

近紫外天底成像光谱仪结构设计

杨剑宇^{1,2,3*}, 杨萱^{1,2}, 郑建华^{1,2}

¹中国科学院国家空间科学中心, 北京 101499;

²复杂航天系统综合电子与信息技术重点实验室, 北京 101499;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对大气环境监测和预报的需求,设计了一种满足光学系统要求的近紫外天底成像光谱仪。首先根据给定的光学系统,设计了设备的总体构形,对主镜和次镜进行了变密度拓扑优化,并对各模块进行布局功能设计;然后对方案进行了有限元仿真分析,同时对设备系统进行了光机热集成分析;最后进行了实验验证。实验结果表明:设备一阶频率大于 100 Hz;正弦振动实验最大放大倍数为 1.04;随机振动实验结果最大误差为 4.72%;力学实验前后设备光谱特性一致。实验结果证明了所提结构设计满足各项技术要求,为今后近紫外天底成像光谱仪结构设计提供了一种新的参考。

关键词 光学器件;近紫外天底成像光谱仪;结构设计;有限元仿真;结构测试

中图分类号 V423.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2123002

Structural Design of Near Ultraviolet Nadir Imaging Spectrometer

Yang Jianyu^{1,2,3*}, Yang Xuan^{1,2}, Zheng Jianhua^{1,2}

¹National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101499, China;

²Key Laboratory of Integrated Avionics and Information Technology for Complex Aerospace Systems, Beijing 101499, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract According to the requirement of atmospheric environment monitoring and forecasting, a kind of near ultraviolet nadir imaging spectrometer which meets the requirements of optical system is designed. First, according to the given optical system, the overall configuration of the device is designed, and the primary mirror and secondary mirror are optimized by variable density topology, and the layout function of each module is designed. Then, the finite element simulation analysis is carried out for the scheme, and the optical, mechanical, and thermal integration analysis is carried out for the equipment system. Finally, the experimental verification is carried out. The experimental results show that the first order frequency of the device is greater than 100 Hz; the largest magnification of sine vibration test is 1.04; maximum error of random vibration test results is 4.72%; the spectral characteristics of the equipment are consistent before and after the mechanical experiment. Experimental results show that the proposed structural design meets the technical requirements, and provides a new reference for the structural design of near ultraviolet nadir imaging spectrometer in the future.

Key words optical devices; near ultraviolet nadir imaging spectrometer; structural design; finite element simulation; structural testing

OCIS codes 230.4040; 350.4600

收稿日期: 2020-10-26; 修回日期: 2021-04-16; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA1535010204)

通信作者: *wangpancad@126.com

1 引言

我国长期受到沙尘天气影响,近两年雾霾、生物燃烧等空气污染事件的发生呈增多趋势,这些污染事件大多与大气气溶胶有关,检测大气气溶胶的分布、传输过程以及微物理特征,是进行大气环境监测和预报的关键^[1-3]。

近紫外天底成像光谱仪具有高空间分辨率、高信噪比等特点。超广角望远系统结合面阵 CCD 的探测方案,由超广角望远系统完成跨轨道方向的覆盖,面阵 CCD 探测器的一维(探测器中的列向量,列向量为光谱方向)给出地球大气后向散射光谱数据,另一维(探测器中的行向量,行向量为空间方向)给出空间分布。

近紫外天底成像光谱仪的空间分辨率在星下点可以达到 $7\text{ km} \times 7\text{ km}$,属于国内领先,因此相较于一般的近紫外天底成像光谱仪,对结构的要求就会变得更高。近紫外天底成像光谱仪主要由光学、电子学系统组成,设备结构分系统的功能就是将光学

和电子学系统部件组成一个整体,满足各部分的安放、固定、相对位置关系、视场、指向、操作、更换、热控实施等方面的需求,保证设备工作性能的正常发挥,并能承受飞船发射力学环境条件的考验,满足有效载荷实现科学目标探测的要求^[4-6]。

根据光学系统对探测仪结构的需求,本文对近紫外天底成像光谱仪进行了针对性的结构设计研制,并通过仿真及实验验证了所提结构设计方案是合理可行的。其中结构设计部分介绍了仪器核心结构的详细设计和仪器的整体设计,仿真分析部分介绍了结构的力学特性,实验部分介绍了设备在实验后的结果。

2 探测仪结构设计

根据仪器的使用要求及卫星平台资源对设备研制的限制,本台设备设计难点主要有两点:主镜和次镜的结构设计;总体构型如何满足各光学模块的安装精度要求。近紫外天底成像光谱仪主要技术指标如表 1 所示,光路如图 1 所示。

表 1 主要技术指标

Table 1 Main technical indicators

Parameter	Value
Channel spectral characteristic	Channel 1: central wavelength 340 nm, bandwidth \sim 2 nm
	Channel 2: central wavelength 354 nm, bandwidth \sim 2 nm
	Channel 3: central wavelength 380 nm, bandwidth \sim 2 nm
	Channel 4: central wavelength 388 nm, bandwidth \sim 2 nm
Spatial resolution	$7\text{ km} \times 7\text{ km}$ (subsattellite point)
Signal to noise ratio (SNR)	>1000

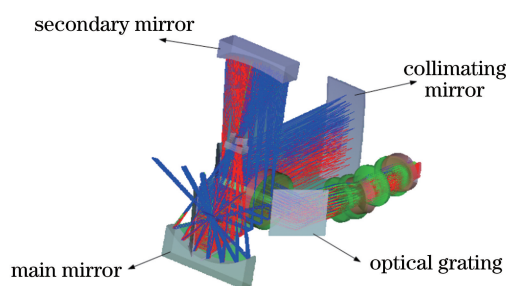


图 1 近紫外天底成像光谱仪光路图

Fig. 1 Optical path of near ultraviolet nadir imaging spectrometer

仪器的结构设计是确保仪器性能的关键因素。仪器结构的总体方案制定,充分考虑了仪器性能和可靠性的因素。为保证仪器结构的可靠性和精度,结构设计应尽可能简化。这样可以避免零件之间的组装误差和独立零件的不稳定降低结构的精度和可靠性。在设计过程中,遵循模块化的设计原则,减少整体装配的次数,将复杂的装配拆分为多个模块进

