

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108842

微小型空间相机碳纤维整体式主框架轻量化设计^{*}

曹明辉^{1,2}, 辛宏伟¹, 陈长征¹, 朱俊青¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:针对某微小型离轴空间相机结构紧凑、质量轻的设计要求,设计了一个高度轻量化的整体式碳纤维主框架。首先,根据空间相机具体功能的设计指标和光学系统,确定主框架的材料和结构形式,设计出碳纤维整体式主框架的基本构型。接着对铺层厚度参数化优化,并考虑碳纤维复合材料的制造约束,确定了主框架碳纤维铺层的厚度、比例。将参数化优化的结果进行离散化,进行碳纤维铺层顺序的优化,确定了最佳的堆叠次序,完成了碳纤维的铺层优化设计,实现了主框架的轻量化设计,解决了复杂碳纤维零件优化的问题。然后对设计完的碳纤维主框架结构代入整机有限元模型中,进行有限元仿真分析,验证主框架的性能指标。最后,将整机装配完成进行动力学试验,并与有限元分析结果进行对比验证。经过优化,碳纤维主框架的质量为4.5 kg,相机一阶频率为81 Hz,动力学试验得到的相机整机的一阶频率为78 Hz,仿真误差为3.7%,符合仿真结果,进一步说明了设计的合理性以及正确性。本文提出的空间相机碳纤维整体式主框架设计方法对微小型离轴三反式空间相机结构设计以及碳纤维零件的轻量化优化设计具有一定的借鉴意义。

关键词: 空间相机;碳纤维复合材料;轻量化;支撑结构;优化设计

中图分类号: TH122 V443+.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.20

A lightweight design of carbon fiber integrated main frame for the micro space camera

Cao Minghui^{1,2}, Xin Hongwei¹, Chen Changzheng¹, Zhu Junqing¹

(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: To meet design requirements of the small off-axis space camera with compact structure and light weight, a highly lightweight integral carbon fiber main frame is designed. First, according to the design indicators and the optical system of the specific functions of the space camera, the material and structure of the main frame are determined. And the basic configuration of the carbon fiber monolithic main frame is designed. Then, the layup thickness is parameterized and optimized. The manufacturing constraints of carbon fiber composite materials are considered. The thickness and proportion of the main frame carbon fiber layup are determined. The results of parametric optimization are discretized, the stacking sequence of carbon fiber is optimized, the optimal stacking sequence is determined, the optimization design of carbon fiber is achieved, the lightweight design of the main frame is realized, and the optimization problem of complex carbon fiber parts is solved. Next, the designed carbon fiber main frame structure is substituted into the finite element model of the whole machine, and the finite element simulation analysis is implemented to verify the performance index of the main frame. Finally, the whole machine is assembled for dynamic test, and compared with the finite element analysis results. After optimization, the mass of the carbon fiber main frame is 4.5 kg, the first-order frequency of the camera is 81 Hz, the first-order frequency of the camera obtained through the dynamic test is 78 Hz, and the simulation error is 3.7%, which is in line with simulation results. Results further explain the rationality and correctness of the design. The design method of carbon fiber integral main frame of space camera proposed in this article has a certain reference significance for the structural design of micro off-axis three trans space camera and the lightweight optimization design of carbon fiber parts.

Keywords: space camera; carbon fiber composite material; lightweight; supporting structure; optimized design

0 引言

近几年来,微纳遥感观测卫星凭借着体积小、重量轻、性能好、研制周期短、成本低、发射方式灵活等优势,并且进行组网或者组星座运行,以获得较高的时间分辨率和空间分辨率,成为遥感观测的一个重要的发展方向。微纳卫星按质量可分为1~10 kg的纳卫星和10~100 kg的微卫星^[1-2]。微小型空间相机是搭载在微卫星平台上的有效光学载荷,是对地遥感观测的主要装备。

微小型空间相机在体积质量方面具有严苛要求。通常情况下,在整机质量中占比最大的是光机结构,主支撑结构在光机结构中具有材料选择广泛和形式多样的优点,相比于其余组件更适合进行高度轻量化^[3]。空间相机的主支撑结构主要起支撑相机各组件处于正确的空间位置的作用,根据光学系统各组件的位置以及卫星预留安装位置,灵活选取材料和设计其支撑结构的形式。目前,空间相机主支撑的结构形式主要是桁架式、框架式等。桁架式主支撑结构在轻量化方面具有优势,在中小型同轴反射式相机和长焦距的大中型空间相机中应用较多,但整体性及稳定性方面存在劣势,应用于对结构尺寸变化更加敏感的大型空间相机时存在稳定性风险^[4]。框架式结构稳定性较好,装调简单,适用于大中型空间相机。框架式支撑结构又有整体式、分体连接式等不同的形式。薄壁筒式主支撑结构可以看作是整体框架式的一种,由于其轻量化水平低、往往应用在小型的空间相机中,但整体稳定性高、易加工、易装调,而且兼顾支撑功能的同时还能作为相机的整体外壳,不用另外设计制造外壳。

