

文章编号 1004-924X(2021)03-0547-11

# 基于碳纤维框架天基目标探测二维跟踪 转台结构优化

陈卓<sup>1,2</sup>, 胡庆龙<sup>1\*</sup>, 李朝辉<sup>1</sup>

(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:**为满足某星载太阳辐照度光谱仪对太阳的跟踪指向技术要求,设计了一种二维转台系统。本文对该转台进行了结构的拓扑优化设计、有限元仿真及试验验证。首先,通过研究和比较现有的转台方案,确定以基本地平式作为转台的结构形式,选择性能优良的 M55J 碳纤维复合材料作为转台结构的主要材料,配合 TC4 镶嵌件来连接部件。根据拓扑优化结果和工程经验,分别完成了转台 3 个主要部件的蒙皮和加强筋结构设计,得到了总体尺寸为 966 mm×400 mm×730 mm、质量为 27.3 kg 的转台框架。针对此结构进行有限元分析,得到转台整体基频为 58 Hz,结构强度和刚度满足设计指标要求。最后,对转台初样进行了抗力学试验和热真空试验。试验结果表明,转台整体的一阶频率为 53 Hz,正弦振动前后基频变化在 2% 以内,随机振动前后基频变化在 4% 以内,在真空环境中功能正常。该转台整体结构设计合理,性能稳定,能够满足设计指标要求。

**关键词:**天基目标探测;二维转台;碳纤维结构;拓扑优化;有限元分析

**中图分类号:**TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20212903.0547

## Structural optimization of 2-D tracking turntable with carbon fiber framework for spatial target detection

CHEN Zhuo<sup>1,2</sup>, HU Qing-long<sup>1\*</sup>, LI Zhao-hui<sup>1</sup>

(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)*

*\* Corresponding author, E-mail: huqinglong.hit@163.com*

**Abstract:** To optimize solar spectroradiometers on satellites, a spatial turntable is designed according to performance indexes; finite element analysis is conducted and the properties of the prototype are tested. First, various articles were consulted to determine the fundamental structure of the turntable, and the azimuthal structure was selected. By researching the properties of different materials, M55J carbon fiber—which uses TC4 inserts for connection—was chosen as the main material for the turntable. The three main parts of the turntable are designed based on topological results and engineering experience; thus, a turntable frame with a size of 966 mm×400 mm×730 mm and mass of 27.3 kg is designed. Next, simulation

收稿日期:2020-09-01;修订日期:2020-09-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61405191)

analysis is carried out, from which the natural frequency of the entire turntable is established as 58 Hz. This implies that the strength and stiffness of the turntable fulfill the optimization criteria. Finally, resistance and thermal vacuum tests are conducted on the prototype. Test results showed that the natural frequency of the turntable was 53 Hz and the variation of the turntable's natural frequency was within 2% (sinusoidal vibration) and 4% (random vibration). Furthermore, we observed that the turntable functioned normally in a vacuum. Accordingly, the proposed design is tenable.

**Key words:** spatial target detection; 2-D turntable; carbon fiber structure; topology optimization; finite element analysis

## 1 引言

转台机构能够实现载荷独立于卫星等空间平台的指向运动,在天基跟瞄系统中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。近年来,根据不同的任务要求,人们设计了不同的转台结构。按照结构,转台大体可以归纳为以下 3 类<sup>[2]</sup>:(1)传统经纬仪式的二维转台结构,由方位轴系和俯仰轴系构成,两轴系正交;(2)潜望镜式指向机构,主光学系统位于搭载平台上,采用两个 45°反射镜;(3)平面指向反射镜结构。根据载荷类型的不同可将转台大致分为两类<sup>[2-3]</sup>,一类用于空间光通信,这类转台强调跟踪过程的灵敏度,其载荷多为反射镜等光学系统的部分,质量较小;另一类用于空间观测成像,这类转台对跟踪与成像质量的稳定性有更高的要求,因此载荷多为相机等整体的光学系统,质量较大。

国内外关于跟踪指向与成像的理论研究很多。Ji 等<sup>[4]</sup>给出了一种天基观测覆盖范围的分析方法,该方法将复杂的三维空间关系转化成易于分析的二维关系。Wen 等<sup>[5]</sup>设计了一套高效率的转台姿态评估方法,将姿态评估误差减小至 0.024°。杨秀彬等<sup>[6]</sup>提出了在低照度条件下对空间近距离目标进行高信噪比探测的技术,能够对 20 km 范围外照度低于 0.05 lx 的目标进行成像。但星载转台的具体结构设计,国外的报道较少。根据国内近年来的研究可知,转台结构中传统的铝镁等金属材料逐渐被钛合金以及碳纤维复合材料等取代。刘铁军<sup>[7]</sup>对碳纤维 U 形架进行了结构与仿真,得到 U 形

架质量为 1.87 kg,一阶基频为 252 Hz,结构性能优于金属材料。胡庆龙<sup>[2]</sup>采用碳纤维结构的固定支架,使支架自重 3.8 kg 时的一阶基频达到 222.7 Hz。郭疆等<sup>[8]</sup>设计了碳纤维机身的空间相机,其结构稳定,一阶基频达到 120 Hz。邢思远等<sup>[9]</sup>针对卫星复合材料框架进行了结构仿真优化,使结构质量降低了 25.1%,基频提高了 48.8%。上述天基载荷的某个部分都使用了复合材料。综上所述,全碳纤维结构的转台具有优良的性能。