行单组组装,再进行整体装配^[7]。

2.1 总体构形

设备总体构形为长方体,外形轮廓尺寸为 $557.2\text{ mm} \times 370\text{ mm} \times 378.7\text{ mm}$,设备结构外形如图 2 所示。设备由主镜模块、次镜模块、电子学箱、机箱、光谱仪模块、探测器模块 5 个部分组成。仪器的各模块之间依靠定位面进行装配。对于较为精密的主镜模块、次镜模块和机壳之间的连接及探测器和光学系统之间的连接等均采用销钉固定的方式。

2.2 主、次镜结构设计及拓扑优化

2.2.1 主、次镜结构设计

主镜和次镜均为金属基底的反射镜,外形结构的设计主要从安装和固定的角度进行考虑。如果安装平面与光学表面直接相连,则当安装点受到螺钉压力后,光学表面的面型会发生很大变化,进而导致整个系统的性能变化。因此,反射镜的安装点与光学平面之间进行了分离,且与基座为三点接触,避免了安装平面的应力导致的光学表面面型变化。

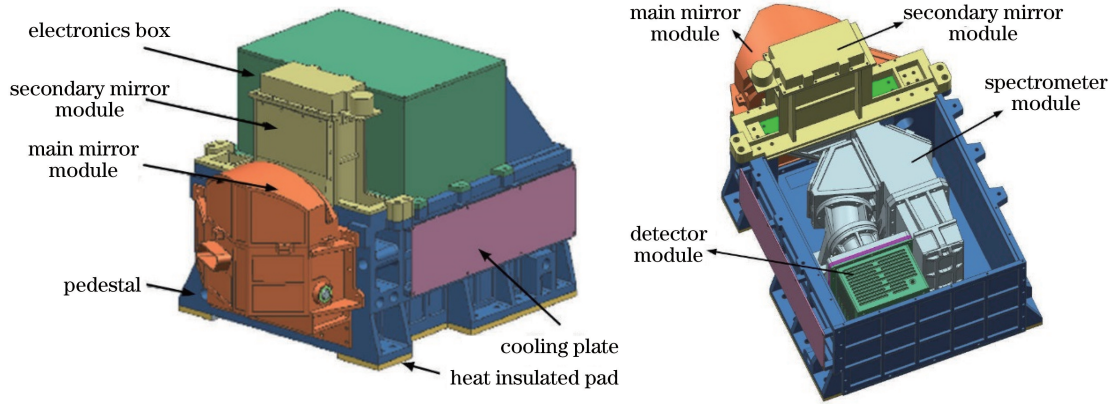


图 2 近紫外天底成像光谱仪设备外形图

Fig. 2 Outline of near ultraviolet nadir imaging spectrometer equipment

2.2.2 拓扑优化模型

由于主、次镜为一体式结构,且在光路中的作用非常重要,因此在满足光学需求的前提下,采用拓扑优化方法对主镜和次镜进行优化。常用的结构刚度度量是结构柔度,结构柔度是一个具有整体性概念的目标函数,即节点载荷列阵的转置与节点位移列阵的乘积。选择最小化弹性体结构的柔度,可以有效调整和控制结构的整体节点位移,进而改善结构的整体刚度。虽然柔度与结构的最大节点位移并不是严格意义上的正比例函数,但许多数据算例证明,在迭代优化过程中,随着弹性体结构的整体弹性降低,整体柔度也会随之减小。而这种情况,往往对于整体结构的最大节点位移有着不可忽视的有益性作用^[8-9]。拓扑优化模型为

$$\min\{\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{U}\}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{C} 表示结构的柔度; \mathbf{F} 为外载荷矩阵; \mathbf{U} 为在整体节点的位移矩阵。根据结构平衡方程,有

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U}, \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^n \rho_m V_m \leq \bar{V}, \quad (3)$$

$$0 < \rho_{\text{llv}} \leq \rho_m \leq 1, \quad m = 1, \dots, n, \quad (4)$$

$$S_{\text{RMS}}(i) < 5 \text{ nm}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

式中: \mathbf{K} 表示整体刚度矩阵; V_m 表示单元 i 的体积; ρ_m 表示单元相对密度; \bar{V} 表示体积约束; ρ_{llv} 表示 ρ_m 的下限值,为避免有限元计算时出现奇异性,通常取 ρ 的下限值为 $1 \times e^{-3}$; n 表示单元的数量; $S_{\text{RMS}}(i)$ 为反射镜镜面面形均方根。

2.2.3 灵敏度分析

在精密光学载荷拓扑优化过程中,与拓扑优化相关的常见问题包括周期性的棋盘格现象、疏密变

化产生的网格依赖现象等,它们会直接影响迭代优化过程的稳定性和计算结果的可靠性,并且不太可能实现具有明确几何边界特性的最优拓扑配置。因此为消除不稳定的数值现象,在优化过程中加入过滤技术,当下具有普遍性的过滤技术主要包括灵敏度过滤技术和密度过滤技术^[8-9]。灵敏度表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{C}'_{\rho_m} = \mathbf{M}'_{\rho_m} \mathbf{U} + \mathbf{F}'_{\rho_m} \mathbf{U}'_{\rho_m} \\ \mathbf{M} = \mathbf{F}^T \end{cases} \quad (6)$$

将(2)式代入(6)式,可得

$$\mathbf{C}'_{\rho_m} = \mathbf{M}'_{\rho_m} \mathbf{U} + \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U}'_{\rho_m} \quad (7)$$