同时,新型航天航空材料和制造工艺在空间相机中得到应用,可供选择的支撑结构材料也越来越多,比如碳纤维复合材料、高体份铝基碳化硅复合材料等,选择优异的轻型材料能使结构轻量化水平更高。其中碳纤维复合材料具有低密度、高比刚度、低膨胀系数、可设计性强等优点,被广泛使用在空间相机支撑结构中。在国内外,许多空间相机中都使用了碳纤维材料的支撑结构。哈勃望远镜采用了桁架式碳纤维支撑结构,用来连接主次镜^[5];欧空局于2019年发射的CHEOPS望远镜,使用了大量的碳纤维材料并且其主背板使用了碳纤维蜂窝夹层结构^[6]。杨帅等^[7]针对某轻小型离轴三反空间相机设计一个碳纤维复合材料框架,采用集成仿真优化设计的方法,研制成功了相机碳纤维框架,各项性能满足设计指标。任国瑞等^[8]根据光学设计中的公差分配,结合复合材料层合板理论和材料热膨胀的影响,研制了碳纤维复合材料主次镜连接筒,实现了高轻量化和高刚度。宋可心等^[9]采用基于碳纤维复合材料的高精密薄壁筒和桁架杆

组合式作为主次镜间的支撑结构,完成了相关优化设计和工程检验,并获取了干净锐利的卫星遥感图像。

现在微小型空间相机使用的光学系统大都为同轴光学系统,离轴光学系统具有成像幅宽、无遮拦等优点,但是由于装调困难,离轴光学系统应用较少,对微小型离轴光学系统相机主支撑研究较少。因此,微小型离轴三反式空间相机在保证高分辨率、高成像质量的前提下,如何设计一个整体式主支撑结构,使其结构紧凑、轻量化程度高,成为微小型空间相机设备研制中一个急需解决的问题。本文旨在使用碳纤维复合材料针对某微小型离轴三反式空间相机设计一种整体式主支撑结构,通过合适的优化方法,使其具有结构紧凑、高度轻量化的特性,并能满足空间相机各项设计指标和实际工程应用。

1 光学系统描述

本文中微小型空间相机在500 km轨道,针对可见光波段,实现分辨率优于0.9 m,地面覆盖14 km的对地遥感观测。综合考虑分辨率、视场、系统结构体积和重量等因素,保证最佳的传函,相机光学系统采用Rug-TMA离轴三反结构,通过孔径离轴以消除次镜遮拦,主次镜间隔和次三镜间隔相同,主次三镜光轴共轴,方便系统装调。光学系统包络尺寸为810 mm×285 mm×490 mm,焦距1 950 mm,视场1.66°。结构形式如图1所示,其中主镜为离轴非球面,次镜为凸双曲面,三镜为凹椭球面。孔径光阑位于主镜上,结构紧凑,像质接近衍射极限。

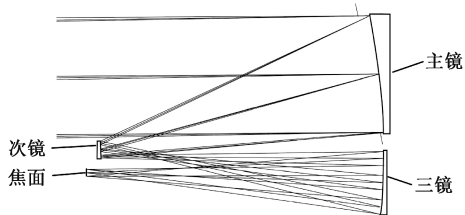


图1 离轴三反式光学系统

Fig. 1 Off-axis three-mirror reflective optical system

2 碳纤维整体式主框架结构设计

2.1 材料选型

为了保证微小型空间相机的支撑结构整体稳定性要求,选择材料时要充分考虑材料的弹性模量、比刚度、热稳定性以及加工工艺性等参数特性^[10]。高弹性模量、高比刚度、低密度和低热膨胀系数的材料,能够使相机具有良好的力热稳定性,并保持足够的轻量化水平,实现高品质遥感成像。在空间相机结构设计中经常用作结构材料的主要有铝合金、钛合金、殷钢、高体份SiC/Al复合材