太阳辐照度光谱仪跟踪转台(以下简称 TY 转台)是实现太阳跟踪对准功能的重要分系统。本文针对 TY 转台的性能指标与功能要求,采用全碳纤维结构,配合钛合金镶嵌件设计转台主要的承力部件(内框架、U 形架和底板)。利用有限元建模进行了结构优化和力学适应性分析,并通过试验验证了转台结构的稳定性。

## 2 转台结构形式

### 2.1 技术指标

作为转台分系统的设计输入或约束,表 1 列出了卫星总体对太阳光谱仪的任务要求、光学载荷的机电接口要求和环境条件要求等主要技术指标。从表 1 可以看出,转台工作在高负载、大温差的条件下,并且转台本身的精度与质量也受到限制,这要求转台材料具有高比刚度、低线胀系数等特点,使转台在温度与负载作用下能正常完成转动功能,为光学载荷提供稳定的工作环境,保证它完成任务。

表1 TY转台的主要性能指标

Tab. 1 Main performance indexes of TY turntable

项目	性能指标要求
转动范围	方位: $24^\circ \sim -30^\circ$ ; 俯仰 $-34.5^\circ \sim 5^\circ$
跟踪指向精度	$\leq 0.1^\circ$
工作角速度	$0.01 \sim 0.1$ ( $^\circ$ )/s
转台质量	$\leq 75$ kg
载荷尺寸	VIS/IR 光谱仪 $238 \text{ mm} \times 376 \text{ mm} \times 366 \text{ mm}$
	UV 光谱仪 $268 \text{ mm} \times 364 \text{ mm} \times 296 \text{ mm}$
	谱仪机箱 $83 \text{ mm} \times 318 \text{ mm} \times 246 \text{ mm}$
承载质量	$\leq 65$ kg
转动惯量负载	俯仰: $\leq 2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ; 方位: $\leq 6.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
结构固有频率	$\geq 50$ Hz(锁紧状态)
存储温度	$-40 \sim +90$ $^\circ\text{C}$
工作温度	$0 \sim +20$ $^\circ\text{C}$
在轨寿命	$\geq 8$ 年

## 2.2 设计原则

综合上述分析, TY转台结构设计原则着重考虑以下几个方面:

### (1) 布局合理

承载2台光谱仪等光学载荷, 要保证具有良好的质量和惯量分布, 以及最佳的动态刚度特性。

### (2) 结构稳定

具有足够的强度和刚度, 保证结构在规定的力学条件下无塑性变形, 具有可靠性和稳定性。

### (3) 温度适应性良好

保证在工作温度范围内机构正常工作, 在存储温度范围内具有稳定的尺寸和精度。

### (4) 高度轻量化设计

尽量减轻结构的质量, 且结构应具有良好的加工性能。

## 2.3 总体布局

二维跟踪转台的结构形式主要有直角坐标内外框架式和极坐标地平式结构。传统的经纬仪地平式俯仰、方位结构具有体积紧凑、质量轻、跟踪精度较好的特点, 是跟踪指向首选结构。参

考国内外经验<sup>[10-13]</sup>, 这里决定采用传统的基本地平式结构。

TY转台的总体结构与布局如图1所示, 它主要由安装光学载荷的内框架、俯仰转动组件、方位转动组件以及底座组成。考虑发射时的冲击和振动, 转台还包括锁定机构(图中未画出)。

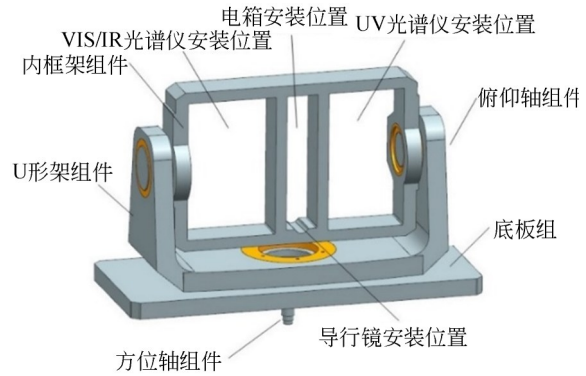


图1 TY转台的总体布局

Fig. 1 Overall layout of TY turntable

## 3 支撑结构设计

### 3.1 结构设计思路

图2确定的总体布局仅在结构尺寸上满足转台安装与载荷固定的要求, 需要进行更详细的设计, 进一步提高环境适应性。从总体布局可以看出, 内框架、U形架和底板是3个主要的承力部件。内框架上安装有两台光学载荷、导行镜和电箱, 其刚度保证了光学载荷的稳定性。U形架和底板的刚度决定了整机的特征频率, 并对轴系的精度和光轴的指向精度有重要影响。

