

文章编号: 1672-8785(2014)12-0029-06

空间相机大型轻质框架的选型与设计

翟 岩

(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: 针对某空间相机的光学设计结果, 基于不同材料的机械加工特性, 设计了几种结构形式的框架并进行了选型。采用有限元法对各框架的谐振频率进行了分析, 对框架的经济性也进行了分析, 最终确定了框架的结构形式。选定的框架为全桁架杆结构, 重量为 57 kg, 一阶谐振频率为 90.4 Hz。框架组件的力学试验验证表明, 其一阶谐振频率为 88.7 Hz。分析和试验结果均表明, 该框架能够满足设计要求。

关键词: 框架; 选型; 有限元分析; 力学试验

中图分类号: V445.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.12.006

Selection and Design of Large Light-weight Framework for Space Camera

ZHAI Yan

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

Abstract: For the optical design result of a certain space camera, several frameworks in different structural forms are designed and selected according to the machining features of different materials. The resonant frequency of each framework is analyzed by using a finite element method and the economics of each framework is also analyzed. Finally, the structural form is determined for the framework. The selected framework structure is a full-truss one. It has a weight of 57 kg and a first-order resonance frequency of 90.4 Hz. The mechanical test of the framework components shows that the framework has its first-order resonance frequency of 88.7 Hz. The analysis and test results show that it meets the design requirement.

Key words: framework; selection; finite element analysis; mechanical test

0 引言

随着空间遥感载荷向着高空间分辨率发展, 遥感器的体积越来越庞大, 因此对遥感器的轻量化要求也越来越高^[1]。光学遥感器的重量主要集中在反射镜组件和机身组件上。对于如何减轻反射镜组件的重量, 可以参考很多文献。但在减轻机身组件特别是框架组件的重量方

面, 可以参考的文献很少^[2]。

目前, 离轴系统相机使用的较普遍的框架结构有两种形式: 尺寸较小的相机大多使用整体铸造的框架结构, 尺寸较大的相机大多采用由若干根桁架杆支撑前后两端两块基板形成的框架^[3]。对于未来反射镜尺寸更大的系统, 后者会使基板的体积和厚度急剧增加, 最终将使整个

收稿日期: 2014-10-11

作者简介: 翟岩 (1974-), 男, 吉林长春人, 副研究员, 主要从事空间光学仪器的光机总体设计工作。

E-mail: zhaiy163@163.com

系统的质量过多地集中在框架上。目前在轨的几款空间遥感器,其机身的质量均超过相机质量的 50%。如何减小框架的质量,使之适应未来反射镜越来越大的趋势,已成为空间遥感器设计必须面对的问题。

1 光学设计结果

某相机的光学设计以离轴三反、中心无遮拦系统为前组,以 10 片透射镜为后组,并在主镜前设置扫描镜以增加视场宽度,设计焦距为 400 mm, F 数为 1:0.98。最初,光学系统的布排如图 1 所示。从扫描镜的外沿到主镜镜面,尺寸超过 1600 mm,且后组会遮挡扫描镜的光路,需要设置折叠镜使光路折转或者使扫描镜外伸至主镜镜面 2400 mm 处,如图 1 所示。

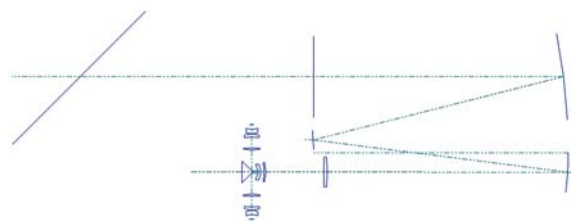


图 1 光学系统设计结果

由于受相机体积的限制,将图 1 的光路折叠:把扫描镜后移至主镜与次镜中间靠近次镜处,使扫描光路不占用相机的整体尺寸;使用一块折叠镜将三镜折转至主镜上方,再使用一块折叠镜将后组折叠至主镜的下方。经过这些折转,得到图 2 所示的光路。此时,次镜镜面至主镜镜面的尺寸减小到 1150 mm。

