

文章编号:1004-4213(2011)01-0087-5

傅里叶望远镜外场实验系统拼接主镜

陈宝刚,董磊,林旭东

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:提出了傅里叶望远镜外场实验系统拼接主镜支撑结构,详细介绍了各组件施工及安装过程.该主镜由 61 块六边形球面子镜拼接而成,高 6 m,宽 5.5 m,是我国目前用于望远镜系统中能量接收面积最大的拼接主镜.子镜采用模块化设计,互换性好且均可实现 3 个自由度的精密调整.支撑桁架采用分体结构设计,便于拆装和运输;地基采用混凝土浇筑预埋型钢构件,各分体组件由螺栓与地基联接为一个整体,保证结构整体刚度的同时,也满足系统对温度的适应性.通过实验验证:该主镜支撑结构稳定性优于 0.075 mrad,子镜指向调整准确度优于 0.05 mrad,对已安装的 8 块子镜进行共焦试验,光斑质心重合准确度小于 20 mm,满足外场实验对拼接主镜的技术要求.

关键词:傅里叶望远镜;拼接镜;主镜支撑;子镜模块

中图分类号:TH754

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114001.0087

0 引言

傅里叶望远镜(Fourier Telescope)是一种基于相干激光成像,并综合了主动成像与合成孔径等多项技术优点的光电探测技术.由于采用激光照明主动成像,利用相对简单的硬件,具有探测深空目标的优势,因而成为目前对地球同步轨道目标高分辨率成像的首选技术.它与其他成像技术最大的不同是采用激光照明的主动成像,发射器同时发射三束以上的激光,通过大气湍流传播,照射目标并在目标表面形成干涉条纹,然后被目标散射,利用大面积非共相接收器接收经时间调制的散射回波能量,经过傅里叶变换重构目标图像^[1-2].

拼接主镜是用来接收汇聚目标散射回波能量的主要系统,也是傅里叶望远镜中的关键组成部分.为了进行外场试验验证傅里叶望远镜的成像原理^[3],本文设计了拼接主镜系统.该系统由 61 块正六边形子镜拼接而成,主镜高 6 m,宽 5.5 m,是我国目前用于望远镜系统中能量接收面积最大的拼接主镜.每块子镜对边长 610 mm,厚 19 mm,重量约 15 kg.它通过 3 点镜面支撑联接在子镜支撑板上,组成子镜室,再将子镜室定位安装在主镜支撑桁架上,通过精确调整 61 块子镜基板的空间位置,使 61 块子镜共焦,从而得到拼接面的主镜系统.该系统使用时各

子镜工作状态固定不动,光轴基本平行于水平面,所以各子镜都处于竖直方向的受力状态.

1 拼接主镜的技术要求

根据傅里叶望远镜外场实验系统的总体要求,拼接主镜的性能指标为:

- 1) 主镜口径 $5.5 \times 6 \text{ m}^2$,由 61 块对边长 610 mm 的子镜拼接而成;
- 2) 镜面曲率半径: $100 \pm 5 \text{ m}$;
- 3) 拼接形式:只共焦不共相;
- 4) 主镜工作状态固定不动,镜面稳定准确度 $\pm 0.5 \text{ mrad}$;
- 5) 子镜室在支撑桁架上精确定位,各子镜安装调整时不能干涉;
- 6) 可单独安全装卸任意位置的子镜室;
- 7) 子镜调整自由度:2 个自由度(tip-tilt),角度调整范围: $\pm 3^\circ$,角度调整准确度: $\pm 0.5 \text{ mrad}$,子镜曲率中心可调范围: $\pm \pi R \times 3^\circ / 180^\circ = \pm 5.2 \text{ m}$,子镜之间边缘间距: 20 mm;
- 8) 使用温度: $-20^\circ\text{C} \sim +30^\circ\text{C}$,储藏温度: $-30^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$.

2 拼接主镜支撑结构

拼接主镜系统主要由支撑桁架、子镜室模块和

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2007AA703425)资助

第一作者:陈宝刚(1982-),男,助理研究员,主要研究方向为大光学仪器结构设计. Email:cbg0813@163.com

收稿日期:2010-08-10;修回日期:2010-09-21

吊装组件组成(如图 1),支撑桁架采用工字钢、方钢等型钢焊接而成;子镜室采用模块化设计,具有 3 个自由度的调整机构;为了方便子镜室模块的装卸,设计了专用的吊装组件和起吊辅助工装。

