling ability was designed by combing a A-Frame flexible tangential rod lateral support structure and a mechanical Whiffletree axial support structure. To obtain the effects of the A-Frame flexible tangential rod lateral support structure on the primary mirror surface, thermal decoupling and the stiffness of the support system, the support effect of the support system was analyzed by using Finite Element Analysis (FEA) with ANSYS. And actual support system was also tested. The tested results show that the distortion error change(RMS) of primary mirror caused by the support structure is less than 13 nm in horizontal and vertical states. The worst mirror surface error change(RMS) is 1.9 nm at the ambient temperature from 14℃ to 23℃ in a laboratory. The dynamic properties of the support system including mirror are also tested. The first natural frequency of support system is 52.7 Hz and the same analyzed result is 63.0 Hz in theory. Moreover, the first six vibration modals are consistent well in both theoretical and experimental results. Finally, it concludes that this support system has excellent support effect and shows both good stiffness and thermal decoupling capability.

收稿日期: 2014-05-25; 修订日期: 2014-07-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11403023)

Key words: space telescope; SiC lightweight primary mirror; Finite Element Analysis(FEA); mirror distortion measurement; thermal distortion experiment; modal measurement

1 引言

SiC轻量化反射镜具有重量轻、比刚度大、热稳定性好等优点,是理想的空间望远镜镜坯材料^[1-2]。随着国内外加工工艺的不断进步, SiC材料有望应用于大口径地基光学望远镜系统中的主镜镜坯制造^[3-4]。因 SiC材料热膨胀率较大,地基望远镜中采用 SiC轻量化主镜时,其支撑系统必须具有较好的热解耦能力,以降低温度变化对于主镜面形的影响^[5]。

本文针对 1.2 m SiC轻量化主镜,采用 A-Frame 柔性切向杆侧向支撑技术^[6-8],并结合 18 点机械式 Whiffletree 轴向支撑结构,形成一套具有良好热匹配性的被动支撑系统方案。采用有限元方法对主镜及其支撑系统进行重力变形分析、热变形分析及模态分析。对该 SiC轻量化主镜及支撑系统在不同俯仰角下、不同环境温度中的主镜面形进行实际检测,应用模态测试仪测量支撑系统的固有频率。最后,通过分析和实际检测数据验证了所设计被动支撑系统的刚度和热解耦能力^[9]。

2 被动支撑系统设计

以主镜镜面顶点为原点建立直角坐标系,定义主镜光轴方向为 Z 轴方向, X 轴平行于俯仰轴, Y 轴根据右手定则确定。

由轴向支撑和侧向支撑组成的主镜支撑系统需满足静定机构原理,即支撑系统完全并恰好约束主镜的 6 个自由度,包括 3 个平动自由度(UX、UY、UZ)和 3 个转动自由度(RX、RY、RZ)^[10]。

SiC轻量化镜的轴向支撑可采用传统的机械式 Whiffletree 结构。图 1 所示为 18 点 Whiffletree 轴向支撑结构,3 个实际硬点逐级扩展为 18 个等力支撑点对主镜进行轴向支撑,并约束了主镜 UZ、RX 和 RY 3 个自由度。Whiffletree 结构的第一级为杠杆机构,第二级为利用球铰及膜片组合而成的 2 自由度铰链机构,每个支撑点处的轴向柔性细杆机构不仅抑制了轴向支撑对侧向支撑的干扰,还有利于主镜径向的自由膨胀,实现轴向支撑机构与主镜热变形的解耦。

