

# 一体式碳纤维次镜支撑结构设计

王升, 丛杉珊\*, 薛志鹏, 张雷

长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130031

**摘要** 针对吉林一号某轻型空间遥感相机的任务需求,以碳纤维复合材料的薄壁筒与桁架杆一体式成型为设计思路,基于拓扑优化、尺寸优化以及铺层优化设计了一种高稳定性的次镜支撑结构。工程分析和实验结果表明一体式碳纤维次镜支撑结构具有较好的结构稳定性,整体质量仅为 1.3 kg,其在轨成像质量良好,这进一步验证了一体式碳纤维次镜支撑结构的可靠性和设计方法的正确性。

**关键词** 遥感; 碳纤维复合材料; 支撑结构; 稳定性

中图分类号 V477.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0522001

## Design of Integrated Carbon Fiber Secondary Mirror Supporting Structure

Wang Sheng, Cong Shanshan\*, Xue Zhipeng, Zhang Lei

Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130031, China

**Abstract** According to the task requirements on a light space remote-sensing camera of Jilin-1 satellite, a high-stability secondary mirror supporting structure was designed. For this purpose, integrated molding of the thin-walled cylinder and truss rod made of carbon fiber reinforced polymer composites was adopted as the design idea. And topology optimization, size optimization, and layer optimization were employed to design a secondary mirror supporting structure with high stability. The results of engineering analysis and tests show that the integrated carbon fiber secondary mirror supporting structure has favorable structural stability, with a mass of 1.3 kg. The on-orbit imaging performance of the space camera is great, which further verifies the reliability of the proposed supporting structure and the correctness of the design method.

**Key words** remote sensing; carbon fiber composites; supporting structure; stability

## 1 引言

近年来,随着空间遥感载荷技术的快速发展和进步,高空间分辨率和高时间分辨率的卫星星座成为了目前国内外光学遥感技术发展的主要方向和目标,以商业航天为发展契机,以低成本、低功耗、小质量、高分辨率为设计理念,以“吉林一号”商业卫星星座为代表的新型轻质高分辨率遥感卫星工程逐步涌现出来<sup>[1]</sup>。

空间相机作为光学遥感卫星的重要载荷,在卫星体积占比较大、在保证其具有较高稳定性的同时,相

机结构的轻量化也十分必要。同轴反射式光学系统相比于离轴反射式光学系统结构简单,因此在微型空间遥感相机中得到了广泛应用,次镜支撑结构作为同轴反射式空间相机的重要组成部分之一,其质量占相机整体质量的比重很大。次镜支撑主要用于固定次镜,保证其相对于主镜的位置精度,二者之间的定位准确度直接关系到相机的成像质量,因此,对次镜支撑结构进行高稳定和轻量化设计具有非常重要的意义。

碳纤维复合材料(CRFP)因其具有密度小、比刚度高、线膨胀系数小等性能,更加符合目前实际应用中对于空间遥感相机的高结构稳定性和小质量等方

收稿日期: 2021-07-29; 修回日期: 2021-09-05; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500904)、吉林省科技发展计划项目(20200401011GX)

通信作者: \*21390266@qq.com

面的要求,因此近年来在空间相机主支撑结构设计中得到了广泛应用,如美国著名的哈勃望远镜(HST)的次镜支撑结构、日本的 ALOS-3 卫星主光学载荷、国内某企业研制的长焦距离轴三反相机的主支撑结构均应用了碳纤维材料<sup>[2-7]</sup>。

目前国内采用的碳纤维桁架杆-薄壁筒组合式结构基本都是采用钛合金预埋件将桁架杆和薄壁筒连接起来,如李凯等设计的一种碳纤维桁架杆与薄壁筒组合的次镜支撑结构,以及王凯等设计的碳纤维桁架杆支撑。这种连接方式的缺点在于组合加工难度大、桁架杆采用回字形结构形式,以及遮拦比较大影响系统的调制传递函数(MTF)。