料、碳纤维复合材料等,材料属性如表 1 所示。碳纤维复合材料具有高比强度、高模量、低密度、低热膨胀系数、良好的抗疲劳性和可设计性强等优点^[11],可以在实现高度轻量化设计的同时,也能满足结构刚度的需要。针对微小型空间相机结构紧凑、高稳定性的要求,碳纤维复合材料可以实现零件的一体成型制造,使其具有更好的整体稳定性。工程上常采用碳纤维预浸料进行铺层加工,得到碳纤维零件。根据实际需要选用牌号为 M55J 型高模量碳纤维材料,碳纤维预浸布单层厚度为 0.15 mm。

表 1 空间相机常用结构材料

Table 1 Common structural materials for the space camera

材料	铝合金	殷钢	钛合金	高体份 SiC/Al	M55J / 氰酸酯
弹性模量 E/GPa	71.00	141.00	114.00	180.00	138.00
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.80	8.90	4.44	3.00	1.60
比刚度 E/ρ	25.40	15.80	25.90	60.00	86.30
热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	142.00	13.70	7.40	225.00	-
线胀系数 $\alpha/(10^{-6}\cdot\text{K}^{-1})$	23.60	2.60	9.10	8.00	2.00
热稳定性 λ/α	6.00	5.30	0.81	28.10	-

2.2 碳纤维整体式主框架基本构型

空间相机主支撑结构需要具有足够的结构刚度、热稳定性、便于装调等设计要求,保证光学元件的位置公差在合理范围内。由于光学系统设计简洁,结构紧凑,外包络尺寸较小,使用碳纤维材料设计薄壁筒整体式框架结构作为空间相机的主支撑结构既能有足够的刚度给各组件提供支撑,也能为整机提供外部轮廓,与其他主支撑结构相比,能够减少设计冗余,减少误差累积,并且有利于离轴三反光学系统后期的装调工作。薄壁筒式框架外壳形状需考虑卫星预留的相机整机安装空间以及光路的外包络尺寸确定。根据光学设计可知,在离轴三反光学系统中主、三镜位于光学系统的一端,次镜位于距离主、三镜较远的另一端。相机采用焦面调焦的方式,即焦面和调焦系统相连,与次镜组件一同安装在连接板上。将主、三镜组件直接安装在镜室上,次镜组件与调焦系统通过连接板相连,将镜室与连接板安装在薄壁筒式框架两端的连接接口上。这样设计出的基础构型,满足基本的功能性指标,能够支撑各光学组件。

为了克服碳纤维层合板刚度不足,整体稳定性差的问题,使用加强筋进行整体性能加强设计。碳纤维 T 型筋条具有结构简单、质量轻、易制造等优点,适用于复杂的碳纤维零件。在薄壁筒式框架内侧使用 T 型加强筋进

行加强支撑,从而以较小的重量代价而获得较高的框架抗压缩和抗剪切能力,减少弯曲挠度。T 型筋分布按照外壳的形状,纵横交错均布于框架内侧,可以有效减少单向 T 型筋失稳的风险。同时在框架内部设置消杂光光阑。最终,碳纤维整体式主框架整体构型如图 2 所示。

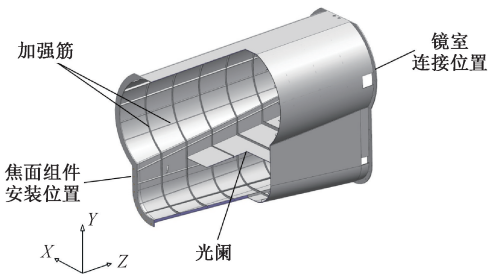


图 2 主框架基本构型

Fig. 2 Basic configuration of main frame

由于碳纤维表面精度难以达到连接精度的要求,为了保证连接精度,在两个端面连接位置使用了钛合金预埋件,通过螺钉将碳纤维框架与别的组件进行连接,如图 3 所示。

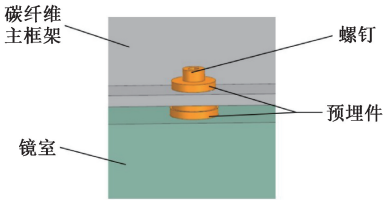


图 3 碳纤维预埋件

Fig. 3 Carbon fiber embedded parts

3 碳纤维整体式主框架铺层优化设计

3.1 铺层厚度参数化优化

研究发现以角度和顺序作为变量,模型会有非线性特性,因此先不考虑铺层顺序,以铺层厚度作为变量进行优化,然后进行铺层顺序的优化^[12-13]。参数优化是结构优化设计中常用的手段,对于薄壁形结构件,可以进行尺寸参数的优化,进而得到合理的壁厚。碳纤维结构件往往由于其铺层的不同,而表现出不同的性能。

