文章编号: 1672-8785(2015)12-0032-05

空间遥感器主反射镜在宽温度范围内 的环境适应性设计

王忠善1,2 何 成1 付亮亮1

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;

2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 主反射镜的面形精度对空间相机的成像质量至关重要。为保证空间相机在宽 温度范围 (20±10 ℃) 内的成像质量,设计了一种柔性支撑结构。首先,选择碳化硅 (SiC) 作为反射镜材料,并对主反射镜镜体进行了背部半封闭式轻量化处理。其次,针对这 个孔径为 550 mm 的圆形主镜组件在 20±10 ℃温度范围内的使用环境,设计了一种柔性 铰链结构。利用 Matlab 软件优化了支撑结构参数,使得支撑柔性结构在受到温度载荷 时沿着径向具有足够的柔性,并可吸收变形和降低反射镜应力。通过有限元分析可以 看出,该支撑结构的一阶频率达到 267 Hz,远高于机身组件的固有频率,因此可保证 主镜组件不遭到破坏。而且在重力耦合 10 ℃温度载荷时,反射镜的面形误差 (RMS 值) 也满足光学系统优于 $\lambda/40$ 的要求。

关键词: 主反射镜; 柔性支撑; 模态分析; 温度适应性

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.12.006

Design of Environmental Adaptation of Primary Mirror of Space Camera in Large Temperature Range

WANG Zhong-shan ^{1,2}, HE Xin ¹, FU Liang-liang ¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The figure shape precision of primary mirrors are most important for the imaging quality of space cameras. To ensure a space camera to have high imaging quality in a wide temperature range $(20\pm10 \ C)$, a flexible support structure is designed. Firstly, the SiC material is selected to make the mirror and semi-enclosed type light-weight processing is carried out for the back of the primary mirror body. Secondly, for the environment in the temperature range of $20\pm10 \ C$ in which the round primary mirror module with an aperture of 550 mm will be used, a flexible articulated structure is designed. Because the parameters of the supporting structure are optimized by the Matlab software, the flexible supporting structure has enough radial flexibility and can absorb distortion so as to reduce the stress of the mirror. The finite element analysis result shows that the supporting structure has the first-order frequency of 267 Hz which is much higher than the inherent frequency of the mirror body module. So, it can ensure the primary module not to be damaged. Even when the gravitation is coupled with the temp-

收稿日期: 2015–09–01

作者简介:王忠善(1983-),男,黑龙江延寿人,助理研究员,主要研究方向为空间光学遥感器的结构设计。 E-mail: hitwzs@126.com

erature load of 10 °C , the mirror can meet the requirement of the figure shape error (RMS) less than $\lambda/40$ of the optical system.

Key words: primary mirror; flexible support; mode analysis; temperature adaptability

0 引言

对于现代空间光学遥感器而言,人们对其 地面覆盖宽度和地面分辨率的要求越来越高, 导致长焦距、大视场和大通光口径已经成为其 发展的必然趋势。作为反射式光学系统的关键 部件,反射镜的面形精度要求非常高,其面形误 差通常需要处在可见光波长量级及以上范围(不 超过100 nm)^[1]。由于会直接影响反射镜保持面 形精度的能力,反射镜支撑系统已经成为反射 镜工程研制中的关键技术之一。

随着空间遥感器光学系统口径的不断增 大,重力和温度载荷对反射镜面形的影响变得 尤为突出^[2]。为了更好地满足大口径光学系统 的高性能要求,通过反射镜的轻量化设计可以 减小自重变形的影响,这一点显得至关重要。随 着反射镜轻量化率的增加,整体结构的绝对刚 度会降低,导致镜面的面形值对支撑应力变得 更加敏感。同时,反射镜工作环境温度的升高或 降低也能通过反射镜支撑系统引起反射镜面形 下降,尤其在宽温度范围的环境条件下的影响 更加明显^[3]。 我们研制的空间遥感器对主反射镜提出了 较高的温度环境要求,即需要在 20±10 ℃范围 内将反射镜的面形保持在 λ/40 (RMS 值) 以内。 因此,本文重点研究如何在保证反射镜处于自 重状态下的面形以及较高动态刚度的同时,尽 量减小热应力对反射镜的影响,从而使面形精 度满足要求。通过对支撑结构参数进行优化设 计,最终达到了反射镜的镜面变形最小、成像质 量最佳的目的。

1 反射镜及支撑结构设计

1.1 反射镜的材料选择

除了具备所要求的光学特性之外,空间相 机的反射镜材料还应该具有可加工性高、可键 膜性强、导热性能良好、比刚度大、热变形系数 小等综合特性^[4]。表1列出了用于空间反射镜 的几种常用材料的物理性能数据。从中可以看 出,SiC 不仅热变形系数最小,而且比刚度也优 于玻璃材料,所以在用作镜体材料时具有明显 优势。因此,本文选用 SiC 作为镜体材料。

比刚度 导热率 密度 弹性模量 热膨胀系数 热变性系数 ULE 2.2130.0 0.0150.023 67 1.3Zerodur 36.40.09 0.03 2.5921.67铍 29015511.31590.0721.85SiC 390 2.43.051121850.014