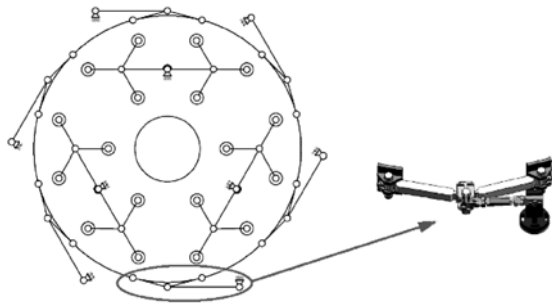


图 1 支撑原理图

Fig. 1 Schematic diagram of support mechanism

综合考虑 SOFIA、SOAR 望远镜中侧向支撑方式,针对 SiC轻量化镜提出了如图 1 所示的 6 组 A-Frame 柔性切向杆侧向支撑方式:6 个柔性切向杆在主镜轴向和径向方向上为柔性,通过三角形铰链连杆机构 A-Frame 扩展为 12 个侧向支撑点。每对相互平行的柔性切向杆形成一个分散作用力的虚约束,3 对柔性切向杆既约束了主镜 UX、UY、RZ 3 个自由度,又避免了与轴向支撑的耦合。在热变形过程中 6 个切向杆具有相同的轴向伸缩量,并将主镜与镜室之间径向热变形量的差异转化为主镜绕光轴方向的微量转动,从而减小主镜和镜室径向热膨胀不一致而产生的热应力,降低热应力对主镜镜面面形的影响。

3 有限元分析

利用 ANSYS 软件平台对 1.2 m SiC轻量化主镜及被动支撑系统建模,如图 2 所示。

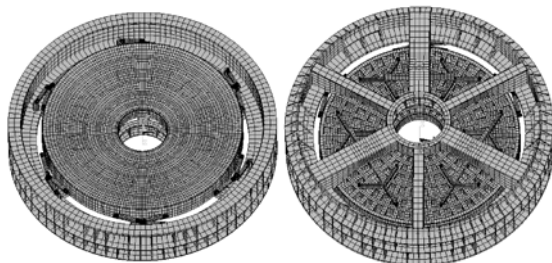


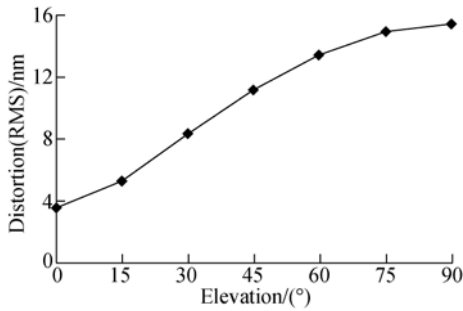
图 2 有限元模型示意图

Fig. 2 Scheme of FEA model

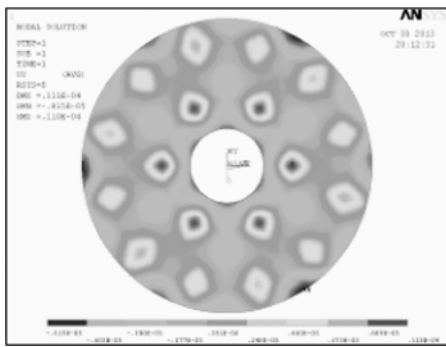
3.1 重力变形分析

分析了主镜光轴由竖直状态变化到水平状态过程中重力作用下被动支撑系统引起的主镜镜面

变形情况,计算出镜面变形误差 RMS 值的变化曲线,如图 3(a)所示,图 3(b)所示为望远镜指向天顶、主镜光轴竖直时主镜镜面变形云图。分析结果表明:重力作用下支撑系统引起的主镜镜面变形 RMS 值最小为 3.6 nm,最大为 15.4 nm。



(a) 不同俯仰角下镜面变形误差的 RMS 值
(a) Distortion(RMS) in different elevations



(b) 镜面变形云图

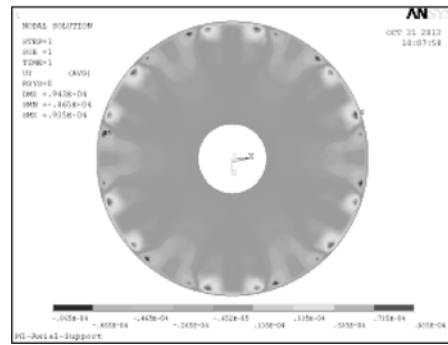
(b) Distortion pattern of optical surface