碳纤维主框架采用了薄壁筒式结构,其内附加强筋,两端为组件连接区域。对主框架结构进行有限元建模,根据其结构特征将其划分成 4 个不同的铺层组,如图 4 所示。在实际工程中常用碳纤维铺层角度 45° 、 90° 、 -45° 、 0° 为主要的铺层角度进行设计制造,将各铺层组的层合板按照铺层角度 $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]$ 的方式铺设,因为层合板设置为对称,所以初始值为层合板各角度厚度

的 1/2,如表 2 所示。主框架结构初始的一阶固有频率为 165 Hz,质量为 9.2 kg,利用 Hyperstudy 软件进行参数优化,求解器调用 Optistruct 模块,来确定各层合板每个角度的厚度。

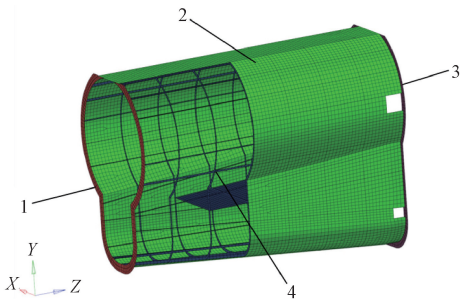


图 4 铺层组特征分区
Fig. 4 Ply group feature partition

表 2 铺层组分区分表

Table 2 Table of thickness range of laminate component area		
铺层组序号	铺层组名称	每个角度初始厚度/mm
1	焦面组件连接端面	0.75
2	筒壁	0.75
3	镜室连接端面	0.75
4	加强筋及光阑	0.75

由于空间相机在发射过程中会受到随机振动,以及在不同的热环境中,碳纤维热变形会导致整体结构变化,进而影响光学系统成像效果。参照以往项目经验,将每个角度层的铺设比例设为 0.2~0.4 之间,碳纤维结构件各向性能相对稳定。在碳纤维结构件设计中,为了减少拉剪耦合作用,±45°铺层需要满足对称均衡要求。

把每个铺层角度的厚度作为设计变量,共 16 个设计变量。使用质量最小作为设计目标。主框架结构的一阶频率大于 130 Hz;各角度铺层比例为 0.2~0.4;各层合板最小厚度大于 1 mm;保证 45°与-45°铺层均衡,使之厚度相等且为单层厚度的偶数倍,作为设计约束。数学描述为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min mass } (x_1, x_2, \dots, x_{16}) \\ \text{s. t. } Th_{i45} = Th_{i-45} \\ Th_i \geq 1 \\ 0.2 \leq P_{ij} = \frac{Th_{ij}}{Th_i} \leq 0.4 \\ F \geq 130 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_{16} \in [0, 0.75]$ 表示 16 个厚度变量; $i \in (1, 2, 3, 4)$ 表示 4 个区域的层合板; $j \in (45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ 表示 4 个铺层方向; Th_{ij} 表示每个层合板各个角度的

厚度; Th_i 表示每个层合板的厚度; P_{ij} 表示各角度厚度占各层合板厚度的比例; F 表示框架的一阶固有频率。

由于模型变量比较多,计算量较大。利用径向基函数拟合算法,将若干基函数进行线性叠加,对变量和输出响应量进行响应面拟合,得到近似模型。根据近似模型进行优化,将变量由连续变量改为离散变量,其取值范围为连续变量中 0.15 的倍数,这样处理就不需要后续对数据进行圆整。使用 Hyperstudy 中内置的遗传算法进行求解,其求解最小质量的迭代过程如图 5 所示,质量优化结果最终收敛为 4.5 kg。

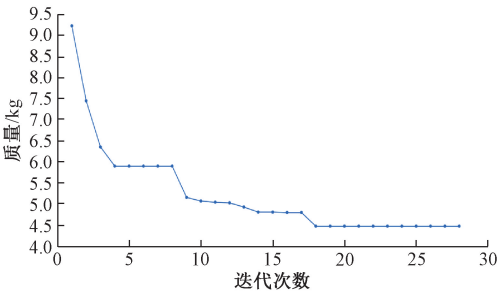


图 5 质量迭代图
Fig. 5 Quality iteration graph

经过每个层合板各角度铺层厚度的优化,优化迭代过程,如图 6 所示,优化结果收敛,得到每一铺层组角度的厚度, Th_i 表示每个层合板的厚度。按照每层 0.15 mm,计算出最终的层数以及每个层合板各角度的厚度,如表 3 所示。