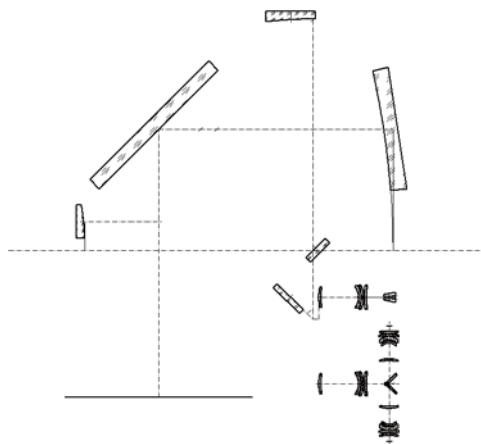


图 2 加入折叠镜后的光路图

2 框架设计面临的问题

为减小相机的整体尺寸而进行的光路折叠使相机的整体尺寸减小了近 30%。但由于入光口、次镜、扫描镜、三镜、主镜、镜头后组和折叠镜 2 位于不同的两两相邻的 7 个面上,且折叠镜 1 位于相机的内部,相机的框架设计仍然很困难。

根据总体要求,相机的整体质量不超过 250 kg。由于摆镜需要必要的支撑与框架相连,后组组件也需要通过相应的接口件将后组及探测器组件(2 套)与框架连接,由此计算得到各反射镜组件、扫描镜组件和后部组件(包含后组组件、2 台探测器组件及接口件)的质量见表 1。

表 1 各组件的重量

组件名称	质量 (kg)
摆镜组件 (包含摆动机构和支撑)	60.2
主镜组件	22.31
次镜组件	3.95
三镜组件	11.67
折叠镜 1 组件	2.47
折叠镜 2 组件	1.67
后部组件	44.09

由表 1 可知,去除各光学组件后,相机其它部分的总质量仅为 70~80 kg,因此对框架重量的要求很高。另外,相机需要适应重力场和温度场的一定变化。

3 材料选择

航天相机对质量的要求通常较高,常用密度较低、弹性模量相对较大的材料^[4]如钛合金材料。近几年来,复合轻质材料已广泛应用于航天工程,它可分为金属基复合材料和非金属复合材料。金属基复合材料主要为铝基复合材料,根据加入的非金属材料的种类和比例不同,它又可分为高体份铝基碳化硅复合材料、低体份铝基碳化硅复合材料和低体份铝基硼合金材料等。非金属复合材料主要指碳纤维材料。另外,目前铍铝合金材料因密度低、弹性模量高的特点也可适应航天相机的需求。以上几种材料的属性见表 2。

表 2 常用航天相机框架材料的属性 [5-7]

材料	密度 $\rho(10^3\text{kg/m}^3)$	弹性模量 $E(\text{GPa})$	线胀系数 $\alpha(10^{-6}/\text{K})$	比刚度 $E/\rho(10^6\text{m}^3)$
钛合金	4.4	106.8	8.8	2.53
高体份铝基碳化硅复合材料	2.96	180	8.0	6.0
低体份铝基碳化硅复合材料	2.8	100	16	3.3
低体份铝基硼合金材料	2.77	100	17	3.6
碳纤维材料 (m40)	1.56	100	0.3	6.4
铍铝合金材料	2.1	200	13.9	9.5

相机中最远的距离是主镜到次镜的间距, 为 1106.7 mm。以相机温度场变化为 5 °C 计算, 热胀系数最大的材料是低体份铝基硼合金材料, 其主次镜间隔变化量为