综合上述分析, 本文的结构设计针对3个主要的承力部件——内框架、U形架以及底板来进

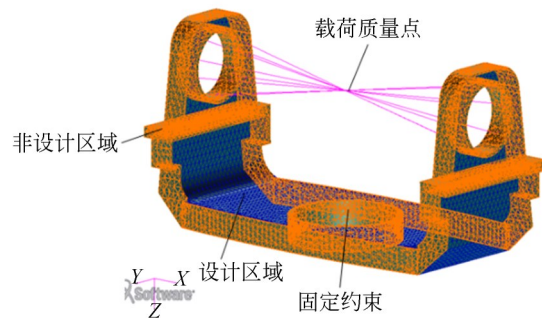


图2 支撑结构的设计区域

Fig. 2 Design domain of support frame

行,通过研究确定合适的材料与结构优化方法,然后针对每个组件单独进行结构细化,在设计过程中组件之间的作用关系通过施加载荷与边界条件来完成。

### 3.2 结构材料选择

高模量碳纤维除了具备轻质、高强、高模等特性以外,承受环境交变的能力也突出,环境适应性强,以它作为增强体可以制备高刚度、高尺

寸稳定性的各种结构型和功能性复合材料<sup>[14-15]</sup>,十分适合作为转台结构材料。

目前,国内已经突破了M60J级碳纤维实验室制备关键技术,M55J级碳纤维能够进行工程化制备。某厂家给出的M55J级碳纤维的参考性能如表2所示。Peiluo等<sup>[16]</sup>采用M55J/CE材料制造了尺寸为 $\varphi 140\text{ mm}\times 557\text{ mm}$ ,厚度为1.5 mm的望远镜镜筒。

表2 M55J的材料性能

Tab. 2 Material performance of M55J

密度 $\rho$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ ( $10^{10}\text{ Pa}$ )	热导率 $\lambda$ /( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	比热容 $C$ /( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	比刚度 $E/\rho$ ( $10^7\text{ N}\cdot\text{mm}/\text{g}$ )	线膨胀系数 $d_1$ ( $10^{-6}/\text{K}$ )
1.6	10.4	70	—	6.5	0.017

本文采用M55J作为转台框架结构的主要材料。但是碳纤维复合材料层对开孔敏感,应力集中远大于金属,并且碳纤维结构表面不能进行机械研磨,因此在连接部分的接口处要镶嵌金属件,以此避免接触破坏,并可通过对镶嵌件进行表面处理来达到精度要求<sup>[17]</sup>。根据已有研究,采用钛合金(TC4)作为镶嵌件材料<sup>[18-19]</sup>。

### 3.3 结构设计方案

参考以往的转台结构,本文采用蒙皮与加强筋的结构形式,通过拓扑优化来辅助设计。

连续体结构的拓扑优化是指满足一定约束条件下,寻求结构材料的空间分布形式,实现指定目标的最优化。彭细荣等<sup>[20]</sup>研究表明,体积约束下结构柔顺度最小化模型(Minimum Compliance with a Volume Constraint, MCVC)适用于解决单荷载工况下未给出位移约束的工程问题,容易得到结构刚度最大化的拓扑。工程中MCVC模型最常采用SIMP方法,即基于SIMP材料插值模型的变密度法,以每个单元的相对密度作为设计变量,同时引入密度与材料弹性模量的假设函数关系,以结构响应量最小化或最大化为目标设定体积比约束。在静力优化问题中,通常以结构柔顺度最小化作为优化的目标函数,其数学模型表示为:

$$\begin{cases} \text{find: } \rho_i \\ \text{min: } C = F^T U = U^T K U \\ \text{s.t. } \frac{V(\rho)}{V_0} - f \leq 0, 0 < \rho_{\min} \leq \rho_i \leq 1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $C$ 为柔顺度值; $K, U, F$ 分别表示总刚度阵,总位移和总载荷; $V_0$ 和 $V$ 分别表示初始结构和优化结构体积; $f$ 是体积比; $\rho_{\min}$ 是拓扑变量下限,用于避免有限元分析奇异性,通常可取 $\rho_{\min}=10^{-3}$ <sup>[21-22]</sup>。

本文用MSC Patran/Nastran有限元分析对3个转台构件分别进行拓扑优化,根据所得的拓扑结果,结合实际工程经验,设计构件的蒙皮与加强筋结构。

这里以U形架为例,如图2所示,考虑到生产与装配过程的可行性,将U形架在俯仰轴系处分上下两部分,设计平台用于连接。将轴孔处、连接平台及框架边缘区域作为非设计区域(图中高亮部分),蓝色区域为设计区域。在底部轴孔面处施加固定约束,将U形架载荷以80 kg质量点的形式通过多点约束(MPC)连接在两侧轴孔处。在 $X, Y, Z$ 三轴方向同时分别施加 $10g, 2g, 2g$ 的加速度载荷,以最小化结构柔顺度为目标,30%体积分数为约束,经过27次迭代后结果如图3所示,结构柔顺度变化如图4所示(彩图见期刊电子版)。

