

Offner 型短波红外成像光谱仪的结构分析与实验

郑志忠^{1,3*}, 杨忠¹, 秦远田², 王立国²

¹南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211100;

²南京航空航天大学航天学院, 江苏 南京 210016;

³中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

摘要 为使成像光谱仪能在复杂振动环境和宽温(5~35 °C)下使用,基于 Offner 同心结构凸面光栅的光学系统,研制出短波红外成像光谱仪系统。为了验证结构设计的合理性,利用 Patran & Nastran 对仪器光机结构进行模态分析、静载分析及热致响应分析,并采用广义逆矩阵方法对静载响应分析结果进行处理,得到仪器光学元件的面形变化和刚体位移数据。在 0~40 °C 温度范围和 4 g 加速度载荷下,仪器光学面形变化的方均根(RMS)值小于 34 nm,各镜之间相对位置变化小于 0.05 mm,各镜偏心小于 0.05 mm,满足仪器面形和刚体位移公差要求。振动实验表明,成像光谱仪的一阶模态为 559 Hz,远高于一般环境激励,其刚度满足使用要求。温度实验表明,宽温范围内波长极值漂移为 0.306 pixel,光谱带宽极值变化为 0.493 Δ (Δ 为吸收峰的半峰全宽)。工程分析和实验验证了该结构的环境适应性,这对仪器工程化具有重要的实用价值。

关键词 光谱学; Offner 型光学系统; 成像光谱仪; 结构分析; 广义逆矩阵; 光学面形

中图分类号 TH744.1; TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.053001

Structure Analysis and Experiment of an Offner-Type Short-Wave Infrared Imaging Spectrometer

Zheng Zhizhong^{1,3*}, Yang Zhong¹, Qin Yuantian², Wang Ligu²

¹College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

²College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

³Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In order to enable imaging spectrometer to be used in a complex vibration environment and a wide temperature range (5-35 °C), we designed a short-wave infrared imaging spectrometer based on an optical system of convex gratings using Offner-type concentric structure. Patran & Nastran was used to conduct modal analysis, static load analysis, and thermal response analysis with respect to the optical-mechanical structure of the instrument to verify the rationality of structure design. Further, the generalized inverse matrix method was used to process the results obtained based on static load response analysis to obtain the surface deformation and rigid body displacement data with respect to optical element of the instrument. Under temperature of 0-40 °C and an acceleration load of 4 g, the root mean square (RMS) with respect to the optical surface deformation is less than 34 nm, the relative position change between the mirrors is less than 0.05 mm, and the eccentricity of mirrors is less than 0.05 mm, satisfying the requirements for the surface shape and rigid body displacement tolerance of the instrument. The vibration tests denote that the first mode of the imaging spectrometer is 559 Hz, which is considerably higher than that of general ambient excitation. The stiffness of the imaging spectrometer also satisfies the application requirement. The temperature experiments denote that the extreme wavelength drift is 0.306 pixel in a wide temperature range and that the extreme spectral bandwidth change is 0.493 Δ , in which Δ is full width at half-maximum (FWHM). Furthermore, the environmental adaptability of the structural design is verified via engineering analyses and

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-08-20; 录用日期: 2019-08-27

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ05025001)

* E-mail: zhengzz_js@126.com

experiments, resulting in important practical value for instrument engineering.

Key words spectroscopy; Offner type optical system; imaging spectrometer; structure analysis; generalized inverse matrix; optical surface

