

基于组装式望远镜的子镜模块结构设计

于夫男, 张春悦

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:在轨组装空间望远镜是将望远镜进行模块化,模块通过一次或多次发射送入预定轨道,并在轨道上完成整机组装、调试。组装式空间望远镜的主镜由多个子镜模块阵列拼接而成,基于1 m口径空间组装望远镜地面原理演示样机,对望远镜子镜模块进行设计,设计内容包括子镜的镜体支撑、促动器的装配方法等,采用有限元数值模拟分析手段对设计结果进行了仿真验证,然后对子镜模块实物进行了相关测试。结果表明,子镜反射镜的面形精度RMS优于 0.02λ ,两组子镜的共焦共位相拼接精度为 0.0235λ ,支撑结构设计合理、效果良好,满足使用需求。

关键词:组装式望远镜;子镜模块;主镜支撑;自由度调整

中图分类号: TH743

文献标志码: A

文章编号: 1672-9870(2020)01-0032-06

Structure Design of Sub-mirror Module of the On-orbit Assembling Space Telescope

YU Fu-nan, ZHANG Chun-yue

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

Abstract: On-orbit Assembly Space Telescope aiming to modularize the telescope, is sent to the designated orbit through one or more launches, and the whole system is assembled and tested on the orbit. the primary mirror of the On-Orbit Assembling Space Telescope is composed of several sub-mirror modules. Based on the principle prototype of one meter diameter assembled telescope, the segment modules of the telescope is designed including the mirror support of the sub-mirror, the assembly method of the actuator, etc. the design results are simulated and verified by FEA, and then the actual test is carried out. the experiment results show that the surface error RMS of the mirror is better than 0.02λ , co-phase detection accuracy after splicing of double sub-mirrors is 0.0235λ , and that the segment structure has good supporting effect and meets the needs.

Key words: assembling telescope; segment module; primary mirror support; degree of freedom adjustment

受到光学原理的制约,光学系统的分辨能力与其光学口径成正比,高分辨率即意味着大口径。在可预见的未来,运载工具的发展速度跟不上望远镜口径增大的步伐。针对上述问题,有研究者提出采用展开式空间镜作为解决方案,然而,对于口径更大的望远镜,即使采用展开式主镜方案^[1-3],也无法突破运载工具对载荷

体积的限制。为了解决如何发射超大口径望远镜的问题,在轨组装空间望远镜应运而生。

在轨组装空间望远镜(On-orbit Assembly Space Telescope)技术是将模块化设计的超大口径望远镜组件通过一次或多次发射送入预定轨道^[4-6],并在轨道上完成整机组装的技术。其中,望远镜的组件可以在其他航天器(如空间

收稿日期: 2019-02-14

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新项目(Y6CX1C1160)

作者简介: 于夫男(1986-),男,硕士,助理研究员, E-mail: 847378033@qq.com

站、飞船)上实施组合装配,完成后可与航天器共同运行,或转入其他运行轨道。在轨组装空间望远镜的出现,将彻底突破运载工具的制约,使口径超过10 m的超大型空间望远镜成为现实。

1 组装式主镜阵列

望远镜主镜由六块子镜阵列组成。如图1所示。望远镜系统主镜光学包络口径为 $\phi 1\,000\text{ mm}$,每片子镜内切圆为 $\phi 320\text{ mm}$,外接圆 $\phi 369.5\text{ mm}$ 。各子镜间对边间距为13 mm(切割区),每两片子镜构成一组子镜模块,共计3组子镜模块。

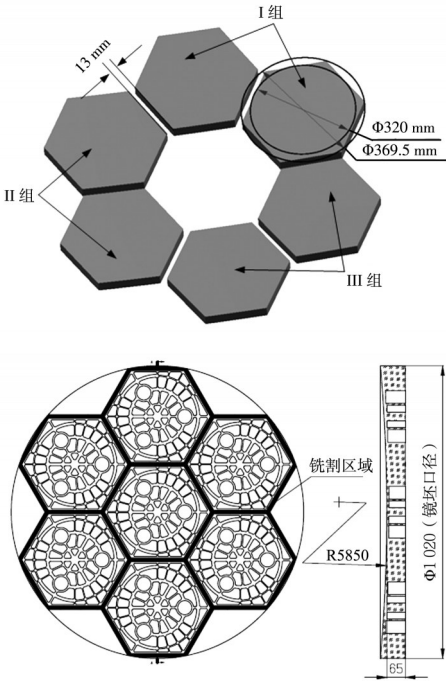


图1 主镜阵列

1.1 镜体材料选择

空间光学系统反射镜常见光学材料如表1所示。材料综合品质最优的应为SiC^[7],但考虑到材料的采购渠道、经济合理性、安全性以及综合性能等因素,最终选择微晶玻璃作为主镜镜体

