

文章编号: 1002-1582(2011)04-0442-04

某空间遥感器主镜支撑方案设计与分析*

付亮亮¹, 何欣¹, 王丽娟²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学二部, 吉林 长春 130033)

(2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光栅技术研究室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 从满足某空间光学遥感器主镜在复杂的工况下综合面形误差要求的角度出发, 介绍了长圆形主镜及其支撑结构材料的选择。讨论了主镜的优化设计及其支撑结构的设计方法, 并运用 CAD/CAE 工程分析软件对其进行了分析及优化, 应用有限元法优化出了一种合理的主镜柔性支撑结构。

关 键 词: 主镜; SIC; Bipod; 挠性支撑

中图分类号: TB133 **文献标识码:** A

Design and analysis of minitype reflected mirror supporting structure project

FU Liangliang¹, HE Xin¹, WANG Lijuan²

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

Abstract: In order to meet the requirements of the integrated precision of the primary mirror segment used for space minitype camera, selection of the materials of primary mirror and supporting structure is introduced. The design method of the supporting structure of the mirror is proposed. The analyzing and optimizing are put up through CAD/CAE engineering analysis software. A sort of reasonable flexible supporting structure reflected mirror is optimized by means of finite element method (FEM).

Key words: primary mirror; SIC; Bipod; flexible link

0 引 言

空间遥感相机的主镜作为空间遥感相机光学系统的关键部分, 对整个光学系统的成像质量起着重要的作用。因此, 相机主镜及其支撑结构设计的好坏直接关系到整个相机成像质量的好坏。主镜组件应具有较强的刚度及良好的动态特性, 体积应该做到尽量小、重量应该做到尽量轻, 且对温度的敏感性低, 在重力、微重力及空间热环境影响下的面形精度

应满足光学系统设计对镜面面形的要求, 并保证主镜组件在严酷的空间力学环境下仍具有良好的尺寸稳定性和可靠性。这些都需要主镜组件具有很高的刚度, 但刚度高与质量轻是矛盾的, 而作为航天仪器的组成部分必须减轻质量。怎样使主镜组件具有足够的刚度, 从而保证相应的尺寸公差和面形误差在允许的范围内, 同时又有最小的质量, 这就需要对其结构进行充分的优化设计与分析。采取的方法是利用工程分析软件进行力学、热学及力热耦合分析, 为

* 收稿日期: 2011-03-10 E-mail: liangliang87711133 @163.com

作者简介: 付亮亮(1980-), 女, 助理研究员, 主要从事空间光学遥感技术的研究。

通信联系人: 何欣。E-mail: hexinxp@yahoo.com.cn

结构参数的预估、选择及优化等提供依据,最终设计出力学和热学兼顾的主镜组件。

本文研究的主镜是用于某空间光学遥感器的有效通光孔径为 366mm×176mm 的长圆形小口径主镜,曲率半径 $R=1654\text{mm}$,光学设计要求的面形精度优于 $(1/10)\lambda\text{PV}$ 、 $(1/50)\lambda\text{RMS}(\lambda=0.6328\mu\text{m})$,组件重量小于 4.1 kg,在轨工作温度水平变化范围为 $\pm 5^\circ\text{C}$,并且需要满足地面力学环境试验的要求。

主镜的支撑是在对主镜进行有效定位的同时卸载它的自重,并且减小热应力对主镜的影响,以达到减小镜面变形的目的。

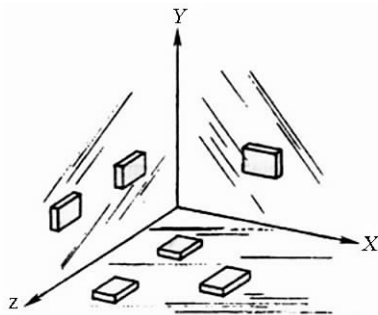
1 结构材料的选取

主镜材料的选择主要考虑材料的物理性能、材料的可加工性能、材料的力学性能以及材料的稳定性、安全性等因素。要选用比刚度大、热畸变小、常用的主镜材料性能指标见表 1。

表 1 常用的光学材料属性

参数	SiC	Al	Zerodur	ULE	熔石英
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	3050	2710	2530	2200	2230
弹性模量 E/GPa	407	69	90.6	67	64
导热率 $\lambda/(\text{W}/\text{mK})$	180	167	1.64	1.3	1.13
线胀系数 $\alpha/(10^{-6}/\text{K})$	2.5	23.9	0.05	0.03	3.25
比刚度 $(E/\rho)/106\text{m}$	13.3	2.6	3.7	3.1	2.9
热畸变 $(\alpha/\lambda)/(10^{-8}\text{m}/\text{W})$	1.2	14.3	3.0	2.3	288

对比表中各种常用的反射镜材料, SiC 材料具



有明显的综合优势。由于其密度低、比刚度高、热畸变小,导热性能良好,且 SiC 反射镜镜面改性工艺也已经成熟,所以不仅可得到较好的抛光表面,而且材料本身对人体及周边环境无毒无害,加工和检测不需要特殊设备,现已在航天遥感器,尤其在成功型号项目中得到了广泛的应用。与其他材料相比, SiC 是一种非常理想的反射镜基体材料。

