

# 空间相机大口径主镜支撑结构设计

董吉洪, 刘宏伟

(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:** 空间相机大口径主镜的支撑技术一直是空间相机研制的关键技术。本文介绍了一种相机大口径主镜球铰支撑结构在研制过程中出现的镜面面形随着外界装配条件及温度的变化出现像散的问题, 并通过对球铰支撑结构的分析与研究, 找出球铰支撑结构的弱点, 提出一种新型的柔性支撑结构, 通过工程分析及优化确定了柔性支撑结构, 利用各种环境试验, 证明该支撑结构一阶模态可以达到近 200 Hz, 具有较高的动态刚度; 同时, 该支撑结构对装配应力与热应力具有较大的适应能力, 既能够在较大温度范围内保证镜面面形不变化, 又能够保证主镜面形在重力载荷变化时达到指标 RMS 值为  $0.02\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm) 的要求, 为空间相机大口径主镜支撑技术打下了坚实的基础。

**关键词:** 大口径; 主镜; 球铰; 柔性支撑; 热应力

**中图分类号:** TH703      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI20112810.0028

## Supporting Structure Design of Large-aperture Primary Mirror for Space Camera

DONG Ji-hong, LIU Hong-wei

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

**Abstract:** The supporting structure of the large-aperture primary mirror of the space camera is the key technology for the space camera. This paper presents the problem that the ball-hinge supporting structure of a certain type of primary mirror will lead to the astigmatism when the external condition varies. Based on the research on the ball-hinge supporting structure, a novel flexure supporting structure was developed and optimized with numerical analysis. Some environment experiments were conducted, and the results demonstrated that the supporting structure had large dynamic stiffness, and was better suitable for the assembly stress and thermal stress. This flexure supporting structure

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.60507003)

makes the mirror surface figure stable in a wide temperature range, and the RMS value of  $0.02\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) when the gravitational load varies, which means the design requirement is satisfied.

**Keywords:** large-aperture; primary mirror; ball-hinge; flexure supporting structure; thermal stress

## 1 引言

人类生存的地球正面临着环境、资源、能源及其他全球和地区性的问题,要解决这些问题,要求把地球作为一个系统来认识,理论与实践证明空间遥感是最有效的认识工具。在现代高技术条件下,空间相机在战略侦察、导弹预警和商业探察方面扮演着日益重要的角色。优质轻型的大口径光学反射镜是空间相机的核心和关键元件,而可靠稳定的反射镜支撑结构是保证空间相机成像质量的关键,反射镜的支撑结构应具备如下特性<sup>[1-3]</sup>:(1)支撑结构能够克服反射镜因自重而引起的镜面变形;(2)支撑结构能够保证一定温度范围内镜面面形的变化满足要求;(3)支撑结构能够适应一定的装配应力,保证装配过程不影响镜面面形。由于反射镜组件在使用环境的温度变化以及不可克服重力场等因素作用下,都会引起参与成像的反射镜发生变形,从而造成光学系统的波像差增大,光学系统传递函数降低,最终导致成像质量降低。相机主镜支撑结构必须确保在发射和运载过程中不会破坏,且保证主镜在静力学环境、热环境下仍具有较高的成像质量(对于成像光学系统,要求反射镜面型精度  $PV \leq 62\text{ nm}$ ,  $RMS \leq 12\text{ nm}$ )。合理的支撑方式会较大程度地减小环境因素对光学仪器的影响,而在支撑方式中设置一定程度的柔性环节是行之有效的方法,特别是在空间环境下的空间望远镜、空间遥感器中采用柔性结构就更加普遍。柔性结构有多种形式,如球铰支撑、柔性支撑等等。

本文在介绍一种相机主镜球铰支撑结构在研制过程中出现的镜面面形不稳定现象的同时,对其结

构进行了分析和研究,总结了其支撑结构的弱点,并将球铰支撑改为柔性支撑。经过分析,柔性支撑可以满足面形精度的要求,并且通过试验证实了柔性支撑能够保证相机在较宽的温度范围和力学环境下的镜面面形,很好地解决了大口径反射镜的支撑问题。