图3展示了设计密度的分布云图,其中越接近红色的区域设计密度越大,表明结构越重要,需要保留;越接近蓝色的区域设计密度越小,表

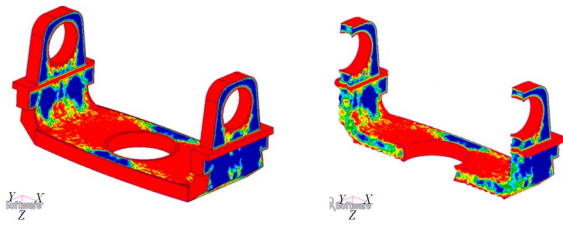


图3 U形架拓扑优化结果

Fig. 3 Topology result of U-shaped frame

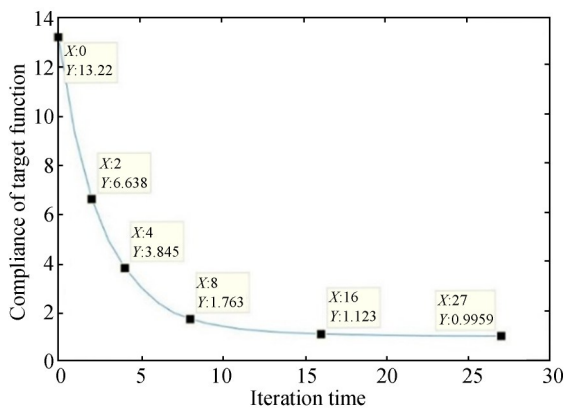


图4 拓扑优化迭代历程

Fig. 4 Iteration process of topology

明此处结构可以去除。图4表明,优化前U形架结构的柔顺度为13.22,优化后结构柔顺度为0.99,即结构刚度为原来的13倍,优化效果明显。根据优化结果,U形架两侧部分单元密度很小,绝大部分可以去除,余下部分单元分布在Z轴方向上,可以考虑在此部分设置Z轴方向上的加强筋,其余部分留空;U形架底部及拐角处表面单元密度很大,属于主要承力部分,内部单元密度较小,可以在此设计较密集的横向与纵向的加强筋,减少材料的同时提高此处刚度。为方便加工,各处加强筋厚度应保持一致。

实际设计时,U形架两侧需要为金属镶嵌件提供安装位置,根据已有经验,两侧设计蒙皮能提高结构刚度。结合工程实际,U形架采用内外面板封闭式结构,内部设置加强筋,考虑到加工工艺性,加强筋呈横纵均匀排布,尺寸相同。最终得出U形架的详细结构如图5所示,组件结构尺寸约为 $842\text{ mm} \times 343\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ,碳纤维结构厚度以4 mm为主。

整个组件由碳纤维材料通过铺层的方式成形,成形过程中在空腔位置预埋水溶性材料,成

形结束后排出。部分金属镶嵌件也在成形过程中预埋构件内,其余金属镶嵌件通过与这些预埋件之间的螺钉连接,实现与碳纤维材料的结合,如图6所示。另外,所有金属件与碳纤维的接触面处都涂胶进行粘接,进一步提高连接的可靠性。

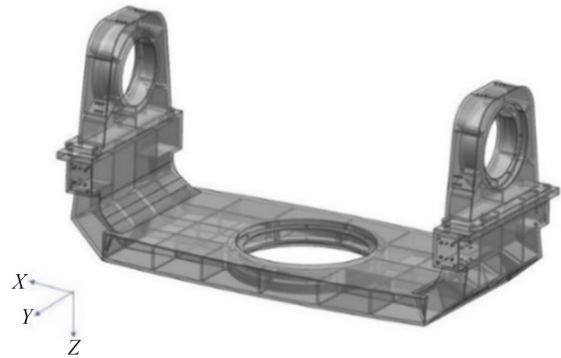


图5 U形架详细结构

Fig. 5 Detailed structure of U-shaped frame

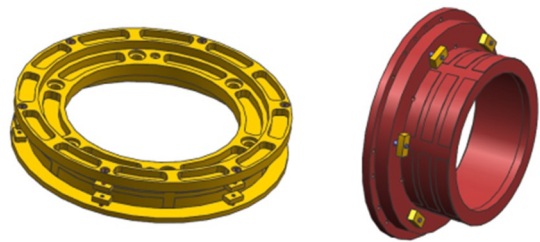


图6 镶嵌件示意图

Fig. 6 Schematic diagram of TC4 inserts

按照同样的方法进行底板与内框架的结构设计。为提高转台的抗力学特性,采用4个爆炸螺栓将U形架与底板通过辅助支架连接。辅助支架上部与U形架固连,可随U形架转动。将转台方位轴部分沉到卫星安装面以下,使质心位置尽量靠近仪器安装面,减小悬臂效应。另外,在内框架和U形架间保留合理间隙,使转动部分质心尽量降低。

根据已有的设计案例,转台各部分经热控系统调控,温度梯度可限制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内。考虑到设计裕度,按照 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度梯度的极限情况计算,碳纤维框架的线膨胀系数为 $1.7 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ ,俯仰左、右端轴跨度为750 mm,引起的轴向位移为0.003 mm。由于轴承存在游隙,并且U形架和外框架

等结构也会有一定的弹性变形来补偿温度引起的轴向位移,20℃的温度梯度不会引起转动机构的卡滞或卡死。转台最终结构如图7所示,总质量为64.7 kg,安装负载后整机质量为127 kg,满足设计指标;其中框架部分质量(含镶嵌件)为27.3 kg,占整机质量的21.5%。

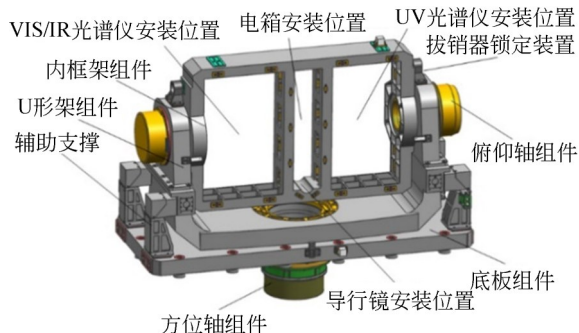


图7 TY转台结构

Fig.7 Structure of TY turntable

## 4 仿真分析

由于转台整体结构较复杂,仿真分析分成两部分,一部分针对单个构件,验证设计的碳纤维结构和镶嵌件布局的可行性,本文以代表性的U形架为例;另一部分针对简化后的转台整体模型,分析设计方案的可行性。