OCIS codes 300.6340; 120.4630; 120.6200

1 引言

成像光谱技术是集成像与光谱探测为一体的多维信息获取技术,能够在连续的光谱段上对同一目标进行分光同时成像,从而获得被测目标的空间信息和光谱信息。从技术和应用发展历史来看,自20世纪80年代以来,成像光谱技术经历了航空高光谱遥感、航天遥感及商业化推广应用三个阶段,这些成像光谱系统的光谱范围从可见近红外(VNIR: $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$)、短波红外(SWIR: $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$)、中红外(MIR: $3 \sim 5 \mu\text{m}$)到热红外(TIR: $8 \sim 12 \mu\text{m}$),波段数从几十到几百,应用行业覆盖地质、能源、农业、环境及海洋等领域。近年来无人机技术、野外现场测量及实验室快速分析检测等,对成像光谱仪尤其是小型化短波红外成像光谱仪的需求迫切。基于凸面光栅分光为核心的成像光谱仪器,相比其他分光系统(平面光栅分光、傅里叶变换光谱技术、滤光片分光、液晶可调谐滤波及声光调制等),具有光学相对孔径大、色散线性度好、结构紧凑和图像成像质量佳等优点。美国1997年发射的卡西尼号土星探测器,其中搭载的成像光谱仪为最早的Offner型凸面光栅成像光谱仪^[1-2]。在目标识别应用方面,短波红外波段相较其他波段,用于探测时具有诸多优势,该光谱区域已成为目前热门研究和应用的谱段^[1-3]。小型短波红外成像光谱仪在应用推广过程中,高质量数据是前提保障,数据质量不仅需要清晰的图像而且要求光谱测量数据稳定,然而环境的变化(振动、温度梯度)会影响成像光谱仪光谱数据的质量,导致谱线漂移和光谱分辨率下降。文献[4]对凸面光栅分光成像光谱仪结构振动分析开展研究,文献[5]在应用实验方面较早开展环境对成像光谱仪数据质量影响的研究。从结构设计、工程分析及实验三方面系统性地对Offner型凸面光栅分光成像光谱仪开展研究的报道较少。

本文基于Offner型同心光学的凸面光栅分光原理,介绍了短波红外成像光谱仪分光光学系统,提出采用基于一体化设计和粘连支撑的方案,设计出一套小型化的短波红外成像光谱仪系统。通过构建结构有限元模型,分析系统动力学特性和温度特性,以动力学响应和镜体面形精度为优化目标,对整体

结构进行优化设计,并完成振动和温度实验,最终验证了结构的合理性,这对仪器工程化具有重要的实用价值。

2 Offner型短波红外分光光学系统

一个典型的Offner型分光光学系统由2块凹面反射镜和1块凸面衍射光栅组成,是在反射式Offner型中继光学系统的基础上发展起来的新型光谱成像系统,为一平面对称系统^[1]。配置前置镜头的分光光学系统和短波红外相机系统组成一套完整的短波红外成像光谱仪,如图1所示。

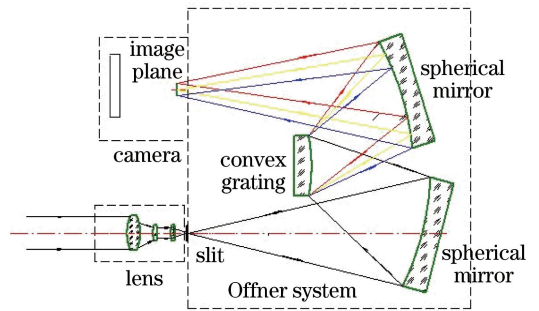


图1 Offner型成像光谱仪结构组成

Fig. 1 Structural composition of an Offner imaging spectrometer

根据应用需求,短波红外成像光谱仪指标参数如表1所示。

表1 成像光谱仪指标参数

Table 1 Index parameters of imaging spectrometer

Parameter	Value
Wavelength range /nm	1000-2500
Focal length /mm	130
<i>F</i> -number	2.2
Dispersion /($\text{nm} \cdot \text{pixel}^{-1}$)	7.5
Slit dimension /mm	Height: 12, width: 0.025
Detector array size /pixel	320×256
Detector pixel size / μm^2	30×30

通过光学设计与仿真分析,影响光学系统成像质量的因素主要有各镜的面形变化和各镜的相对位置变化等,即光学系统光学元件面形和光学公差。

为保证成像质量,准直镜、凸球面光栅、成像镜面形误差的方均根(RMS)要小于34 nm,各镜之间相对位置变化要小于0.05 mm,各镜偏心量变化要小于0.05 mm。

3 成像光谱仪的结构设计

成像光谱仪在进行结构设计时主要考虑以下因素:

- 1) 支撑结构应具有足够的支撑刚度,在环境载荷作用下需保持镜面变形在许可的范围内;
- 2) 整体结构具有足够的刚度,在环境载荷作用下应保持各光学元件的相对刚体位移在许可范围内;
- 3) 在温度范围内应满足光学系统面形要求;
- 4) 结构设计应保证光机系统总装和检测的便利,同时还需考虑结构的经济性。