## 2 球铰支撑结构的原理及分析

文中设计并制造的 680 mm 轻量化 SiC 主镜<sup>[4]</sup>,采用了一种背部半封闭、三角形孔的轻量化结构。其内部轻量化孔的形式如图 1 所示,图 2 为主镜的实物照片。

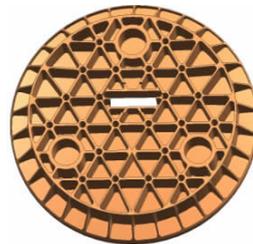


图 1 主镜轻量化孔形式

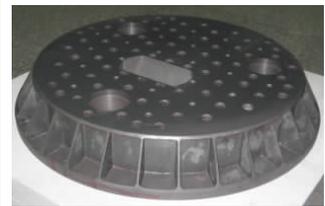


图 2 主镜实物照片

这种轻量化形式的提出有效地解决了单独轻量化方式存在的不足,综合了三角形轻量化孔刚度高、扇形轻量化孔质量小的优点,使单镜在质量较小的状态下达到了较高的刚度,为大口径反射镜的支撑打下了有利的基础。

该大口径主镜最初采用三点球形铰链的支撑方案<sup>[5-6]</sup>。通过三点球形铰链一定程度的自由度释放,用来解决反射镜热适应性和装配工艺问题;而通过一定程度的预紧方式,使球铰连接间保持一定程度的紧密性,用来提高主镜组件的动态刚度,使主镜组件可以承受发射状态下的力学环境。三点支撑最终

通过三角板与相机安装面进行过渡联接。球铰支撑的结构如图3所示,球铰支撑主镜组件的有限元模型如图4所示。球杆所选用的殷钢材料与上下压环、衬套相同,线胀系数调配得与反射镜材料相同。三角板选用钛合金,以便降低质量。衬套与反射镜的镜体胶接在一起,通过压盖上的螺钉将上下压环与球杆的球头压紧,而球杆又通过拧紧螺母与三角板联接,由此实现反射镜的三点定位。

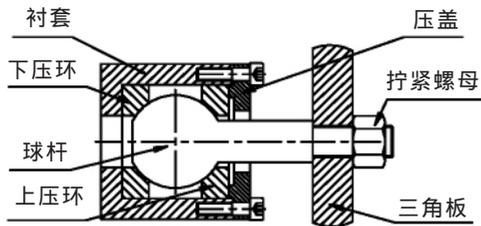


图3 球铰支撑结构简图

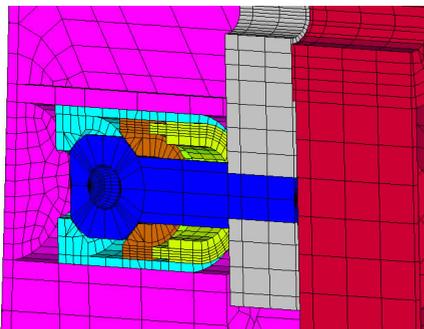


图4 球铰支撑主镜组件的有限元模型图

该支撑结构的主镜组件在主镜加工的过程中曾多次出现主镜组件安装在不同基面上或者温度发生较大变化时出现像散的现象,其像散多以马鞍型像散为主,图5为加工好的面形图,图6为出现像散的面形图。

经过对主镜组件支撑结构与试验现象的分析,得出如下结论:

(1) 主镜组件采用了球形铰链支撑结构,从理论上球形铰链支撑结构能够更好地提供支撑结构的适应性,但球形铰链支撑结构也存在很多非线性问题,对支撑的装配要求很高,同时很难做到完全量化装配,存在一定的装配随机性,因此,主镜组件的最终状态会存在很多不可控的因素。为了保证主

