

文章编号 1674-2915(2012)03-0229-06

1.2 m 轻量化 SiC 主镜支撑系统优化设计

邵亮*, 杨飞, 王富国, 吴小霞

(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 1.2 m 轻量化 SiC 主镜,提出了轴向支撑采用 18 点 Whiffle-tree 结构结合压杆结构,侧向支撑采用 A-Frame 柔性机构结合切向支撑机构的支撑方案。从原理上对该主镜支撑方案进行了分析,说明了采用以上两种结构的优点;通过有限元方法对各个机构参数进行了分析、优化,并对整体结构进行了静力学以及热学仿真。实验显示:在参考温度下主镜面形精度(RMS)值为 3.5 nm;温差达到 40 °C 时,RMS 值为 11.1 nm。该设计方案满足了 1.2 m 轻量化 SiC 主镜的支撑要求,同时可以很好地抵消热应力对主镜的影响。

关键词:轻量化 SiC 主镜;支撑系统;压杆结构;A-Frame

中图分类号:P111.22 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120503.0229

Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary mirror

SHAO Liang*, YANG Fei, WANG Fu-guo, WU Xiao-xia

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

* Corresponding author, E-mail: shaol@mail.ustc.edu.cn

Abstract: A design based on 1.2 m lightweight SiC primary mirror is presented. An 18 point Whiffle-tree structure and a pressure bar are used for the axial support, and an A-Frame flexure mechanism and a tangent link are used for the lateral supporting system. The project of primary mirror design is discussed in the principle, and the advantages are given. The parameters of mechanism are analyzed and optimized by the Finite Element Analysis(FEA) method. The whole FEA model is established, and the statics and thermal simulation analysis are accomplished. Experiments indicate that the Root Mean Square(RMS) of the mirror resulted from the supporting system is 3.5 nm at reference temperature, and it is 11.1 nm when the temperature difference is 40 °C. The results show that the design could suit for the 1.2 m lightweight SiC mirror well, and thermal effect could be compensated successfully.

Key words: lightweight SiC primary mirror; supporting system; pressure bar mechanism; A-frame

收稿日期:2012-01-18;修订日期:2012-03-17

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA8080603);国家科技部国际科技合作资助项目(No. 2011DFA50590)

1 引言

在大型光学天文望远镜中, 镜面支撑机构用以保证光学镜面在工作状态下保持准确的位置和面形, 一般基于刚体静力学原理对其进行设计。理想的镜面支撑机构应当使镜面如同漂浮在同密度的液体中^[1]。在实际应用中, 镜面支撑设计就是通过侧面或背面选取适当的支撑点数量和位置施加支撑力来接近这一理想状况, 以达到技术要求。

目前, 应用于大型光学天文望远镜的主镜材料主要为微晶及超低膨胀系数 (ULE) 材料, 该类材料具有热膨胀系数低、弹性模量小等特点。采用该类材料的镜面受热效应影响较小, 但受自身重力影响变形较大。多镜面望远镜 (MMT) 采用了硼硅酸作为主镜材料, 该材料受热效应影响及自身重力影响均较大, 需采用主动力校正。相比于其他镜面材料, SiC 材料具有自身重力影响变形小、强度高、反射率高等优良性能, 是制造反射镜的理想材料; 另外, 轻量化结构可以大大降低主镜本身自重, 进而降低系统控制难度以及造价^[2]。因此, SiC 材料主镜适用于较大口径的被动式光学天文望远镜。

本文基于 SiC 轻量化主镜设计提出其具体支撑方案, 主要包括以下两方面技术: (1) 轴向支撑采用 18 点 Whiffle-tree 结合压杆的支撑方法; (2) 侧向支撑采用 A-Frame 柔性机构结合切向支撑机构的技术。

