

4 m SiC 主镜起吊装置结构设计与分析

孙敬伟, 吴小霞, 李剑锋, 吕天宇, 刘杰

(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: 根据 4 m SiC 主镜的结构和材料特性, 设计了带有 12 个底支撑杆的主镜起吊装置。首先确定了起吊装置主体构成包括主体框架、底支撑组件、侧支撑、上压紧等组件。其次运用有限元建模、分析和优化的办法, 重点进行了有关主体框架的设计、施力面积的优化以及设计尺寸的优化。分析出了安装存在的误差所导致的 3 点支撑和主镜倾斜时镜子变形和应力情况, 并提出了相应的解决方法。最终确定了起吊装置的最终方案, 并按照设计和优化的结果, 加工、安装和使用起了吊装置。分析结果和实际应用表明, 起吊装置达到了设计要求, 可以为类似的结构提供一定的指导。

关键词: 起吊装置; 4 m SiC 主镜; 有限元分析; 结构优化

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2753-07

Design and analysis of 4 m SiC primary mirror handing device structure

Sun Jingwei, Wu Xiaoxia, Li Jianfeng, Lv Tianyu, Liu Jie

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

Abstract: The primary mirror handing device with 12 axial supporting bars was designed in this paper, according to the structure and material characteristic of 4 m SiC primary mirror. Firstly, it was determined that the handing device consisted of main body frame, axial supports, radial supports and upper compaction. Secondly, with method of finite element model building, analysis and optimization, the design of main body frame, the optimization of application area of force and projected dimension were studied. Thirdly, the mirror deformation plot and stress state and the primary mirror supported by 3 points and tilted caused by the installation error were analyzed. Finally, the final project of handing device was determined, and it was machined, assembled and applied according to the results of the analysis and optimization. The analysis result and practical application indicate that the design requirement of the handing device is achieved, and the direction for similar structure is provided here.

Key words: handing device; 4 m SiC primary mirror; finite element analysis; structural optimization

收稿日期: 2013-02-01; 修订日期: 2013-03-10

基金项目: 国家 863 计划(2009AA808020)

作者简介: 孙敬伟(1983-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事机械设计制造以及大口径望远镜装调方面的研究。

Email: blizzardmaple@163.com

0 引言

为了追求对更远更暗的目标的探测,当代地基望远镜的口径越做越大,分辨率越来越高,探测距离越来越远^[1-5]。望远镜系统的核心是主镜,更大口径的主镜的加工和检测成为望远镜研制成功与否的关键;然而随着主镜及其支撑系统的重量越来越大,为了降低系统的重量与成本,大口径望远镜主镜普遍采用轻量化结构形式;这就对大口径反射镜的制备和加工工艺的技术瓶颈提出挑战^[6-9]。在这种条件下,SiC 凭借其优异的物理和机械特性,在众多的备选材料中脱颖而出^[10-12]。SiC 材料具有较小的密度和较高的弹性模量,从而使其比刚度较高,实现相同机械性能的轻量化能力更好;还具有较低的热膨胀系数和较高的导热系数,使其热稳定系数较高,可以降低对热控系统的要求^[13-15]。SiC 材料凭借其在物理特性、机械性能、热性能等方面的综合优势,已经成为制造大口径望远镜主镜反射镜镜坯的主要候选材料。

对于较大口径的 SiC 主镜,其相关辅助设备的研究也日益成为迫切要解决的问题。文中针对基于 4 mSiC 主镜的起吊装置,通过分析主镜的结构和特性来设计、建模和分析起吊装置,使它能满足主镜包括出炉、加工、检测和装配等一系列的使用要求。

1 系统工作原理及指标

图 1 所示为 4 mSiC 主镜的透视图,可以发现出于轻量化的考虑,其主体组成为底面、上表面和一系列蜂窝状的支撑筋板,镜子的总质量为 2 672.3 kg。由于口径的巨大和镜子的高昂造价,其起吊过程必须以保证镜子的安全为前提,同时起吊装置还必须能实现不同场合的需要。因此需要对起吊装置进行一系列的设计和有限元分析以保证其功能。