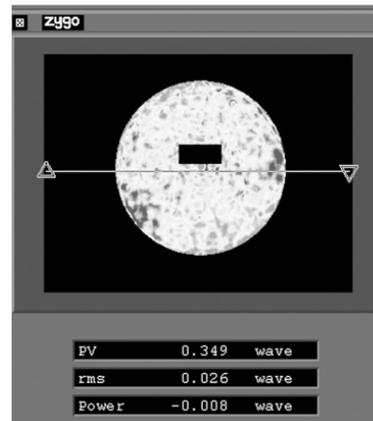


图5 1/40λ 面形图

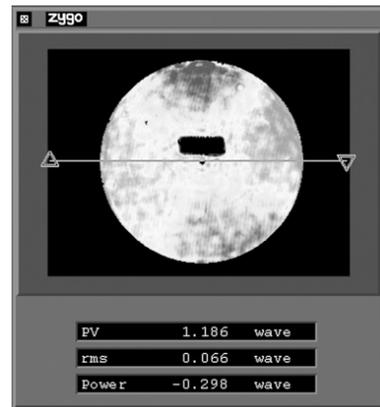


图6 出现像散的面形图

镜组件的动载荷特性支撑结构的球铰部分,需要增加预紧力,而预紧力的存在使其结构在温度变化大时很难自如地释放热应力,因此,当温度变化时主镜组件就会因为支撑内部产生应力迫使镜面面形发生变化。

(2) 主镜支撑结构在轴向方向没有有效的弹性释放环节,使主镜组件安装在不同的基面上时,由于其安装平面的平面度不同而产生一定的装配应力,其应力会通过球铰支撑结构直接传递到主镜,使镜面面形发生变化。

### 3 柔性支撑的设计、分析及试验验证

通过对初始支撑结构所遇到的问题进行分析,作者设计了一种新型的柔性支撑结构,其特点是在固定连接的基础上增加了柔性设计,使主镜支撑结

构能够在保证静力学和动力学特性的同时,适应较大的装配应力和较宽的温度变化范围,以此来减小装配应力和热应力对镜面面形的影响。

### 3.1 柔性支撑的结构设计及优化

柔性支撑的结构如图7所示,锥套与SiC主镜通过环氧树脂胶粘接在一起,将开有柔性槽的柔性杆与锥套通过螺钉进行可靠连接,并对3个柔性杆与三角板连接的平面进行共面加工,保证3个柔性杆安装面的共面性,最后将三角板与柔性杆进行连接,形成主镜组件。柔性杆的实物照片如图8所示。

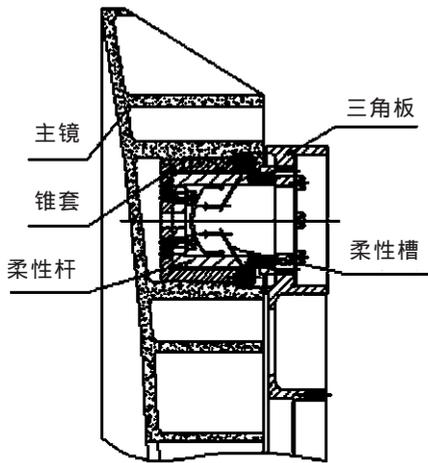


图7 柔性支撑结构



图8 柔性杆实物照片

为了能够获取最佳的支撑结构,作者采用了以有限元技术为核心的工程分析方式对柔性支撑结构进行了优化设计<sup>[7]</sup>,主镜组件的有限元模型如图9所示。有限元模型的划分应以最大程度地遵循实体模型为原则,在计算机硬件和分析周期允许的前提下,

适当增加单元数量,可提高分析精度。在反射镜结构分析中,从有限元原理角度出发,采用六面体型单元(或以四边形为主的壳单元),可以防止单元过硬。六面体单元的分析结果通常比四面体单元的分析结果更加准确,而且用六面体单元离散的单元总数远远小于用四面体单元总数,再加上六面体形态更容易辨别和修改,在不修改实体模型时,更容易修改有限元模型,给结构二次设计或改进带来方便。在细小结构和设计精度较高的部分,应实现单元疏密程度的逐渐过渡,既能保证有限元算法的实现和应力集中区域所需的网格密度,提高计算精度,又能有效地减少单元总数。根据精度分析结果逐步降低或增加、修改有限元模型,使实际分析既符合精度要求,又满足实际分析外部条件<sup>[5]</sup>。其优化的目标主要有两个方面,一个方面是支撑结构能够满足主镜组件的力学特性要求,另一个方面是支撑结构能够保证主镜在重力和15℃温差变化时镜面面形满足设计的RMS值达到 $\lambda/50$ 的要求。