### 4.1 U形架仿真分析

对U形架结构进行基频计算,并进行正弦激励下的强度校核。正弦振动载荷及试验条件如表3所示。

U形架模型简化后仅保留金属镶嵌件与底部6个加载螺栓孔,其余孔洞去除。金属镶嵌件采用实体单元,碳纤维结构采用壳单元,二者之间采取粘接方式连接,结构中包含80 kg负重以

表3 正弦激励试验条件

Tab.3 Test conditions of sinusoidal excitation

方 向	频率/Hz	振级(0-P)	扫描频率/ (oct·min <sup>-1</sup> )
X轴向	5~12	5.18 mm	2
	12~25	3.0g	
	25~35	过渡到5.25g	
	35~65	5.25g	
	65~70	过渡到3.75g	
Y,Z 二轴向	70~100	3.75g	
	5~12	12.94 mm	
	12~65	7.5g	
	65~70	过渡到5.25g	
	70~100	5.25g	

质量点形式建立于相应位置,6个螺栓孔处施加固定约束,并在X,Y,Z三个方向上进行正弦激励分析。共划分15 865个单元,网格模型如图8所示。分析得出U形架前3阶频率分别为54.0,59.5和101.6 Hz,正弦激励分析结果如表4所示,U形架的一阶振型如图9所示。

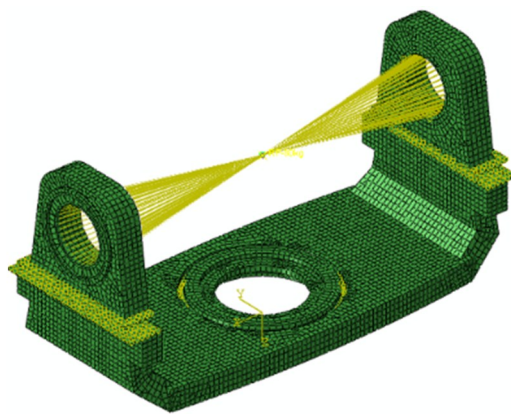


图8 U形架网格模型

Fig.8 Mesh model of U-shaped frame

表4 正弦激励下U形架结构的变形和应力结果

Tab.4 Deformation and stress of U-shaped frame under sinusoidal excitation

方 向	变形/mm				碳纤维层应力/MPa			
	$U_x$	$U_y$	$U_z$	USUM	纵向应力	横向应力	剪应力	设计参考值
X	4.282	0.121	3.998	5.646	438.5	9.9	12.3	1 400
Y	0.223	8.594	3.581	8.644	823.4	16.9	22.8	20
Z	0.122	0.043	1.252	1.253	247.0	6.2	6.1	56

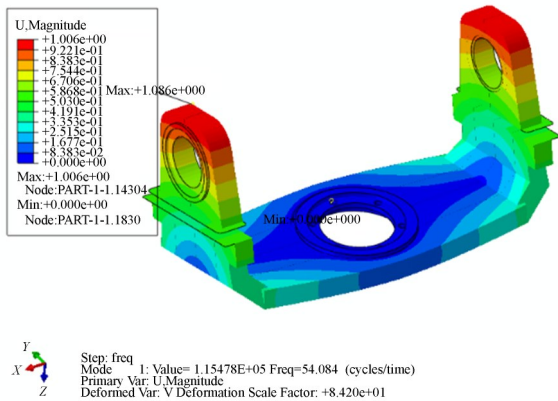


图 9 U形架的一阶振型

Fig. 9 First-order vibration shape of U-shaped frame

分析结果表明,U形架满足设计指标,并且在正弦振动作用下满足强度要求,不会发生结构破坏。

#### 4.2 转台整体仿真分析

依据三维实体模型对转台整体进行网格划分,其中光学载荷以质量块的形式代替。为了方便建模,在关键力的传递路径上,网格划分较密,非关键部位适当简化,使它能等效真实构件对整机的质量和刚度贡献。对于轴承部分进行简化,去除滚子部分,轴承外圈与轴孔固结,内圈与轴固结,内、外圈用RBE2单元分别约束于各自中心处的独立节点,两个独立节点之间建立弹簧单元,模拟滚子处作用力。添加约束在载荷附近的质量点作为配重,使有限元模型绕质心的转动惯量更接近实体模型。