对(2)式进行求导,可得

$$\mathbf{K} \mathbf{U}'_{\rho_m} = \mathbf{M}'_{\rho_m} - \mathbf{K}'_{\rho_m} \mathbf{U} \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式,引入伴随方法^[8],有

$$\mathbf{C}'_{\rho_m} = 2\mathbf{U}^T \mathbf{M}'_{\rho_m} - \mathbf{U}^T \mathbf{K}'_{\rho_m} \mathbf{U} \quad (9)$$

将固体各向同性材料惩罚(SIMP)插值模型代入到(9)式中,最终灵敏度表达式为

$$\mathbf{C}'_{\rho_m} = 2\mathbf{U}^T \mathbf{M}'_{\rho_m} - p \rho_m^{(p-1)} \mathbf{U}_m^T \mathbf{K}_m^* \mathbf{U}_m, \quad (10)$$

式中: p 为惩罚因子; \mathbf{U}_m 为单元的节点位移矩阵; \mathbf{K}_m^* 表示单元的刚度矩阵。

2.2.4 优化过程

主镜经过 40 次迭代,次镜经过 30 次迭代后,目标函数逐渐收敛,迭代收敛曲线如图 3 所示,主镜、次镜材料分布如图 4 所示。通过观察材料的分布情况,去除单元密度较小的材料,即深色部分,该区域对柔度灵敏度影响较小;同时保留单元密度较大的材料,即浅色部分,该区域对柔度灵敏度影响较大。另外考虑后期加工工艺及可加工性,需要对拓扑优化后的模型进行进一步处理^[8-10],最终模型如图 5 所示。

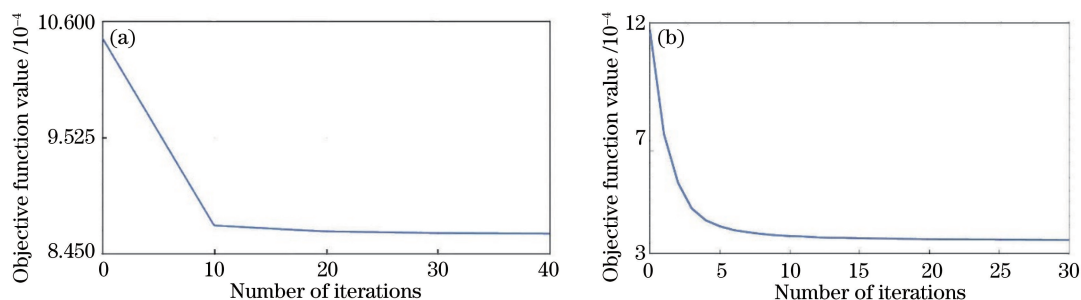


图 3 迭代收敛曲线。(a)主镜;(b)次镜

Fig. 3 Iterative convergence curves. (a) Main mirror; (b) secondary mirror

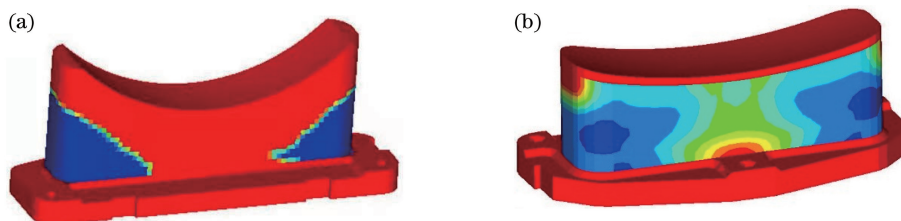


图 4 材料的分布情况。(a)主镜;(b)次镜

Fig. 4 Distributions of material. (a) Main mirror; (b) secondary mirror

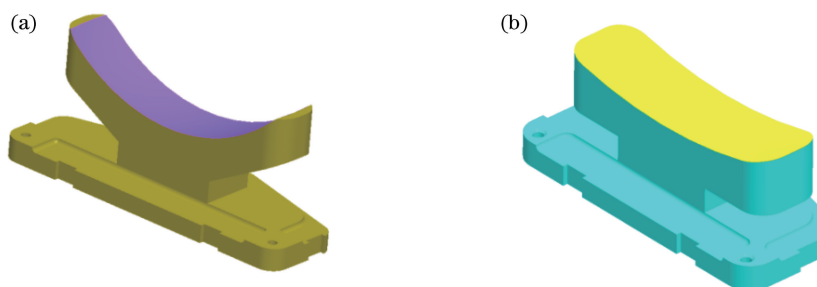


图 5 工艺处理后模型。(a)主镜;(b)次镜

Fig. 5 Model after process treatment. (a) Main mirror; (b) secondary mirror

2.3 各模块布局及功能设计

各模块布局应充分考虑结构设计的易实现性,保证构形和布局方案有利于设备工作性能的正常发挥,有利于结构强度和刚度的设计,有利于设备机、光、电、热之间相互兼容^[11]。

2.3.1 主镜模块

主镜模块主要由电机、漫反射板、主镜基座、氙灯、主镜等组成,如图 6 所示。电机安装在电机底板上,下端安装有转盘和漫反射板,可带动转盘和漫反射板一天一转,实现星上定标;主镜基座固定在机箱前端,是主镜模块的主承力结构,通过左右两侧定位面结构满足主镜模块的安装精度要求;氙灯位于主镜基座内部,两端固定在基座的左右侧板上,实现定标的功能。

2.3.2 次镜模块

次镜模块主要由次镜基座、次镜、定位棱镜组件、退偏器等组成,如图 7 所示。次镜基座是模块的

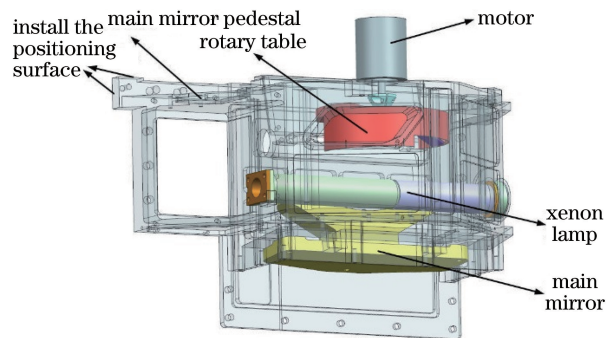


图 6 主镜模块机构布局图

Fig. 6 Mechanism layout of main mirror module

主承力结构,支撑固定在机箱前上端,通过机箱上左右两侧参考面结构满足次镜模块的安装精度要求,并且为了实现模块的多次装配与拆卸,在基座两侧设计有重复安装结构;定位棱镜组件安装在定位棱镜支架上,作为星上装配后的测量基准;退偏器安装在次镜基座内部,固定在次镜基座前端面,起到退偏