材料。微晶玻璃具有良好的光学加工性能、热膨胀系数小且价格较为适中等特点。

1.2 子镜模块光机结构

考虑到主镜阵列组装后要求严格的共焦共位相,以及望远系统末端波前(S-H)及位相(DFS)测试系统测量范围和精度,子镜的光机结构应具备如下功能:

- (1)具有六自由度微调机构(粗调);
- (2)具有适应环境温度变化的柔性支撑;
- (3)具有能产生波长级三自由度微位移机构(精调)。

六自由度微调机构采取六轴并联调整机构;三自由度微位移机构选用精密压电促动器;柔性支撑安装在镜体背部与支撑背板之间。

六轴并联调整机构负责粗位姿调整;柔节负责消减环境温度变化时镜体与支撑结构热膨胀系数不一致带来的热应力以及消减装配应力;精密压电促动器负责精密位姿调整。

子镜模块光机结构如图2所示。

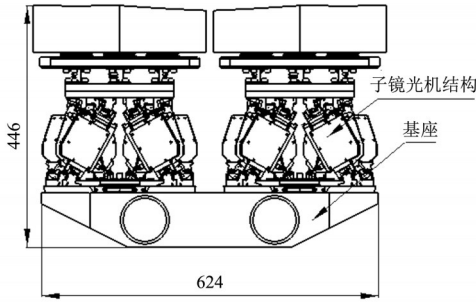


图2 主镜阵列子镜模块光机结构

1.3 子镜轻量化设计

为了减轻六轴并联调整机构所承受的载荷,降低镜体因自重产生的变形,有必要对子镜镜体进行轻量化设计。子镜轻量化设计的优劣直

表1 常见空间望远镜光学材料指标参考值

序号	材料	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 E / GPa	比刚度 $(E/\rho) / (10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{g})$	热导率 $\lambda / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	线膨胀系数 $\alpha / (10^{-6}/^\circ\text{C})$
1	SiC	3.05	400	13.1	185	2.5
2	Be	1.85	280	15.1	160	11.4
3	微晶玻璃	2.53	90.3	3.6	1.46	0±0.05
4	石英	2.2	67	3.1	1.3	0.5

接影响其最终的使用性能,包括抗变形能力、减重比、热稳定性、镜体表面光学质量以及制造难度与其成本等,因而镜体轻量化对反射镜的性能有很大影响。

镜体背部轻量化设计与镜体支撑方式有关。根据以往工程经验,镜体采用背部三点支撑方式,三组支撑点中的每一点位置应位于子镜镜体1/3分块的质心处,依据此理论,本子镜镜体的理论支撑分布圆为 $\phi 184\text{ mm}$,结合镜体轻量化结构形式及支撑结构特点,最终确定背部三点支撑分布圆为 $\phi 190\text{ mm}$ 。考虑到轻量化后镜体的刚度等效性以及镜体加工工艺与镜体材料属性与经济性,镜体轻量化为背部开放式,如图3所示。