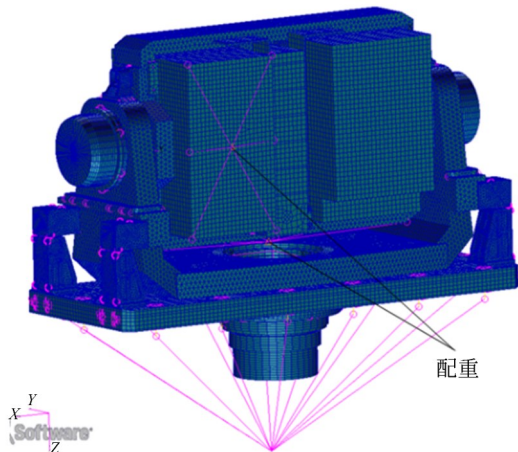


图 10 整机网格模型

Fig. 10 Mesh model of complete machine

建立的有限元模型共有 332 505 个单元,其结构形式如图 10 所示。有限元模型质量为 124 kg,略低于三维实体模型的 127 kg,相差约 2%,其原因可能是实体模型包含螺钉和热控机构,有限元模型没有这些部分,但质量差距很小,不影响有限元模型的可靠性。

对于屈服极限载荷条件,产品的结构部件应具有正的安全裕度。不同类型的材料,安全裕度要求不同,具体规定见表 5。

表 5 安全裕度规定

Tab. 5 Rules of safety margin

金属材料	安全裕度	非金属材料	安全裕度
屈服强度	0	首层失效	0.25
极限强度	0.12	承载强度	0.25
稳定度	0.25	稳定度	0.30

其中,安全裕度的定义如下:

$$M. S. = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\text{MAX}} \times f} - 1, \quad (2)$$

式中:[ $\sigma$ ]为极限应力(屈服极限或强度极限); $\sigma_{\text{MAX}}$ 为鉴定载荷产生的最大主应力; $f$ 为安全因子,对于屈服极限(弹塑性材料),安全因子 $f=1.20$ ;对于破坏极限(脆性材料),安全因子 $f=1.35$ 。

对有限元模型进行模态分析和表 3 所示的正弦激励分析,分析中约束施加在底部支架下面的 14 个安装孔处,约束该位置节点的 6 个自由度。分析结果如表 6~表 7 和图 11 所示。分析结果表明,转台整体的一阶频率为 58 Hz,前三阶频率在 100 Hz 以内;正弦振动时,各位置处应力响应的安全裕度均符合规定,说明强度满足要求,不会发生结构破坏。

表 6 前六阶固有频率

Fig. 6 Six orders' natural frequencies (Hz)

一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
58	72	93	108	119	188

表 7 正弦激励各位置的最大应力

Tab. 7 Maximum stress in each part under sinusoidal excitation

位置	材料	X向加载		Y向加载		Z向加载	
		应力/MPa	安全裕度	应力/MPa	安全裕度	应力/MPa	安全裕度
内框架	M55J	778	1.9	480	3.8	153	14.0
U型架	M55J	866	1.6	751	2.0	126	17.1
底板	M55J	510	3.5	844	1.7	65	34.1
方位电机	TC4	84	7.8	120	5.2	16	45.3
俯仰电机	TC4	227	2.3	111	5.7	40	17.5

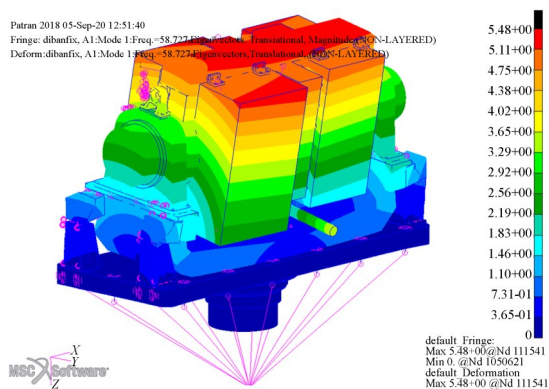


图 11 转台整体的一阶振型

Fig. 11 First-order vibration shape of turntable

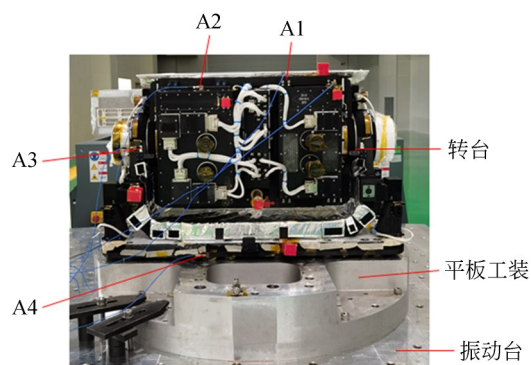


图 12 振动试验平台

Fig. 12 Vibration test platform

## 5 试验

### 5.1 抗力学试验

为验证产品的力学性能,对太阳辐照度光谱仪初样整体进行振动试验。仪器通过平板工装连接在振动台台面上,如图 12 所示。

试验使用 4 个三向加速度测量传感器,传感器分别位于内框架顶部、VIS/IR 谱仪上部、U 形架上侧面和底板。根据表 3 所示的试验条件,每个方向上试验前后都会进行幅值为 0.1g、频率在 10~2 000 Hz 的特征扫描来检查结构的固有频率,选择 A3 传感器数据作为代表,实验结果如表