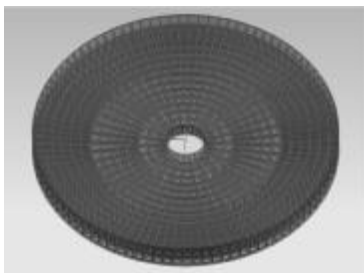


图 1 SiC 主镜结构图

Fig.1 Schematic layout of SiC primary mirror

选用 SiC 棒料,两端固支,中间点加力,测出棒料断裂的应力值为 320~350 MPa。主镜起吊装置必须保证主镜不会出现破坏,因此需要计算主镜在起吊过程中镜体内部的应力,并保证该工况下镜体内部的应力小于 SiC 材料的许用应力。主镜基本参数及 SiC 相关属性见表 1、表 2。

表 1 主镜基本参数表

Tab.1 Parameters for primary mirror

Diameter/mm	Hole/mm	Edge thickness /mm	Primary mirror weight/kg
4 000	400	350	2 672.3

表 2 SiC 材料的相关属性

Tab.2 Material property of SiC

Material	Density $\rho/\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$	Elastic ratio /MPa	Poisson's ratio μ
SiC	3.05E-9	392 000	0.25

2 起吊装置结构的设计

初步确定 4 mSiC 主镜起吊装置主要包括主体框架、底支撑组件、侧支撑、上压紧等。

考虑到 SiC 主镜烧制完成后的出炉过程以及主镜安装进入主镜室的过程,起吊装置的底支撑结构必须沿镜子的外圈均匀分布。由于 SiC 镜子的蜂窝状轻量化结构,底支撑不能支撑在蜂窝处而必须支撑在筋板上;而镜子一圈的筋板为 24 个,因此为了保证底支撑结构均匀地支撑在镜子的底部,选择底支撑数为 12。

针对不同部件的设计要求,把起吊装置的每个部分加以分析和优化,使其在能实现功能的情况下同时兼顾安全性和操作性。下面针对不同部件的设计分析和优化过程,把起吊装置的每个部分加以说明。

2.1 主体框架的设计

起吊装置的主体框架是整个系统的骨架,对于整个系统的稳定性和刚度具有重要的作用。既要保证系统具有较高的刚度和抗弯强度,又要保证其质量不要过高,导致给整个起吊装置的加工、运输和使用过程带来不必要的麻烦。

针对 4 mSiC 主镜的结构考虑,以及为 12 个底

支撑提供接口,因此主体框架选择利用 2 个正六边形上下叠加的焊接结构来实现,每个六边形的边长为 2 m。由于主体框架的尺寸和跨度较大,为了保证起吊装置的刚度,需要为其设计相应结构提供辅助刚度支撑。图 2 所示结构利用一个小六边形以及周围一系列管料的焊接提高整体刚度,对其进行有限元建模分析。此时起吊位置选在中心的小六边形上,因此边界条件定位中心的小六边形六自由度完全固定,并在每个底支撑上施加相应的力分析该系统整体的变形情况。图 3 所示为该系统在全部均匀承受镜子重量时的变形云图,支撑装置的最大位移为 0.679 mm。

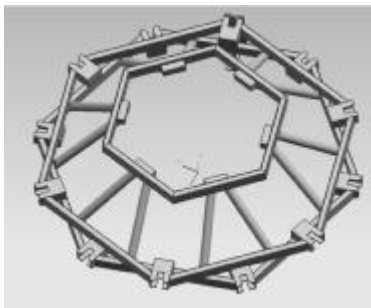


图 2 主体框架结构 1

Fig.2 Structure of main body frame 1

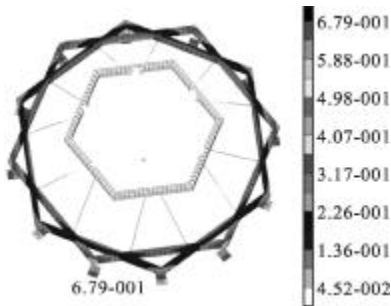


图 3 结构 1 的变形云图

Fig.3 Deformation plot of structure 1

图 4 所示结构利用型钢焊接成一个井字形的结

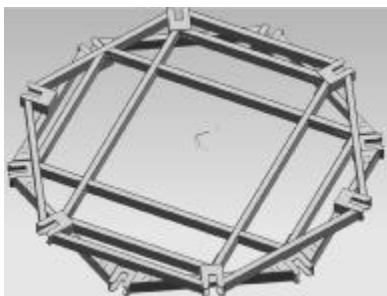


图 4 主体框架结构 2

Fig.4 Structure of main body frame 2

构来提高整体刚度,为了将该结构和图 2 结构进行对比,对其进行有限元建模分析。此时,边界条件发生了变化,起吊位置选在井字的 4 个交叉位置,因此将 4 个起吊位置 6 个自由度固定为 0,并在每个底支撑上施加相应的力分析该系统整体的变形情况。图 5 所示为该系统在全部均匀承受镜子重量时的变形云图,支撑装置的最大位移为 0.896 mm。