在结构材料的选择上,为了避免由于材料线膨胀系数的不匹配造成对镜面面形精度的影响,所以与 SiC 镜体粘接的结构材料选用膨胀系数经过特殊匹配的钢材材料,其他支撑结构材料则选用线膨胀系数相对较小、比刚度相对较高的钛合金材料。然而仅从材料的线胀系数匹配上来消除由于温度变化而造成的面形精度的下降是远远不够的,还要通过选用合适的反射镜支撑结构来进一步降低由外部因素变化对主镜面形精度的影响。

2 主镜及支撑方案的确定

2.1 主镜组件方案

通常小型反射镜的安装形式包括半运动学的安装、胶接安装、挠性安装 3 种形式,每种形式都具有各自的特点。其中半运动学的安装形式具备理想的 6 自由度约束形式,可以避免由于外部施加力而产生的主镜变形(图 1)。为了防止主镜脱离定位面,需要外部载荷对主镜施加一预载作用力 P_{\min} :

$$P_{\min} = Wf_s \sum a_G$$

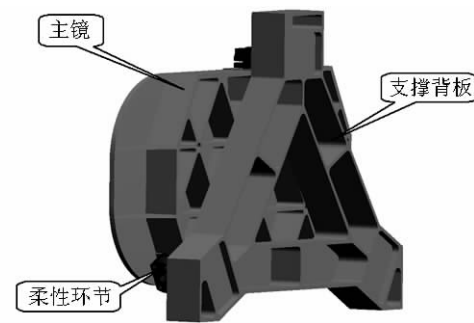


图 1 主镜组件示意图

2.2 主镜的优化设计

空间光学遥感器所经受的静力学环境主要指重力环境和微重力环境,主镜镜体会由于自身受力的改变发生弹性变形。主镜的径厚比决定了主镜的动静态刚度,它的选择与主镜的材料特性、轻量化形式及支撑结构形式等因素有直接关系。Roberts 等人研究了其径厚比 (D/t) 与自重变形的关系,并给出了如下经验公式:

$$\delta = \frac{3\rho g a^4}{16Et^2} = \frac{3\rho g dr^2 D^2}{256E}$$

式中: δ 为最大自重变形(单位为 m); ρ 为材料密度(单位为 kg/m^3); g 为重力加速度; $a = D/2$ 为圆盘半径(单位为 m); E 为材料弹性模量(单位为 Pa); t 为圆盘厚度(单位为 m); dr 为径厚比。

从上式可以看出,主镜的自重变形与材料的比刚度 (E/ρ) 成反比,与径厚比及口径的平方成正比。本文所讨论的主镜镜面尺寸为 $376\text{mm} \times 188\text{mm}$,

并不完全符合以上经验公式的要求。以主镜的对角线(420mm)为直径,以面形精度 $PV \leq (1/10)\lambda (\lambda = 632.8 \text{ nm})$ 为目标进行计算,可得主镜厚度为 32mm。

经计算,未做减重的镜坯质量已接近 4kg,组件质量必将超标,因此主镜必须采用轻量化结构。轻量化的结构形式需要综合考虑镜坯的尺寸特性、轻质结构提供的刚度情况、支撑结构的分布、轻量化加工的工艺性、镜面抛光的工艺性等多方面因素,并通过工程分析对镜坯厚度、镜面厚度、筋的宽度等一系列参数进行优化,得到一个具备最佳比刚度的轻量化镜坯。本主镜镜体的轻量化采用了三角形轻量化结构,如图 2 所示,轻量化率为 67%。

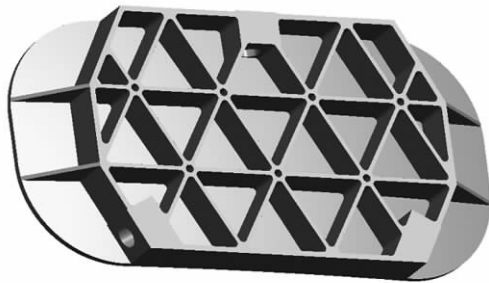


图 2 主镜轻量化结构示意图

2.3 基本柔性铰链的选用与参数设计

反射镜支撑结构一方面要保证主镜组件在不同重力方向下位置及面形精度的稳定性;另一方面,当外界环境变化时,它能有效地减小与其连接的部件因外界环境变化所产生的变形对镜面面形精度的影响。经多次计算分析及结构优化,支撑结构的形式为:上部是连接法兰结构,与主镜侧面的连接孔粘接;下部与钛合金接口背板连接;中部是 Bipod 形式的挠性环节,中间挠性 Bipod 结构曾应用在许多高精度的主镜支撑中,它是由 6 个支腿组成的三个双脚架部件,可固定于反射镜的边缘或背部。每个双脚架可等效于一个双臂铰链或十字形挠性铰链,具有旋转适应性(图 3)。