8 所示,图 13 给出了 Y 方向(转台一阶振型方向)上 U 形架处的特征扫描响应曲线。

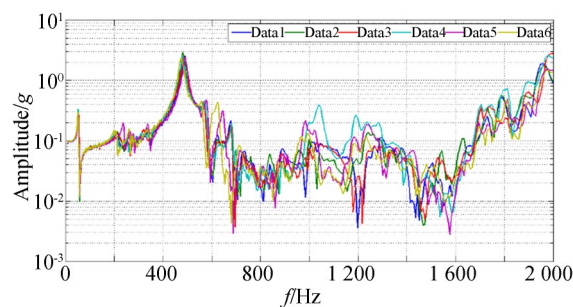


图 13 特征扫描响应曲线

Fig. 13 Response curves of feature scanning

表 8 振动试验结果

Tab. 8 Results of vibration test

方向	正弦振动前		正弦振动后		随机振动前		随机振动后	
	Freq/Hz	Amp/g	Freq/Hz	Amp/g	Freq/Hz	Amp/g	Freq/Hz	Amp/g
X	61.6	0.91	60.3	0.82	60.3	0.82	60.3	0.76
Y	53.6	0.59	52.7	0.64	53.0	0.99	51.1	1.12
Z	106.6	1.44	107.2	1.43	106.6	1.66	103.9	1.58

由表8可见,三个轴向上正弦振动前后结构基频相对变化在1%左右,变化较小;Y方向上随机振动前后结构基频变化相对较大,为3.6%,鉴定级正弦及随机振动条件对结构的力学特性不会产生明显的影响。图13中Data1,Data2,Data3,Data4,Data5,Data6分别代表验收级正弦激励前后特征扫频响应曲线、鉴定级正弦激励后特征扫频响应曲线以及鉴定级随机激励前后特征扫频响应曲线。由图13可见,正弦随机振动前后,整体峰值分布基本保持不变。

特征扫描显示总体结构的一阶固有频率最低为53 Hz,与仿真所得的58 Hz误差为8.6%。经过分析认为<sup>[23]</sup>,这是使用MPC理想约束来替代螺栓连接所致,该误差在试验允许的范围。以上分析表明,转台的力学特性稳定,满足强度和刚度的要求。

## 5.2 热环境试验

为验证转台的环境适应性,采用热压罐模拟在轨时的环境,对整机进行热真空试验。试验环境要求为真空度优于 $6.65 \times 10^{-3}$  Pa,温度为0~35℃,温度梯度为5℃。试验过程中对转台发送

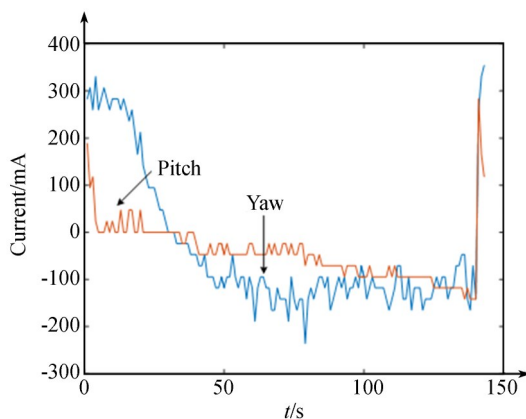


图14 力矩电流

Fig. 14 Torque current

指令,使转台模拟跟踪运动。通过记录过程中电机的力矩电流情况,来验证转台工作是否正常,如图14所示。

整个转动过程中方位力矩电流低于1 A,俯仰低于0.5 A。在载荷整机测量时,转台程控跟踪19 min内,运行角位置与预期相符,跟踪精度满足要求,电流数据正常。该结果表明转台在真空环境中功能正常。

## 6 结论

本文通过分析太阳辐照度光谱仪的任务指标与工作模式,设计了其转台结构。通过拓扑优化分析,转台承力部件采用内外面板封闭式结构,内部设置加强筋。转台构件采用M55J碳纤维复合材料铺层成形,成形过程中预埋水溶性材料形成空腔。碳纤维结构之间通过金属镶嵌件进行连接,镶嵌件与碳纤维构件内部的预埋件通过螺钉连接,两种材料接触面处涂胶进一步保证可靠性。转台初样的总体尺寸为966 mm×400 mm×730 mm,质量为64.7 kg,整机质量为127 kg,其中转台框架(含镶嵌件)质量为27.3 kg,占整机的21.5%。试验表明,整机的一阶频率为53 Hz,与整机仿真得到的58 Hz误差约为8.6%,经正弦激励试验后基频变化在1%以内,经随机激励试验后基频变化在4%以内,证明结构力学特性稳定,符合强度和刚度的要求。转台在热真空试验中力矩电流正常,功能正常。

本文使用M55J材料完成了全碳纤维结构空间转台的设计,证明了碳纤维复合材料应用于空间转台的可行性。所设计的空间转台解决了高载荷、大尺寸与高精度、低质量之间的矛盾,在提高结构强刚度的同时降低了发射成本,为未来的空间转台提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 王晓海. 天基空间目标探测系统技术研究进展[J]. 卫星与网络, 2017(11): 64-70.  
WANG X H. Developments of technical study on space-based detection system for spatial targets [J]. *Satellite & Network*, 2017(11): 64-70. (in Chinese)
- [2] 胡庆龙. 摆扫式天基红外成像系统光机结构设计及其像移补偿技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.  
HU Q L. *Optical and Mechanical Structure Design and Research on Image Motion Compensation Technology of Whisking Broom Space-based Infrared Im-*