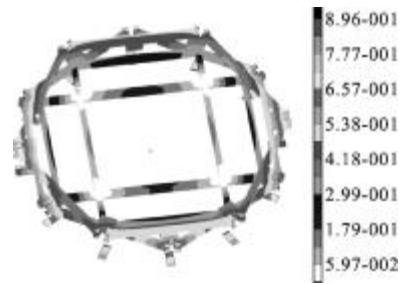


图 5 结构 2 的变形云图

Fig.5 Deformation plot of structure 2

通过对比可以发现,采用如图 2 类似桁架结构配合小六边形的方式具有较好的刚度,但是整个系统的结构较为复杂,除了中心增加了一个型钢焊接的小六边形外,还需要一系列的管料进行辅助焊接。这种方式不但增加了成本和加工难度,而且对管料的焊接提出了较高的要求,如果焊接后的应力释放不均匀,可能会引入变形和内部应力。而采用井字形如图 4 所示结构虽然刚度略有不足,但系统最大刚体位移依然小于 1 mm,完全能够满足刚度要求,并且完全采用型钢的组合焊接,加工精度大大降低,质量较轻,更适合起吊装置的技术要求。因此,选用如图 4 所示的井字形加强形式作为起吊装置的框架。

2.2 结构设计优化及分析

2.2.1 施力面积的优化

参照 SiC 主镜背后的轻量化形式,以及起吊装置的底支撑杆的 12 点对称分布可知,底支撑必须以蜂窝状结构中间的筋板为对称。中间筋板的厚度为 50 mm,蜂窝跨度为 75 mm,因此底支撑板的宽度应该在 50~250 mm 范围内,而支撑板的长度如果过长可能带来安装困难的麻烦,而长度过短则可能导致镜子背后的局部应力过大,给镜子带来不利影响。因此有必要通过优化底支撑板的长、宽以及厚度,在安全的前提下,使系统得到进一步优化。

方案 1: 跨越中间一个竖筋和两边各半个竖筋

以及部分横筋,如图 6 所示。此时底支撑板的尺寸为 250×124 , 蜂窝孔洞处支撑板无法施力, 因此, 实际支撑面积为 $250 \times 124 - 2 \times 75 \times 75 = 19\,750 \text{ mm}^2$ 。观察图 6 所示的有限元分析结果, 此时镜子的最大局部应力为 0.67 MPa 。方案 1 是将底支撑板的宽度设为最大。

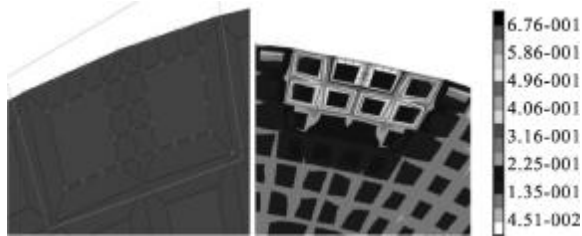


图 6 方案 1 及其变形云图

Fig.6 Scheme 1 and deformation plot

方案 2: 只跨越中间一个竖筋和部分横筋, 如图 7 所示。此时底支撑板的尺寸为 150×100 , 同样蜂窝孔洞处支撑板无法施力, 因此, 实际支撑面积为 $150 \times 25 + 50 \times 75 = 7\,500 \text{ mm}^2$ 。观察图 7 所示的有限元分析结果, 此时镜子最大的局部应力为 2.73 MPa 。方案 2 的支撑面积比方案 1 的面积缩小了 2.5 倍, 但是局部应力同样远低于 SiC 材料能承受的应力范围。