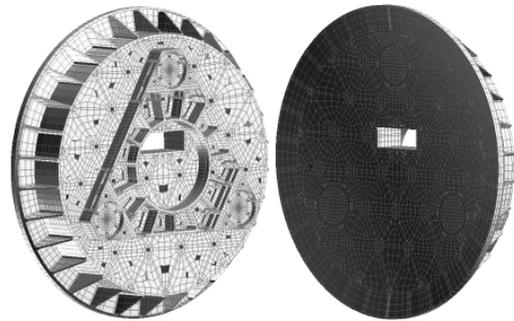


图9 主镜组件有限元模型图

柔性支撑结构的优化具体来说就是对柔性杆进行优化,其结构优化主要从以下几个方面进行:

- (1) 柔性杆的侧面壁厚与连接面壁厚;
- (2) 柔性槽的倾斜角度;
- (3) 柔性槽的斜槽与直槽的比例;
- (4) 两层柔性槽的距离;
- (5) 柔性杆的材料选择。

根据以上优化方法和原则确定了最终的柔性支撑结构。

### 3.2 柔性支撑的分析及试验验证

柔性支撑的分析主要侧重于模态分析<sup>[8]</sup>与镜面形变化分析。

主镜组件必须具有合理的模态分布,才可以保证主镜组件的结构能适应严酷的运载力学环境,其中构件不产生微屈服。同时,模态分析又是考察动态刚度的重要指标,如果组件的一阶固有模态与相机载体一阶固有模态重叠或相近就可能引起共振,必须对结构进行改进设计,提高组件的一阶模态。

主镜组件固有频率分析的有限元模型如图10所示,主镜组件安装在圆盘试验夹具上,试验<sup>[9-10]</sup>照片如图11所示,分析预示工作基频与试验结果见表1,计算与试验最大偏差9.2%。从分析与试验的结果可

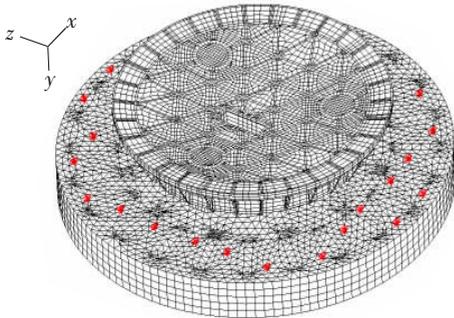


图10 主镜组件模态试验有限元模型

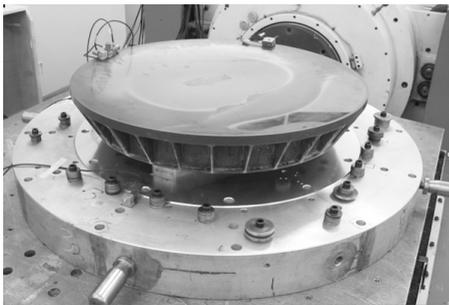


图11 主主镜组件模态试验现场照片

表1 主镜组件固有频率分析结果与试验结果对比

激励方向	预示工作基频 Hz	实测工作基频 Hz	计算与试验偏差%	振型描述
X	178	195	8.7	主镜沿着X向平移振动耦合绕Z轴转动
Z	178	196	9.2	主镜沿着Z向平移振动耦合绕X轴转动
Y	251	255	1.6	主镜沿着Y向平移振动

以看出,柔性支撑结构能够保证主镜组件的动态刚度,满足一阶模态 $>70$  Hz的建造规范要求。

为了能够更加真实地反映主镜面形在整机状态下的变化情况,主镜组件的面形分析是在整机状态下进行的。工程分析主要考察重力环境、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热环境下(整机采用主动和被动热控方案)反射镜的工作情况,用来模拟空间在轨状态下相机的工作情况。表2表示了主镜组件在重力载荷作用下主镜镜面变形和主镜的位置变化,表3给出了主镜组件在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均匀温升作用下主镜镜面变形和位置变化。