作用;主、次镜间隔公差及偏心为 $\pm 0.05\text{ mm}$,两镜倾斜公差小于 $2'$ 。为此主、次镜安装时,各有 3 个安装参考面,并且在基座与镜间设计有调整垫片。在系统的入光口放置干涉仪,平行光入射后,以主镜作为基准,可根据需要修磨垫片,微调次镜使像质满足要求。

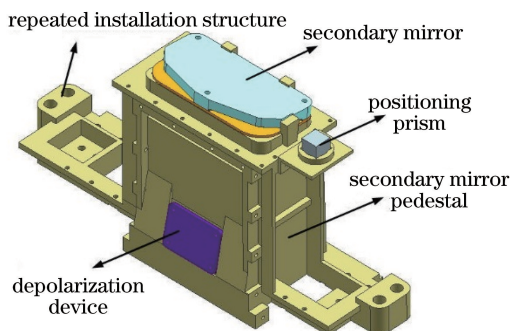


图 7 次镜模块机构布局图

Fig. 7 Mechanism layout of secondary mirror module

2.3.3 光谱仪模块

光谱仪模块包括入射狭缝的固定结构、平面反射镜和凹面反射镜的固定结构、透镜的固定结构、光栅的固定结构和消杂光光阑的设计等。光谱仪结构装调精度、温度稳定性和力学稳定性要求均较高,为满足光谱仪的设计稳定性和多次装调的要求,光谱仪部分的结构采用了模块化的设计,每个模块单独组装,测试完成后再整体装调,如图 8 所示。

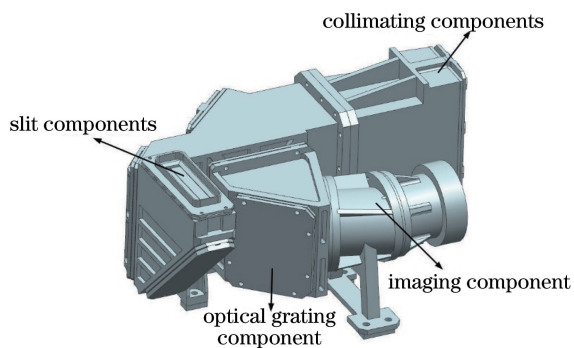


图 8 光谱仪模块结构外形图

Fig. 8 Outline drawing of spectrometer module structure

光谱仪模块通过底部的 6 个支耳,固定在机箱组件底板上,并通过钛合金隔热垫隔热。通过机箱底板右侧的参考面,光谱仪模块的水平安装精度要求得到了满足。通过调整钛合金隔热垫的外形尺寸,光谱仪模块的垂直安装精度和调试精度要求得到了满足。

成像镜组中,透镜倾斜公差为 0.03° ,采用直装方式安装,为了提高精度,镜筒采用图 9 结构来提高同轴度。镜片安装后通过定心仪测量镜片的实际倾斜量和镜间距,根据镜间距测量结果修磨垫片厚度。

光栅组件中,XY 轴方向透镜倾斜公差小于

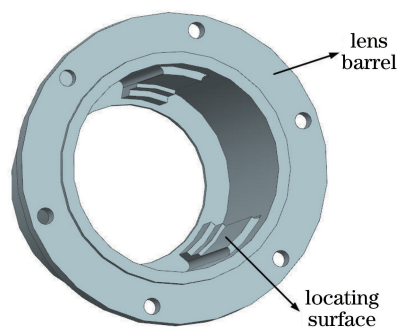


图 9 透镜组结构外形图

Fig. 9 Structural outline drawing of lens group structure $2'$,Z 轴方向透镜倾斜公差小于 $0.5'$,镜架上设计有定位面,装框时通过塞尺使光栅居中,通过在侧面和底面注胶实现固定。安装后通过干涉仪测量面型参数,根据面型参数来调整垫片,如图 10 所示。

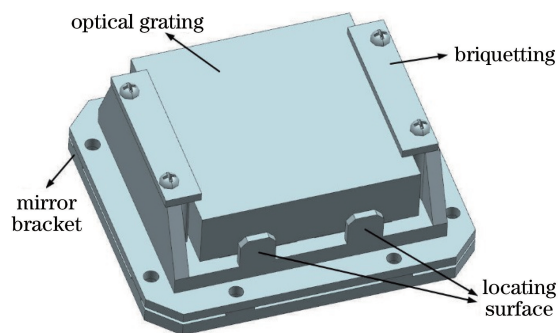


图 10 光栅组件结构外形图

Fig. 10 Outline drawing of optical grating structure

2.3.4 探测器模块

探测器模块主要由安装支架、调整垫片、探测器 3 部分组成。安装支架直接与机箱组件底板直接连接,探测器通过调整垫片安装到安装支架后端面上。通过调整垫片的厚度和角度,满足探测器的安装精度要求。安装支架的前端面设计有一个环形的嵌套结构,与光谱仪端部法兰进行连接,起到防尘及遮挡杂散光的作用,如图 11 所示。