表1 常用反射镜材料的属性表

1.2 反射镜的轻量化设计

本文研制的主反射镜是一片口径为 550 mm 的圆形反射镜。我们采用背部三点支撑方式对 反射镜进行定位和支撑。在主镜轴向上,最少支 撑点数的判定准则为^[5]:

$$N = \left(\frac{0.375D^2}{t}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{E\delta}\right)^{1/2} \tag{1}$$

http://journal.sitp.ac.cn/hw

式中, D 为主镜直径, D=550 mm=21.65 in; δ 为允 许的最大镜面面形误差 (RMS 值), 取 δ = 632.8/40 nm=6.22×10⁻⁷ in; t 为镜体厚度, t =6.5 cm=2.56 in; E 为主镜材料的弹性模量, SiC 的弹性模 量 E =410 GP=59.6×10⁶ lb/in²; ρ 为材料密度, ρ =3.05 g/cm³=0.11 lb/in³。经计算得到, 最少支撑 点数 N=3.7。由于反射镜是圆形的,四点支撑

INFRARED (MONTHLY)/VOL.36, NO.12, DEC 2015

不利于支撑点分布,故取 N=3,即三点均匀分 布。反射镜采用背部开口的轻量化方式。为了增 加镜体刚度,采用半封闭式轻量化孔,其轻量化 结构见图 1。



图1 反射镜的轻量化结构

1.3 支撑结构设计

由于此反射镜的工作环境具有较大的温度 范围,我们在设计反射镜的支撑结构时,必须充 分考虑热应力释放问题。该反射镜为圆形结构, 其三个背部支撑点也关于圆心对称。在经受温 度载荷时,反射镜镜体围绕中心呈对称膨胀。因 此,支撑结构在径向方向上必须具有较好的柔 性,以产生径向变形并释放反射镜所受的径向 应力。同时,支撑结构在轴向及切向上需要具有 较好的刚度,以实现反射镜的精确定位,并保证 反射镜组件具有较高的动态刚度。图 2 和图 3 所 示分别为本文设计的支撑结构模型以及反射镜 组件的装配图。

2 支撑结构的参数设计

本文柔性支撑结构的底部采用直梁形柔性 铰链结构,而对其刚度特性进行分析是支撑结



图 2 支撑结构模型



图 3 反射镜组件的装配图

构参数设计的关键所在。柔性铰链结构具有体积 小、无机械摩擦、无空回以及运动灵敏度高等特 点。通过对变形区的主要参数进行优化设计,不 仅可以消除支撑系统受温度应力时对反射镜面 形精度的不利影响,而且还可以降低联接和装 配过程中所产生的应力对镜面面形精度的影响 ^{6]}。图4所示为直梁形柔性铰链的主要结构参 数,主要包括铰链厚度t、圆角半径R,铰链长 度l和铰链宽度b。

由材料力学可知,柔性铰链弯曲时微小段 中性面的曲率为

$$\frac{1}{\rho x} = \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} = \frac{M_z}{EI_z(x)} \tag{2}$$

式中, *M_z* 为力矩; *E* 为弹性模量; *I_z*(*x*) 为截面对转动中心 Z 轴的惯性矩。通过积分计算可得出



图 4 直梁形柔性铰链的模型图

柔性铰链转动刚度的计算公式:

$$K = \frac{M_z}{\alpha_z} = \frac{EbT^3R^2}{12lR^2 + 12ft^3}$$
(3)

式中,

$$f = \frac{12\beta^3(6\beta^2 + 4\beta + 1)}{(4\beta + 1)^{5/2}} \arctan \sqrt{4\beta + 1} + \frac{2\beta^3(6\beta^2 + 4\beta + 1)}{(4\beta + 1)^2(2\beta + 1)}$$
(4)

$$\beta = \frac{R}{t} \tag{5}$$

在一定的限制条件下,将转动刚度最小作为 优化目标,以铰链宽度 b、厚度 t、圆角半径 R 和 直梁长度 l 为优化变量,即 {x} = { x_1, x_2, x_3, x_4 } = {t, R, l, b},则支撑结构的参数优化数学模型如 下:

$$\min K(x) = \min \frac{x_1^3 x_2^2 x_4}{12 x_2^2 x_3 + 12 x_1^3 f(x_1, x_2)}$$
s.t. 1.5 mm $\leq x_1 \leq 8$ mm
1 mm $\leq x_2 \leq 20$ mm
2 mm $\leq x_3 \leq 20$ mm
5 mm $\leq x_4 \leq 50$ mm
 $x_1 + 2x_2 \leq 50$ mm
 $\frac{6 \times 0.5}{x_1^2 x_4} \leq 0.249$
(6)

采用 Matlab 工具箱进行优化,输入变量 $\{x_0\} = \{1.5, 1, 2, 5\}$ 。通过计算得到优化结果 $\{x_y\} = \{4.2, 6.3, 15, 47.8\}$;经过圆整,取t = 4.2, R = 6, l = 15, b = 48。