Offner 型系统为离轴光学系统,离轴系统中对离轴三反(TMA)望远镜的研究较多,此类系统大都采用主框架结构,反射镜采用背部支撑^[4,6-7],这种方

式成本较高,多应用于航天光学遥感载荷系统。本次分析的成像光谱仪结构组成如图 2 所示,结构为一个整体腔体,光学元件与结构采用粘连方式连接,所选用的材料及属性如表 2 所示。

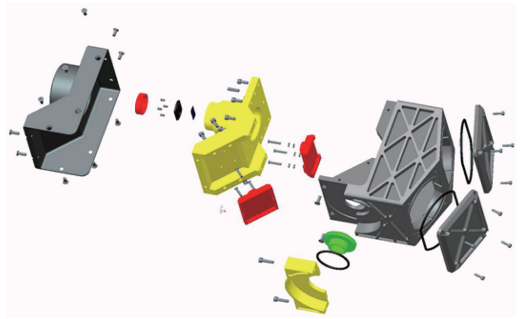


图 2 结构拆解图

Fig. 2 Exploded view of the components

表 2 成像光谱仪的材料属性表

Table 2 Material property sheet for imaging spectrometer

Material	Density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Modulus of elasticity /GPa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion /(10^{-6}K^{-1})
6061 aluminum	2.70	70	0.33	21.7
45 steel	7.85	202	0.30	10.6
K9 glass	2.51	55	0.21	7.1

4 工程分析

为了考核结构刚度和环境载荷对成像光谱仪成像质量的影响,利用 Patran & Nastran 对光机结构进行模态分析和载荷(加速度载荷、随机载荷及温度载荷)响应分析。同时采用广义逆矩阵方法对各反射镜在不同载荷作用下的面形变化进行分析求解。

4.1 有限元模型

利用 Patran 建立有限元模型。有限元模型采用体单元和壳单元,其中大部分采用六面体单元,所有的加强筋都用壳单元,如图 3 所示。

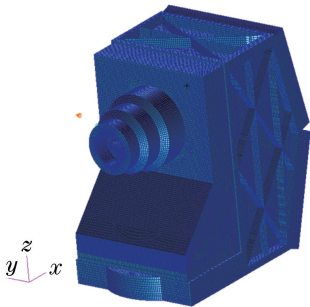


图 3 成像光谱仪的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of imaging spectrometer

4.2 模态分析

为了避免成像系统在受迫振动时发生共振而破坏结构,系统的固有频率要避开环境激励频率,同时考虑到其具有足够大的动态刚度,需对固有模态进行分析。图 4 是成像光谱仪的一阶模态振型图。成像光谱仪的一阶模态为 559 Hz,远高于一般环境激励,其刚度是满足要求的。

4.3 利用广义逆矩阵方法求解面形变化和刚体位移

利用文献[4]提到的广义逆矩阵方法对环境载荷作用下的镜面面形进行拟合,进而求解镜面面形变化。刚体位移的求解是利用齐次坐标变换建立镜面变形前后各节点的对应关系,构建六元一次方程组,去除高阶项后,分离变量,再次构建齐次线性方程组,利用广义逆矩阵方法求解镜面刚体位移^[3,6]。

1) 球面镜面形变化处理

将球面方程形式变换为

$$\alpha x_i + \beta y_i + \gamma z_i + \theta = -(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2), \quad (1)$$

式中: x_i, y_i, z_i 为变形后的节点坐标; i 为节点序号, $i=1,2,\dots,n$,其中 n 为节点总数; $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ 为待求解量^[7-8]。