本文从任务需求为出发点,利用现有的一体式碳纤维材料成型工艺,对次镜支撑结构进行了一体化设计,通过拓扑优化、尺寸优化、铺层优化进行次镜支撑结构的优化分析,最后进行了整机的振动、静力以及热稳定性实验,以验证该结构的各项性能满足设计指标要求。

## 2 光学系统和材料选择

### 2.1 光学系统和系统公差要求

本文针对“吉林一号”卫星星座某超轻型、高分

辨率遥感相机光学系统展开研究,该相机在 535 km 轨道上进行推扫成像,能够获取优于 1 m 分辨率、幅宽大于 17 km 的全色遥感图像。该相机采用的同轴三反式光学系统如图 1 所示,其中 M1、M2、M3、M4、M5 分别代表主镜、次镜、折叠镜、三镜以及调焦镜,主、次镜系统类似于传统的 Ritchey-Chretien 系统,成像视场较小但体积紧凑,是高分辨相机常用的系统形式。该光学系统的通光口径为 266 mm,主次镜间距为 397.8 mm,光学系统公差要求如表 1 所示,其中  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的刚体偏心,  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的扭转角, Datum 代表基准。

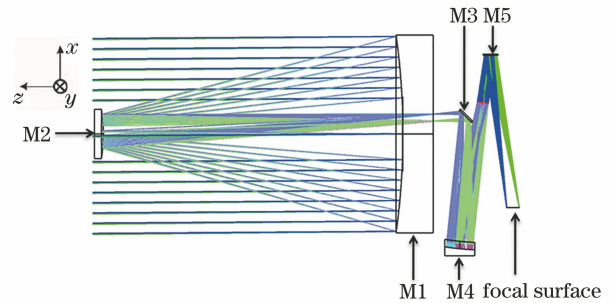


图 1 光学系统分布

Fig. 1 Layout of optical system

表 1 光学系统公差

Table 1 Tolerance of optical system

Mirror	Eccentric value			Tilt		
	$\Delta x / \mu\text{m}$	$\Delta y / \mu\text{m}$	$\Delta z / \mu\text{m}$	$\theta_x / (")$	$\theta_y / (")$	$\theta_z / (")$
Primary mirror	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum
Secondary mirror	10	10	10	10	10	—

### 2.2 材料的选择

目前应用于空间相机次镜的支撑材料主要包括钛合金(TC4)、铝合金(2A12 等)、高体份(SiCp/Al)、钢(Invar)、碳纤维复合材料(M40)等,材料属性如表 2 所示。在选取材料过程中要综合考虑材料比刚度、线膨胀系数、加工工艺等方面。此同轴三

反式光学系统的次镜位移放大倍率较高,受温度影响较大,所以选择线膨胀系数较小的碳纤维复合材料和钢,碳纤维材料相对于钢的比刚度较高,有利于满足相机的轻量化需求,另外随着技术的发展,碳纤维的加工工艺也逐渐成熟,综合考虑选取碳纤维复合材料作为空间相机次镜支撑结构材料。

表 2 常用空间相机支撑结构材料

Table 2 Supporting structure materials of space camera in common use

Material	Density $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Elastic modulus	Specific stiffness	Thermal expansion coefficient /
		$E / \text{GPa}$		$(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
TC4	4.40	114	25.90	9.10
2A12	2.78	70	25.18	22.70
SiC/Al (55%)	2.94	180	61.20	8.00
Invar	8.10	141	17.40	0.05-7.50
M40	1.60	72	45.00	0.60

### 3 次镜支撑结构优化设计

#### 3.1 拓扑优化设计

空间相机次镜支撑结构优化通常需要综合考虑结构刚度和质量因素。国内某些学者采用单目标拓扑优化方法<sup>[8-10]</sup>,以单方向刚度最大为目标分别对  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向进行三次拓扑优化处理,根据三个方向的优化结果抽象出具体的结构形式,所得结果并不能达到最佳效果。本研究设计以线性加权的方式将上述的三个方向变量关联起来以进行拓扑优化分析,进而避免由单目标优化方法带来的设计上的缺陷。