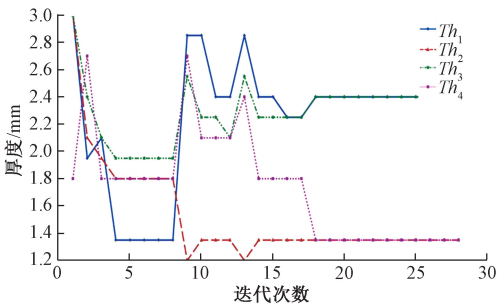


图 6 层合板厚度迭代图
Fig. 6 Iterative graph of laminate thickness

表 3 参数化优化结果

Table 3 Parameters optimization results						
铺层组	铺层厚度/mm					角度
	45°	90°	-45°	0°	总厚度	铺层比例
1	1.20	1.20	1.20	1.20	4.80	1:1:1:1
2	0.60	0.60	0.60	0.90	2.70	2:2:2:3
3	1.20	1.20	1.20	1.20	4.80	1:1:1:1
4	0.60	0.60	0.60	0.90	2.70	2:2:2:3

3.2 铺层顺序优化

碳纤维铺层顺序优化是用来确定各种角度铺层的最佳堆叠次序的。碳纤维复合材料零件制造过程复杂,有较多的工艺限制和要求。Optistruct 的复合材料顺序优化 (composite shuffle) 模块能够在考虑制造工艺的情况下进行铺层顺序优化。

考虑到实际的加工采用了一体成型的工艺,需要考虑碳纤维铺层区域的剪裁形状。主框架中存在的 T 型区域采用图 7 中铺层方式,即铺层组 L1、L2 构成一条边,铺层组 L1、L2、L3 共同构成另一条边。在主框架中,还存在十字纵横交错的加强筋与薄壁组成的加强筋薄壁结构,这种区域采用图 8 中的铺层方式,即 L4、L5、L6、L7、L8、L9 构成内薄壁和筋条,与外薄壁 L10 共同构成加强筋薄壁结构,实现一体制造。采用上述的铺层方式,T 型区域、加强筋与薄壁都能够紧密连接,能够提升结构的整体性^[14]。

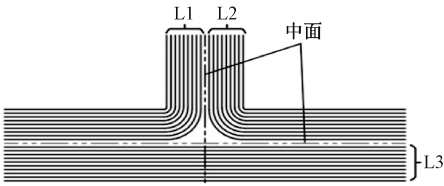


图 7 碳纤维 T 型区域一体加工示意图
Fig. 7 Schematic diagram of integrated processing of carbon fiber T-shaped area

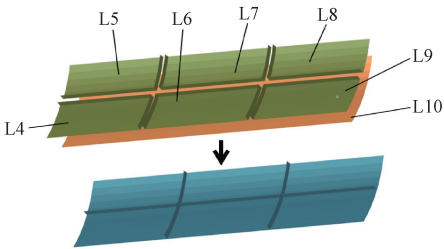


图 8 碳纤维加强筋薄壁结构一体加工示意图
Fig. 8 Schematic diagram of integrated processing of carbon fiber reinforced thin-walled structure

下面对碳纤维主框架铺层顺序优化前处理,进行详细的阐述。在碳纤维主框架中,两个连接端面与薄壁形成了 T 型连接,加强筋、光阑和薄壁形成了加强筋薄壁结构。为了满足实际制造要求,在铺层顺序优化时,需要考虑碳纤维预浸料的剪裁形状。如图 9 所示,其中 Sh1 为焦面连接端面,Sh2 为筒壁,Sh3 为镜室连接端面,Sh4 为加强筋及光阑。Sh2 和 Sh4 表示加强筋、光阑和筒壁,因为铺层厚度和角度比例都相同,且可以设置为对称,Sh2_1 和 Sh2_2 表示对称的两部分,Sh4_1 和 Sh4_2 同理。Sh2 和 Sh4 构成的加强筋薄壁结构具有相同的铺层,在铺层顺序优化时,可以看作一个优化变量。Sh1 较厚,