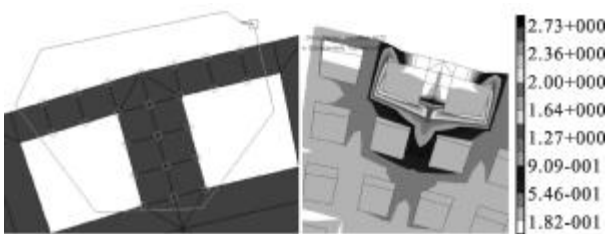


图 7 方案 2 及其变形云图

Fig7 Scheme 2 and deformation plot

方案 3: 只跨越中间一个竖筋, 如图 8 所示。此时底支撑板的尺寸为 50×100 , 实际支撑面积为 $50 \times 100 = 5\,000 \text{ mm}^2$ 。观察图 8 所示的有限元分析结果, 此时镜

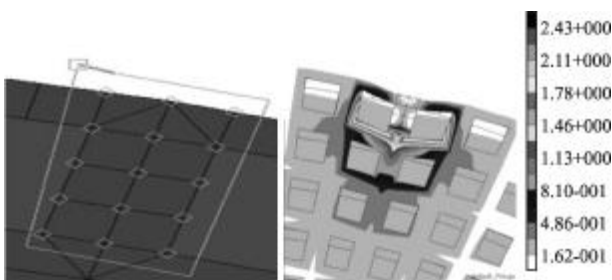


图 8 方案 3 及其变形云图

Fig.8 Scheme 3 and deformation plot

子最大的局部应力为 2.43 MPa 。方案 3 的支撑面积比方案 2 的方案面积小, 但是局部最大应力和其相比却降低了。

通过上述一系列分析可知: 竖筋对于镜子的支撑起着决定性作用, 增大底支撑板的长度对于减小系统的局部应力有着较好的作用; 而横筋对于局部应力则影响不大, 这是由与横筋连着蜂窝孔导致的, 可见宽度仅需适当即可, 它对于减小镜子的局部应力效果不明显。因此通过优化决定底支撑板的长宽尺寸分别为 $170 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。

底支撑板的长度和宽度对于镜子的局部应力影响分析完成后, 还需要对于支撑板的厚度进行分析。如图 9 所示: 横坐标为底支撑板的厚度, 分别从 30 mm 减小到 15 mm , 纵坐标为镜子的最大局部应力。为了准确, 采用两种方式分析该影响, 菱形线所示为有限元的赋力方式为压强 (pressure), 而方形线所示为力 (force)。观察压强的分析可知, 厚度从 20 mm 减小到 15 mm , 局部应力从 1.1 MPa 增加到接近 1.4 MPa , 因此确定底支撑板的厚度为 20 mm , 并配合加强筋增强其刚度。

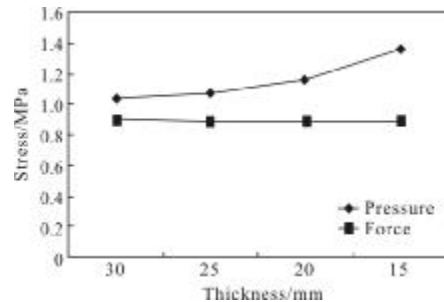


图 9 底支撑板厚度优化曲线

Fig.9 Optimization curve of support thickness

2.2.2 设计尺寸的优化

底支撑板的尺寸优化完成后, 还需要对整个系统的框架进行相应的优化。因为采用的框架形式为型钢的焊接, 因此有必要对型钢的尺寸进行相应的优化分析。选用矩形钢来焊接整体框架, 鉴于材料加工等方面的考虑, 整个框架选用同种型号的钢材。型钢的外形尺寸初步定为 $140 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。壁厚则是优化的尺寸。

图 10 所示为壁厚从 4 mm 增大到 7 mm 、整个系统的最大刚体位移的变化情况, 同样分为按照压强和力两种方式进行分析。观察规律可以发现, 随着壁

厚的增大整体刚度有所加强,但是加强的幅度并不大,而且壁厚最薄的 4 mm 的型钢焊接成的框架完全满足系统的要求;而伴随这壁厚的增加,整个主体框架的质量却从 909.6 kg 增大到 1 288.0 kg 如表 3 所示;过于庞大的质量给整个系统的加工、安装、使用和运输都带来不便。因此综合考虑,将整个系统焊接的型钢壁厚确定为 4 mm。

