

文章编号:1007-1180(2010)12-0104-05

# 空间反射镜柔性支撑设计与分析

杨 亮

(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:** 反射镜支撑结构在空间力学和热环境下良好的稳定性是保证反射镜成像质量的关键。本文针对空间光学遥感器反射镜设计了一种反射镜支撑结构。由于刚性支撑结构不能满足热环境下的面形要求, 进而设计了一种柔性支撑方案。通过有限元模型分析, 表明该支撑结构力学以及热环境下均可以保证反射满足面形要求, 验证了该方案的合理性。

**关键词:** 反射镜; 柔性支撑; 有限元

**中图分类号:** TH703 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20102712.0104

## Design and Analysis of Flexible Support Structure of Reflector in Space Remote Sensor

YANG Liang

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

**Abstract:** Fine stability is the key factor of imaging quality to the optical reflector of space remote sensor under the environment of force and thermal constraints. Based on a space remote sensor, a support structure of a space optical reflector is designed. Results indicate that solid support structure can't meet the demands of imaging quality, so a flexible support structure is designed. The finite element analysis show that the surface accuracy of reflector meets the needs of imaging quality due to regulation of flexible structure under the environment of force and thermal constraints. Analysis and test results demonstrate that the flexible support structure is reasonable.

**Keywords:** reflector; flexible supporting; finite element

## 1 引言

反射镜是空间光学系统的关键部件之一,其面形精度将决定着整个系统的地面分辨率等光学性能。由于空间光学遥感在运载、发射阶段的振动过载冲击等动力学环境下,将产生应力释放,影响反射镜面形精度,尤其是在入轨后所处的复杂热环境下,温度的变化将使反射镜镜面面形严重超差,影响整个系统的成像质量<sup>[1-2]</sup>。因此,在考虑反射镜料选取、结构形式等方面的同时,必须选择合理的支撑方式,以保证主反射镜在空间力学和热环境下保持良好的稳定性。

本文针对外形尺寸为 $\varphi 240$  mm的小型空间遥感器反射镜柔性支撑方案进行了优化设计。系统要求反射镜在重力作用以及环境温度 $\pm 6$  °C变化时,镜面面形精度PV值优于 $\lambda/10$ , RMS值优于 $\lambda/50$  ( $\lambda=700$  nm),反射镜组件的一阶谐振频率要求达到200 Hz。本文通过反射镜支撑材料选择、支撑方案的确定、组件的有限元分析,设计了一种满足要求的反射镜柔性支撑方案。

## 2 结构设计

### 2.1 反射镜的支撑结构

反射镜支撑方式按与反射镜接触点的位置分为周边支撑、中心支撑和背部支撑等。小尺寸反射镜多采用周边支撑,通过压圈将镜片固定在镜框上。中心支撑方式适合于单拱形反射镜,多采用中心环定位支撑,有时辅以背部小平面支撑。背部支撑通常为背部多点支撑,有三点、六点、九点支撑等,大型反射镜一般采用多点、多层背部支撑方式<sup>[3]</sup>。

由于反射镜的包络尺寸为 $\varphi 240$  mm,尺寸不大,所以主反射镜采用周边支撑方式,为了减轻质量,反射镜支撑结构采用一定形式的轻量化结构。

### 2.2 反射镜组件整体结构

反射镜组件由反射镜、连接环、支撑框架3部分组成。反射镜背部与连接环内环3处胶接,连接

环再通过3个螺钉与反射镜支撑框架连接,最终通过6个螺钉将反射镜支撑框架与相机框架连接。反射镜整体结构如图1所示。

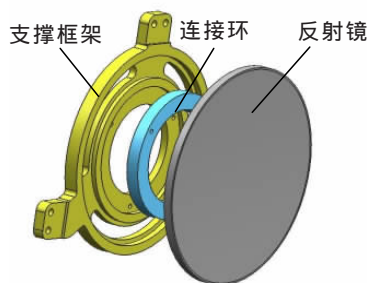


图1 反射镜整体结构

合理的材料选取可以尽量减少材料热特性不匹配带来的影响。选取比刚度和导热系数较大的碳化硅作为反射镜基体材料,选取线胀系数与反射镜非常接近的铁镍合金(4J32)作为过渡连接结构的材料,选择比刚度较大、线膨胀系数较小的钛合金作为间接支撑结构的材料。