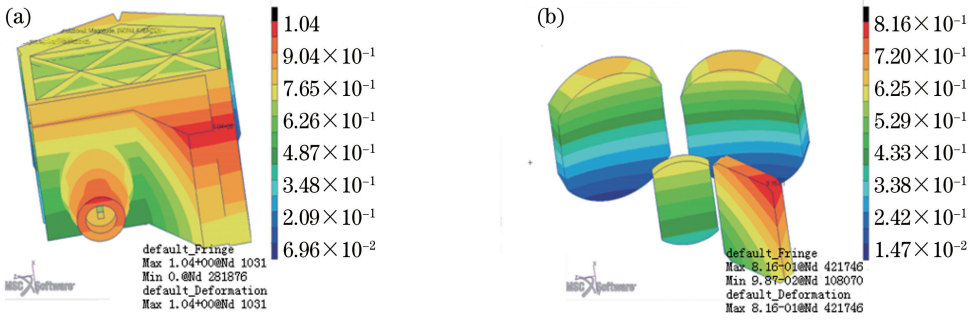


图4 机械结构和光学零件的一阶模态振型图。(a)机械结构;(b)光学零件

Fig. 4 Nature mode sharp of mechanical structure and optical elements. (a) Mechanical structure; (b) optical elements

由广义逆矩阵理论,可求解未知量的最小二乘解: 令 $C = -1$, 则

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 + z_n^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

球心坐标和半径为

$$a = -\frac{\alpha}{2}, b = -\frac{\beta}{2}, c = -\frac{\gamma}{2}, \quad (3)$$

$$R = \sqrt{\frac{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}{4} - \theta}.$$

球面上节点到拟合后的新球心距离 l_i 为

$$l_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - a)^2 + (z_i - a)^2}. \quad (4)$$

距离平均值为

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i. \quad (5)$$

变形后镜面的法向面形变化的 RMS 值为

$$R_{MS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n}}. \quad (6)$$

法向面形变化的峰谷(PV)值为

$$P_V = \max(l_i) - \min(l_i). \quad (7)$$

2) 平面镜面形变化处理

平面方程的一般形式为

$$Ax_i + By_i + Cz_i + D = 0, \quad (8)$$

式中: A, B, C, D 为常数。

将平面方程形式变换为

$$z_i = -(Ax_i + By_i + D)/C, \quad (9)$$

$$z_i = Ax_i + By_i + D. \quad (10)$$

将(10)式写成

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}. \quad (11)$$

(11)式满足平面方程的正则方程组,由广义逆矩阵理论,可求解未知量 A, B, D 的最小二乘解,即

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}. \quad (12)$$

镜面变形后节点到拟合平面的距离 d_i 为

$$d_i = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (13)$$

变形后镜面的法向面形变化的 RMS 值为

$$R_{MS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}. \quad (14)$$

法向面形变化的 PV 值为

$$P_V = \max(d_i) - \min(d_i). \quad (15)$$

3) 利用线性坐标变换和广义逆矩阵方法求解镜面刚体位移

假设镜面的刚体位移为 $[T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z]$, 则变形后的节点 (x'_i, y'_i, z'_i) 可以看成节点 (x_i, y_i, z_i) 的坐标系 $C1$ 按如下顺序变换到坐标系 $C0$: T_x, T_y, T_z 的平移顺序任意; 旋转顺序为先绕 x 轴旋转 R_x , 再绕 y 轴旋转 R_y , 最后绕 z 轴旋转 R_z , 即

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos R_z & \sin R_z & 0 \\ -\sin R_z & \cos R_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos R_y & 0 & -\sin R_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R_y & 0 & \cos R_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_x & \sin R_x \\ 0 & -\sin R_x & \cos R_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos R_z \cos R_y & \sin R_z \cos R_x + \cos R_z \sin R_y \sin R_x & \sin R_z \sin R_x - \cos R_z \sin R_y \cos R_x \\ -\sin R_z \cos R_y & \cos R_z \cos R_x - \sin R_z \sin R_y \sin R_x & \cos R_z \sin R_x + \sin R_z \sin R_y \cos R_x \\ \sin R_y & -\cos R_y \sin R_x & \cos R_y \cos R_x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

对于成像光谱仪这样的小像差系统,各光学镜面刚体位移一般较小,去除坐标变化矩阵中的高阶项,可简化为

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (18)$$

分离变量,(18)式可以写成

$$\begin{bmatrix} x'_i - x_i \\ y'_i - y_i \\ z'_i - z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y_i & z_i & 0 & 0 & 0 & 1 \\ x_i & 0 & -z_i & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -x_i & y_i & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_z \\ R_y \\ R_x \\ T_z \\ T_y \\ T_x \end{bmatrix} \quad (19)$$