2 支撑系统结构

如图 1 所示, 主镜的支撑系统由轴向支撑组件、侧向支撑组件、压紧机构以及主镜室组成。该方案结构紧凑, 总重约 542 kg。压紧机构平时不参与支撑作用, 而是在发生诸如脱胶等原因导致的支撑系统失效时, 对主镜进行保护。主镜室为主镜提供安装基准, 要求有很好的环境适应能力, 对外界的振动、意外载荷、温湿度变化等能起到很好的隔绝作用。本支撑系统采用焊接的方法, 构造出高刚度、低惯量的板壳主镜室结构。

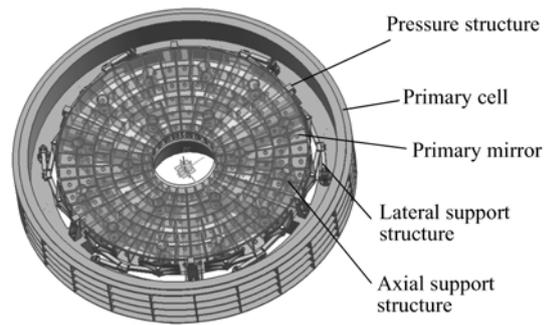


图 1 支撑方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of supporting system

2.1 轴向支撑

轴向支撑是保持镜面面形的主要原因之一。Whiffle-tree 机构基于“三点确定平面”支撑原理, 具有原理简洁、结构紧凑和工艺简单等优点, 因此被广泛应用于镜面轴向支撑设计^[3]。该设计方案在每一个支撑点均采用压杆支撑的方式, 利用细压杆一定的柔性来抵消热应力对主镜的影响, 国外南方天体物理望远镜 (SOAR) 主镜轴向支撑结构也采用了类似设计^[4]。

2.2 侧向支撑

侧向支撑采用 A-Frame 结构结合切向杆结构的组合支撑方式。A-Frame 结构属于被动支撑方案, 其本质上都是三点定位^[5]。A-Frame 结构为铰链连杆机构对于支撑点的扩展, 可通过自身结构变形抵消一部分由于温度改变而产生的热应力的影响, 国外同温层红外天文台的望远镜 (SOFIA) 也采用了类似结构^[6], 并取得了较好的效果。切向杆结构在热变形过程中 6 个方向的切杆具有同样的伸缩量, 把主镜与镜室之间的热变形差异转化为主镜与镜室之间绕轴向微小的转动, 从而降低热应力对镜面的影响, SOAR 望远镜也采用了类似结构^[7]。图 2 为采用该方案的侧向支撑原理示意图。在该侧向支撑方案中, 3 对相互平行的切杆可认为是分散作用力点的虚约束结构, 相当于在该机构中, 含有 3 套连杆结构起约束作用, 该侧向支撑结构系统构成闭式运动链; 在该机构中可视为含有 9 个杆件以及主镜和机架, 共计 11 个构件, 同时铰链可等效为 15 个低运动副, 且不存在点、线接触的高运动副形式, 根据运动链自由

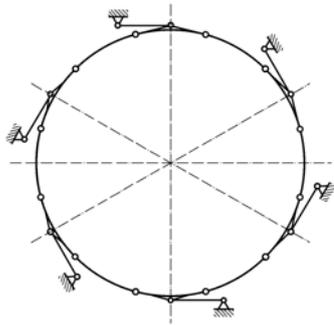


图2 侧支撑原理图

Fig.2 Schematic diagram of lateral supporting mechanism

度计算公式可得到其自由度为 $F = 3 \times (11 - 1) - 2 \times 15 = 0$ 。

A-Frame 机构最大的优势在于热变形的情况下,主镜不会因受主镜室过度束缚而导致较大的镜面变形。主镜与主镜室之间由于材料属性不同导致的热变形不一致问题可通过 A-Frame 结构中的三角形变形以及切向杆结构的伸缩变形抵消,因而不会导致较大的热应力。图3为这种热变形