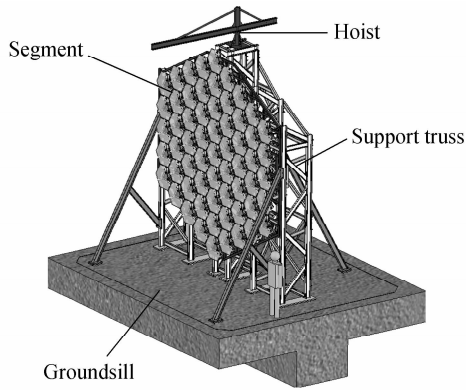


图 1 拼接主镜三维效果图
Fig. 1 3D view of segmented mirror

2.1 支撑桁架

支撑桁架是拼接主镜系统的主要支撑结构. 由于外形尺寸较大,要求支撑稳定性好、刚度大,故采用工字钢、槽钢、方钢等型钢焊接而成,焊后经热时效处理,以保证结构稳定性. 综合考虑加工场地、加工工艺、热时效设备、运输条件等因素,主支撑桁架采用分体焊件设计,共分 8 个大的组件(如图 2),分别为左立柱、中间立柱、右立柱、上盘、下盘、斜拉筋、侧拉筋、地基预埋焊接组件. 组件只采用焊接工序,不必进行精加工,焊后经热时效处理和表面喷砂处理,再摆好各组件的位置进行配打孔,对位置准确度要求不高. 图 3 为车间装配中的支撑桁架. 各大组件配打孔后,装配关键联接螺栓,然后加工上下盘 61 个圆环上的 549 个 M6 丝孔,各个丝孔之间有位置准确度,误差太大将使子镜装配调整时镜边发生干涉. 为了保证各个丝孔的位置准确度,设计了 3 个六

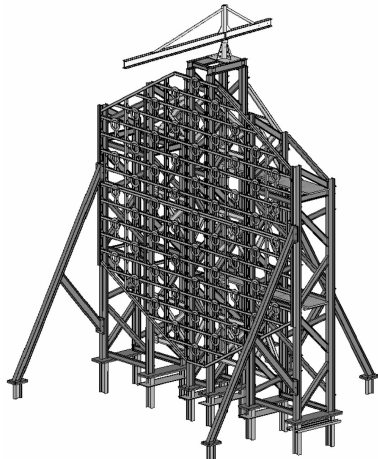


图 2 支撑桁架三维效果图
Fig. 2 3D view of support truss

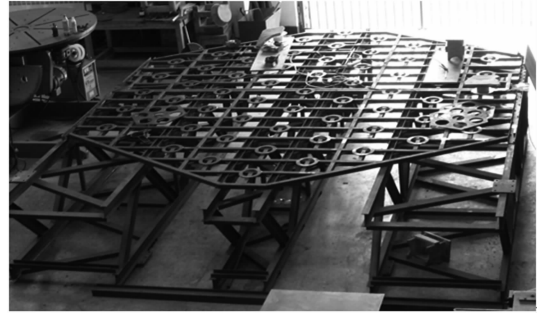


图 3 车间装配中的支撑桁架
Fig. 3 Support truss at work shop

边形的打孔定位工装,六边形对边长 630 mm,使用时固定一个六边形打孔工装,逐次移动. 利用相邻六边形互相锁紧的原理,可以实现对所有圆环上丝孔的加工,为了减小累计误差,第一个打孔工装放置在最中间圆环上.

考虑到主镜的使用状态和稳定性要求,主镜的地基采用砂石混凝土浇筑焊接预埋件,如图 4(a). 浇筑地基采用隔振沟隔振,增强了主镜的抗振性能. 浇筑地基焊接预埋件时,用水准仪实测(如图 4(b))保证 6 个预埋件的上表面平面度小于 2 mm.



(a) Fix pre-embedded piece of ground base



(b) Measure planes error of pre-embedded piece

图 4 地基施工
Fig. 4 Construction of ground base

主支撑架在室内配装完成后,再分体运至施工现场装配,经表面喷漆防锈处理后,整体吊装到与地基预埋件现场焊接装配(如图 5). 为了保证主支撑架 12 个焊脚位置的平面度,采用经纬仪实测,砂轮机修磨保证平面度小于 2 mm.



图 5 支撑桁架组装后整体吊装
Fig. 5 Integrated suspending truss after assembly

2.2 子镜室模块

由于在外场实验中要求子镜调整角度较大(±3°)且准确度较高,为了保证调节过程中子镜受力稳定,本文通过子镜室把镜面支撑机构和镜面调节机构分成串联的两部分^[4].子镜通过三点镜面支撑粘接到子镜基板上,镜面支撑采用柔性膜片结构,可以很好地消除由于子镜与支撑结构的热变形不一致而引起的热应力,补偿热变形的影响;角度调整机构采用3点螺旋传动手动调节.