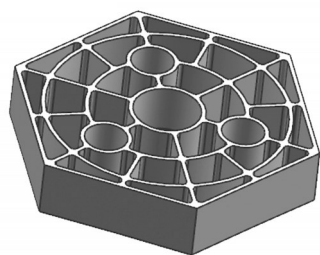


图3 轻量化子镜

轻量化后的子镜镜体重量为7 kg,轻量化率达到57%。

1.4 子镜支撑设计

子镜镜体采用三点背部柔性支撑,支撑结构形式如图4所示。

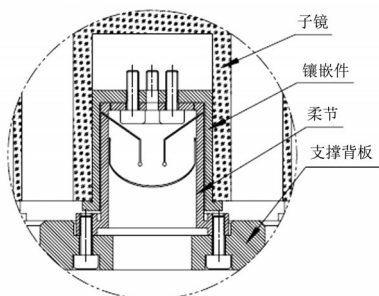


图4 子镜背部支撑点结构

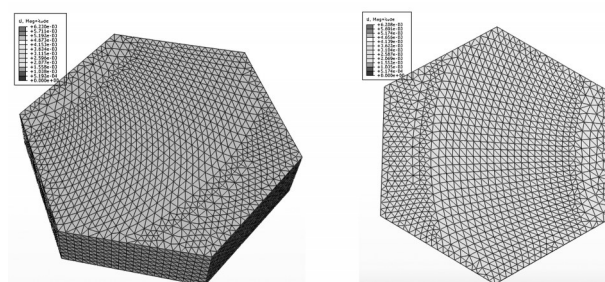
镶嵌件通过配研与子镜背部支撑孔配合,并通过环氧树脂胶粘于子镜镜体支撑孔内,镶嵌件止口法兰与镜体背部相贴合。镶嵌件与柔节之间通过底部螺钉连接,镶嵌件与柔节径向预

留有间隙,柔节与支撑背板之间亦通过螺钉连接。柔性支撑的作用一方面在于起到隔振的作用,另一方面可以吸收绝大部分的装配应力避免应力,传导至镜体上影响镜面面形精度,且当外界温度变化时,子镜镜体与其支撑结构之间材料热特性的不匹配可以通过柔节给予补偿^[8-11]。

支撑结构材料应保证足够的强度、大的比刚度,同时又要要有高的热稳定性以及热传导率。与镜体材料微晶玻璃直接接触的镶嵌件选择与其具有相近热膨胀系数的材料,避免因温度的变化产生内应力。镶嵌件与柔节材料选择钢4J32,支撑背板选择TC4。

1.5 工程分析

子镜镜体在重力载荷与 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温变载荷联合作用下,通过约束支撑板安装面六自由度的有限元仿真分析结果如图5所示。



(a) 1 g重力、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温变下子镜面形分析 (b) 1 g重力、 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温变下子镜面形分析

图5 结构支撑下子镜镜面精度分析

为保证相机成像质量,光学元件应符合光学系统中所要求的空间相对位置关系(刚体位移)和镜面变形精度要求(PV,RMS)。利用最小二乘法拟合变形后的镜面球心与曲率半径,算得镜面产生的刚体位移、PV值及RMS值,得出镜面变形情况,对比光学设计指标,评价结构支撑的合理性。分析结果如表2所示。

表2 结构支撑下子镜面形分析结果

工况	Z向刚体位移/ μm	PV/nm	RMS/nm
1 g、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温变下	1.77	16.165	3.892 7
1 g、 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温变下	1.34	23.570	5.258 1

从分析结果中可以看出,结构支撑下的两种工况镜面精度 RMS 均小于光学设计指标 0.02λ ,刚体位移满足光学元件的相对稳定性要求。优化后的柔性支撑结构能够满足光学对结构设计的支撑精度要求,设计合理、可行。

1.6 子镜位姿调整

子镜的位姿调整采取粗调整和精密调整共同完成,其中,粗调整采取六轴并联机构,精密调整采取精密压电促动器。

子镜精密调整采用 PI 生产的 P-843.10,其技术参数如表 3 所示。

表 3 P-843.10 性能指标

输出最大 位移/ μm	分辨率/ nm	重量/ g	轴向刚度/ ($\text{N}/\mu\text{m}$)	可承受最大 拉应力/ N	长度/ mm
15	0.3	31	57	800/300	37

由于压电促动器的主要工作部件为压电陶瓷片,这就决定了在使用压电促动器时应考虑以下几点问题:(1)压电促动器本身不允许承受过大的弯曲应力;(2)压电促动器的驱动位移应得到有效地保证。为解决压电促动器难以承受过大弯矩的问题,对其采用柔节连接进行卸载,卸载原理如图 6 所示。

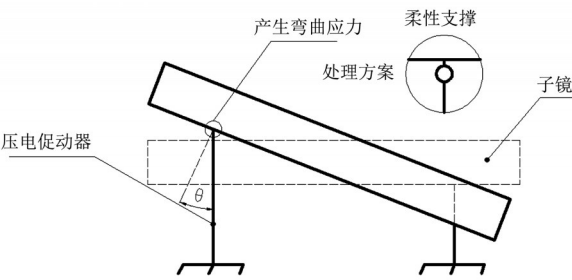


图 6 压电促动器弯矩卸载原理

为解决弯矩卸载问题,在压电促动器驱动端安装与之相配套的卸载柔节,为保证压电促动器的有效驱动位移,在其两端分别安装有钢材制成的上套筒及下套筒,安装设计如图 7 所示。