为了方便表示,将 Sh1 拆分为 5 组,Sh3 同理。Sh1_5 和 Sh2_1 应为连续的碳纤维预浸布,Sh1_4 和 Sh2_2 同理。在顺序优化时,Sh1 表面的铺层顺序应与 Sh2 相同,这样才能实现 T 型区域的制造。又因为对称设置,所以 Sh1_4、Sh1_5 和 Sh1_1 对称铺设,Sh1_2 和 Sh1_3 也应为对称设置。另一侧连接端面同理,这样整个主框架都能实现铺层对称且能满足 T 型区域和薄壁结构的加工要求。

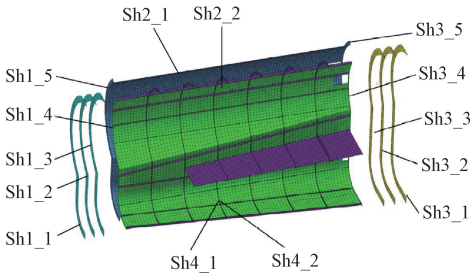


图 9 铺层设计简述
Fig. 9 Brief description of ply design

利用 Optistruct 模块的复合材料顺序优化方案,进行铺层顺序优化。设计变量为每个碳纤维层合板各角度铺层的顺序;由于碳纤维主框架的铺层尺寸都已经确定,铺层顺序优化优化对质量几乎没有影响,因此将优化目标设置为主框架的一阶固有频率最大;设计约束为 $\pm 45^\circ$ 铺层对称均衡,相邻的铺层角度重复不超过 4 层。

经过 4 次迭代,完成了碳纤维主框架的铺层顺序优化。为了方便表示层合板是对称铺设的,将铺层组分组按图 4 中的特征分组,最终铺层顺序优化结果如表 4 所示。优化前的一阶基频为 130 Hz,优化后基频为 133 Hz,并且铺层能够满足 T 型区域铺层加工的要求,能够实现碳纤维主框架的一体加工制造。

表 4 铺层顺序优化结果
Table 4 Laying sequence optimization results

铺层组	优化铺层方案
1	[45°/90°/0°/90°/-45°/45°/0°/-45°/0°/90°/45°/-45°/90°/45°/-45°/0°] _s
2	[45°/90°/0°/90°/-45°/45°/0°/-45°/0°] _s
3	[45°/90°/0°/90°/-45°/45°/0°/-45°/0°/90°/45°/-45°/90°/45°/-45°/0°] _s
4	[45°/90°/0°/90°/-45°/45°/0°/-45°/0°] _s

4 仿真分析与试验验证

4.1 仿真分析

为了验证设计是否满足要求,需要进行工程分析。采用有限元方法对空间相机整机进行工程仿真分析,检

验各方面设计是否达到设计指标。根据优化结果和其余各组件的设计,建立整机有限元模型,如图10所示。其中,为了计算方便,使用质量点来代替调焦组件。

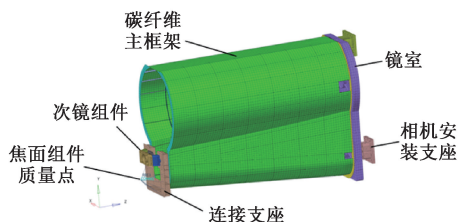


图10 整机有限元模型

Fig. 10 The finite element model of the camera

模态分析是空间相机动力学分析中常用的分析方法之一。主要是用来计算相机系统的固有频率、阻尼和振型等,分析结构的动态刚度和振动特性,避免受到复杂的动力学环境的影响^[15]。为了不和卫星平台发生共振,要求整机基频大于60 Hz。根据有限元动力学分析,可知相机整机基频为81 Hz,一阶模态分析结果如图11所示。

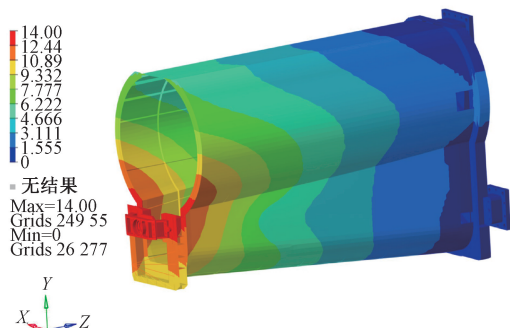


图11 整机一阶固有频率

Fig. 11 First-order natural frequency of the camera

空间相机在地面制造装调时,会受到1 g重力环境的影响。在轨运行时,重力释放,这种重力环境的变化会给相机各个组件发生微小位移和镜面的面形畸变^[16]。为了检验相机结构抵抗重力环境变化的能力,需要进行静力学分析。空间相机在Y向1 g重力工况下的静力学分析结构如图12所示,最大位移量为0.028 mm,碳纤维主框架的静态结构刚度满足成像需要。