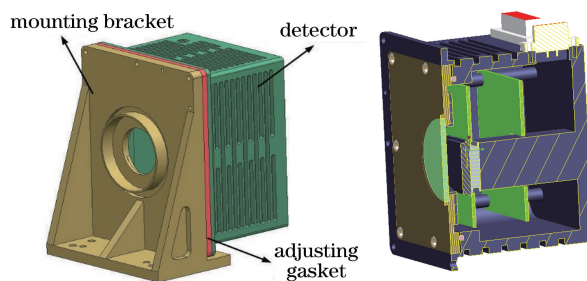


图 11 探测器模块外形图

Fig. 11 Outline drawing of detector module

3 探测器结构静力学、动力学分析

作为一种高精度的精密仪器,近紫外天底成像光谱仪无论是在加工环节亦或是在装配环节,都有严格的要求^[12]。本实验组采用国内外通用的 MSC.Patran/MSC.Nastran 航天结构分析软件进行结构的有限元分析计算^[13]。

3.1 设备结构模态分析

模态分析是设备研制工作的重要组成部分,是设备研制过程中重要的一环,关系到设备能否满足

设计要求、能否达到设计性能指标以及最终能否在轨正常工作^[14]。在模态分析中,低阶模态是最为重要的一环,因此也是分析的重点^[15]。边界条件是对设备法兰的 10 个安装孔施加位移约束,限制全部 6 个方向的自由度。表 2 是设备前 5 阶的固有频率和振型。图 12 为设备一阶振型云图。

星载设备一阶固有频率要求大于 100 Hz,从表 2 中可以看出,近紫外天底成像光谱仪结构在横向和纵向基频都比较高,满足卫星对仪器结构设计的动刚度要求。

表 2 前 5 阶的固有频率和振型

Table 2 Natural frequency and vibration mode of the first 5 orders

Order	Natural frequency /Hz	Vibration mode
1	205.69	Probe module swings along Y-axis
2	261.08	Probe module swings around X-axis
3	293.30	Secondary mirror module swings around Y-axis
4	385.98	Device swings around X-axis
5	448.22	Spectrometer module up and down swing

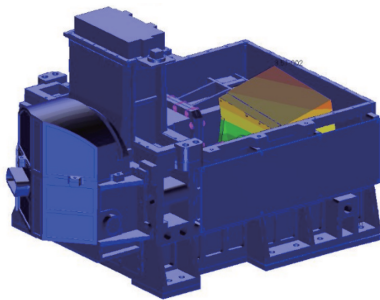


图 12 设备一阶振型云图

Fig. 12 Cloud diagram of first-order vibration mode for equipment

3.2 静力学分析

近紫外天底成像光谱仪为星上仪器,在轨运行时处于失重状态,可以忽略重力的影响。但是仪器装调和测试定标过程均在实验室完成,光机结构在此过程中均受到重力的影响^[14],实际性能与在轨运行时有一定的差异。其中光谱仪模块是设备的重要组成部分,它的力学性能、变形大小和尺寸稳定性将会直接影响到光路中各个透镜的相对位置和成像的质量,因此有必要对光谱仪模块进行静力学分析。边界条件是对光谱仪模块的 11 个安装孔施加位移约束,限制全部 6 个方向的自由度,载荷施加是对光谱仪整体结构施加 g 的重力载荷,方向为 Z 轴方向,竖直向下。

通过分析得到:最大变形为 $0.483 \mu\text{m}$,远小于光学系统要求的 $50 \mu\text{m}$;最大应力为 1.24 MPa ,小于铝合金 7075 材料的许用应力 325 MPa 。从分析中可以

看出,在重力的作用下,光谱仪模块无论是变形还是应力都很小,说明了光谱仪结构的设计满足要求。

3.3 过载分析

过载分析主要模拟设备在加速度环境中的承受能力。加速火箭的加速度主要产生在火箭向上的时候,是向上的推力导致的。在火箭的发射过程中,发动机在点火、关机、火箭级间分离等环节,都会使设备受到这种惯性载荷的作用。通过过载分析,可获得结构在这种环境中受到的最大应力和变形及发生部位,为评定结构的承载能力和可靠性提供依据^[12]。对设备整体结构沿 3 个轴向分别施加加速度载荷,方向分别沿 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向。加速度环境实验条件如表 3 所示。过载分析结果如表 4 所示。根据分析结果,可以看出机构最大应力远小于材料许用应力,设备是安全的。

表 3 加速度环境实验条件

Table 3 Acceleration environment test conditions

Parameter	Value
Acceleration along X-axis of the satellite	10g
Acceleration along Y-axis of the satellite	2g
Acceleration along Z-axis of the satellite	2g

3.4 正弦激励响应分析

正弦振动发生的原因有很多,包括火箭发动机不稳定燃烧导致的推力脉动变化,火箭部分结构与系统间的共振频率耦合等。一般来说,低频率的正弦振动的范围为 $5 \sim 100 \text{ Hz}$ 。低频正弦振动带来的影响却不容小觑,可能会导致组件共振或者系统

表 4 过载分析结果

Table 4 Results of overload analysis

Equipment composition	Material	Maximum deformation		Maximum stress		Allowable stress /MPa
		Maximum deformation /mm	Distribution location	Maximum stress /MPa	Distribution location	
Aluminum alloy structure	7075	0.0589	Upper right part of detector module	50.4	Mounting hole of imaging objective lens frame and chassis bottom plate of spectrometer module	325
Lens	Fused quartz	0.0420	The spectrometer module images the objective lens	4.74	The spectrometer module collimates the reflector	36
Heat insulated pad	Fiber glass	0.0152	Left heat insulated pad middle	3.57	Installation hole for heat insulated pad on right side	32

整机共振,甚至会给光学元件带来不可修复的损伤,破坏元器件的结构^[15]。边界条件是对设备法兰的 10 个安装孔施加位移约束,限制全部 6 个方向的自由度,载荷施加在机箱组件与卫星底板的连接法兰上,激励方向分别为 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向,激励形式为正弦激励,激振力载荷按照设备鉴定振动实验

