

航天相机框架轻量化研究

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: 对某在轨运行的航天相机框架进行了轻量化研究。在保留了原有结构的基础上, 通过更换材料的方式对已有的框架进行了几种可能的改造, 通过有限元计算分析了各框架对任务的满足程度、各种材料框架的优劣, 将质量降低了 14%, 谐振频率提高了 8%。

关键词: 航天相机; 框架; 轻量化

中图分类号: V248.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102712.0077

Lightweight Research on Space Camera Framework

ZHAI Yan

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

Abstract: A lightweight framework of some space camera in orbit was researched. The framework was improved by changing its material based on its former structure. Several changed frameworks were analyzed with finite element method. Analysis results showed that the new framework had less mass(14% decreased) and higher fundamental frequency (8% increased).

Keywords: space camera; framework; lightweight

1 引 言

航天相机作为卫星的有效载荷, 在运输、发射、在轨运行等各个阶段, 会经受振动、冲击和加速度

等各种形式的动力学环境; 其质量会影响卫星发射、调姿、变轨的成本以及发射平台的建立; 因此, 相机需要采用高刚度、轻质的结构。框架是航天相机的主支撑结构, 是保证空间光学元件的镜面变形和

光学元件间的相对尺寸的关键部分,通常也是整机质量最大的部分^[1]。因此,对框架进行轻量化研究具有重要的意义。

2 相机结构

航天相机采用离轴三反、无中心遮拦光学系统,空间桁架结构形式,具有视场大、体积小、传函高等特点。其设计要求质量不大于 32 kg,一阶谐振频率不小于 100 Hz,实际产品的一阶谐振频率为 116 Hz。表 1 为相机质量分布汇总。

表1 相机质量分布

组件	质量 (kg)	占总质量比例
主镜组件	2.8	9.3%
次镜组件	0.5	1.7%
第三镜组件	2.1	7%
机身组件	框架	12
	光阑	1.2
调焦组件	3.4	11.3%
其它	8	26.7%
总质量	30	100%

由表 1 可以看出,框架质量占相机总质量的 40%,框架的三维结构如图 1 所示。框架为全钛合金材料,采用精密铸造一次成型工艺。除接口处局部加厚外,框架的筋和蒙皮厚度为 2~3 mm,由于铸造零件的壁厚度误差控制较难,完成加工后零件质量会比计算的质量多。例如此框架,根据计算质量为 9.556 kg,加工完成后为 12 kg,超重 2.444 kg,较设计质量多 25.6%。而超重的质量是均匀分布在整個框

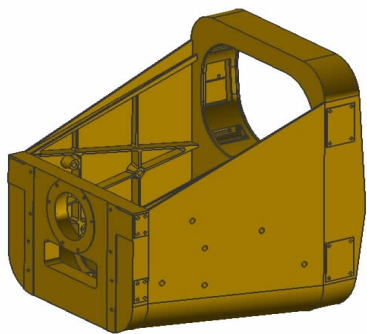


图1 框架结构示意图

架的内外表面的,想减重非常困难。

对于空间相机来说,在保持一定谐振频率的基础上,尽量减少相机质量是每个相机设计过程中均要面对的问题。由

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

可推出 $k=4\pi^2 f_n^2 m$,在采用同种材料、且谐振频率基本保持不变的情况下,质量越小则整体刚度越小。对于刚度来说,可以采用提高结构刚度或更换高弹性模量的材料来提高整体刚度。因此,为保证相机整体刚度足够高,减少质量就需要更换轻质高刚度的材料,或者采用同种材料,而采用使用材料少但具有更高刚度的结构形式^[2]。

对于航天相机,框架是负荷光学零件和其他部、组件的基础,是提供热控实施的基础和热传导的基本路径之一^[3]。框架的材料和结构选用既要照顾到整体刚度,又要保证热性能的可靠,同时还要有良好的机械加工性能。

相机框架材料选用铸造钛合金材料,加工性能良好,并且有多年的加工经验保证。比钛合金材料轻质的常用材料,通常有铝及铝基复合材料、碳纤维材料等。考虑加工性能,铝的加工性能最优,其成型效率和热传导率最高。但是,其热膨胀系数高达 $22 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,在温度变化时,对反射镜的空间相对位置和镜头焦点位置的影响较大。可通过调整其成分分配比改变铝基复合材料的热膨胀系数,但其加工难度大。碳纤维材料几乎可以成型为任何形状,但其加工时容易切断纤维束,造成人为的强度降低,并且碳纤维材料耐油性很差,浸油后易产生分层现象,造成强度降低。因此,对于相机的框架来说,如需进一步轻量化,相关材料有如下选择:

- (1) 采用碳纤维桁架支撑前后框架结构,外包络碳纤维蒙皮;
- (2) 采用目前框架结构,保留前后框架为钛合金结构,将中段的钛合金蒙皮改为碳纤维蒙皮;
- (3) 全框架采用碳纤维结构,需要加工处镶嵌钛合金块。

3 分 析

对原结构和上述几种结构分别进行有限元分析，各框架质量与前三阶谐振频率如表 2 所示。

可见，对于原结构，其结构刚度主要由于其内部的筋和前后板组合在一起的结构提供，蒙皮只有很少的贡献。由计算结果可以看出，将蒙皮去除后的

框架谐振频率降低仅 10%。因此，在将蒙皮替换为同厚度的碳纤维材料后，框架的谐振频率升高 8%且质量降低 14%。在将全部结构材料改成碳纤维材料后，谐振频率提高 139%，质量降低了 52.4%。