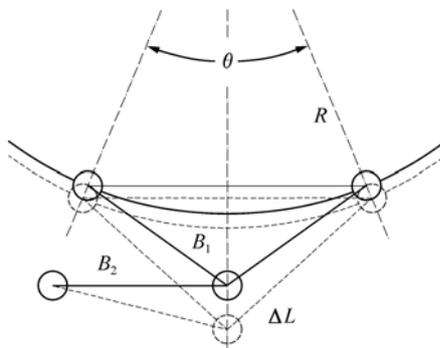


图3 侧支撑热变形示意图

Fig.3 Schematic diagram of thermal distortion for lateral supporting system

上式是在合理舍去高阶小量得到的近似表达式, B_2 的确定与 t 相关,且当 B_2 的大小与温度变化量 t 的平方根成正比时,才能消除温度的影响。可见,实际设计过程中固定长度的切向杆结构必然会导致镜面旋转的趋势,同时恰是这种旋转的趋势部分抵消了镜面与镜室热变形的差异。

抵消过程的原理图。

首先假设镜面不会与主镜室发生沿光轴方向的相对旋转,通过对切向杆长度的推导说明该侧向支撑抵消主镜与主镜室之间热变形的机理。如图3所示,设温度变化为 t ,主镜半径及热膨胀系数为 R 及 α_1 , A-frame 连杆以及切向杆长度分别为 B_1 和 B_2 ,其材料热膨胀系数为 α_2 。镜面径向热变形、A-Frame 连杆轴向热变形长度以及切向杆轴向热变形分别为 $R\alpha_1 t$, $B_1\alpha_2 t$ 及 $B_2\alpha_2 t$ 。设 ΔL_1 为主镜外径径向热膨胀导致的 A-Frame 机构径向位移量, ΔL_2 为 A-Frame 机构连杆与主镜组成的三角型因热膨胀变形导致的顶点变形量, ΔL 为 A-frame 机构径向变形总量,根据图3几何关系,有:

$$\Delta L = |\Delta L_1 + \Delta L_2| \quad (1)$$

欲抵消热变形的影响, ΔL 径向变形总量应与切向杆 B_2 热膨胀变形的径向分量相抵,即:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \sqrt{(B_2 + \Delta B_2)^2 - B_2^2} = \\ &= \sqrt{B_2^2(\alpha_2 t + 1)^2 - B_2^2} = \\ &= B_2\sqrt{2\alpha_2 t} \end{aligned} \quad (2)$$

其中:

$$|\Delta L_1| = R\alpha_1 t \cos \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} |\Delta L_2| &= \sqrt{B_1^2(1 + \alpha_2 t)^2 - R^2(1 + \alpha_1 t)^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} - \\ &= \sqrt{B_1^2 - R^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} - \\ &= \frac{B_1^2 \alpha_2 t - R^2 \alpha_1 t \sin^2 \frac{\theta}{2}}{B_1 \sin \frac{\theta}{2}} \end{aligned} \quad (4)$$

将上述等式合并带入,有:

$$B_2 = \left| \frac{B_1^2 \alpha_2 - R^2 \alpha_1 \sin^2 \frac{\theta}{2} \pm B_1 R \alpha_1 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2}}{\sqrt{2\alpha_2} B_2 \sin \frac{\theta}{2}} \right| \sqrt{t} \quad (5)$$

3 有限元分析优化与仿真

在建立有限元模型过程中,采用了 shell 单元、beam 单元以及 MPC 单元相结合的方式。在一定的结果偏差允许下,采用 shell 单元替代 solid

单元对空心主镜进行建模^[8];为了能够实现映射划分,对模型进行了适当合理的简化,即将支撑点处的圆筒结构简化为直接十字连接结构,同时忽略了工艺孔^[9]。图4为支撑结构以及主镜室一体化的有限元模型。

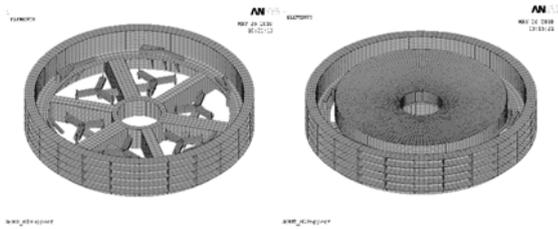
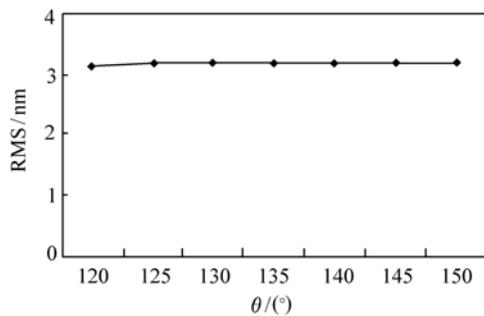