条件施加,如表 5 和表 6 所示。根据设备的载荷条件,分析时把频率增加到 500 Hz,可以更清楚地观察响应情况。综合 3 个轴向方向振动响应分析结果,得出设备正弦振动最大加速度响应和最大应力,如表 7 所示。

表 5 X 轴向正弦振动实验条件

Table 5 X direction sinusoidal vibration test conditions

Parameter	Value					
Frequency range /Hz	5-12	12-25	25-35	35-60	60-70	60-100
Vibration level	3.88 mm	2.25g	4.5g	4.5g	3g	3g

表 6 Y、Z 轴向正弦振动实验条件

Table 6 Y, Z direction sinusoidal vibration test conditions

Parameter	Value				
Frequency range /Hz	5-12	12-25	25-35	35-100	
Vibration level	11.65 mm	6.75g	5.25g	5.25g	

表 7 正弦激励响应结果

Table 7 Sinusoidal vibration response results

Sinusoidal vibration loading direction	Maximum acceleration response			Maximum stress response	
	Acceleration	Magnification	Stress /MPa	Position	Allowable stress /MPa
X-axis	4.86g	1.08	28.6	Spectrometer lens screw hole at the bottom	
Y-axis	6.79g	1.01	21.6	Spectrometer and chassis bottom flange	325
Z-axis	6.81g	1.01	22.8	Spectrometer ear	

从表 7 中可以看出,3 个方向最大加速度与输入的加速度相比放大倍数比很小,可见设备的振动安全性比较高,结构没有发生共振。另外 3 个方向最大应力均小于材料的许用应力,由此可以看出,在考查的正弦响应的频率范围内,设备在正弦振动后不会损坏,因此设备是安全的。

3.5 随机振动响应分析

随机振动激励存在于火箭的升空主动段,产生的原因有可能是喷气噪声,有可能是脉动推力,也可

能是紊流边界层噪声等^[16]。通过卫星平台与设备底部连接的支撑结构,这些环境激励直接从设备支撑结构传递到设备结构上,将引起设备结构变形甚至破坏设备结构^[13]。边界条件是对设备法兰的 10 个安装孔施加位移约束,限制全部 6 个方向的自由度。在随机响应的计算中,激振力作用在机箱组件与卫星底板的连接法兰上,激励方向分别为 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向,激振力载荷按照设备鉴定振动实验条件施加,如表 8 所示。

表 8 随机振动实验条件

Table 8 Random vibration test conditions

Frequency range /Hz	20-100	100-600	600-2000
Power spectral density	+3 dB/oct	0.09 g ² · Hz ⁻¹	-9 dB/oct
Total root mean square acceleration (Grms)	8.6g		
Test direction	X, Y, Z triaxial		

表 9 随机振动响应结果

Table 9 Random vibration response results

Random vibration direction	Maximum acceleration response			Maximum stress response	
	Result of random vibration analysis	Magnification	Stress /MPa	Position	Allowable stress /MPa
	Grms				
X-axis	167.8g	19.5	8.75	Top surface light inlet rear plate section	
Y-axis	24.99g	2.9	5.29	Spectrometer lens holder upper end	325
Z-axis	32.35g	3.8	0.51	Spectrometer lens back side	

综合 3 个轴向方向振动响应分析结果,得出设备正弦振动最大加速度响应和最大应力,如表 9 所示。从表中可以看出,虽然 X 方向放大倍数较大,但该方向关注点的应力很小,远小于材料 325 MPa 的许用应力。由此可以看出,在考查的随机响应的频率范围内,不会出现结构破坏的情况。

4 系统光机热集成分析

针对精密光学仪器,光机热集成分析的意义十分重要,它是光、机、热数据共享为技术支撑,通过量化的光学性能指标作为设计的评判依据,通过集成分析方法获得数据和参数,能够更加有效地指导设计过程,节约成本并提升仪器的性能^[17]。

4.1 光机系统的热计算

光机系统的热计算通过仿真光机系统的热变形导致的性能衰减,确定各个部分的工作温度范围,从而为光机系统的热仿真与热控设计提供输入条件。主要分析了 10 °C 和 30 °C 两个工况,结果如表 10 所示。

表 10 工况位移极值

Table 10 Extremum of displacement in working conditions

Working condition	Maximum displacement of mirror node /mm
01	0.1143
02	0.07121

4.2 Zernike 多项式拟合

求解 Zernike 多项式系数,一般用到的方法如下:1)对函数族的基底进行调整来改善方程组;2)用 Householder 正交三角化系数矩阵,再通过最小二乘法拟合。由于直接使用最小二乘法求解时,正则

方程常出现病态,但是使用 Gram-Schmidt 方法构造正交归一函数系的过程中,相关性的情况非常多,求解不能达到预期。实际上最小二乘法 and Gram-Schmidt 正交化方法在求解 Zernike 多项式拟合系数解时的稳定性是一致的。数据量较小时,最小二乘法拟合求解是首选方案,因此在设计数据转换接口时采用了算法简洁的最小二乘法,最小二乘误差函数^[17-18]为

$$E = \sum K_i (\epsilon_i - X_i)^2, \quad (11)$$

$$X_i = \sum z_j \Phi_{ji}, \quad (12)$$

式中: X_i 为 Zernike 多项式表示的变形; z_j 为 Zernike 多项式的系数; Φ_{ji} 为 Zernike 多项式; ϵ_i 为实际有限元计算得出的变形; K_i 为各节点分配的权重函数。联立(11)、(12)式可得

$$E = \sum K_i (\epsilon_i - \sum z_j \Phi_{ji})^2. \quad (13)$$

根据最小二乘法原理,当 $E' = 2 \sum K_i (\epsilon_i - \sum z_j \Phi_{ji}) \Phi_{ji} = 0$ 时,可以得到线性方程组,系数向量可使用高斯法进行求解。每个镜面拟合后的数据以 INT 文件格式输出,同时会产生一个系统整体的刚体位移文件,该文件需要通过宏命令导入到光学文件中。在原始设计的光学文件中加载刚体位移宏命令和各镜面 INT 文件后,即可在光学软件中进行特定工况干扰后系统光学指标的评价。