(19)式还可以写成

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_1 - x_1 \\ y'_1 - y_1 \\ z'_1 - z_1 \\ \vdots \\ x'_n - x_n \\ y'_n - y_n \\ z'_n - z_n \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -y_1 & z_1 & 0 \\ x_1 & 0 & -z_1 \\ 0 & -x_1 & y_1 \\ \vdots \\ -y_n & z_n & 0 \\ x_n & 0 & -z_n \\ 0 & -x_n & y_n \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \vdots \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} R_z \\ R_y \\ R_x \\ T_z \\ T_y \\ T_x \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (20)$$

由广义逆矩阵理论,可求解未知量的最小二乘解:

$$\begin{bmatrix} R_z \\ R_y \\ R_x \\ T_z \\ T_y \\ T_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -y_1 & z_1 & 0 \\ x_1 & 0 & -z_1 \\ 0 & -x_1 & y_1 \\ \vdots \\ -y_n & z_n & 0 \\ x_n & 0 & -z_n \\ 0 & -x_n & y_n \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \vdots \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_1 - x_1 \\ y'_1 - y_1 \\ z'_1 - z_1 \\ \vdots \\ x'_n - x_n \\ y'_n - y_n \\ z'_n - z_n \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (21)$$

4.4 加速度载荷分析

在 4 g 加速度载荷作用下对成像光谱仪进行静力学分析^[9-10],各光学镜面面形变化和刚体位移结果见表 3。

由表 3 可知,在 4 g 加速度载荷作用下,成像光谱仪各镜面面形误差的 R_{MS} 最大值发生在 X 向加载时的反射镜上,为 0.53 nm,小于 34 nm, P_V 最大值为 12.89 nm,小于 170 nm;刚体位移(即偏心量)最大值为 3.64 μm (线位移)和 5.25" (角位移),小于 0.05 mm,满足使用要求。

4 g 加速度载荷下的各镜之间的相对位置变化

见表 4~6,各镜之间的相对位置变化的最大值发生在发射镜和光栅之间,为 1.16 μm ,小于 0.05 mm,满足使用要求。

4.5 热载荷分析

成像光谱仪装配温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,工作环境温度要求为 5~35 $^{\circ}\text{C}$ 。在 0~40 $^{\circ}\text{C}$ 温度载荷下对成像光谱仪进行分析^[9],各光学元件镜面面形变化和刚体位移数据如表 7 所示。

反射镜、光栅、成像镜与准直镜在 0~40 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围面形变化如图 5、6 所示,从图中可以看出镜面面形 R_{MS} 值小 34 nm, P_V 值小于 170 nm,满足设

表3 4 g 加速度载荷下的面形变化和刚体位移

Table 3 Shape errors and rigid displacement with 4 g acceleration load

Direction	Parameter	Mirror	Grating	Image plane	Collimating mirror
X	R_{MS}/nm	0.53	0.20	0.52	0.04
	P_V/nm	12.89	1.69	2.25	1.57
	Rigid angular displacement /(")	5.18	5.25	5.19	5.24
	Rigid line displacement / μm	3.64	3.51	3.95	3.46
Y	R_{MS}/nm	0.010	0.040	0.050	0.004
	P_V/mm	1.53	0.63	3.11	2.12
	Rigid angular displacement /(")	2.95	2.83	3.13	2.79
	Rigid line displacement / μm	2.10	2.10	2.29	2.08
Z	R_{MS}/nm	0.14	0.05	0.20	0.01
	P_V/mm	5.40	1.03	0.53	0.15
	Rigid angular displacement /(")	0.59	0.73	0.82	0.83
	Rigid line displacement / μm	0.52	0.59	0.83	0.66

表4 X 向加载 4 g 加速度时各镜之间的相对位置(角位移/线位移)

Table 4 Relative displacement between mirrors on X-direction 4 g acceleration load (angular displacement/line displacement)

Component	Mirror	Grating	Imageplane	Collimatingmirror
Mirror	—	0.07"/1.16 μm	0.57"/0.32 μm	0.19"/0.23 μm
Grating	0.07"/1.16 μm	—	0.33"/0.46 μm	0.10"/0.05 μm
Image plane	0.57"/0.32 μm	0.33"/0.46 μm	—	0.41"/0.49 μm
Collimatingmirror	0.19"/0.23 μm	0.10"/0.05 μm	0.41"/0.49 μm	—