图4 有限元模型示意图

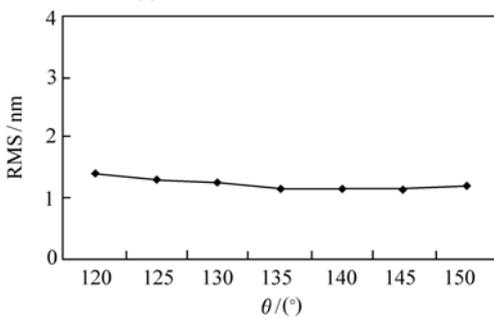
Fig.4 Schematic diagram of finite element model

3.1 A-Frame 角度大小确定

对 A-Frame 角度在 120 ~ 150° 情况下进行仿真,得出图5所示的俯仰角 90° (镜面指向天顶,



(a) 俯仰角 90° 时的 RMS 曲线
(a) RMS curve at 90° elevation



(b) 俯仰角 0° 时的 RMS 曲线
(b) RMS curve at 0° elevation

图5 俯仰角 90° 以及 0° 时夹角 120° 至 150° 的 RMS 曲线

Fig.5 RMS curves at 90° and 0° elevation when angle of A-Frame is from 120° to 150°

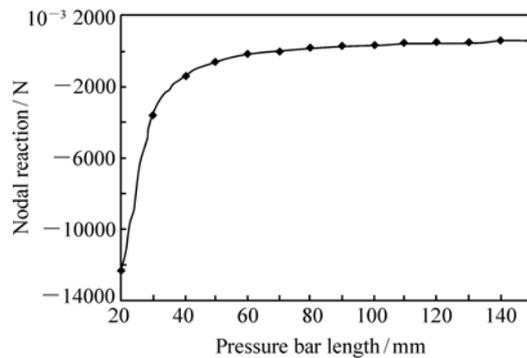
下文与此相同)以及 0° (镜面指向水平,下文与此相同)时的 RMS 曲线。

从以上分析可以看出, A-Frame 结构角度在 120° 至 150° 情况下,面型影响变化不大。但在实际中,其主镜室结构尺寸随角度的增大可以迅速降低,因而 A-Frame 角度选择 150°。

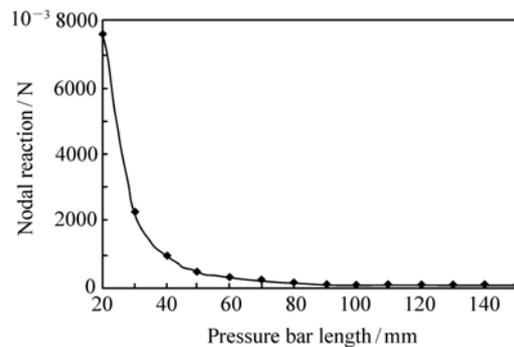
3.2 轴向支撑压杆尺寸确定

轴向支撑结构中,压杆既不可太“硬”,太“硬”会给主镜带来较大的额外内力;也不能过“软”,过“软”会造成镜面刚体位移增大以及轴向与侧向支撑的耦合度增大等不利因素。结合国内外采用此技术的望远镜以及现有加工能力,确定压杆直径为 $\Phi 3$ mm。结合轴向支撑及侧向支撑,对不同长度压杆主镜的影响进行了模拟分析。