$$1106.7 \times 18 \times 10^{-6} \times 5 = 0.0996 \text{ mm}$$

与光学设计要求的 0.5 mm 位移误差相比较, 反射镜组件的设计和相机的装调误差仍留有足够

的余量。

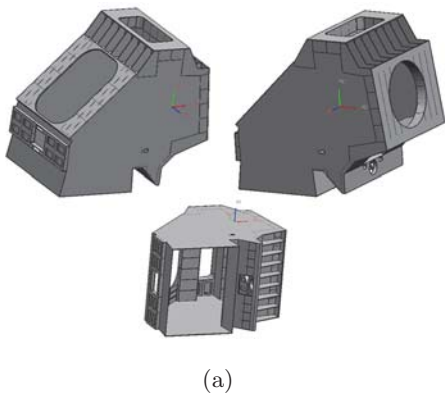
4 结构设计

由于不同种类的材料具有不同的加工性能, 因此需要根据所选材料的加工性能设计结构形式, 以达到利用其优势、规避加工难度的目的。以上几种材料的加工性能特点见表 3。

表 3 常用航天相机框架材料的加工性能特点

材料	特点
钛合金	可铸造成型, 加工性能良好
高体份铝基碳化硅复合材料	不可铸造成型, 多为板材焊接成型, 需多次热处理消除应力, 加工性能差, 硬度大
低体份铝基碳化硅复合材料	可铸造成型, 热处理消除应力, 加可铸造成型, 热处理消除应力, 加工性能不佳, 硬度较大
低体份铝基硼合金材料	可铸造成型, 热处理消除应力, 加工性能不佳, 硬度较大
碳纤维材料 (m40)	缠绕或粘接成型, 成型较简单但需要胎具辅助, 切削加工对强度影响大, 不成直接形成螺钉孔结构, 需要预埋金属件
铍铝合金材料	可铸造成型或粉末冶金成型, 热处理消除应力, 加工性能好, 粉尘有毒, 需对环境控制对人员进行防护

根据几种材料的属性和加工性能特点, 初步设计了三种形式的框架结构, 如图 3 所示。图 3(a) 的结构可适应铸造钛合金材料 [8] 和高体份铝基复合材料两种材料; 图 3(b) 的结构可适应铸造钛合金材料、低体份铝基复合材料、低体份硼合金材料和碳纤维材料四种材料; 图 3(c) 的结构可适应钛合金接头 - 碳纤维支杆和全铍铝合金材料。



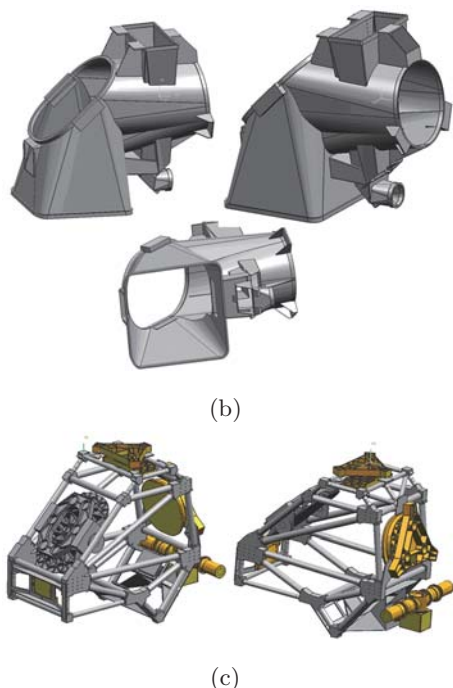


图 3 根据光学设计结果设计的三种框架结构形式

以上三种框架中,金属件的壁厚均为 4 mm,接口处加厚至 6 mm。

5 性能比较

对三种形式的框架赋以 8 种不同材料进行有限元分析,得到的数据见表 4。

表 4 各结构有限元分析结果

结构形式	材料	框架质量	谐振频率 (Hz)
图 3(a)	铸造钛合金材料	108	42.7
	高体份铝基复合材料	72.2	56.3
图 3(b)	铸造钛合金材料	42.9	67.1
	低体份铝基复合材料	27	82.4
	低体份硼合金材料	27	83.7
	碳纤维材料 (m40)	19.5	110
	(带钛合金接口件情况)	24.6	102
图 3(c)	钛合金接头 - 碳纤维支杆	57.35	90.4
	全铍铝合金材料	33.85	115

由表 3 可知,图 3(a) 结构形式的框架刚度明显不能满足航天需求。在集成整机后,相机的谐振频率将低于 40 Hz,易与星平台上的其它部件产生扰频。并且其质量明显大于其它 6 个框

架,不能满足总体提出的相机重量要求。因此图 3(a) 的机构形式不适于此相机。

图 3(b) 结构的几种框架的重量都可以满足总体要求。但经有限元分析,仅采用碳纤维材料 (m40 材料) 的框架在安装反射镜组件后能够满足航天相机对整机频率的要求,采用其余几种材料的框架的整机谐振频率最高仅为 62 Hz。

图 3(c) 结构的两种框架重量可以满足总体要求。经有限元分析,在使用钛合金接头 - 碳纤维支杆材料的框架时,整机谐振频率为 74 Hz。采用全铍铝合金材料的框架时,整机谐振频率为 96 Hz,均满足航天相机对整机谐振频率的要求。