表2 主镜组件在重力载荷作用下镜面变形和位置变化

重力方向	PV值 (nm)	RMS值 (nm)	TX ( $\mu\text{m}$ )	RZ ( $''$ )
发射方向	56	12	-8.2	1.7

表3 主镜组件在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均匀温升作用下镜面变形和位置变化

PV值 (nm)	RMS值 (nm)	TX ( $\mu\text{m}$ )
22	2.7	-7.7

通过分析可以看出,柔性支撑结构可以满足重力载荷及温度变化对面形精度的影响,说明柔性支撑结构满足设计要求。同时,对柔性支撑结构的实际性能进行了试验验证,对于重力载荷作用下镜面面形的变化也进行了试验验证,验证方式为对主镜组件分别在 $0^{\circ}$ 和 $180^{\circ}$ 进行面形测试。如果两个方向主镜组件的面形精度都能够满足RMS值为 $0.02\lambda$ 的要求,则说明该支撑结构能够克服重力载荷的影响。

图12表示主镜在 $0^{\circ}$ 位置时的镜面面形情况,图13为主镜在 $180^{\circ}$ 时的镜面面形情况。其面形变化如表4所示。通过两个角度的主镜面形对比可见,主镜支撑结构能够保证主镜面形在重力载荷发生变化时均满足设计RMS值为 $0.02\lambda$ 的要求。

为了验证柔性支撑结构对温度变化的适应能力,在主镜面形RMS优于 $0.05\lambda$ 时进行了主镜组件温度适应能力测试。其方法为通过调整主镜组件所处的环境温度,分别测试主镜组件在不同的温度情况下的面形值,以此说明支撑结构的热适应能力。但由于室内温度调整困难,同时温度的剧烈变化必然引起气流扰动,对测试结果将产生影响,因此,只是测