图6(a)为参考温度为 20 °C,俯仰角为 0° 时,



(a) 温度 20 °C 及俯仰角 0° 时节点反力
(a) Nodal reaction at 20 °C and 0° elevation



(b) 温度 40 °C 及俯仰角 90° 时节点反力
(b) Nodal reaction at 40 °C and 90° elevation

图6 轴向支撑点侧向反力随不同长度压杆变化曲线

Fig.6 Change curves of lateral reaction of axial supporting point with different long pressure bars

主镜支撑点侧向反力随不同长度压杆变化的曲线。

图 6(b) 为俯仰角为 90° , 温度为 40°C (参考温度 20°C) 时, 压杆长度对最大侧向支撑点反力的影响。

通过以上分析, 可确定压杆具体尺寸范围, 即压杆长度选择在 $80 \sim 90\text{ mm}$ 时, 可使其既不会因强度过大给主镜带来较大额外的作用力, 也不会由于强度过小导致支撑性能不够理想。

3.3 静力学仿真

支撑结构及参数确定后, 对该支撑结构作静力学仿真分析, 图 7 为俯仰角在 $0 \sim 90^\circ$ 变化时主镜的面型曲线。可以看出, 通过 Whiffle-tree 与柔性压杆结合的轴向支撑以及 A-Frame 与切杆组成的侧向支撑结构可以很好地在不同状态下抵消支撑带给镜面的影响; 耦合度低, 同时自由度为零的静定支撑系统避免了镜面受力的不确定性, 通过数据拟合, RMS 可达 3.5 nm 。

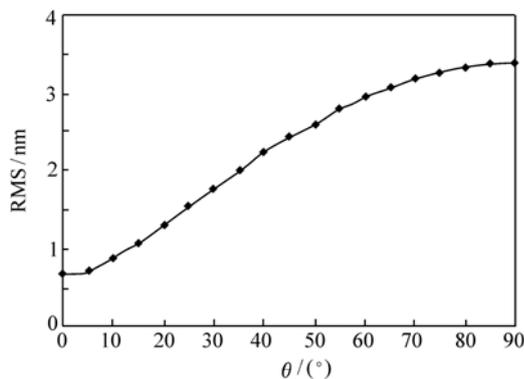


图 7 俯仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时的 RMS 曲线

Fig. 7 RMS curve with elevation angle from 0° to 90°

3.4 热学仿真

SiC 材料具有很好的比刚度以及热传导率特性, 但其自身热膨胀系数较大, 在温度发生变化时, 其自身变形较大。主镜支撑系统的目的之一就是保证主镜在温度变化时镜面主要发生曲率半径的改变而非曲面类型的改变。

对整个支撑系统进行温度为 $-20 \sim 40^\circ\text{C}$ 的有限元仿真。图 8 为不同温度条件下的 RMS 变化曲线, 曲线说明了支撑机构较好地消除了主镜与主镜室之间由于热膨胀不一致带来的有害应

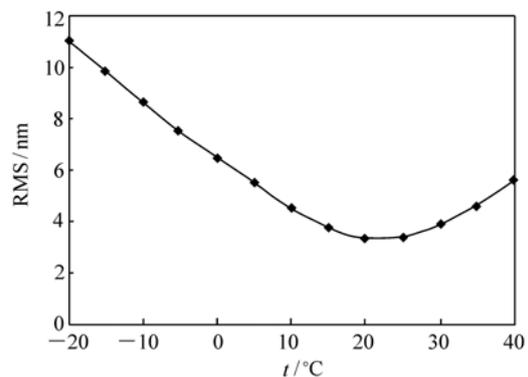


图 8 RMS 随温度变化的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of RMS values with different temperatures