可见,由于航天相机对整机重量和谐振频率的限制,在设计的几种框架中,用碳纤维材料 (m40 材料) 如图 3(b) 形式的框架、使用钛合金接头 - 碳纤维支杆材料和使用全铍铝合金材料的如图 3(c) 结构形式的三种框架均能满足项目的要求。

采用这三种材料的框架,由于使用的材料不同,其加工工艺也完全不同。使用碳纤维材料的框架由于其内表面和外表面均为圆弧过渡面,个别表面甚至为部分椭圆锥面,其内胎面和外胎面的模具加工成本很高,并且加工周期很长,使投入到框架加工的经费预计超过 100 万元。铍铝合金的材料价格很高,达到 4 万元/kg,而全铍铝合金的框架的净重量已达 33.85 kg,仅根据此重量计算的材料费用已经超过 135 万元。另外,由于铍铝合金有毒,在加工过程中要求具备环境保护条件,这会使框架的加工和装调成本进一步增加。使用钛合金接头 - 碳纤维支杆材料的框架的钛合金铸造件净重约为 33 kg,碳纤维材料件的重量约 24 kg。铸造钛合金材料以 2500 元/kg 计算,需要经费 8.25 万元,碳纤维材料以 2 万元/kg 计算,需要经费 48 万元,共需要 56.25 万元,成本远低于其它两种材料的框架。而且其加工过程中不产生毒性,所需模具的价格很低。

通过以上几项内容的比较,选择使用钛合金接头 - 碳纤维支杆的全桁架杆框架结构。该框架结构有 20 个主要接头、1 个辅助接头、42 根主要支撑杆和 16 根辅助支撑杆。接头材料为铸

造钛合金材料, 壁厚为 4 mm, 接口处的壁厚为 6~8mm。支撑杆的材料为 m40 材料, 主要支撑杆的外径为 50 mm, 壁厚为 5 mm, 辅助支撑杆的外径有 36 mm 和 30 mm 两种规格, 壁厚为 2.5 mm。

6 试验验证

在框架加工、装配完毕后, 对框架进行了力学试验。力学试验包括三个方向 0~2000 Hz 范围内 0.2 g 特征试验和正弦、随机振动。试验谐振

频率结果如表 6 和图 5 所示。

表 5 力学试验结果

方向	X	Y	Z
Fn(Hz)	197	88.7	196.8

由表 5 可见, 试验组件 X、Y、Z 三个方向的基频分别为 197 Hz、88.7 Hz 和 196.7 Hz, 试验结果与设计分析结果相吻合。图 4 为框架 0.2 g 特征扫描试验曲线。



图 4 框架 Y 向 0.2 g 特征扫描曲线

由图 4 可知, 试验组件没有密频现象, 曲线特性良好。

从表 5 和图 4 看出, 该框架的结构刚度满足要求。在随后的随机振动试验前后, 反射镜组件的动态响应未发生变化。试验后, 检测结构没有被破坏, 说明结构形式合理, 性能可靠。

7 结论

针对某航天相机的框架, 针对不同种材料进行了结构设计和选型。通过对整机重量、谐振频率及制造成本等方面的比较, 选择了以钛合

金为接头材料、碳纤维为支撑杆材料的全桁架形式的框架结构。有限元分析表明, 框架的一阶谐振频率为 90.4 Hz, 力学试验也验证了这一点, 说明框架的动态刚度较高。根据现有技术, 为提高分辨率, 航天相机必须增大体积。本文为需要大体积轻量航天相机的框架设计提供了一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] 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.

- [2] 张雷, 贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(3): 603–608.
- [3] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(2): 2485–2490.
- [4] Yoder P R. *OPto- Mechanical System Design* (2nd edition) [M]. Marcel Dekker, 1993.
- [5] 杨洪波. 空间相机动态特性系统评价 [J]. *光学精密工程*, 1998, **8**(6): 69–80.
- [6] 王文明, 潘复生, Lu Yun, 等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料开发与应用的研究现状 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2004, **27**(3): 61–67.
- [7] 薛闯, 颜昌翔. 空间相机主支撑结构设计与分析 [J]. *科学技术与工程*, 2011, **11**(35): 8894.
- [8] 黄猛, 丁金伟, 张葆, 等. 某航空相机光学系统支撑框架有限元分析 [J]. *计算机仿真*, 2009(4): 317–343.