图 3 重力变形分析结果

Fig. 3 Gravitational distortion analysis results

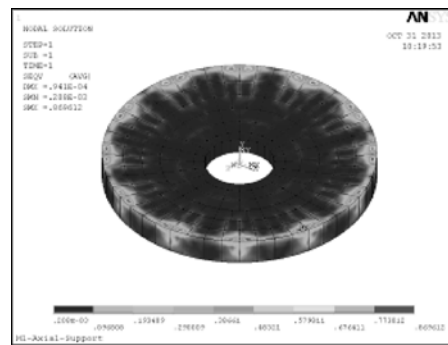
3.2 热变形分析

以 20°C 为参考温度,分析环境温度 -40~60°C 时,1.2 m SiC 轻量化主镜安装在被动支撑系统中的热变形情况,计算结果如图 4 所示。图 4(a)所示为 -40°C 时主镜镜面热变形云图,拟合计算出主镜镜面热变形误差 RMS 为 15.6 nm;图 4(b)所示为 -40°C 时主镜上的等效力分布云图,最大应力仅为 0.87 MPa,远小于 SiC 断裂极限;图 4(c)所示为 -40~60°C 条件下主镜镜面热变形误差 RMS 值的变化曲线。热分析结果初步表明被动支撑系统具有较好的热解耦能力。



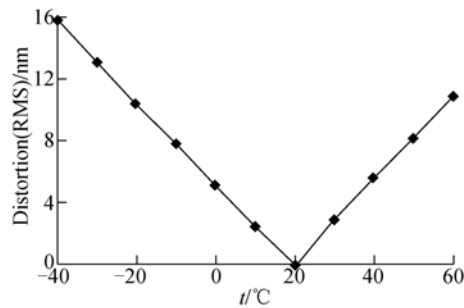
(a) -40°C 热变形云图

(a) Thermal deformation in -40°C



(b) -40°C 应力云图

(b) Stress pattern in -40°C



(c) 不同温度下镜面热变形误差的 RMS 值

(c) Distortion(RMS) in different temperature

图 4 热力学仿真结果

Fig. 4 Thermal analysis results

3.3 模态分析

对主镜支撑系统有限元模型进行模态分析时,施加对镜室安装面全约束的边界条件,计算出整个主镜支撑系统的前六阶频率如表 1 所示,前六阶模态振型体现为主镜支撑系统的刚度。

表 1 主镜振型描述

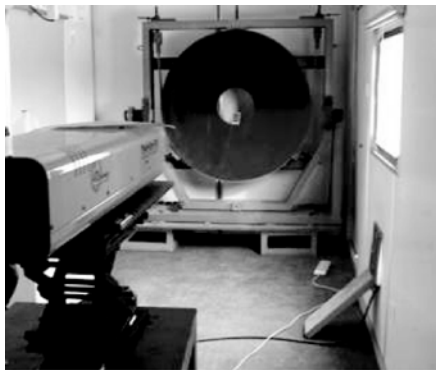
Tab. 1 Description of primary mirror mode

阶次	频率/Hz	振型描述
1	63.0	主镜绕 X 轴转动(RX)
2	63.0	主镜绕 Y 轴转动(RY)
3	73.1	主镜沿光轴平动(UZ)
4	131.3	主镜沿 X 轴平动(UX)
5	131.3	主镜沿 Y 轴平动(UY)
6	253.1	主镜绕光轴转动(RZ)

4 实验验证

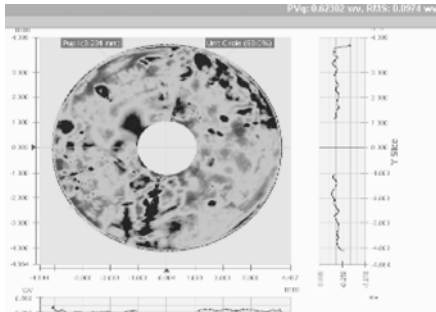
4.1 吊带支撑主镜面形检测

根据支撑原理可知,吊带支撑法引起的反射镜镜面变形较小。采用吊带装置支撑初步加工后的 1.2 m SiC 轻量化主镜,借助 4D 干涉仪对主镜镜面面形精度进行检测。检测装置如图 5(a)所示,检测获得的主镜面形如图 5(b)所示,此时主镜面形精度误差 RMS 值为 61.6 nm。