##### 3.1.1 数学模型

多目标优化方法主要将各个优化目标所占比重进行合理的分配,利用线性加权的方式将多个优化目标转换为单目标进行优化处理。多目标的数学模型为

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \mathbf{F}(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{G}(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_z(x)]^T \leq 0 \\ \mathbf{H}(x) = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_z(x)]^T = 0 \end{cases} \\ & \quad \mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $n$  为变量个数; $m$  为目标向量个数; $z$  为不同约束函数的个数; $\mathbf{G}(x)$ 、 $\mathbf{H}(x)$  分别为不等式约束向量与等式约束向量; $f_m(x)$  为目标函数; $g_z(x)$  和  $h_z(x)$  为不同的约束函数<sup>[11]</sup>;设计变量  $\mathbf{X} \in \mathcal{R}^n$ ;目标向量  $\mathbf{F}(x) \in \mathcal{R}^m$ ;  $\mathcal{R}$  为实数域。

空间遥感相机的次镜支撑结构应该综合考虑三个方向的稳定性,因此,本文所研究的问题属于一个多目标优化问题,在设计过程中应以三个方向的刚度最大为目标,以质量和次镜三个方向的位移为约束,建立拓扑优化数学模型。

目标函数为

$$\text{Minimize: } C_s = \gamma C_x + \eta C_y + \kappa C_z, \quad (2)$$

式中: $C_s$  表示加权后结构优化的目标函数; $C_x$ 、 $C_y$  和  $C_z$  分别为整机在重力工况下  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的柔度; $\gamma$ 、 $\eta$ 、 $\kappa$  分别为三个方向的加权因子( $\gamma = \eta = \kappa = 0.33$ )。约束条件为

$$\begin{cases} m' \leq M \\ dx \leq 0.01 \text{ mm} \\ dy \leq 0.01 \text{ mm} \\ dz \leq 0.01 \text{ mm} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $m'$  为结构总质量, $M$  为结构优化的质量约束上限,单位为 kg; $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  表示次镜沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的位移。

柔度为刚度的倒数,目标函数加权刚度最大即柔度加权最小。优化模型中的材料为碳纤维复合材料(M40),按照各向同性铺层将其等效为各向同性材料,其材料参数如表 2 所示。

##### 3.1.2 优化过程

根据光学元件安装位置以及空间包络要求,建立次镜支撑结构的拓扑优化有限元模型,如图 2 所示。次镜支撑结构的拓扑优化有限元模型分为两个部分,分别是优化部分和非优化部分。次镜组件以质量点的形式连接在次镜支撑结构上。

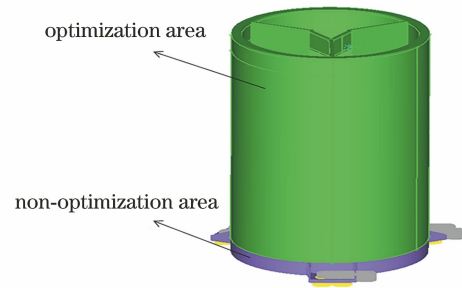


图 2 拓扑优化有限元模型

Fig. 2 Finite element model for topology optimization

有限元模型经过了 26 轮迭代计算,最终收敛。图 3 为次镜支撑结构的拓扑优化单元密度分布云图。密度从 0 到 1 显示,密度越接近 1,代表该部分结构越重要,可以根据实际设计进行保留;密度越接近 0,代表该部分越不重要,可以根据实际设计适当去除。从图 3 中可以看出材料分布基本保持连续,其中较为重要的颜色区域需要保留,主要包括次镜、三根桁架杆、底部筒身,以及连接筒身和桁架杆的三个三角加强肋板,其余颜色区域相对不重要,可以适当去除或者进行轻量化处理。最终根据图 3 所示的优化结构形式,抽象出实际的次镜支撑结构形式,如图 4 所示。