(上接第 22 页)

- [6] 汪敏, 李兴国, 吴文. 8 mm 波段直接检波式接收机研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**(4): 310–313.
- [7] 张祖荫, 林士杰. *微波辐射测量技术及应用* [M]. 北京: 电子工业出版社, 1995: 33–34.
- [8] Gustavo A S, Jose M R, Pedro G. On the Use of Radiometric Measurements to Estimate Atmospheric Attenuation at 100 and 300 GHz [J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2011, **32**(4): 528–540.
- [9] Liebe H J. MPM-An Atmospheric Millimeter Wave Propagation Model [J]. *Int J Infrared Milli Waves*, 1989, **10**(6): 631–650.
- [10] Weger E. Apparent Sky Temperatures in the Microwave Region [J]. *Journal of Meteorology*, 1960, **17**(4): 159–165.
- [11] Zhang G F, Zhang Z Y, Wei G. Research on Antenna Temperature Contrast of Metal Solid Objects [J]. *Int J Infrared Milli Waves*, 2004, **25**(6): 929–937.
- [12] 邢业新. 短毫米波被动探测及反隐身技术研究 [D]. 南京理工大学博士论文, 2012: 92–101.

(上接第 28 页)

代入 CODE V 软件进行光学计算, 得到变形前后系统在 70 lp/mm 处的传递函数分别为 0.735 和 0.703 (见图 10)。由空间应用环境造成的摆镜变形会对系统传递函数产生影响, 其相对降幅约为 4.4% (<5%), 满足系统的光学成像要求。

4 结束语

本文利用优化设计方法对空间相机用摆镜进行了轻量化设计, 其面密度达到 8 kg/m^2 。然后在空间微重力、低温和转动惯性等载荷的作用下对轻量化摆镜进行了面形校核, 其结果均满足摆镜设计要求。利用光机集成仿真方法对空间环境中摆镜对光学遥感器性能的影响进行了分析。由于摆镜产生变形, 系统的光学传递函数约降了 4.4%, 满足光学成像要求。

参考文献

- [1] 宋春涛, 李英才. 空间指向摆镜的轻量化研究 [J]. *光子学报*, 1998, **27**(4): 377–381.
- [2] 刘学业, 周新贵. 空间摆镜轻量化的有限元研究 [J]. *新技术新工艺*, 2006, **25**(11): 58–59.
- [3] 王伟成, 裴云天. 一种空间大口径碳化硅指向镜轻量化设计 [J]. *科学技术与工程*, 2011, **34**(3): 8642–8644.
- [4] 陈长征, 赵贵军, 张星祥, 等. 空间光学镜头可适应边界温度的 CAE 计算方法 [J]. *光学精密工程*, 2007, **31**(5): 668–673.
- [5] 王栋, 杨洪波, 陈长征. 光学表面面形的计算机仿真 [J]. *计算机仿真*, 2007, **25**(2): 298–301.
- [6] 朱波, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径望远镜三镜结构设计及优化 [J]. *工程设计学报*, 2010, **18**(6): 469–472.
- [7] 姜景山. *空间科学与应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 刘云猛, 张宝龙. 空间遥感器二维扫描指向镜的轻量化设计及应用 [J]. *红外技术*, 2007, **27**(12): 688–691.
- [9] Miller J, Hatch M, Green K. Predicting Performance of Optical Systems Undergoing Thermal/Mechanical Loadings Using Integrated Thermal/Structural/Optical Numerical Methods [J]. *Optical Engineering*, 1981, **20**(2): 202166.
- [10] 刘云猛, 张宝龙. 空间遥感器二维扫描指向镜的轻量化设计及应用 [J]. *红外技术*, 2007, **27**(12): 688–691.
- [11] 吴清文, 杨洪波, 杨近松, 等. 空间相机中主镜及其支撑方案设计与分析方法 [J]. *光学技术*, 2004, **22**(2): 153–156.
- [12] 薛育, 孙志远. 基于 ESO 的反射镜拓扑优化设计 [J]. *长春理工大学学报 (自然科学版)*, 2011, **30**(3): 19–22.