(a)吊带支撑测量实验装置

(a)Experiment device of strip support measuring



(b)吊带支撑测量结果

(b)Measuring result of strip support

图 5 吊带支撑测量实验

Fig. 5 Measuring experiment of strip support

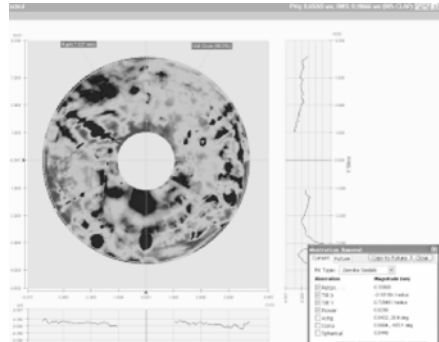
4.2 被动支撑主镜面形检测

将主镜安装到被动支撑系统中,对主镜光轴竖直和水平两种状态重力作用下支撑系统引起的镜面变形进行检测。光轴竖直时的测量装置如图 6(a)所示,主镜面形如图 6(b)所示,主镜镜面面形 RMS 值为 67.5 nm;光轴水平时的测量装置如图 7(a)所示,主镜面形如图 7(b)所示,主镜镜面面形为 68.6 nm。



(a)垂直测量实验装置

(a)Experiment device of vertical measuring

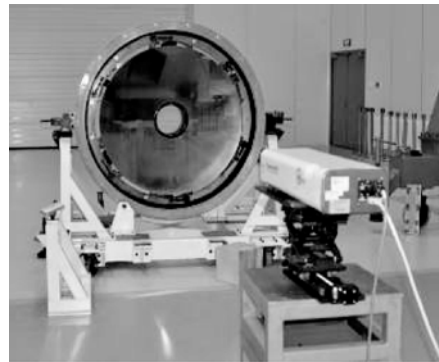


(b)垂直测量结果

(b)Result of vertical measuring

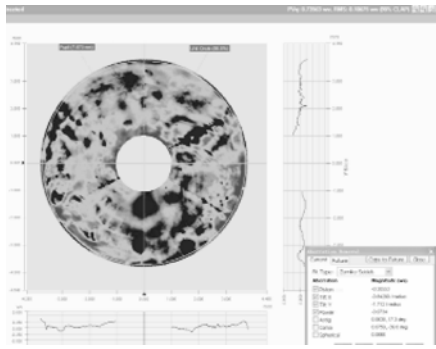
图 6 垂直测量实验

Fig. 6 Vertical measuring experiment



(a)水平测量实验装置

(a)Experiment device of horizon measuring



(b)水平测量结果

(b)Result of horizon measuring

图 7 水平测量实验

Fig. 7 Horizon measuring experiment

光轴竖直和水平状态下,有限元分析获得的镜面面形 RMS 分别为 3.6 nm 和 15.4 nm,实际面形检测结果与计算结果不具有直观比较性的主要原因为:(1)该 1.2 m SiC 轻量化主镜初步加工后自身的面形精度 RMS 为 61.6 nm,而有限元分析是基于主镜面形加工误差为 0 的前提下计算获得支撑系统引起的主镜变形;(2)吊带支撑法虽然引起的主镜面形变形不大,但仍会对主镜产生一定的影响,吊带支撑下的主镜面形检测结果很难完全表示主镜的实际面形精度。

反射镜镜面的面形精度与各种因素引起的镜面误差项之间的关系为^[11-12]:

$$\delta_{\text{total}} = \sqrt{\sum \delta_i^2} \quad (1)$$

在该 SiC 轻量化主镜及支撑系统中,主镜镜面面形误差项包括面形加工误差 δ_1 ,吊带法支撑误差 δ_2 ,被动支撑系统引起的镜面误差 δ_3 。3 个误差项相互独立,可以得到 SiC 主镜面形精度 RMS 测得值 δ_{total} 与这 3 个误差项之间的关系为:

$$\delta_{\text{total}} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \quad (2)$$

主镜光轴竖直和水平时支撑系统引起的镜面误差分别为 δ_V 和 δ_H 。由于轴向支撑和侧向支撑相互独立、互不耦合,被动支撑系统引起的镜面误差项 δ_3 可表示为:

$$\delta_3 = \sqrt{\delta_V^2 \cos^2 z + \delta_H^2 \sin^2 z} \quad (3)$$

其中 z 为天顶距,即主镜光轴方向与垂直方向的夹角。

综上所述,主镜光轴竖直和水平时,镜面面形实际检测结果 $\delta_{V\text{-total}}$ 及 $\delta_{H\text{-total}}$ 可表述为:

$$\delta_{V\text{-total}} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_V^2} \quad (4)$$

$$\delta_{H\text{-total}} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_H^2} \quad (5)$$