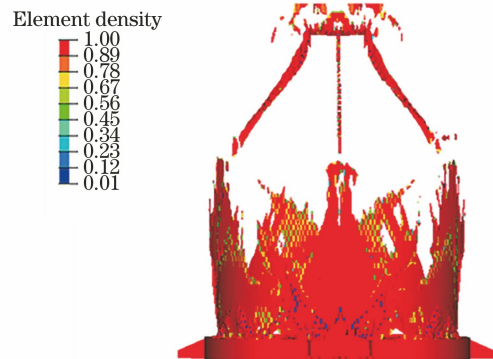


图 3 拓扑优化后结构单元密度分布

Fig. 3 Cell density distribution of structure after topology optimization

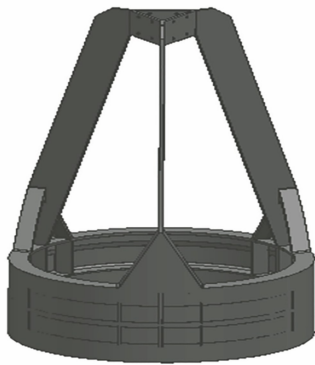


图 4 一体式次镜支撑结构

Fig. 4 Integrated second mirror supporting structure

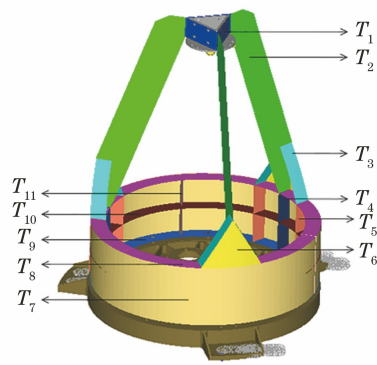


图 5 尺寸优化有限元模型

Fig. 5 Finite element model for size optimization

### 3.2 尺寸优化

#### 3.2.1 数学模型

本文 3.1 节通过拓扑优化找到了次镜支撑结构的最佳材料分布,对次镜支撑结构进行了基本构型分析。虽然该次镜支撑结构满足了质量要求,但是次镜支撑结构的各个尺寸位置并没有达到最佳尺寸配比,所以为了在现有结构形式下更加合理地分配三个方向的刚度,以次镜支撑结构的三个方向刚度最大为设计目标,以质量和次镜三个方向的位移为约束,将结构划分为 11 个设计区域,建立尺寸优化的数学模型。

Minimize  $C_s$

$$s. t. \begin{cases} 1.5 \text{ mm} \leq T_i \leq 6 \text{ mm} \quad (i = 1, 2, \dots, 11) \\ m' \leq M_c \\ dx \leq 0.01 \text{ mm} \\ dy \leq 0.01 \text{ mm} \\ dz \leq 0.01 \text{ mm} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $C_s$  表示加权后结构优化的目标函数; $T_1, T_2, \dots, T_{11}$  分别代表次镜支撑结构各设计位置的厚度; $M_c$  为次镜支撑结构的质量要求上限。

#### 3.2.2 优化过程

根据 3D 模型建立次镜支撑结构的有限元模型,图 5 中用质量点来代替次镜组件,设计变量为次镜支撑各位置的厚度。

在经过 14 轮迭代优化后,模型优化结果趋于收敛,图 6 为优化后次镜支撑各组成部分的尺寸配比,具体结果如表 3 所示,仿真结果为非整数,根据实际优化结果进行合理取值,得到最终设计尺寸。