4.3 成像质量分析

根据上述方法,通过编程分析可以得到主镜和次镜表面的变形图,如图 13 所示,从图中可以看出光学表面拟合后的变形情况,并且得到了 10 °C 和 30 °C 下的光学系统调制传递函数(MTF),如图 14 和图 15 所示。

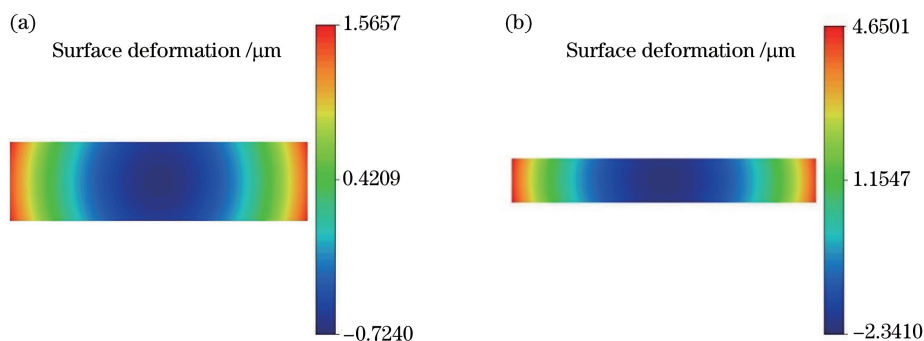


图 13 表面变形图。(a)主镜;(b)次镜

Fig. 13 Surface deformation. (a) Main mirror; (b) secondary mirror

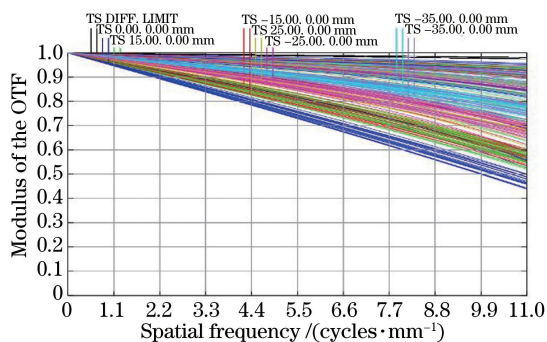


图 14 10 °C 时传递函数曲线

Fig. 14 MTF at 10 °C

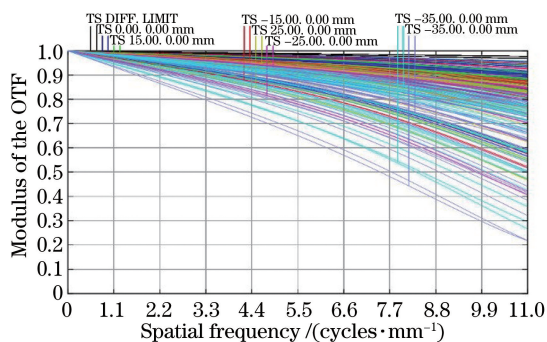


图 15 30 °C 时传递函数曲线

Fig. 15 MTF at 30 °C

从图 14、15 中可以看出,MTF 均发生了较大的变化,但实际要求只为 6.5 lp/mm,可以满足光学系统的性能指标,说明光机热集成设计符合设计使用要求。

5 实验结果

设备使用 BT1200M 液体静压式水平滑台,对总装完成的近紫外天底成像光谱仪进行了力学环境实验,如图 16 所示。实验结果表明设备一阶频率为 210.75 Hz,如图 17 所示,与分析结果 205.69 Hz 的误差为 2.5%。设备正弦振动实验结果表明,X 轴向最大加速度响应放大倍数为 1.04,与分析结果的误差为 3.8%,Y 轴向最大放大倍数为 1.04,与分析

结果的误差为 3.28%,Z 轴向最大放大倍数为 1.03,与分析结果的误差为 2.1%。随机振动实验结果表明,X 轴向最大加速度响应放大倍数为 18.7,与分析结果的误差为 3.35%,Y 轴向最大加速度响应放大倍数为 3.05,与分析结果的误差为 4.72%,Z 轴向最大加速度响应放大倍数为 3.6,与分析结果的误差为 4.5%。实验结果表明设备结构满足力学环境实验要求,结构总体力学性能较好。

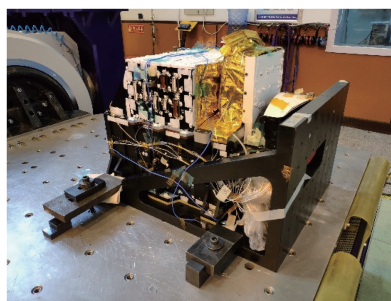


图 16 设备力学实验照片

Fig. 16 Photograph of equipment mechanics test

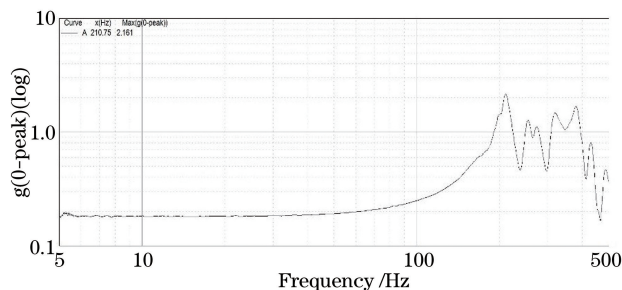


图 17 设备测点实验曲线

Fig. 17 Experimental curve of equipment measuring points

设备在后续其他环境实验中的表现均满足实验要求。在力学实验后,使用标准谱线灯测试设备光谱特性,与进行力学实验前结果对比,光谱特性前后一致,如图 18 所示,力学前后光谱特性测试的量化结果如表 11 所示,最大变化为 0.4 个像素。证明结构设计合理,稳定性良好。