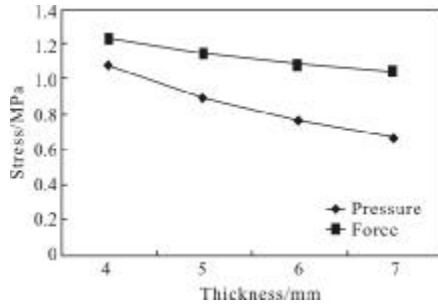


图 10 型钢尺寸优化曲线

Fig.10 Optimization curves of structural steel dimensions

表 3 壁厚的尺寸变化对应框架的质量

Tab.3 Frame masses corresponding to change of wall thickness

Wall thickness/mm	4	5	6	7
Mass/kg	909.6	1 038.3	1 164.4	1 288.0

2.2.3 安装存在误差时镜子受力情况分析

参照上面的设计可知,整个支撑工装共有 12 个底支撑板一起负担主镜的重量,前面的分析也同样是基于该理想情况下的变形和应力情况;考虑到实际应用中,如果 12 个支撑板不完全发挥作用导致实际只有对称 3 点承担主镜的重量,那么对于镜子的影响则和理想情况有较大差异。如图 11 所示最大平动的位移是 0.061 1 mm,此时镜子局部最大应力为

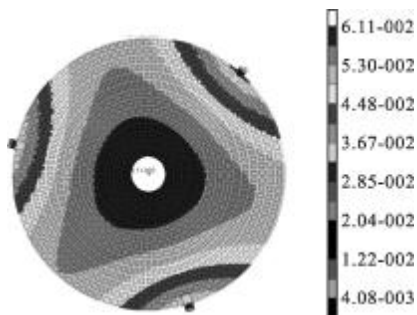


图 11 3 点支撑时主镜的变形云图

Fig.11 Primary mirror deformation plot with 3 supports

19.5 MPa, 仍然远低于镜子材料 SiC 所能承受的应力。为了消除实际中可能存在这样的情况,对于底支撑杆的受力情况,借助于力矩扳手测量,保证 12 个支撑杆均匀承担镜子的重量。

前面建立了对称分析模型,即 3 个支撑点 120° 均匀分布的底支撑发挥了作用,考虑实际情况是 3 点定面,但不能保证是 120° 的 3 点对称分布的情况,存在 3 种主要情况:即 3 个底支撑的间隔角度分别为:90°、120°、150°;60°、150°、150°;60°、120°、180°。其他的情况下镜子都无法保持稳定状态。针对实际中存在这样的支撑状况下进行建模分析,观察这些不对称情况下,镜子的变形情况。如图 12 所示的为 90°、120°、150° 的间隔的底支撑发挥作用时镜面的最大平动位移是 0.139 mm;而 60°、120°、180° 分析得到的最大平动位移是 0.319 mm。观察对比这些数据可知,当底支撑 3 点不对称分布时,对镜面造成更大的应力以及导致最大平动位移,并且偏离对称的角度越大时底支撑对镜面的影响越大。

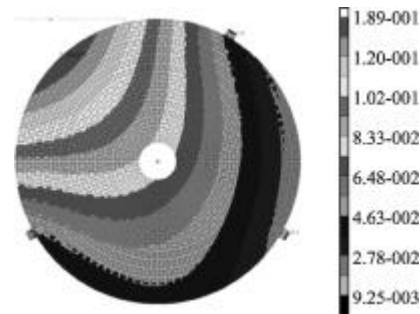


图 12 3 点不对称支撑时主镜的变形云图

Fig.12 Primary mirror deformation plot with 3 asymmetric supports

上面的分析只是当 12 个支撑杆中由于安装或者加工等导致的误差造成实际只有 3 个支撑点发挥作用的情况;下面考虑另外一种实际应用中可能存在的问题:当起吊带长度存在差异或者加工、安装、起吊位置存在差异时,还可能存在另外一个问题。此时镜子的底面并不水平,即镜子本身和竖直方向存在一定的夹角。分析这种情况可能导致起吊存在何种问题。同样基于比较极限的情况,假设镜子偏离竖直方向 5°,并且只有 3 个支撑点发挥作用,如图 13 所示。

此时分析可知,镜子局部的最大应力增加到 25.4 MPa,观察图 13 可知镜子有很大面积达到了最

大的位移 0.117 mm，此时镜子的重力一部分由支撑提供，另一部分则由支撑和镜子的摩擦力提供。如果实际存在这样的问题，需要考虑摩擦力是否能满足需要，给镜子的受力增添了不必要的因素，存在一定的风险。因此实际应用中需要侧支撑的辅助作用。