子镜背面与子镜室支撑机构采用环氧树脂粘接.虽然环氧树脂的寿命很长,但是从长期使用及装配调试的安全性考虑,子镜的保护装置是必要的.考虑到子镜之间间隙(20 mm)较大,本文采用如图6所示的镜托作为子镜的保护机构.3个镜托分布位置如图6所示,其中下面两个镜托与子镜之间通过粘接一层聚四氟乙烯垫无应力接触,一旦子镜背后支撑粘接点失效脱落,镜托可以承受全部子镜重力载荷;上面一个镜托起到防止子镜向前倾覆脱落的危险.另外为了方便子镜室的装卸,镜托同时作为起吊的受力点.

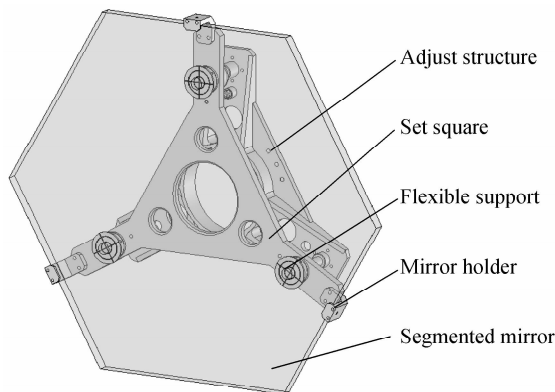
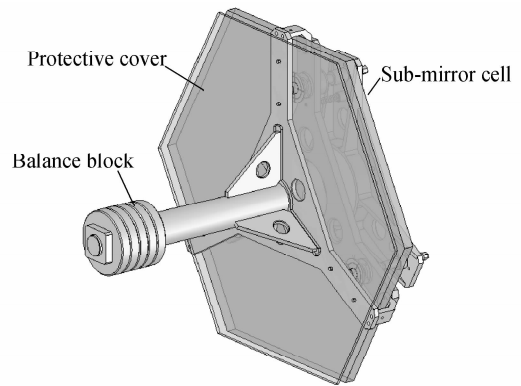


图 6 子镜室支撑模块
Fig. 6 Segment support module

2.3 子镜吊装

拼接主镜外形结构较大,最高处距地面超过6 m,子镜模块单个重约30 kg,安装时又都处于竖

直状态,因此本文设计了专用的起吊装置,包括悬臂吊和起吊工装.悬臂吊旋转半径3 m,由小车和电动葫芦组成.小车安装在工字钢悬臂上,实现径向运动;电动葫芦联接在小车上,实现竖直运动;悬臂吊基座安装在主镜支撑桁架的中间立柱上.子镜间距很小(20 mm),且子镜都基本都处于同一竖直面内,为了实现对任意位置子镜的安全装卸^[5-8],起吊时的受力点只能选择3个安全镜托的端面.本文设计了图7(a)所示的起吊工装,它可以起到配平的作用,并在起吊工装上安装透明有机玻璃板,既保护镜面,又方便操作;图7(b)为子镜室吊装过程.



(a) Schematic diagram of suspending



(b) Process of suspending

图 7 子镜室吊装
Fig. 7 Sub-mirror cell suspending

3 实验及结果

3.1 支撑稳定性实验

傅里叶望远镜是能量系统,主镜支撑结构的不稳定性会造成主镜共焦准确度不够,即各子镜汇聚的能量光斑质心漂移,最终造成主镜汇聚的能量光斑过大.为了检测支撑结构的稳定性是否满足总体要求,本文在主镜曲率中心附近放置激光经纬仪作为激光发射装置,如图8.考虑到支撑桁架的最上端晃动最厉害,故在最上端固定一个能调倾斜的平面反射镜.激光发射装置旁边放置接收靶,调整激光发射角度和反射镜的角度,使激光束经平面反射镜再打到接收靶的中心.接收靶上画有带刻度的一组同

心圆环,若支撑桁架不稳定,上端固定的反射镜就会晃动,造成激光靶中心的光斑晃动,故通过测量激光靶上光斑质心的位移就可以验证支撑桁架的稳定性.经实测8h内光斑质心漂移小于15mm(相当于支撑桁架晃动优于0.075 mrad),满足外场实验系统的总体要求.

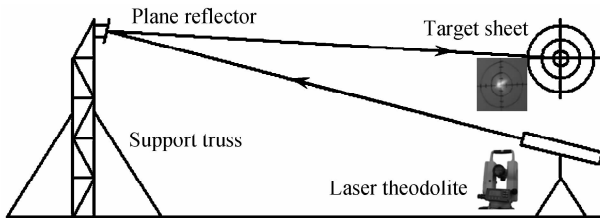


图8 支撑桁架稳定性检测示意图

Fig. 8 Schematic diagram of stability measurement for support truss

3.2 子镜共焦实验

对已安装好的部分子镜进行共焦实验^[9],其方法如图9.采用一大功率激光器,经透镜组扩束发散以模拟点目标,光束经子镜汇聚到激光器附近的接收靶上,调整各子镜的倾斜角度,最终使所有光斑质心重合并落到接收靶的中心位置,经实测各光斑质心重合准确度小于20mm.