图 3 柔性环结构示意图

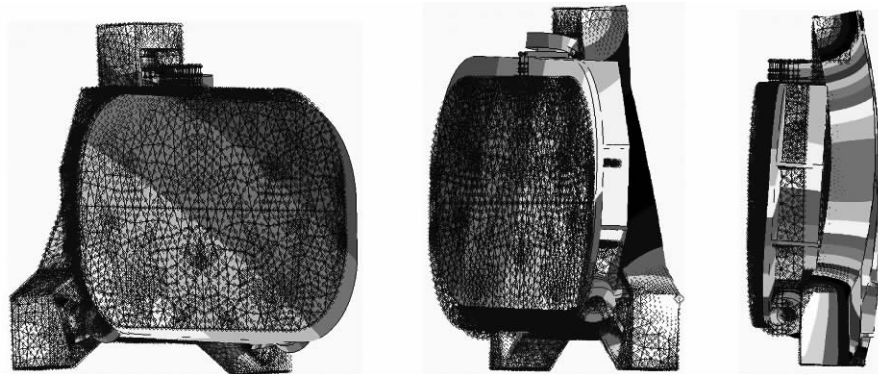


图 4 主镜组件的模式云图

经过优化,在挠性环节宽度为 7mm、最薄处厚度为 3mm、主镜组件在静力学状态下以及静力学加 5℃温升条件下的镜面面形的 PV 值和 RMS 值最小,且满足设计指标要求。在静力学条件下,计算分析情况如表 2 所示。

表 2 主镜在重力及重力加 5℃温升条件下的镜面面形精度

载荷	镜面 PV /nm	镜面 RMS /nm	镜面刚体位移/ μm			镜面倾斜角/($^{\circ}$)		
			ΔX	ΔY	ΔZ	θ_x	θ_y	θ_z
G_x	26.7	5.6	0.001	0	0	0.03	0.01	0.74
G_y	16.9	2.93	0	0.001	0	0.08	0	1.23

续表 2

载荷	镜面 PV /nm	镜面 RMS /nm	镜面刚体位移/ μm			镜面倾斜角/($^{\circ}$)		
			ΔX	ΔY	ΔZ	θ_x	θ_y	θ_z
G_z	37.23	6.38	0	0	0.001	0.16	0.02	0.31
$G_x + 5^{\circ}\text{C}$	39.42	9.86	0.002	0	0.004	1.77	2.92	0.88
$G_y + 5^{\circ}\text{C}$	49.5	10.4	0.002	0.001	0.004	1.82	2.9	0.92
$G_z + 5^{\circ}\text{C}$	58.9	11.6	0.002	0	0.004	1.9	2.9	0.92

随着主镜柔性支撑的弱化,主镜的位置度误差将随之加大,组件的动态刚度也随之降低。为了预示主镜组件的动态特性,对其进行了动力学约束模

态分析,分析结果如表3和图4所示。

表3 主镜组件约束模态

阶数	自然频率	振形描述
1	583	主镜沿水平 X、Y 轴对角线方向摆动
2	609	主镜沿 Y 方向摆动
3	769	主镜沿光轴方向摆动

3 结 论

在主镜设计初期,应充分考虑影响主镜面形精度的各个因素,确定合理的支撑方案。在满足对主镜的支撑刚度的前提下,通过合理的结构设计解决由于温度变化及装配应力而引起的主镜镜面面形下降的问题,运用计算机辅助分析技术进行结构参数的预估和选择,为优化等提供依据。得到了一种符合应用于某空间遥感器的主镜支撑方式的有效方案。

参考文献:

[1] 谭进国,何欣,付亮亮. 小型主镜中心支撑技术[J]. 红外与激光

工程,2010,39(6):1007—2276.

TAN Jin-guo, HE Xin, FU Liang-liang. Support technique of minitype reflector[J]. Infrared and laser engineering, 2010, 39(6):1007—2276.

[2] 宋立强,杨世模,陈志远. 空间太阳望远镜中的轻量化铍镜研究[J]. 光学精密工程,2009,17(1):1004—924X.

SONG Li-qiang, YANG Shi-mo, CHEN Zhi-yuan. Study on lightweight beryllium mirror of space solar telescope [J]. Optics and precision Engineering, 2009, 17(1):1004—924X.

[3] 陈红,王彤彤,高劲松,等. 应用 SIC 主镜表面改性技术提高 TMC 光学系统信噪比[J]. 光学精密工程,2009,17(12):1004—924X.

CHEN Hong, WANG Tong-tong, GAO Jin-song, et al. Improvement of signal noise ratio of YMC optical system by SIC surface modification technology [J]. Optics and precision Engineering, 2009,17(12):1004—924X.

[4] 王忠素,翟岩,梅贵. 遥感器主镜柔性支撑的设计[J]. 光学精密工程,2010,18(8):1833—1841.

WANG Zhong-su, ZHAI Yan, MEI Gui. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor[J]. Optics and precision Enginee, 2010,18(8):1833—1841.