图 18 力学实验前后光谱特性对比图。

(a)实验前;(b)实验后

Fig. 18 Comparison of spectral characteristics before and after mechanics experiments. (a) Before experiment; (b) after experiment

表 11 光谱位置变化结果

Table 11 Spectral position change results

Wavelength /nm	Before mechanics	After mechanics
	experiment (pixel position)	experiment (pixel position)
340	124.5	124.8
354	360.5	360.1
380	425.5	425.3
388	507.5	507.2

6 结 论

针对大气环境监测和预报的需求,设计了一种满足光学系统要求的近紫外天底成像光谱仪的结构方案。根据给定的光学系统,设计了设备的总体构形、布局,并对主镜和次镜进行了变密度拓扑优化,同时根据光学系统对结构的要求指标,给出了各模块的结构方案。对方案进行了模态、静力、过载、正弦振动、随机振动的仿真分析,同时对设备系统进行了光机热集成分析,最后进行了实验验证。结果表明:设备一阶频率为 210.75 Hz,大于 100 Hz 的要求;正弦振动实验结果最大放大倍数为 1.04,与分析结果的误差为 3.8%,未发生共振响应;随机振动实验最大放大倍数为 18.7,但该处位于进光口后侧板,属于单纯的结构件,对光学系统并未造成影响,且该处结构应力很小,结构并未发生破坏。力学实验前后光谱特性一致,且设备通过了所有环境实验,表明设备结构设计满足各项技术要求,验证了结构设计方案是合理可行的,为今后近紫外天底成像光谱仪结构方案设计提供了一种新的思路。

参 考 文 献

[1] Ye Y, Li X Y, Chen K, et al. Association of aerosol optical depth with air pollutants and meteorological factors: a time series analysis [J]. Climatic and

Environmental Research, 2011, 16(2): 169-174.

叶瑜,李秀央,陈坤,等. 大气气溶胶光学厚度与大气污染物及气象因素关系的时间序列研究[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(2): 169-174.

[2] Fan X H, Chen H B, Xia X A. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2): 477-498.

范学花,陈洪滨,夏祥鳌. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 477-498.

[3] Fang L, Yu T, Gu X F, et al. Aerosol retrieval and atmospheric correction of HJ-1 CCD data over Beijing [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(1): 151-164.

方莉,余涛,顾行发,等. 北京地区 HJ-1 卫星 CCD 数据的气溶胶反演及在大气校正中的应用[J]. 遥感学报, 2013, 17(1): 151-164.

[4] Hu F, Jin S Y. Study on the development of wide swath imaging technology about high resolution optical remote sensing satellites [J]. Geomatics World, 2017, 24(5): 45-50.

胡芬,金淑英. 高分辨率光学遥感卫星宽幅成像技术发展浅析[J]. 地理信息世界, 2017, 24(5): 45-50.

[5] Wang Y K. Research of wide swath imaging technology based on area-array detector adopting whiskbroom scanning mode[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2015.

王义坤. 面阵摆扫宽幅成像技术研究[D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2015.

[6] Zhang D, Zheng Y Q. Hyperspectral remote sensing and its development and application review [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(3): 67-73.

张达,郑玉权. 高光谱遥感的发展与应用[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(3): 67-73.

[7] Hu Q L. Optical and mechanical structure design and research on image motion compensation technology of whisking broom space-based infrared imaging system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.

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]. 北京: 中国科学院大学, 2018.

[8] Shao M Q, Zhang L, Li L, et al. Optimization design of supporting backplate for ultra-light space camera [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0322001.

邵梦旗,张雷,李林,等. 超轻空间相机主支撑背板的优化设计[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0322001.

- [9] Hu Y, Li J, Jia X Z. Optimal design of lightweight off-axis mirror and flexible support[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1923002.
胡洋, 李季, 贾学志. 超轻离轴反射镜及柔性支撑优化设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1923002.
- [10] Wang T L, Zhang L, Jia X Z, et al. Optimized design of integrated ultra-light main supporting structure for micro-nano remote-sensing camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0728009.
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): 0728009.
- [11] Ji H X, Zhu Y T, Hu Z W. Optical system design of high throughput multi-channel spectrograph for very large telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0330003.
季杭馨, 朱永田, 胡中文. 极大望远镜高效率多通道光谱仪的光学系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0330003.
- [12] Jiang R K. Dynamic analysis and optimization of astronomical survey camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
蒋仁奎. 巡天相机结构动力学分析与优化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [13] Ma X R, Yu D Y, Han Z Y, et al. Research evolution on the satellite-rocket mechanical environment analysis & test technology[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(3): 323-331.
马兴瑞, 于登云, 韩增尧, 等. 星箭力学环境分析与实验技术研究进展[J]. *宇航学报*, 2006, 27(3): 323-331.
- [14] Plotnikov B C, Valvromev H, Pustovalov B E. Design and calculation of optical-mechanical instrument[M]. Zhu S J, Transl. Beijing: China Machine Press, 1991.
B. C. 普洛特尼科夫, H. 瓦尔佛洛麦夫, B. E. 普斯托瓦洛夫. 光学机械仪器设计和计算[M]. 祝绍箕, 译. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [15] Zhao H Z. Design and finite element analysis of background objective measurer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
赵华振. 背景/目标测量仪关键部件的设计与有限元分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [16] Guo Y M, Wan L, Huang D. Finite element method and engineering application of MSC. Nastran software [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
郭乙木, 万力, 黄丹. 有限元法与 MSC. Nastran 软件的工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [17] Yang W Q. Optical-mechanical-thermal integrated analysis on optical component of Mars medium resolution camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
杨文强. 火星中分辨率相机光学组件光机热集成分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [18] Yang Y, Zhang W, Chen S J. Study on data transmission tool for thermal/structural/optical integrated analysis [J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(2): 201-205, 222.
杨怿, 张伟, 陈时锦. 光机热集成分析中数据转换接口的研究[J]. *宇航学报*, 2005, 26(2): 201-205, 222.