### 3.3 铺层优化

碳纤维复合材料的材料属性与其具体的铺层方

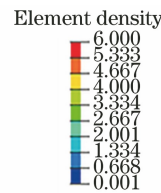


图 6 优化后尺寸分布

Fig. 6 Optimized size distribution

表 3 次镜支撑结构尺寸

Table 3 Sizes of second mirror supporting structure

Design variable	Variation range	Optimization value	Design value
$T_1$	[1.5, 6]	1.82	2
$T_2$	[1.5, 6]	3.75	4
$T_3$	[1.5, 6]	2.05	2
$T_4$	[1.5, 6]	3.92	4
$T_5$	[1.5, 6]	1.60	2
$T_6$	[1.5, 6]	2.07	2
$T_7$	[1.5, 6]	1.50	1.5
$T_8$	[1.5, 6]	4.03	4
$T_9$	[1.5, 6]	6.00	6
$T_{10}$	[1.5, 6]	1.54	1.6
$T_{11}$	[1.5, 6]	1.71	2

式息息相关,可以根据具体的结构特点和使用需求进行铺层设计。根据空间相机桁架杆式次镜支撑结构的变弯曲载荷为拉压载荷,沿杆方向刚度应大于垂杆方向刚度,因此在桁架杆铺层优化设计过程中,沿杆方向的弹性模量也应该大于垂杆方向的弹性模量。

本文所设计的桁架杆结构选用高模纤维 M40,碳纤维复合材料中的单板材料的参数如表 4 所示,

其中  $E_x$ 、 $E_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向的弹性模量,  $G_{xz}$ 、 $G_{yz}$ 、 $G_{xy}$  分别为  $xz$  平面、 $yz$  平面、 $xy$  平面的剪切模量,  $A_x$ 、 $A_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向的线膨胀

系数。定义沿板方向为  $x$  方向( $0^\circ$ ), 垂板方向为  $y$  方向( $90^\circ$ )。选取常用的  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $90^\circ$  铺层方式进行交错铺层优化。

表 4 M40 单板材料参数

Table 4 M40 single-plate material parameters

$r / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E_x / \text{GPa}$	$E_y / \text{GPa}$	$G_{xz} / \text{GPa}$	$G_{yz} / \text{GPa}$	$G_{xy} / \text{GPa}$	$A_x / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$A_y / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$\mu$
1.7	200	7	4.5	4.5	4.5	-0.58	23.2	0.28

### 3.3.1 数学模型

经尺寸优化后桁架杆的厚度已定, 为 4 mm, 进行  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $90^\circ$  4 种角度的厚度配比的优化, 桁架杆的轴向弹性模量大小直接影响桁架杆沿重力方向的位移, 即次镜沿重力方向的偏心大小。以次镜(质量点)沿  $x$  轴方向的位移最小为设计目标、质量为约束、4 种铺层角度的厚度为设计变量, 建立数学模型。

目标函数为

$$\text{Minimize}(dx), \quad (5)$$

约束条件为

$$\begin{cases} 0.1 \text{ mm} \leq T_j \leq 2 \text{ mm} (j = 0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ) \\ T_{45^\circ} = T_{-45^\circ} \\ m = M \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $T_{0^\circ}$ 、 $T_{45^\circ}$ 、 $T_{-45^\circ}$ 、 $T_{90^\circ}$  分别为不同铺层角度的设计变量。

表 6 桁架杆材料参数

Table 6 Material parameters of truss

$r / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E_x / \text{GPa}$	$E_y / \text{GPa}$	$G_{xz} / \text{GPa}$	$G_{yz} / \text{GPa}$	$G_{xy} / \text{GPa}$	$A_x / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$A_y / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$\mu$
1.7	113	35.2	25.3	4.5	4.5	-0.61	9.77	0.28

## 4 次镜支撑结构有限元分析

为了验证优化结果的正确性和合理性, 对整机进行有限元建模, 分别进行了模态分析和静力学分析。

### 4.1 模态分析

通过模态分析能够计算得到结构的固有频率和振型, 二者是评估结构的力学性能和考察结构的动态刚度的重要参考。通过计算得到次镜支撑结构的一阶固有频率为 141 Hz, 振型为桁架杆绕着光轴的扭转, 该结构的抗低频正弦性能较好, 如图 7 所示。次镜支撑结构在垂直光轴方向的固有频率为第二阶和第三阶固有频率, 振型为沿着  $x$  轴和  $y$  轴方向的平动, 频率分别为 252.2 Hz 和 252.5 Hz, 这间接说