表5 Y 向加载 4 g 加速度时各镜之间的相对位置(角位移/线位移)

Table 5 Relative displacement between mirrors on Y-direction 4 g acceleration load (angular displacement/line displacement)

Component	Mirror	Grating	Imageplane	Collimatingmirror
Mirror	—	0.12"/0.03 μm	0.34"/0.24 μm	0.16"/0.04 μm
Grating	0.12"/0.03 μm	—	0.38"/0.25 μm	0.08"/0.03 μm
Image plane	0.34"/0.24 μm	0.38"/0.25 μm	—	0.45"/0.28 μm
Collimatingmirror	0.16"/0.04 μm	0.08"/0.03 μm	0.45"/0.28 μm	—

表6 Z 向加载 4 g 加速度时各镜之间的相对位置(角位移/线位移)

Table 6 Relative displacement between mirrors on Z-direction 4 g acceleration load (angular displacement/line displacement)

Component	Mirror	Grating	Imageplane	Collimatingmirror
Mirror	—	0.29"/0.19 μm	0.34"/0.33 μm	0.31"/0.20 μm
Grating	0.29"/0.19 μm	—	0.51"/0.33 μm	0.27"/0.10 μm
Image plane	0.34"/0.33 μm	0.51"/0.33 μm	—	0.31"/0.23 μm
Collimatingmirror	0.31"/0.20 μm	0.27"/0.10 μm	0.31"/0.23 μm	—

计指标要求。图8给出0~40℃温度载荷时各镜之间的相对位置变化的最大值。从图7、8可以看出各镜间相对位置变化均小于0.05 mm,亦能满足设计要求。将上述工况用ZEMAX软件对变形后的光学系统进行光线追迹,求解了8个工况的镜面刚体位移导致的光谱成像系统CCD像面上的谱线位置变化。文中研究的成像光谱仪在光谱方向上的探测器像元尺寸为30 μm ,在空间方向上的像元尺寸为30 μm 。分析得到光谱漂移极值变化为8.2 μm ,即0.27 pixel。

5 环境实验

成像光谱仪搭载至运动平台(星载、机载、车载)或在野外环境中正常工作时,需满足平台的振动环境和工作温度范围的要求。环境实验一方面用于验证分析结果,另一方面用于分析成像光谱仪的环境适应性。力学、热学环境实验是为了考核成像光谱仪对环境的适应性,以验证结构设计的合理性。

5.1 力学环境实验

力学环境实验条件如表9所示,表中oct表示

表 7 0~40 °C 温度载荷下成像光谱仪的面形变化和刚体位移

Table 7 Shape errors and rigid displacement of imaging spectrometer on 0~40 °C temperature load

	Parameter	Mirror	Grating	Image plane	Collimating mirror
max	R_{MS}/nm	12.9	15.8	16.4	17.9
	P_V/nm	86.2	75.2	79.3	102.8
	Rigid angular displacement /(")	39.8	35.1	33.3	40.4
	Rigid line displacement / μm	50.4	36.3	24.7	55.6
min	R_{MS}/nm	5.0	4.6	4.8	5.0
	P_V/nm	32.1	24.0	32.4	27.1
	Rigid angular displacement /(")	9.9	8.6	8.3	18.7
	Rigid line displacement / μm	12.6	9.1	6.2	13.7