- aging System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [3] 孟立新. 机载激光通信中捕获与跟踪技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
MENG L X. *Research on Acquisition and Tracking Technology of Airborne Laser Communication*[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [4] JI H R, ZENG G Q. A method for spatial effective coverage analysis in space-based optical observation [J]. *Optik*, 2018, 166: 116-126.
- [5] WEN C Y, HE S Y, BU C G, *et al.*. Cost-effective improvements of a rotating platform by integration of a high-accuracy inclinometer and encoders for attitude evaluation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(1): 015901.
- [6] 杨秀彬, 刘春雨, 范国伟, 等. 空间目标近距离高灵敏度探测技术[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(4): 825-833.  
YANG X B, LIU CH Y, FANG G W, *et al.*. High-sensitivity detection of space targets at close range [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 825-833. (in Chinese)
- [7] 刘铁军. 高精度空间二维转台轻量化结构设计与分析[D]. 长春: 长春工业大学, 2013.  
LIU T J. *Design and Analysis of Spacial Two-dimensional Turntable with High Precision and Lightweight*[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] 郭疆, 邵明东, 王国良, 等. 空间遥感相机碳纤维机身结构设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 571-578.  
GUO J, SHAO M D, WANG G L, *et al.*. Design of optical-mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 571-578. (in Chinese)
- [9] 邢思远, 刘洪新, 张玉生. 卫星高稳定复合材料框架结构仿真优化[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(12): 89-95.  
XING S Y, LIU H X, ZHANG Y SH. Optimization of high stable composite frame structure in the satellite [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018(12): 89-95. (in Chinese)
- [10] HU Q, LI Z, YANG L, *et al.*. Overview of research on space laser communication tracking and pointing technology [J]. *Chemical Engineering Transaction*, 2015, 46: 1015-1020.
- [11] 郝永耀. 空间激光通信光学天线及粗跟踪技术研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2016.  
YAN Y Y. *Research on Optical Antenna and Coarse Tracking Technology of Space Laser Communication*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [12] 罗威, 董文锋, 霍亮宇. 基于库德光路的小型激光定向发射装置设计[J]. *激光与红外*, 2017, 47(6): 655-658.  
LUO W, DONG W F, HUO L Y. Design of a directional laser emitting equipment based on Coude optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 655-658. (in Chinese)
- [13] 吕佳飞, 张立中, 张家齐. 微小卫星激光通信粗跟机构设计与分析[J]. *长春理工大学学报: 自然科学版*, 2017, 40(1): 93-97.  
LÜ J F, ZHANG L ZH, ZHANG J Q. Design and analysis of coarse tracking assembly for micro-satellite laser communication project [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2017, 40(1): 93-97. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 蒋诗才, 李伟东, 李韶亮, 等. PAN基高模量碳纤维及其应用现状[J]. *高科技纤维与应用*, 2020, 45(2): 1-10.  
JIANG SH C, LI W D, LI SH L, *et al.*. PAN-based high modulus carbon fiber and application status [J]. *Hi-Tech Fiber and Application*, 2020, 45(2): 1-10. (in Chinese)
- [16] SHI P L, BAI X L, FU P J, *et al.*. M55J Carbon fiber/cyanate ester composites' properties and application [C]. *International Congress on Composite Materials*, 2017: 2584-2590.
- [17] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 697-705. (in Chinese)
- [18] 刘袁财, 刘伟, 余梓豪, 等. 复合材料壁板与钛合金接头连接强度试验与分析[J]. *机械设计与制造工程*, 2017, 46(1): 99-102.
- LIU SH C, LIU W, YU Z H, *et al.*. Analysis and experiment on connection strength between the composite panel and titanium joint [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2017, 46(1): 99-102. (in Chinese)
- [19] 方志晓. 钛合金与复合材料壁板连接结构群钉载荷分配仿真与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- FANG ZH X. *Research on the Load Distribution of Mechanical Connection Structure of Titanium and Composite Panel by Simulation and Experiment* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [20] 彭细荣, 隋允康. 对连续体结构拓扑优化合理模型的再探讨[J]. *固体力学学报*, 2016, 37(2): 181-191.
- PENG X R, SUI Y K. A further discussion on rational topology optimization models for continuum structures [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2016, 37(2): 181-191. (in Chinese)
- [21] ZHAO L, XU B, HAN Y S, *et al.*. Continuum structural topological optimization with dynamic stress response constraints [J]. *Advances in Engineering Software*, 2020, 148: 102834.
- [22] YI G L, SUI Y K. Different effects of economic and structural performance indexes on model construction of structural topology optimization [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2015, 31(5): 777-788.
- [23] 邹冀, 伞晓刚, 李耀彬, 等. 光电经纬仪转台动态特性研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(1): 93-98.
- ZOU J, SAN X G, LI Y B, *et al.*. Dynamic characteristics study of opto-electronic theodolite turntable [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(1): 93-98. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈卓(1996—),男,湖北麻城人,硕士研究生,2018年于中南大学获得学士学位,主要从事航天光学遥感器结构的设计。E-mail: chenzhuo183@mails.ucas.edu.cn

#### 通讯作者:



胡庆龙(1987—),男,黑龙江佳木斯人,博士,副研究员,2008、2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2018年于中国科学院大学大珩学院获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术及跟踪指向技术等方面的研究。E-mail: huqinglong.hit@163.com

#### 导师简介:



李朝辉(1969—),男,吉林双辽人,博士,研究员,1991年、1994年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航天光学遥感器的研制工作。E-mail: lizh\_ciom@yahoo.com.cn