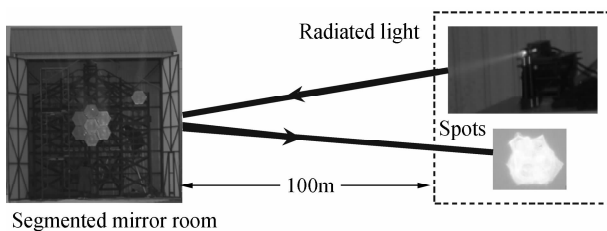


图9 拼接主镜共焦实验示意图

Fig. 9 Schematic diagram of segmented mirror co-focus experiment

给子镜输入最小调整角度,接收靶上对应光斑质心移动小于10mm,故子镜指向调整准确度优于0.05 mrad.

4 结论

傅里叶望远镜外场实验系统主镜是由61块六边形球面子镜组成的拼接球面镜,是能量汇聚系统.与光学成像的拼接望远镜相比,它只要求共焦,不要求共相,故设计思想也不同于光学成像的拼接镜.根

据外场实验的总体要求,本文设计了光轴水平的固定式拼接主镜,详细介绍了该主镜各组件施工及安装过程,最后通过实验验证该主镜支撑结构稳定性优于0.075 mrad,子镜指向调整准确度优于0.05 mrad,对已安装的8块子镜共焦试验,光斑质心重合准确度小于20mm,满足外场实验对拼接主镜的技术要求,为傅里叶望远镜外场实验取得理想成像效果奠定基础.

参考文献

- [1] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a fourier telescope imaging system[C]. *SPIE*, 2005, **5896**: 58960D-1-58960D-15.
- [2] MATHIS J, STAPP J, CUELLAR E L, *et al.* Field experiment performance of the receiver elements for a Fourier telescope imaging system [C]. *SPIE*, 2005, **5896**: 58960F-1-58960F-12.
- [3] DONG Lei, LIU Xin-yue, WANG Jian-li. Realization of Fourier telescope technology in laboratory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(6): 999-1002.
董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境下傅里叶望远镜技术的实现[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(6): 999-1002.
- [4] CHEN Bao-gang, ZHANG Jing-xu, YANG Fei, *et al.* Design of segment support module of collecting light mirror in Fourier telescope for field experiment[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(4): 329-333.
陈宝刚, 张景旭, 杨飞, 等. 傅里叶望远镜外场实验聚光镜子镜支撑模块的设计[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(4): 329-333.
- [5] YANG De-hua, QI Yong-jun, ZHU Zhen-dong, *et al.* Design and test of the active micro-motion mechanism for optical mirror segment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(2): 191-197.
杨德华, 戚永军, 朱振东, 等. 光学拼接镜面微位移主动调节机构的设计和实测[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(2): 191-197.
- [6] 庞振基, 黄其圣. 精密机械设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000, 125-164.
- [7] 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, 235-252.
- [8] WU Xiao-xia, YANG Hong-bo, ZHANG Jing-xu, *et al.* Optimal design of system for the large-aperture sphere mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 129-132.
吴小霞, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径球面镜支撑系统的优化设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 129-132.
- [9] LIN Xu-dong, CHEN Tao, WANG Jian-li, *et al.* Co-focus experiment of segmented-mirror active optics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 564-569.
林旭东, 陈涛, 王建立, 等. 拼接镜主动光学共焦实验[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 564-569.

Segmented Mirror of Fourier Telescope Field Experimental System

CHEN Bao-gang, DONG Lei, LIN Xu-dong

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

Abstract: A supporting structure of segmented mirror for Fourier telescope field experimental system is proposed, and the fabrication and assemble sequence of each part are introduced. The segmented mirror, 6 meters in height and 5.5 meters in width, which is composed of 61 hexagon spherical sub-mirrors, is the biggest segmented mirror telescope used for energy collecting in China till now. The sub-mirror cell is designed in modular block so that it is interchangeable and its three FOD precision adjust can be realized. The supporting truss adopts fission structure for its assemble and transport to become easy. The ground base uses pre-embedded bar and beton. Each component joins with the ground base by bolts. In this way, the integer rigidity is ensured and the temperature adaptability is also satisfied. The experiment indicates that the stability of support structure is better than 0.075 mrad and the angle adjust accuracy is better than 0.05 mrad. The co-focus experiment of 8 segments which are already assembled indicates that superposition accuracy of spots center of mass is less than 20 mm. All the results above show that the proposed supporting structure satisfies the technical requirements of the field experimental system.

Key words: Fourier telescope; Segmented mirror; Support of primary mirror; Segment module