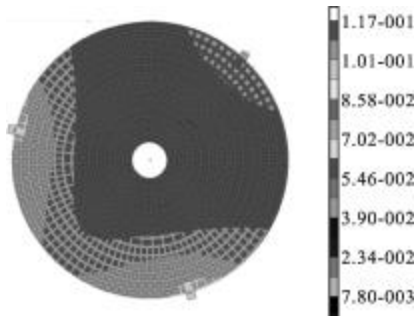


图 13 3 点支撑时主镜倾斜 5° 的变形云图

Fig.13 Deformation plot of primary mirror tilt 5° with 3 supports

2.3 最终方案

通过上面的一系列分析，最终确定起吊装置的结构如图 14 所示；选用 2 个正六边形对称焊接配合井字形的加强结构作为主体框架，利用 2 组不同长度的 12 个底支撑结构均匀排布在 SiC 镜子的底面外圆周的筋板处，承担镜子的重量；为防止 12 点不能同时均匀承受镜子重量，利用力矩扳手来旋紧螺母控制底支撑板和镜子的接触过程，只需保证力矩扳手显示的力矩相同，即可大致认定 12 点已经均匀受力；为防止镜子起吊过程中的歪斜给镜子带来的影响，在主体框架上添加如图 15 所示的侧支撑结构和镜面压紧机构，给镜子提供侧向的支撑平衡镜子重力沿侧向的分力，并且侧支撑结构还能起到保证起吊装置和主镜二者同心的效果，因此也可以称其为侧向定位机构。

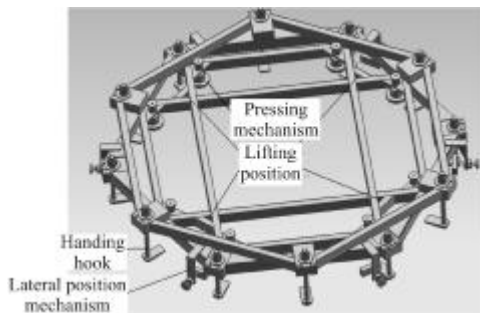


图 14 起吊装置结构图

Fig.14 Schematic layout of primary mirror handling

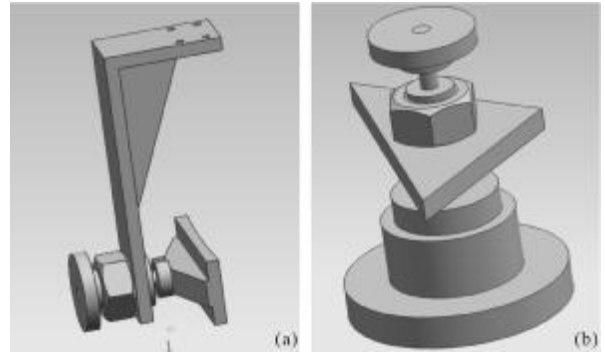


图 15 侧支撑和上压紧机构

Fig.15 Side support and upper compacting

前面的分析结果表明，利用该起吊装置实现主镜的起吊过程完全满足主镜的安全和使用要求。

3 实际应用

按照前面的分析和优化过程，进行了整个起吊装置的设计和加工过程。其中主体框架采用了型钢焊接，底支撑杆和侧支撑通过过渡结构连接在主体框架上，图 16 所示为起吊装置加工完成后的组装过程以及最后用于镜子的起吊过程。该起吊装置在安全的前提下，方便实用的实现了 4 m 级镜子的起吊过程，说明了整个起吊装置设计的合理性。

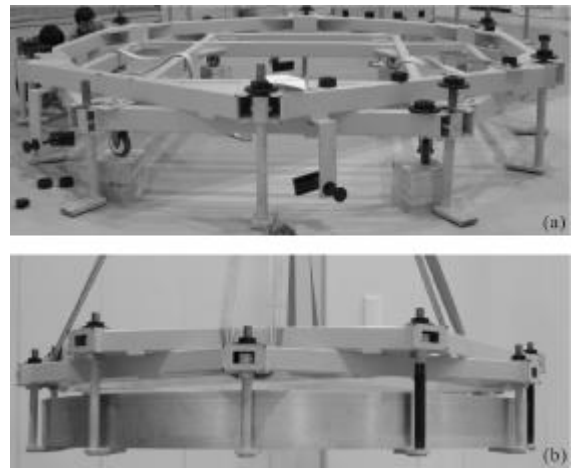


图 16 起吊装置的安装和使用

Fig.16 Assembly and application of handing device

4 结论

文中针对应用于 4 mSiC 主镜的起吊过程，确定了 12 点底支撑形式的主镜起吊装置，外形尺寸为 4 100 mm×4 100 mm×904.5 mm，质量为 1 375.7 kg。为