3 有限元分析

由于本文采用圆柱形柔性支撑结构,上文中的参数 b 可近似代表圆柱直径。采用 Patran/Nastran 有限元分析软件创建有限元模型,其模态 分析结果及振型图见表 2 和图 5 。表 3 列出了 重力作用及重力温度耦合作用下的面形计算结 果。

表 2 反射镜组件的模态分析结果

模态	频率 (Hz)	振型描述	振型图
一阶	267	反射镜沿 X 轴平动	图 5
二阶	268	反射镜沿Y轴平动	图 5
三阶	295	反射镜绕 Z 轴转动	图 5

从计算结果中可以看出,主镜组件具有较高的一阶谐振频率,高出相机系统基频 3.3 倍; 具有很好的动态刚度,能有效避开机身组件的固有频率,以防止共振发生。在重力作用下以及重力加 10 ℃温升的温度范围内,主镜的转角和位移均符合光学系统的公差要求,而且面形误差也在允差范围内。

4 结束语

针对某空间相机的圆形主镜组件 (孔径为 550 mm) 在 20±10 ℃温度范围内的使用环境,设 计了一种在背部支撑主镜的柔性铰链结构。利 用 Matlab 软件优化了支撑结构参数,使得支撑 柔性结构在受到温度载荷时沿着径向具有足够 的柔性,并可吸收变形和降低反射镜应力。通过



工况			重力		重力加10℃ 温升			允差
重力	方向	X 向	Y 向	Z 向	X向	Y 向	Z 向	
镜面刚	ΔX	3.2	1.4	1.6	3.5	1.8	1.5	40
体位移	ΔY	1.2	3.3	1.7	1.5	3.1	1.8	40
(µm) -	ΔZ	0.4	0.4	1.8	0.8	0.9	2.1	40
镜面倾	θx	0.2	2.2	0.8	0.3	2.5	2.0	20
斜角	θy	2.4	0.3	0.9	1.7	0.6	1.2	20
(")	θ Ζ	1.5	1.8	0.2	1.6	2.3	0.5	20
PV (i	nm)	68.4	69.3	59.2	74.8	75.2	68.2	79.1
RMS	(nm)	11.9	11.6	9.4	14.5	15.2	12.3	15.82

表 3 由重力及热力耦合引起的反射镜面形误差

有限元分析可以看出,该支撑结构的一阶频率 达到 267 Hz,远高于机身组件的固有频率,因此 可保证主镜组件不遭到破坏。而且在重力耦合 10 ℃温度载荷时,反射镜的面形误差 (RMS 值) 也能满足光学系统优于 λ/40 的要求。

参考文献

- Friedman E. Photonics Rules of Thumb [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [2] 曾勇强, 傅丹鹰, 孙纪文, 等. 空间遥感器大口径反

新闻动态 News

美国提出对地观测卫星任务的 优先级确立机制

据 www.spacedaily.com 网站报道,最近,

美国国家科学院、美国国家工程院和美国国家 医学院联合发布了一份新的报告。该报告为美 国国家航空航天局(NASA)提供了一个根据科学 价值设定卫星观测与测量任务优先级的机制。

目前,NASA 在制定对地观测任务优先级时 主要还是从定性方面加以考虑的。而这份新报 告就此提出了一种部分量化且透明的方法,即 根据各种测量任务的科学价值来对其相对重要 性进行评估。该报告并没有针对具体项目给出 看法,而是为 NASA 提供了用于确定任务优先 级的方法及指标。

这份报告建议,NASA 可以尝试为其地球科 学测量任务设定一些量化目标,并基于相同来 射镜支撑结构型式综述 [J]. **航天返回与遥感**, 2006, **25**(2): 18-22.

- [3] Yoder P. Opto-mechanical System Design [M]. New York: Cooperate Marcel Dekker Inc, 1993.
- [4] 辛宏伟,关英俊,李景林,等.大孔径长条反射镜 支撑结构的设计 [J]. 光学精密工程,2011,32(7): 1560-1567.
- [5] 李志来,徐宏. 长条形空间反射镜及其支撑结构设计
 [J]. 光学精密工程, 2011, 32(5): 1039–1047.
- [6] 付亮亮,何欣,吴谨,等.大口径平面基准仪反射 镜支撑技术 [J]. 光电工程, 2012, 39(3): 25-29.

源制定各个项目计划。这些来源包括科学界在 美国国家科学院、美国国家工程院和美国国家 医学院组织的十年调查项目中就任务优先级所 达成的共识以及美国国会和行政部门提出的相 关指导意见。

另外,该报告还举例说明了量化目标的具体形式,比如在一个具有不确定性的量化范围内,如何确定全球海平面的平均上升速率或者海洋储热的变化情况。

为了在重要性、效用、质量和成功概率等方 面实现某个量化目标,NASA 接着就应该对具体 测量任务的意义进行评估。

除了阐述如何使用以上任务优先级确立机 制之外,这份报告还指出,该机制能够用来帮 助 NASA 衡量社会效益与测量任务优先级之间 的关系。然而,在利用该机制时,NASA 则需要 确定如何对这个领域的量化目标进行鉴定和评 估。

□岳桢干