反射镜组件材料的性能如表1所示。

表1 反射镜组件材料性能

材料名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量 (GPa)	泊松比	热膨胀系数 (10 <sup>-6</sup> /K)
碳化硅(SiC)	3.05	400	0.25	2.50
铁镍合金(4J32)	8.10	141	0.25	2.50
钛合金(TC4)	4.44	106	0.34	7.89

反射镜组件的有限元模型如图2所示。

通过有限元分析,在力学环境下,反射镜面形精度可以达到成像质量要求;而在热环境下,反射镜面形严重超差,不能达到光学成像要求。这是由于反射镜材料与支撑的金属材料线膨胀系数不一致,

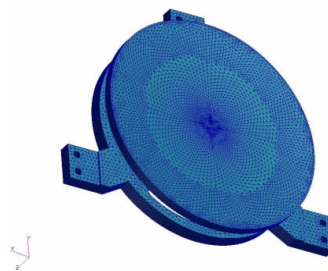


图2 主镜组件有限元模型

当温度变化时,支撑结构的热变形直接传递到反射镜上,造成了温度应力对镜面面形精度的影响。综上所述,仅从材料匹配上考虑,并不能满足面形要求,必须加入合理的柔性环节来更好地消除温度变化的影响,从而保证热环境下反射镜的面形精度。

### 2.3 柔性连接的设计

柔性支撑是反射镜组件中的一个重要环节,它不但可以隔震、消除部分装配应力,同时可以吸收温度变化下材料热特性不匹配产生的能量<sup>[4-6]</sup>。柔性环节增加柔性的同时,必须同时保证柔性环节本身的强度和刚度,避免在力学环境下柔性环节自身的破坏,以及相机整体刚度降低而不能满足整机要求。

考虑到力学环境和温变环境对结构的影响,使结构具有一定的缓冲作用,反射镜的柔性支撑采用在原有环形连接上增加狭缝的结构形式。反射镜的柔性连接结构示意图如图3所示。

在原有连接环的圆环上加工6条穿过环体的交错细长曲线狭缝,从而将连接环分成内环和外环两部分,为了增加挠性,采用双层挠性结构,即在狭缝连接处再增加一层狭缝。内环采用3处圆锥面胶

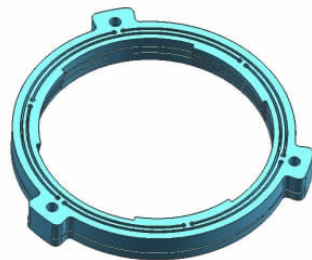


图3 反射镜柔性连接结

接在等锥度的主镜背部外圆上,通过螺钉将外环固定在支撑板上。当温度变化时,反射镜支撑框架变形带动外环产生变形,产生的微小变形通过柔节吸收,不会传到内环上,所以反射镜不会承受外环变形产生的应力。反射镜变形产生的应力也将通过柔节吸收。柔节消除温度变化产生应力的同时,也可以消除由加工误差在装配时产生的装配应力。

## 3 工程分析

### 3.1 重力分析

图4为分别施加X、Y和Z轴方向重力载荷时,反射镜组件的变形图。

重力载荷下反射镜面形变化的具体数据如表2

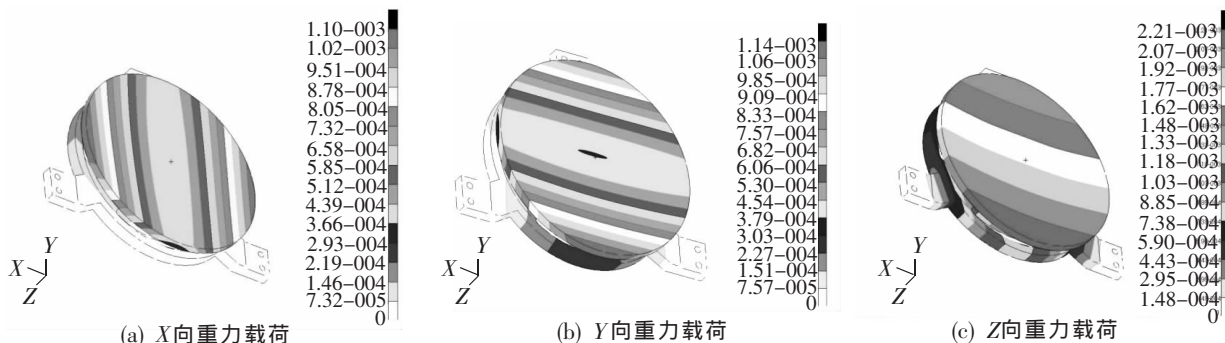


图4 重力载荷下主镜组件变形图

表2 重力载荷下反射镜组件面形变化

载荷指标项目	$G_x$	$G_y$	$G_z$
X偏心 (mm)	$1.1 \times 10^{-8}$	$-7.8 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-4}$
Y偏心 (mm)	$3.9 \times 10^{-4}$	$-1.3 \times 10^{-4}$	$7.1 \times 10^{-8}$
X倾斜 (")	-1.7	0.74	$3.9 \times 10^{-4}$
Y倾斜 (")	$-3.1 \times 10^{-4}$	$4.5 \times 10^{-3}$	-1.8
PV (nm)	14.83	7.35	21.77
RMS (nm)	3.24	1.75	4.63