了保证主镜的安全性和起吊装置的实用性,对比分析了两种主体框架的加强形式,设计优化了施力面积和结构尺寸,分析了安装存在误差时镜子的受力和解决方案。分析结果和实际应用表明,起吊装置达到设计要求,可以为类似的结构提供一定的指导。其结构和安装、使用方法对于大尺寸反射镜的起吊具有很好的借鉴和指导意义。

参考文献:

- [1] Cheng Jingquan. Principles of Astronomical Telescope Design [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003: 61-68. (in Chinese)
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: 61-68.
- [2] Yoder J R, Paul R. Opto-Mechanical Systems Design [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1993: 407-470.
- [3] Bely Pierre Y. The Design and Construction of Large Optical Telescopes [M]. New York: Springer-Verlag Inc, 2003: 219-223.
- [4] Wang Huai, Dai Shuang, Zhang Jingxu. Azimuth shafting bearing structure in a large Alt-azimuth telescope[J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(7): 1509-1516. (in Chinese)
王槐, 代霜, 张景旭. 大型地平式望远镜的方位轴系支撑结构[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1509-1516.
- [5] Xu Liang, Zhao Jianke, Xue Xun. Detectability of lunar-based optical telescope on ground [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(5): 972-978. (in Chinese)
徐亮, 赵建科, 薛勋. 月基望远镜探测能力地面标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 972-978.
- [6] Zhang Dongge, Zhou Renshan, Li Yaobin. Surrogate models based optimization methods for the axial support points of the primary mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 409-414. (in Chinese)
张东阁, 卓仁善, 李耀彬. 反射镜轴向支撑位置优化得代理模型方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 409-414.
- [7] Fan Lili, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Impact of the supports of primary mirror in equatorial telescope on its surface deformation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 173-177. (in Chinese)
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影响[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 173-177.
- [8] Sun Jingwei. Alignment technique for the large-aperture telescope based on astigmatism [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 427-435. (in Chinese)
孙敬伟. 利用像散分析实现得大口望远镜装调技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 427-435.
- [9] Zhang Yuanyuan, Jing Wei, Cheng Yuntao, et al. Design and finite element analysis of $\Phi 510$ mm SiC ultra-lightweight mirror [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(8): 1718-1724. (in Chinese)
张媛媛, 敬畏, 程云涛, 等. $\Phi 510$ mm SiC 超轻量化反射镜的设计与有限元分析 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1718-1724.
- [10] Wu Xiaoxia, Wang Minghao, Ming Ming, et al. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20 (6): 1243-1249. (in Chinese)
吴小霞, 王鸣浩, 明名, 等. 大口径 SiC 轻量化主镜热变形得定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1243-1249.
- [11] Zhang Limin, Zhang Bin, Yang Fei, et al. Design and test of force actuator in active optical system [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(1): 38-44. (in Chinese)
张丽敏, 张斌, 杨飞, 等. 主动光学系统力促动器得设计和测试[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 38-44.
- [12] Gao Jinsong, Shen Zhenfeng, Wang Xiaoyi, et al. Research status quo of SiC space mirror material and its surface modification [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(2): 71-78. (in Chinese)
高劲松, 申振峰, 王笑夷, 等. SiC 空间反射镜材料及其表面改性技术现状分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 71-78.
- [13] Palusinski I A, Ghozeil I. Developing SiC for optical system application[C]//SPIE, 2004, 5524: 14-20.
- [14] Tang Yuxia, Zhang Ge. The development of fabrication techniques in large scale light-weighted SiC mirror blank [J]. Opt Tech, 2007, 33(4): 510-518. (in Chinese)
唐裕霞, 张舸. 大口径碳化硅轻质反射镜镜坯制造技术的研究进展[J]. 光学技术, 2007, 33(4): 510-518.
- [15] Rodolfo J. Polishing, coating and integration of SiC mirror for space telescopes[C]//SPIE, 1995, 2543: 238-247.