### 3.3.2 优化过程

根据 3.2 节中次镜支撑的最终尺寸分布, 桁架杆的厚度为 4 mm, 采用厚度为 0.1 mm 的 M40 单板复合材料进行铺放, 共铺设 40 层。模型在经过 24 轮迭代优化后, 优化结果趋于收敛, 结合优化结果和实际实施工艺最终确定桁架杆各角度的铺层层数, 经整理得到的优化结果如表 5 所示, 进行合理取值后得到桁架杆最终的材料属性参数如表 6 所示。

表 5 次镜支撑结构铺层优化结果

Table 5 Optimization results of lay-up of second mirror supporting structure mm

Material	Variation range	Optimization value	Design value
$T_{0^\circ}$	[0.1, 2]	2	2
$T_{45^\circ}$	[0.1, 2]	0.935	0.9
$T_{-45^\circ}$	[0.1, 2]	0.935	0.9
$T_{90^\circ}$	[0.1, 2]	0.13	0.2

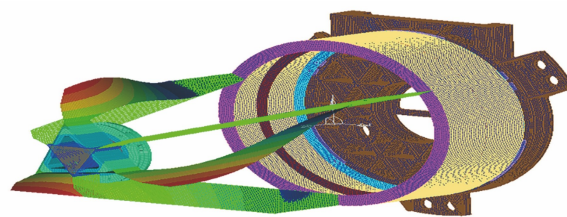


图 7 桁架杆的一阶振型

Fig. 7 First order vibration shape of truss

明其抗视轴抖动性能优异。

### 4.2 静力学分析

由于空间相机在地面装调、检测以及成像过程中受重力的作用, 次镜相对主镜存在一定的偏心 and 转角。为了验证该次镜支撑结构是否满足静力学指标, 对整机进行有限元建模和分析, 结果表

明  $x$  方向重力工况下次镜支撑结构相对主镜的偏心为  $2.5 \mu\text{m}$ , 次镜沿  $y$  轴方向的转角为  $2.78''$ , 这满足光学系统设计指标要求, 证明了该次镜支撑

结构能够在后续的相机装调、检测以及成像过程中有效地克服重力对系统的影响。表 7 为静力学分析结果。

表 7 静力学分析结果

Table 7 Results of statics analysis

Mirror	Eccentric			Tilt		
	$\Delta x / \mu\text{m}$	$\Delta y / \mu\text{m}$	$\Delta z / \mu\text{m}$	$\theta_x / (")$	$\theta_y / (")$	$\theta_z / (")$
Primary mirror	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum	Datum
Secondary mirror	2.5	0.07	—	0.01	2.78	—

## 5 实验验证

### 5.1 动力学验证

图 8 为空间相机力学振动实验现场, 传感器安装在次镜模拟镜的表面, 对实验对象在三个方向分别进行了扫频、正弦振动以及随机振动实验。根据有限元分析, 该次镜支撑结构的前两阶固有频率均在  $x$  方向(重力方向), 所以以  $x$  方向为参考进行实验

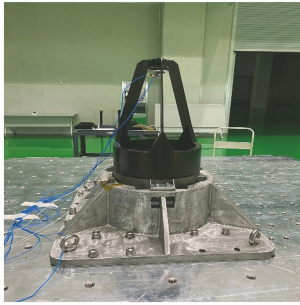


图 8 振动实验现场

Fig. 8 In-site vibration experiment

结果分析。 $x$  方向实验结果如图 9 和表 8 所示。实验结果表明, 次镜支撑结构的一阶固有频率和二阶固有频率分别为  $142.35 \text{ Hz}$  和  $254.18 \text{ Hz}$ , 与仿真结果的偏差分别为  $0.9\%$  和  $0.8\%$ , 正弦振动实验和随机振动实验前后固有频率偏差小于  $0.6\%$ , 这证明了有限元分析结果的准确性和该结构较好的力学稳定性。