注:  $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$ 分别代表X、Y和Z轴方向1 g重力载荷

所示。

从图表中可以看出,在1 g重力载荷作用下,反射镜组件各项指标均满足光学设计要求。

### 3.2 热弹性分析

图5是在1 g重力载荷和6℃均匀温升共同作用下主镜组件的变形图,图6是在1 g重力载荷和6℃均匀温降共同作用下主镜组件的变形图。

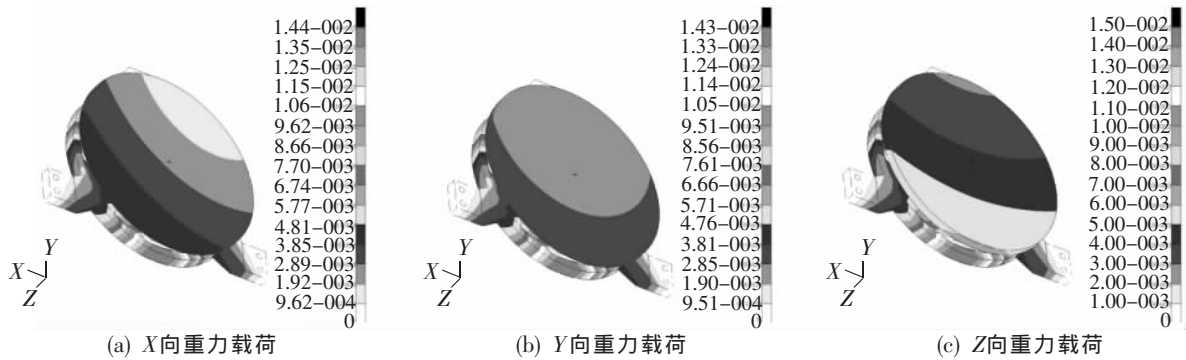


图 5 重力载荷和温升作用下主镜组件变形图

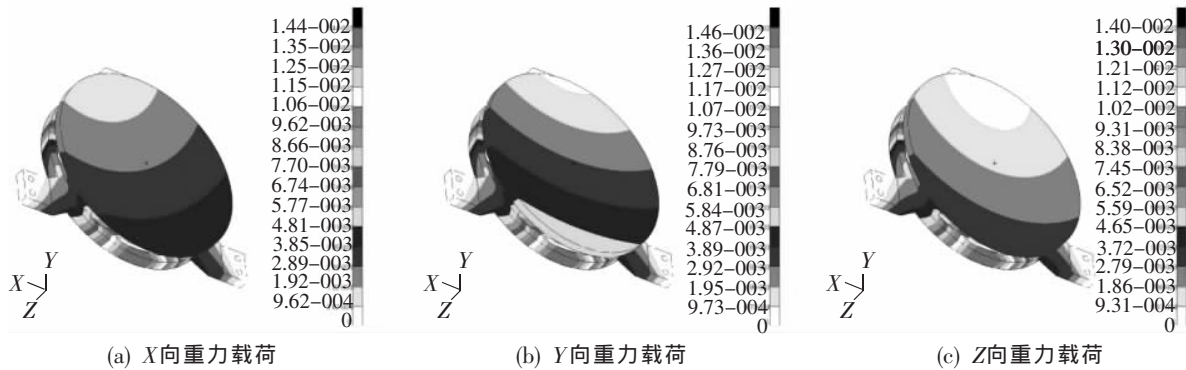


图 6 重力载荷和温降作用下主镜组件变形图

在 6℃均匀温升、温降和 1g 重力载荷共同作用  
表 3 重力载荷和6℃温升下主镜面形变化

载荷指标项目	$G_x$ +温升	$G_y$ +温升	$G_z$ +温升
X偏心 (mm)	$-9.7 \times 10^{-6}$	$-1.1 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-4}$
Y偏心 (mm)	$-1.4 \times 10^{-3}$	$-2.0 \times 10^{-3}$	$-1.8 \times 10^{-3}$
X倾斜 (")	-0.86	1.6	0.89
Y倾斜 (")	0.047	0.051	-1.7
PV (nm)	25.55	42.45	46.69
RMS (nm)	4.49	7.95	8.69