压电促动器与卸载柔节之间通过螺纹配合进行连接,卸载柔节与上套筒之间、压电促动器与下套筒之间通过螺钉连接,上套筒与支撑背板之间、下套筒与安装背板之间通过螺钉连接。

另外,由于压电精密调整促动器难以承受较大弯矩,因此需要核算子镜模块在倾斜状态下所承受弯矩的大小,镜体倾斜状态如图 8 所示。

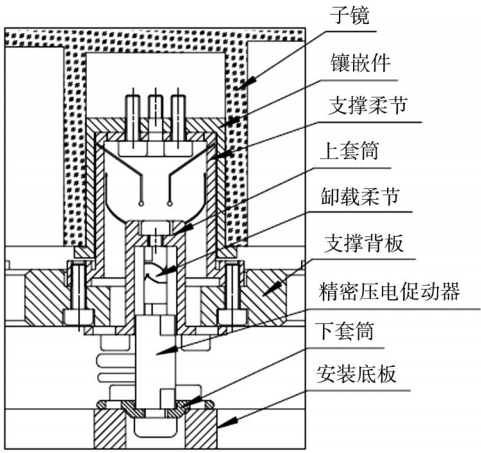


图 7 压电促动器装配结构设计

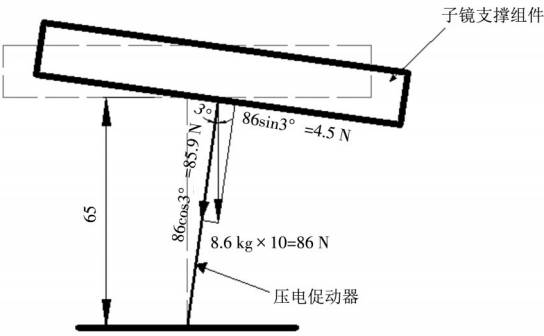


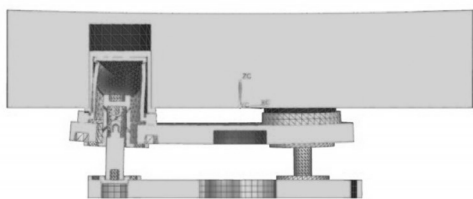
图 8 子镜倾斜状态下压电促动器受力简图

计算得到每个压电精密促动器所承受的弯矩为 0.0285 Nm ,能够满足压电促动器使用条件。

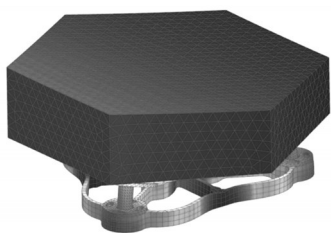
1.7 装配促动器后子镜面形分析

促动器的装配设计是否合理直接影响到子镜镜面的面形精度,设计的过于刚性则会导致将装配应力、热应力传到镜面上,而使面形精度受到破坏,同时,也会造成精密促动器的失效;设计的过于柔软则会使促动精度损失以及基频降低,有限元分析结果如图 9 所示。

分析结果表明, 1 g 、 $-2\text{ }^\circ\text{C}$ 温变下, Z 向刚体位移为 $2.13\text{ }\mu\text{m}$, RMS 为 4.36 nm ; 1 g 、 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 温变下, Z 向刚体位移为 $1.87\text{ }\mu\text{m}$, RMS 为 6.15 nm 。对比两次结果可以看出促动器的装配设计对子镜的面形以及刚体位移影响很小,设计合理。



(a)促动器下1 g重力、-2 °C温变子镜面形分析



(b)促动器下1 g重力、2 °C温变子镜面形分析

图9 促动器装配后的面形分析

2 实验验证

对子镜模块进行面形检测及主动光学位姿拼接验证,由于主镜的曲率半径过大,大气扰动对镜面面形检测具有一定的影响,因此,实验测试设备采取4D干涉仪,将满足设计公差要求的零件按照合理的装配工艺进行装配,确保装配不引进过大的误差,装配后的子镜组件实物如图10所示。



图10 子镜组件实物图

面形检测结果如图11所示。

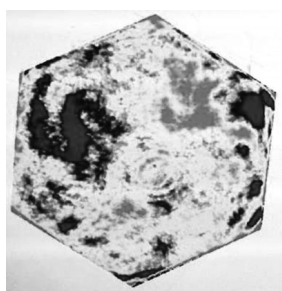


图11 背部支撑下的子镜面形精度检测干涉图

在室温18 °C下检测其面形精度RMS为0.018 9 λ ,在室温20 °C下检测其面形精度RMS为0.019 6 λ ,因此背部结构支撑后子镜的面形为完全满足光学指标0.02 λ 的设计要求,支撑合理。将子镜的位姿调整促动器装配后,进行主动光学位姿调整的拼接实验,搭接后的两组子镜模块如图12所示。