主镜从光轴竖直状态变化到水平状态时,面形差异 δ_Δ 可表达为:

$$\delta_\Delta = \sqrt{|\delta_{H\text{-total}}^2 - \delta_{V\text{-total}}^2|} \quad (6)$$

将式(4)、(5)带入式(6),可得:

$$\delta_\Delta = \sqrt{|\delta_H^2 - \delta_V^2|} \quad (7)$$

将实测结果带入式(6),可得到实测值差异为 12.2 nm;将有限元仿真结果带入式(7),可得到有限元仿真值差异为 15.0 nm。从实际检测结果中去除主镜加工误差项和吊带法检测误差项后,计算获得的支撑系统引起的主镜镜面变形实测值与有限元仿真结果接近,表明被动支撑系统具有较好的支撑效果。

4.3 热变形引起的主镜面形检测

图 8 所示为主镜光轴水平,实验室内温度为 14~23℃时,被动支撑系统和吊带支撑下的主镜面形的检测结果曲线(其中曲线 1 为被动支撑系统下的检测结果,曲线 2 为吊带支撑下的检测结果)。在该温度区间内,采用被动支撑系统时,主镜面形精度 RMS 最大差异量为 1.9 nm;采用吊带支撑时主镜面形精度 RMS 最大差异量为 13.3 nm。实际检测结果表明被动支撑系统解耦效果更好。

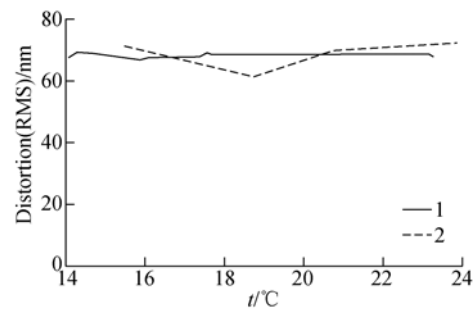


图 8 温差实验对比结果

Fig. 8 Comparison results of temperature difference experiment

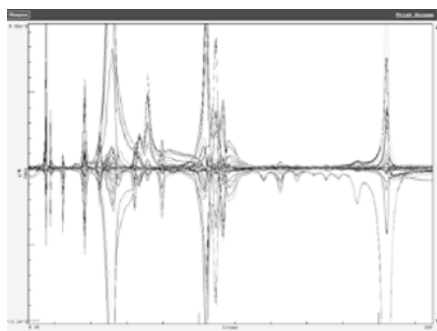
4.4 模态测量实验

利用模态分析仪 1.2 m SiC 轻量化主镜支撑试验系统进行模态测量,将 8 个三向加速度传感器均布在主镜外圆周上。模态测试装置如图 9(a)所示,图 9(b)所示为测量获得的加速度曲线,主镜前 6 阶模态实测结果如表 2 所示。主镜支撑系统一阶固有频率实测值 52.7 Hz,高于风载、外界振动等因素对于天文望远镜主镜支撑系统要求^[13-14],利于望远镜整体系统控制带宽保证。表明该被动支撑系统支撑刚度较高,满足实际应用需求。



(a) 模态实验装置

(a) Modal measuring experiment device



(b) 模态测量结果

(b) Modal measuring result

图9 模态测量实验

Fig. 9 Modal measuring experiment

表2 主镜振型测量结果

Tab. 2 Primary mirror mode measuring results

阶次	频率/Hz	振型描述
1	52.7	主镜绕 X 轴转动(RX)
2	54.4	主镜绕 Y 轴转动(RY)
3	71.3	主镜沿光轴平动(UZ)
4	104.4	主镜沿 X 轴平动(UX)
5	109.3	主镜沿 Y 轴平动(UY)
6	204.2	主镜绕光轴转动(RZ)

参考文献:

- [1] RANDO N, BRUNNER O, DOYLE D, *et al.*. Assessment study of the SPICA telescope assembly [J]. *SPIE*, 2009, 7436:743605.
- [2] EMMANUEL S, YVES T, FREDERIC S, *et al.*. A 3.5 m SiC telescope for HERSCHEL mission [J]. *SPIE*, 2003, 4850: 606-618.
- [3] IWONA A P, ISACC G. Developing SiC for optical system application [J]. *SPIE*, 2004, 5524: 14-20.