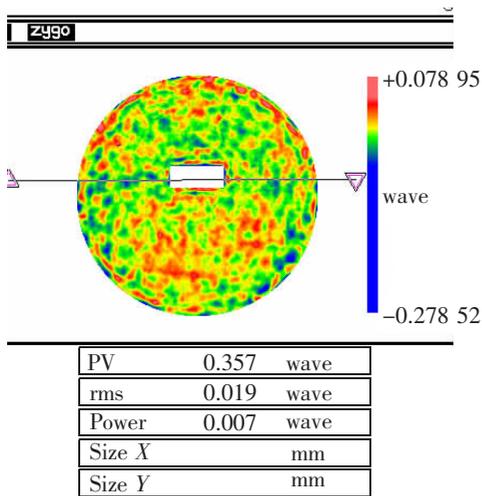


图12 0°主镜面形

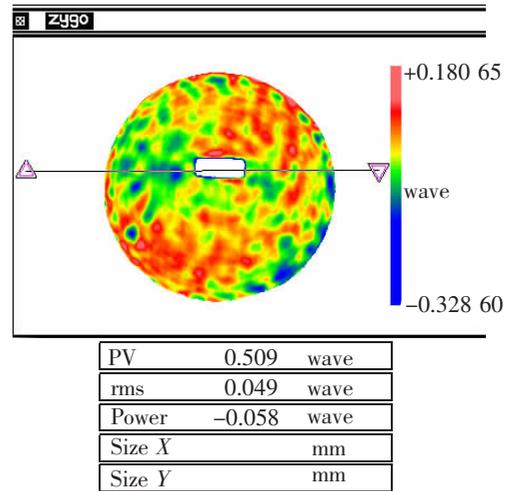


图14 24.5 °C面形图

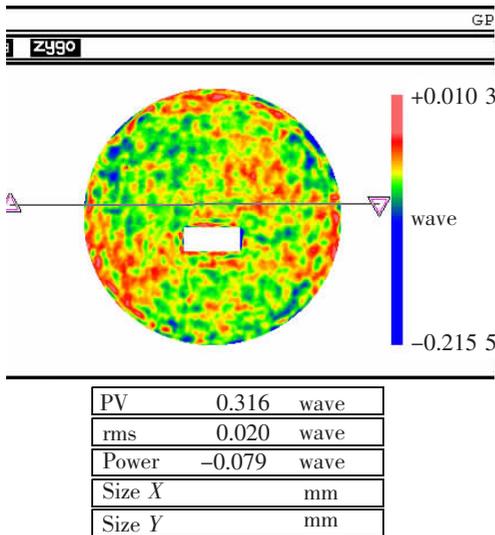


图13 180°主镜面形

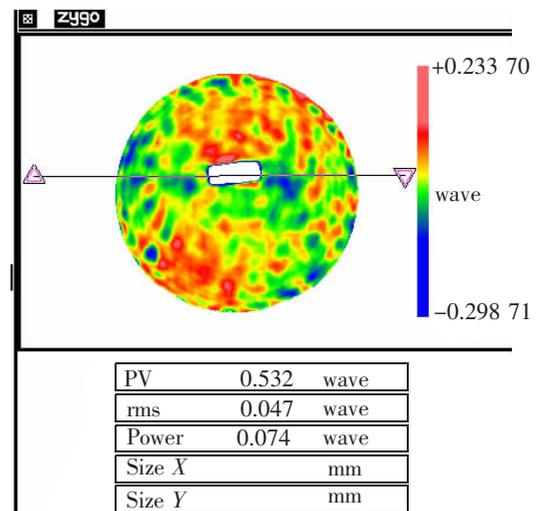


图15 19 °C面形图

表4 主镜组件在重力载荷作用下的面形情况

主镜状态	面形值 (RMS)	满足度
0°	0.019λ	满足
180°	0.020λ	满足

试了19 °C与24.5 °C两个温度点的主镜面形。

对于温度变化引起的测量值离散, 可以采用多次测量取平均值的方式。图 14 表示 24.5 °C时主镜面形情况, 图 15 表示 19 °C时主镜面形情况。通过对两个温度点的面形情况对比可以看出, 主镜组件

在温度变化 5.5 °C时面形没有发生变化, 同时根据分析可以推论该支撑结构能够保证主镜面形在 15 °C温度变化范围内满足设计面形要求。

#### 4 结 论

本文通过对空间相机大口径主镜球铰支撑结构的研究与分析, 提出一种新型的柔性支撑结构, 并且通过工程分析进行了优化设计, 确定了柔性支撑结构, 同时对采用该柔性支撑结构的 SiC 主镜组件进行了各种性能指标测试。通过试验证明新型的柔

性支撑结构不但能够满足主镜组件的力学特性要求, 够满足面形精度要求。  
同时保证了主镜在重力载荷及温度变化情况下都能

## 参考文献

- [1] 姜景山. 空间科学与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 赵立新. 空间太阳望远镜的热设计和热光学分析[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(1): 11-18.
- [3] 吴清彬, 陈时锦, 董申. 光学相机轻质反射镜的结构-热优化设计[J]. 光学技术, 2003, 29(5): 562-567.
- [4] 高明辉, 刘磊, 任建岳. 空间相机反射镜碳化硅材料性能测试[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1170-1174.
- [5] 张志杰, 袁怡宝. 单边导角形柔性铰链的计算与性能分析[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(3): 384-389.
- [6] 薛实福, 李庆祥. 精密仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [7] 关英俊, 辛宏伟, 赵贵军, 等. 空间相机主支撑结构拓扑优化设计[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1157-1163.
- [8] 陈长征, 赵玲玲, 刘磊, 等. 空间遥感器支撑桁架的模态计算与试验[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1164-1169.
- [9] 王建设. 空间光学组件的动力学环境试验[J]. 光学 精密工程, 2004, 9(2): 174-176.
- [10] 李宏壮, 林旭东, 刘欣悦, 等. 400 mm 薄镜面主动光学实验系统[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(9): 2076-2084.

作者简介: 董吉洪 (1972-), 男, 汉族, 吉林长春人, 学士, 研究员, 硕士生导师, 1995年于中国科学技术大学获得学士学位。主要从事光学精密机械、光学遥感技术等领域的研制开发工作。E-mail: dongjihong2002@sohu.com