注:  $G_x$ 、 $G_y$ 和 $G_z$ 分别代表X、Y和Z轴方向1 g重力载荷  
表 4 重力载荷和6℃温降下SiC主镜面形变化

载荷指标项目	$G_x$ +温升	$G_y$ +温升	$G_z$ +温升
X偏心 (mm)	$9.8 \times 10^{-6}$	$9.0 \times 10^{-6}$	$3.9 \times 10^{-4}$
Y偏心 (mm)	$2.2 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-3}$
X倾斜 (")	-2.6	-0.14	-0.89
Y倾斜 (")	-0.047	-0.042	-1.8
PV (nm)	50.22	34.73	46.39
RMS (nm)	9.34	7.01	8.58

注:  $G_x$ 、 $G_y$ 和 $G_z$ 分别代表X、Y和Z轴方向1 g重力载荷。

下,反射镜面形变化的具体数据见表 3、表 4。

从以上图表中可以看出,在 1 g 重力载荷和 6 ℃ 温升、温降共同作用下,主镜组件各项指标均满足光学设计要求。

3.3 动态刚度分析

反射镜组件约束模态分析得到的前三阶模态结果见表 5。从表 5 中可看出,主镜组件第一阶模态是整机频率(约 70 Hz)的 50 倍以上,大于要求的 200 Hz,表明其动态刚度足够高,满足结构动态刚度要求。

表 5 主镜组件模态分析

模态	频率 (Hz)	振型描述
1	382.96	主镜绕X轴转动
2	396.84	主镜绕Y轴转动
3	428.62	沿Z轴振动和绕Z轴转动

3.4 结构强度分析

通过主镜组件在过载状态下的结构强度分析,在材料安全系数取 5 的情况下,反射镜组件各材料在

过载状态下的最大应力值远小于材料许用应力,材料是安全的,即结构强度满足要求。

#### 4 实验验证

为了确定反射镜组件的结构参数、力学特性以及在振动实验条件下的抗干扰能力,采用1:1的铝镜代替玻璃镜,进行力学实验。在3个方向上进行0.2 g的力学特性扫频,测定0~2 000 Hz内的响应频率,然后进行正弦振动和随机振动,振动后再进行0.2 g扫频,并对振动前后的力学特性进行对比。振动试验结果表明,反射镜的一阶振动频率为385.5 Hz,与分析结果基本相符。振动前后主镜组件的动态响应与实验前数据对比无明显变化,结构未破坏。

#### 5 结 论

本文通过反射镜支撑材料的选取、反射镜支撑方案的确定,进行了空间遥感器反射镜组件的设计,通过合理柔性结构的设计,解决了原有支撑结构在温度变化下镜面面形超差的问题。通过有限元模型重力分析、热弹性分析以及动态刚度分析得知,反射镜组件的一阶谐振频率达到382.96 Hz,在1 g重力和6℃温升共同作用下,镜面综合面形误差RMS值分别达到4.49 nm、7.95 nm、8.69 nm,结果表明,该支撑结构力学以及热环境下的反射镜均满足面形和强度要求。最终通过实验验证实际与分析结果相符,说明此柔性支撑结构是合理可行的。

#### 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] 王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(8): 1833-1841.
- [3] 吴清文, 杨洪波, 杨近松, 等. 空间相机中反射镜及其支撑方案设计与分析方法 [J]. 光学技术, 2004, 30(2): 152-156.
- [4] Lobontiu, Painejsn, Omalleye, *et al.* Parabolic and hyperbolic flexure hinges: flexibility, motion precision and stress characterization based on compliance closed2form equations[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(2): 183-192.
- [5] 吴清文, 牛晓明. 空间光学仪器温度指标的确定[J]. 光学 精密工程, 1998, 8(z1): 211- 215.
- [6] 付亮亮, 何欣, 廉凤慧. 小型反射镜支撑方案的设计与分析[J]. 光学技术, 2008, 34(4): 532- 534.

作者简介: 杨亮(1982-), 男, 汉族, 吉林吉林人, 硕士, 实习研究员, 2009年于西安交通大学获得硕士学位, 主要从事空间遥感器的结构设计。E-mail: hgdhit@163.com