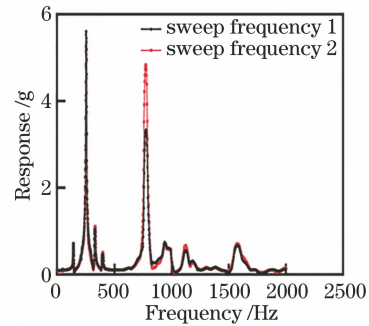


图 9 正弦扫频实验数据

Fig. 9 Experimental data of sine-frequency sweep

表 8 固有频率的对比

Table 8 Comparison of intrinsic frequency

Mode	Intrinsic frequency for analysis /Hz	Intrinsic frequency before vibration /Hz	Intrinsic frequency after vibration /Hz	Error 1 /%	Error 2 /%
Mode 1	141	142.35	142.35	0.9	0
Mode 2	252.2	254.18	252.87	0.8	0.6

### 5.2 静力学验证

目前, 国内的技术还无法实现在地面模拟无重力测试, 所以本次静力学实验根据翻转实验原理, 应用经纬仪测量空间相机在重力状态下次镜相对主镜的转角变化。其基本原理是在次镜和主镜镜面上各粘接一个立方棱镜, 二者分别代表次镜和主镜的空间位置, 应用经纬仪测量相机重力方向下次镜棱镜相对主镜棱镜的倾斜角度  $\theta_1$ , 相机翻转  $180^\circ$  后次镜棱镜相对于主镜棱镜的倾斜角度为  $\theta_2$ , 此状态等效于空间相机受到了两倍重力的影响, 因此重力影响下空间相机主次镜的倾斜角度  $\Delta\theta$  可以近似为

$$\Delta\theta = \left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right|. \quad (7)$$

根据上述原理, 搭建了如图 10 所示的相机静力学实验检测平台, 棱镜 1 安装在次镜表面, 棱镜 2 安装在背板上, 代表主镜。

表 9 为相机在重力工况和温度工况下的稳定性检测数据, 重力工况下次镜相对于主镜在重力方向的转角为  $3''$ , 在光学设计公差要求范围内, 该值与计算仿真结果的偏差仅为  $7.9\%$ 。温度实验后次镜相对于主镜重力方向的转角为  $3.31''$ , 实验前后转角相差仅为  $0.31''$ 。结果表明该次镜支撑结构具有较高的结构稳定性, 热环境适应能力较好。

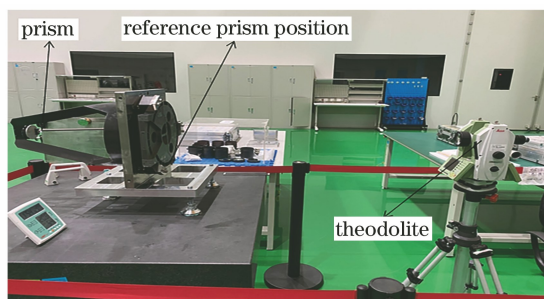


图 10 静力学实验现场

Fig. 10 *In-site* statics experiment

表 9 静力学实验结果

Table 9 Results of *in-site* statics experiment (")

Angle of pitch	Optical tolerance	Tilt angle for analysis	Tilt angle for gravity load	Tilt angle for thermal load
$\theta_x$	10	2.78	3	3.31