图12 装配后的子镜模块

在4D干涉仪的监视下进行两块子镜的共焦共位相拼接,拼接后的双子镜的共位相检测精度(0.023 5 λ),符合设计指标,能够满足系统成像的要求,如图13所示。

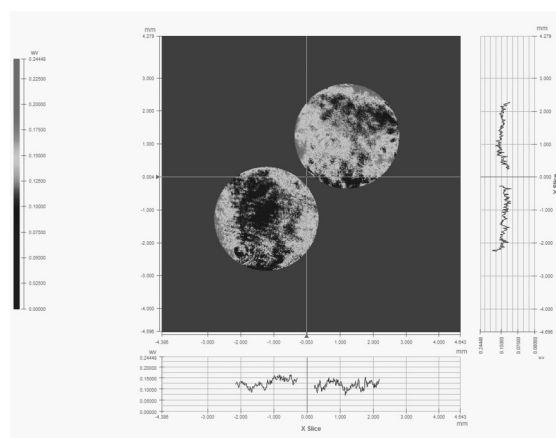


图13 拼接后达到共焦共位相的两片子镜检测干涉图

3 结论

本文基于组装拼接式望远镜实施方法,根据主镜的面形精度要求,研究了主镜阵列中子镜模块结构,对子镜模块中的镜体支撑、促动器的装配进行了设计,并通过有限元模拟分析以及实验验证了结构设计的合理性,结果表明,实验结果与工程分析结果基本一致。子镜反射镜的面形精度RMS优于0.02 λ ,两组子镜的共焦共位相拼接精度为0.023 5 λ ,均满足光学指标设计公差

要求。

参考文献

- [1] Clampin M, Smith Eric P. Overview of the james webb space telescope observatory [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7731(7): 1-9.
- [2] Lillie C F. Large deployable telescopes for future space observatories [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5899(10): 1-12.
- [3] Conrad W. Assembly integration and ambient testing of the james webb space telescope primary mirror [C]. Proc, SPIE, 2004.
- [4] Basu S. Conceptual design of an autonomously assembled space telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2004(5166): 98-112.
- [5] Basu S, Mast T, Miyata G. A proposed autonomously assembled space telescope (AAST) [C]. AIAA Space 2003 Conference & Exposition, 2003.
- [6] Izzo D, Pettazzi L, Ayre M. Mission concept for autonomous on orbit assembly of a large reflector in space [C]. International Astronautical Congress, 2005.
- [7] 范磊. 2 m口径地基望远镜 SiC 主镜轻量化设计及支撑技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [8] 关英俊, 辛宏伟, 李志来, 等. 大口径空间反射镜组件结构设计与分析 [J]. 激光与红外, 2014, 44(7): 777-782.
- [9] 王克军. 天基大口径反射镜轻量化设计及复合支撑技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [10] 李剑锋. 粘结连接在望远镜主镜支撑中应力分散作用研究 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(3): 23-27.
- [11] 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其共面装调 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(5): 7-15.
- [6] Torr P H S, Zisserman A. MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2000, 78(1): 138-156.
- [7] Daniel D, Matas J. Graph-Cut Ransac [C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2017: 6733-6741.
- [8] Forster C, Zhang Z C, Gassner M, et al. SVO: Semidirect visual odometry for monocular and multicamera systems [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(2): 249-265.
- [9] Kolmogorov V, Zabini R. What energy functions can be minimized via graph cuts? [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 21(5): 65-81.
- [10] Burri M, Nikolic J, Gohl P, et al. The EuRoC microaerial vehicle datasets [J]. The International Journal of Robotics Research, 2016, 35(10): 1157-1163.
- [11] Michael O, David I, Nisar A, et al. Cooperative Robot Localization Using Event-triggered Estimation [C]. Journal of Aerospace Information Systems (JAIS), 2018: 1-53.
- [12] 张超, 曹雄, 徐春风, 等. 基于稀疏直接法的 SLAM 算法 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 101-104.
- [13] 完文韬, 杨成禹. 改进的 SIFT 算法在图像特征点匹配中的应用 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(1): 44-47.

(上接第26页)