与表1中的模态分析结果相比,主镜前6阶模态振型实测结果与分析结果一致,固有频率实测值与分析值存在误差的原因主要为支撑结构复杂,材料属性、装调连接、机加误差等原因使得支撑系统的实际刚度与有限元模型存在着一定的差异。

5 结论

针对热膨胀率较大的 SiC 轻量化主镜,结合机械式 Whiffletree 轴向支撑结构,提出了 A-Frame 柔性切向杆侧向支撑结构,设计了具有良好热解耦能力的主镜被动支撑系统。对 1.2 m SiC 轻量化主镜优化出 18 点 Whiffletree 轴向支撑和 6 组 A-frame 柔性切向杆侧向支撑方案。光轴由竖直变化为水平状态,计算出支撑系统引起的主镜镜面变形误差 RMS 由 3.6 nm 渐变为 15.4 nm;环境温度为 -40°C 时,支撑系统及主镜热变形作用下主镜镜面变形误差 RMS 不超过 15.6 nm;模态分析得到主镜一阶固有频率为 63.0 Hz。

该 1.2 m SiC 主镜初步加工后面形精度 $\text{RMS}=61.6\text{ nm}$ 。主镜安装到所设计的被动支撑系统中,检测出主镜光轴竖直和水平状态下,镜面面形 RMS 分别为 67.5 nm 及 68.6 nm;在实验室内温度为 $14\sim 23^{\circ}\text{C}$ 时,检测得到主镜面形 RMS 最大差异为 1.9 nm;利用模态分析仪对该主镜及支撑系统进行模态测试,测得其一阶固有频率为 52.7 Hz,且前 6 阶模态的振型与分析结果一致。分析和检测结果验证了该被动支撑系统具有较高的支撑刚度和良好的热解耦能力。

- [4] 王建立,陈涛,张景旭.地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及技术分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(专辑): 1-16.
- WANG J L, CHEN T, ZHANG J X. General requirements and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(special): 1-16. (in Chinese).
- [5] 王富国,杨洪波,赵文兴,等.1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):

- 85-91.
WANG F G, YANG H B, ZHAO W X, *et al.*.
Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (1): 85-91. (in Chinese)
- [6] HANS J K, PETER E, MARTIN S. Mechanical principles of large mirror supports [J]. *SPIE*, 2010, 7733: 77332O.
- [7] HERMANN B, MATTHIAS E, PETER H, *et al.*. SOFIA primary mirror assembly: structural properties and optical performance [J]. *SPIE*. 2003, 4857: 266-273.
- [8] 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.
- [9] 邵亮, 杨飞, 王富国, 等. 1.2 m 轻量化 SiC 主镜支撑系统优化设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 229-234.
SHAO L, YANG F, WANG F G, *et al.*. Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 229-234. (in Chinese)
- [10] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003. 96-102.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. 96-102. (in Chinese)
- [11] 吴小霞, 王鸣浩, 明名, 等. 大口径 SiC 轻量化主镜热变形的定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1243-1249.
WU X X, WANG M H, MING M, *et al.*. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1243-1249. (in Chinese)
- [12] 崔向群. 采用主动光学的大口径单块薄镜面的支撑系统[D]. 南京: 中科院紫金山天文台, 1995.
CUI X Q. *Support system of large aperture thin monolithic primary mirror with active optics* [D]. Nanjing: Purple Mountain Observatory CAS, 1995. (in Chinese)
- [13] YANG D H, GU B Z, CUI X Q. Structural analysis of the reflecting surface system of a large astronomical telescope [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 17(3): 415-419.
- [14] 杨德华, 徐灵哲, 徐欣圻. 大型光学天文望远镜风载作用分析[J]. *光学技术*, 2009, 35(3): 342-346.
YANG D H, XU L ZH, XU X Q. Wind disturbance study on large astronomical telescopes [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3): 342-346. (in Chinese)

作者简介:



邵亮(1982—),男,吉林桦甸人,硕士,助理研究员,2006年于中国科学技术大学获得学士学位,2009年于中科院南京天光所获得硕士学位,主要研究方向为镜面支撑系统设计和仿真分析。E-mail: shaol@ciomp.ac.cn



吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,博士,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中科院长春光机所获得博士学位,主要研究方向为大口径薄镜面主动支撑系统设计和仿真分析。E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)