## 6 结 论

从“吉林一号”某型号空间相机实际应用的角度出发,设计并研制了一种轻型、高稳定性的一体式碳纤维次镜支撑结构。建立了以三个方向刚度线性加权为目标的拓扑优化数学模型,通过优化计算得到次镜支撑结构的最佳传力路径,结合实际加工工艺和应用建立次镜支撑结构模型;同样以三个方向的刚度线性加权为目标优化得到结构各组成部分的尺寸配比;针对次镜支撑较为关键的杆部进行铺层优化,以次镜重力方向位移最小为优化目标,通过优化得到最佳铺层方式和配比。设计完成后对整机进行了有限元分析,分析结果表明,一阶基频为 141 Hz,重力载荷作用下次镜相对于主镜的偏心和倾斜角分别为  $2.5 \mu\text{m}$  和  $2.78''$ ,二者均满足设计指标要求。最后通过实验验证表明,该次镜支撑结构的基频为 142.35 Hz,与分析结果的偏差仅为 0.9%,次镜相对于主镜的倾斜角为  $3''$ ,与分析结果的偏差仅为 7.9%,温度实验前后次镜相对于主镜的倾斜偏差仅为  $0.31''$ 。

通过次镜结构一体化设计结合相关工程分析和实验验证,可得一体式碳纤维次镜支撑结构具有较高的结构稳定性,结构整体质量仅为 1.3 kg,一阶基频为 142.35 Hz,这符合卫星平台对相机载荷的要求,验证了结构拓扑优化、尺寸优化、铺层优化方法的正确性和合理性。该设计方法对空间载荷反射镜支撑结构的设计具有借鉴意义。该次镜支撑结构已经成功应用于“吉林一号”空间相机,在轨成像良好。

## 参 考 文 献

- [1] Song K X, Zhang L, Jia X Z, et al. Carbon fiber truss support technology for JL-1 light high resolution space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2122002.  
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): 2122002.
- [2] Zhang L, Yao J S, Jia X Z, et al. Development of trusses made of carbon fiber composites for coaxial space remote sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 1967-1973.  
张雷, 姚劲松, 贾学志, 等. 同轴空间相机碳纤维复合材料桁架结构的研制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1967-1973.
- [3] Li W, Guo Q F. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(3): 201-212.  
李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 201-212.
- [4] Franssen S, Doyle D, Catanzaro B. Opto-mechanical modeling of the Herschel space telescope at ESA/ESTEC [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8336: 833604.
- [5] Wang K, Zhang X Y, Jin G. Research on CFRP truss support technology of lightweight space camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.  
王凯, 张尧禹, 金光. 轻型空间相机碳纤维桁架支撑技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.
- [6] Imai H, Watanabe T, Katayama H, et al. Conceptual design of advanced land observing satellite-3 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7474: 74740R.
- [7] Zhang L B, Ren G, Chen H B. Dynamic analysis for supporting structure of crossed-plate type [J]. *Optics Precision Engineering*, 2003, 11(5): 472-476.  
张林波, 任戈, 陈洪斌. 四翼十字形中心支撑结构的动力学分析[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 472-476.
- [8] Wei L, Zhang L, Xie P, et al. Optimization design and test for the front frame of a large off-axis TMA space camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(5): 0522001.  
魏磊, 张雷, 解鹏, 等. 大型离轴三反空间相机前框架优化设计与试验[J]. *光子学报*, 2017, 46(5): 0522001.
- [9] Li L F. The research of structure topology optimization based on variable density method [D].

Changchun: Jilin University, 2007.

李凌飞. 基于变密度法的结构拓扑优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.

- [10] Jia X Z, Jin G, Jia J Q, et al. Topology optimization design for main board of lightweight space camera [J]. Chinese Journal of Space Science, 2011, 31(3): 395-400.

贾学志, 金光, 贾继强, 等. 轻型空间相机主承力基板结构拓扑优化设计[J]. 空间科学学报, 2011, 31

(3): 395-400.

- [11] Wei L. Design and optimization for main support structure of a space camera with large field of view and long focal length [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.

魏磊. 长焦距宽视场空间相机主支撑结构优化设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.