将 3 个反射镜组件装入机身组件，计算其在重力和温度变化条件下的面型精度和空间位置变化，计算结果如表 3 所示。

表2 几种框架谐振频率

序号	1	2	3	4
状态	铸造钛合金框架，加强筋在蒙皮内部	铸造钛合金框架，无蒙皮	铸造钛合金框架，加强筋在蒙皮内部，蒙皮为碳纤维	全部采用碳纤维材料
质量	9.556 kg	7.046 kg	8.232 kg	4.554 kg
频率 (Hz)	X	378.18	341.28	526.52
	Y	522.39	487.47	692
	Z	556.22	512.39	768.96

表3 反射镜分析结果

原结构						
重力方向	主镜		次镜		三镜	
	PV(nm)	RMS(nm)	PV(nm)	RMS(nm)	PV(nm)	RMS(nm)
X向	31.14	4.88	6.27	1.27	11.6	2.17
Y向	51.62	8.14	10.49	2.23	21.79	3.77
Z向	55.04	7.68	2.07	0.42	25.58	4.06
铸造钛合金框架，无蒙皮						
重力方向	主镜		次镜		三镜	
	PV(nm)	RMS(nm)	PV(nm)	RMS(nm)	PV(nm)	RMS(nm)
X向	31.42	4.89	6.20	1.20	10.52	2.09
Y向	50.99	8.067	11.00	2.37	22.00	3.71
Z向	55.22	7.69	1.86	0.34	26.16	4.08
铸造钛合金框架碳纤维蒙皮						
重力方向	主镜		次镜		三镜	
	PV(nm)	RMS(nm)	PV(nm)	RMS(nm)	PV(nm)	RMS(nm)
X向	30.46	4.90	6.15	1.29	11.15	2.09
Y向	51.61	8.09	10.49	2.17	22.71	3.78
Z向	55.34	7.67	2.30	0.42	25.73	4.08
全部采用碳纤维材料						
重力方向	主镜		次镜		三镜	
	PV(nm)	RMS(nm)	PV(nm)	RMS(nm)	PV(nm)	RMS(nm)
X向	31.15	4.90	6.379	1.378	10.86	2.098
Y向	50.50	7.91	9.34	1.88	22.45	3.73
Z向	54.65	7.68	2.10	0.39	25.66	4.09

比较以上4个分析结果,在固定在不同框架上后,各反射镜的面型和空间位置仍然满足光学设计要求的精度指标。

再比较各框架加工性能。原框架到目前为止已经由两个生产厂家共制造了3个成品,除首件外,毛坯生产周期平均约50 d,精加工周期约30 d;光阑生产周期30 d;框架和光阑可同步生产;机身组装约15 d,共计95 d。对于去掉蒙皮的框架来说,其材料仍为铸造钛合金材料,预计其生产周期约50 d,精加工周期约30 d;蒙皮和光阑可以与框架同步生产,加工周期一共约50 d;机身组装约25 d,共计105 d。对于全部采用碳纤维材料的框架,其生产用的工装需重新制造,框架生产周期预计不少于180 d。

从机械加工的方面看,原框架和去掉蒙皮的框架可以采用各种加工手段来达到设计的指标要求,可以允许油冷、水冷、热处理等各种工艺的实施。而全碳纤维材料的框架,虽然其各处加工面均镶嵌了钛合金块,但该框架的整体加工必须在碳纤维结构完成后才可以进行,其工艺手段受材料不耐油、不耐水、不耐热的特点影响很大,很多加工工艺难以实施,并且在加工过程中如果产生的热量过大,还会影响结构的尺寸变化,造成加工误差。

综合以上各种因素,框架在成型后如仍需较大工作量的加工工作,那么全碳纤维材料的框架除在重量上占很大优势外,在生产周期和加工精度上并没有很大优势,而对于空间相机的主承力结构来说,其生产精度和生产时间都对整个相机的精度和周期有着巨大的影响。另外,碳纤维材料是非线性材料,其强度和热膨胀系数受材料铺层和工艺的影响很大,前述计算为求简化,将碳纤维材料按照线性材料计算,与实际得到的结果会有所差别。因此,如需要相机再轻量化,将选择铸造钛合金框架碳纤维材料蒙皮结构的框架。当然,如果追求极至的轻量化结果,应选择全部为碳纤维材料的框架。

4 结 论

通过对航天相机框架的再轻量化,在保留了原来结构的基础上,仅通过更换材料的方式设计了几种框架,通过有限元计算分析了各框架对任务的满足程度,并分析了作为主承力零件各种材料框架的优劣,将质量降低了14%,谐振频率提高了8%。文中对材料的分析,对其他相机的设计选材和构型可以提供一定的借鉴。

参考文献

- [1] Robichaud J L, Anapol M I, Gardner L R, *et al.* Ultralightweight off-axis three mirror anastigmatic SiC visible telescope[J]. *SPIE*, 1995, 2543: 180-184.
- [2] Zhang Xin-yu, Chen Zhi-yuan, Yang Shi-mo. Optimization of a space spectrograph main frame and frequency response analysis of the frame[J]. *SPIE*, 2009, 7385: 73850C-1-73850C-10.
- [3] 辛宏伟,董得义.长焦距空间遥感器支撑结构设计研究[J].光机电信息,2009,26(10):28-33.

作者简介:翟岩(1974-),男,吉林长春人,学士,副研究员,1997年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事航天遥感器结构总体设计。E-mail:zhaiy163@tom.com