4.2 试验验证

根据上述碳纤维整体式主框架的优化设计方案,最终完成了碳纤维主框架的研制并进行了动力学试验,试验设置如图13所示。在相机上安装了两个传感器,传感器1安装点位于碳纤维主框架的上端,传感器2安装点为相机的主镜侧壁上。

扫频试验范围为10~2 000 Hz,扫描率为4 oct/min,

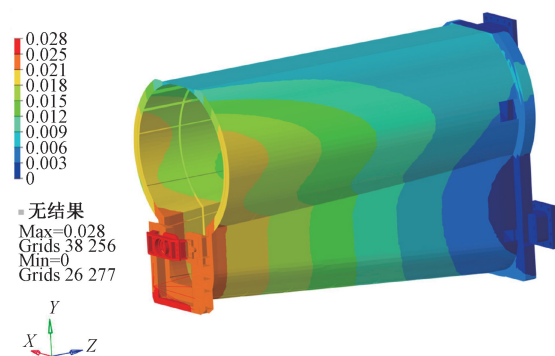


图12 Y向重力静力学分析结果

Fig. 12 Y-direction gravitational statics analysis results

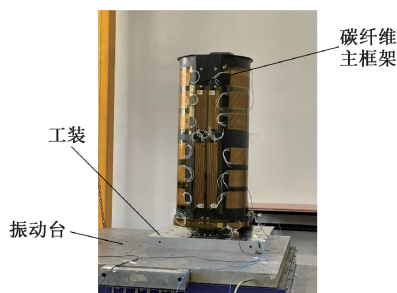


图13 试验装置

Fig. 13 Test device

相机Y向扫频振动试验结果如图14所示。相机的一阶固有频率为78 Hz,与仿真结果81 Hz吻合,仿真误差为3.7%。验证了优化设计结果和有限元分析的可靠性,说明碳纤维主框架结构具有足够的刚度,能达到预期的设计要求。

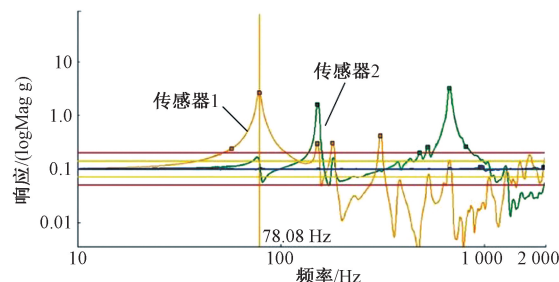


图14 Y向扫频试验结果

Fig. 14 Y-direction frequency sweep test results

5 结论

本文针对某微型空间相机体积小、质量轻的设计要求,通过选材轻和多层次优化两方面,同时考虑碳纤维结构件设计要求和制造工艺,设计了整体式的碳纤维主框架,在保证其刚度的同时,获得较高程度的轻量化水

平。本课题研制的碳纤维主框架具有框架一体成型、结构整体性高的特点,避免了框架零件多和装配所带来的误差累积,同时通过碳纤维铺层优化,达到了比较高程度的轻量化,最终质量为 4.5 kg。经过试验验证,相机整体的一阶固有频率为 78 Hz,仿真误差为 3.7%。最终,碳纤维整体式主框架满足各项设计要求,能够应用于实际工程中。