力; 在发生热膨胀变形, 尤其是温差达到 40°C 时, 经拟合后, 对于支撑结构, 镜面精度 RMS 达到 11.1 nm 。

4 结 论

采用 Whiffle-tree 结合压杆的轴向支撑以及 A-Frame 结合切向杆的侧向支撑方案对 1.2 m SiC 主镜支撑结构进行了设计。轴向支撑中, 与压杆结合的 Whiffle-tree 结构可以很好地克服传统 Whiffle-tree 结构中摩擦力和热效应等因素对镜面的影响; 侧向支撑中, A-Frame 与切向杆相结合的支撑方式一方面通过对切向杆支撑结构的拓展来分散力作用点, 减低局部应力, 另一方面 A-Frame 中的三角型铰链杆结构可以很好地抵消热效应的影响; 该设计方案很好地满足了 1.2 m 轻量化 SiC 主镜的支撑要求, 同时很好地抵消了热应力对主镜的影响^[10]。分析结果表明: 在该支撑机构下, 镜面精度的 RMS 可达 3.5 nm , 温差 40°C 时, 镜面精度 RMS 达 11.1 nm 。该支撑结构对于 SiC 材料镜面具有较好的实用性, 满足 $1 \sim 2\text{ m}$ 级地基望远镜的技术需求。

目前, 该支撑系统设计方案机械结构部分正在进行加工, SiC 主镜镜坯已完成烧制。在系统实际装调完成后将对文中理论分析结果进行修正, 为 $1 \sim 2\text{ m}$ 级 SiC 主镜被动式支撑设计提供参考。

参考文献:

- [1] 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,2002.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design*[M]. Beijing:China Science & Technology Press,2002. (in Chinese)
- [2] 王富国,张景旭,杨飞,等. 1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. 光学精密工程,2008,16(专辑):117-122.
WANG F G,ZHANG J X,YANG F,et al. . Lightweight design and analysis for a 1.2 m SiC primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(Special):117-122. (in Chinese)
- [3] 杨德华,邵亮. 基于 ANSYS UIDL 的镜面轴向支撑机构 CAE 系统的实现[J]. 天文研究与技术,2008,5(3):312-318.
YANG D H,SHAO L. ANSYS UIDL-based CAE development of axial support system for optics mirrors[J]. *Astronomical Res. Technology*,2008,5(3):312-318. (in Chinese)
- [4] NEILL D R,KRABBENDAM V,ANDREW J,et al. . Active tangent link system for transverse support of large thin meniscus mirrors[J]. *SPIE*,2007,6665:66650F.
- [5] 杨德华,向伟玮. 摆臂式三点光学镜面支撑系统的研究[J]. 光学技术,2005,31(4):580-582.
YANG D H,XIANG W W. Study on three-swing-jib support system for optics mirror[J]. *Opt. Technique*,2005,31(4):580-585. (in Chinese)
- [6] BITTNER H,ERDMANN M,HABERLER P,et al. . SOFIA primary mirror assembly: structural properties and optical performance[J]. *SPIE*,2003,4857:266-273.
- [7] SOAR Telescope report. The SOAR telescope-status and prospects[EB/OL]. (2003-09-01)[2012-01-18]. [http://www.soartelescope.org/observing/soar-status/?searchterm=the soar telescope-status](http://www.soartelescope.org/observing/soar-status/?searchterm=the%20soar%20telescope-status).
- [8] 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)
- [9] YODER P R. 光机系统设计[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2008.
YODER P R. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. 3rd ed. . Beijing:China Machine Press,2008. (in Chinese)
- [10] 王建立,陈涛. 空间目标监视用地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及关键技术分析[J]. 中国光学与应用光学,2008,1(1):36-48.
WANG J L,CHEN T. General requirements and key technologies of ground-based high resolution OE imaging telescope for space target surveillance[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Optics*,2008,1(1):36-48. (in Chinese)

作者简介:邵亮(1982—),男,吉林桦甸人,硕士,研究实习员,主要从事望远镜主镜支撑方面的研究。

E-mail:shaol@mail.ustc.edu.cn

杨飞(1982—),男,湖北天门人,硕士,助理研究员,主要从事光学仪器结构设计方面的研究。

E-mail:yangflying@163.com

王富国(1979—),男,山东单县人,博士,助理研究员,主要从事光机系统设计与仿真等方面的研究。

E-mail:wfg109@163.com

吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,博士,副研究员,主要从事大口径薄镜面主动支撑系统设计、计算机辅助设计等方面的研究。E-mail:wu-xiaoxia@sohu.com