参考文献

- [1] 傅丹膺,满益云,李瀛搏,等. 微纳卫星光学有效载荷的发展机遇与挑战[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 64-69.
- FU D Y, MAN Y Y, LI Y B, et al. The opportunities and challenges in optical payload of micro-nano satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(4): 64-69.
- [2] 李健全,王倩莹,张思睨,等. 国外对地观测微纳卫星发展趋势分析[J]. 航天器工程, 2020, 29(4): 126-132.
- LI J Q, WANG Q Y, ZHANG S X, et al. Analysis on development trends of foreign country's micro-nano satellites in earth observation [J]. Spacecraft Engineering, 2020, 29(4): 126-132.
- [3] 王泰雷,张雷,贾学志,等. 微纳遥感相机一体式超轻主支撑结构优化设计[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 417-424.
- WANG T L, ZHANG L, JIA X ZH, et al. Optimized design of integrated ultra-light main supporting structure for micro-nano remote-sensing camera [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 417-424.
- [4] 宋伟阳,解鹏,王循. 大型空间离轴三反相机分体支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2021, 29(3): 571-581.
- SONG W Y, XIE P, WANG X. Design of lightweight split support structure for large space off-axis three mirror camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(3): 571-581.
- [5] LYON R G, DORBAND J E, HOLLIS J M. Hubble space telescope faint object camera calculated point-spread function [J]. Appl Optics, 1997, 36(8): 1752-1765.
- [6] BLECHA L, ZINDEL D, COTTARD H, et al. Analytical optimization and test validation of the sub-micron dimensional stability of the CHEOPS space telescope's CFRP structure [C]. Proc of SPIE, 2016, V. 9912: 99121G.
- [7] 杨帅,沙巍,陈长征,等. 空间相机碳纤维框架的设计与优化[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 697-705.
- YANG SH, SHA W, CHEN CH ZH, et al. Design and optimization of carbon fiber framework for space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(3): 697-705.
- [8] 任国瑞,李创,王炜,等. 空间相机碳纤维复合材料主次镜连接筒设计[J]. 光子学报, 2019, 48(8): 150-159.
- REN G R, LI CH, WANG W, et al. Structural design of carbon fiber-reinforced plastics barrel for space remote sensing camera[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 48(8): 150-159.
- [9] 宋可心,张雷,贾学志,等. 吉林一号轻型高分辨空间相机碳纤维桁架支撑技术[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 143-148.
- SONG K X, ZHANG L, JIA X ZH, et al. Structure design on the carbon fiber truss of JL-1 light high resolution space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 143-148.
- [10] 李畅,何欣,刘强. 高体份 SiC/Al 复合材料空间相机框架的拓扑优化设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2526-2530.
- LI CH, HE X, LIU Q. Design and topology optimization of space camera frame fabricated by high volume fraction SiC/Al composite material [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8): 2526-2530.
- [11] 王浩攀,高令飞,李学林. 碳纤维材料在我国卫星制造领域的应用及国产化需求[J]. 化工新型材料, 2020, 48(9): 20-23.
- WANG H P, GAO L F, LI X L. Application of carbon fiber composites to satellite manufacturing fields and demand for localization [J]. New Chemical Materials, 2020, 48(9): 20-23.
- [12] GHIASI H, PASINI D, LESSARD L. Optimum stacking sequence design of composite materials Part I: Constant stiffness design [J]. Composite Structures, 2009, 90(1): 1-11.

- [13] 印立, 徐中明, 马媛媛, 等. 复合材料控制臂的多区域铺层结构优化[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(2): 305-312.
- YIN L, XU ZH M, MA Y Y, et al. Optimization of multi-area layup structure for composite control arm [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(2): 305-312.
- [14] 姜志平, 刘明辉, 吕召燕, 等. 考虑一体成型固化工艺的复合材料加筋壁板优化设计[J]. 飞机设计, 2019, 39(3): 39-42.
- JIANG ZH P, LIU M H, LYU ZH Y, et al. Optimum design of stiffened composite panel considering integrated molding curing process [J]. Aircraft Design, 2019, 39(3): 39-42.
- [15] 刘奉昌, 李威, 董吉洪, 等. 深空探测相机超轻主支撑结构优化设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 217-224.
- LIU F CH, LI W, DONG J H, et al. Optimization design of the ultra-light main supporting structure of deep space detection camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 217-224.
- [16] 董得义, 李志来, 薛栋林, 等. 重力对空间相机系统波像差影响的光机集成分析与验证[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1917-1926.
- DONG D Y, LI ZH L, XUE D L, et al. Integrated optomechanical analysis and experiments for influence of

gravity on wavefront aberration of space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1917-1926.

作者简介



曹明辉, 2018年于潍坊学院获得学士学位, 现为中国科学院大学硕士研究生, 主要研究方向为空间相机光机结构优化设计。
E-mail: icaominghui@163.com

Cao Minghui received his B.Sc. degree from Weifang University in 2018. He is currently a master student at University of Chinese Academy of Sciences. His main research interests include optimal design of opto-mechanical structure of space camera.



陈长征 (通信作者), 2000年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2007年于中国科学院大学获得博士学位, 现为长春光学精密机械与物理研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间光学遥感器总体设计。

E-mail: chencz@ciomp.ac.cn

Chen Changzheng (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2000, and received his Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2007. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at CIOMP. His main research interest is the integrated design of space optical remote sensors.