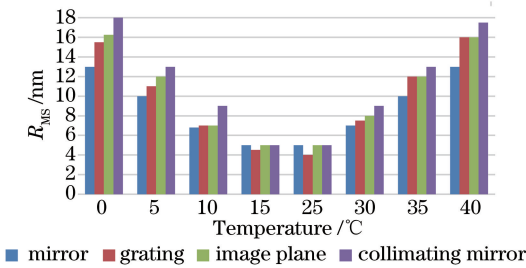


图 5 0~40 °C 各镜 R_{MS} 比较

Fig. 5 R_{MS} values between mirrors at 0~40 °C

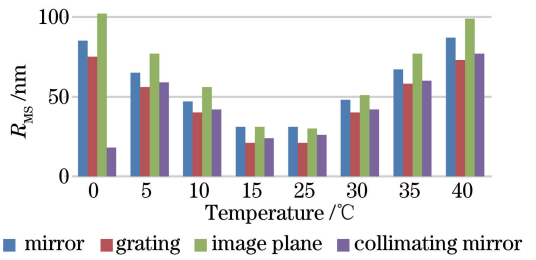


图 6 0~40 °C 各镜 P_V 比较

Fig. 6 P_V values between mirrors at 0~40 °C

表 8 0~40 °C 温度载荷时各镜之间的相对位置变化的最大值(角位移/线位移)

Table 8 Max relative displacement between mirrors on 0~40 °C temperature load (angular displacement/line displacement)

Component	Mirror	Grating	Image plane	Collimating mirror
Mirror	—	38.7"/40.3 μm	54.3"/28.7 μm	45.4"/53.9 μm
Grating	38.7"/40.3 μm	—	32.3"/33.7 μm	16.6"/19.0 μm
Image plane	54.3"/28.7 μm	32.3"/33.7 μm	—	31.7"/51.8 μm
Collimating mirror	45.4"/53.9 μm	16.6"/19.0 μm	31.7"/51.8 μm	—

表 9 正弦振动实验条件

Table 9 Sinusoidal vibration test condition

Frequency / Hz	Magnitude / g	Scanning speed / (oct \cdot min ⁻¹)	Experimental direction
5~150	0.8	5	X, Y, Z

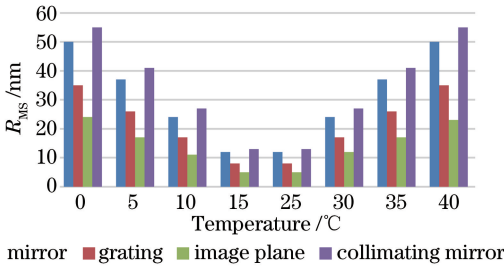


图 7 0~40 °C 下各镜平动时 R_{MS} 比较

Fig. 7 RMS values between translating mirrors at 0~40 °C

倍频程。

随机实验条件如图 9 所示,实验方向为 X、Y、Z

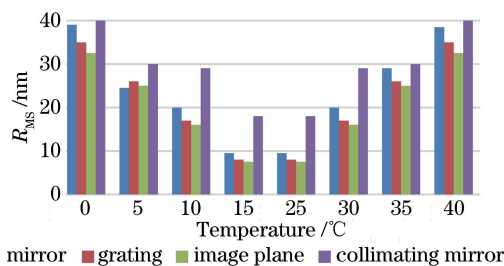


图 8 0~40 °C 下各镜转动时 R_{MS} 比较

Fig. 8 RMS values between rotating mirrors at 0~40 °C

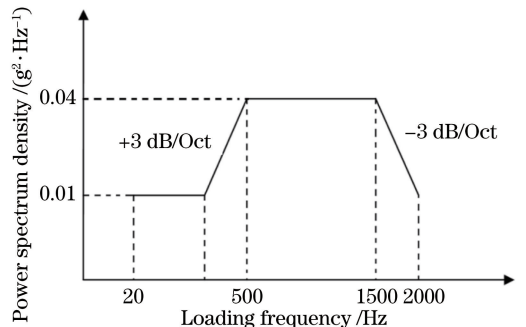


图 9 随机实验条件

Fig. 9 Random test condition

向,实验时间为 5 min。

力学环境实验主要验证成像光谱仪在振动实验前后,镜面变形及镜面之间位置关系变化的情况。图 10是进行随机和正弦振动的实验现场。图 11 是振动实验前后对成像光谱仪主反射镜的光学检测现场。

振动实验前后光学检测中反射镜光斑未发生明显变化,验证了成像光谱仪对振动环境的适应性。

5.2 热光学实验

仪器的热光学实验是在高低温实验箱内进行的,如图 12 所示。根据实际应用需求,实验中 5~35 °C 内每隔 5 °C 对靶标进行一次扫描成像,以完成光谱



图 10 振动实验现场
Fig. 10 Vibration test scene

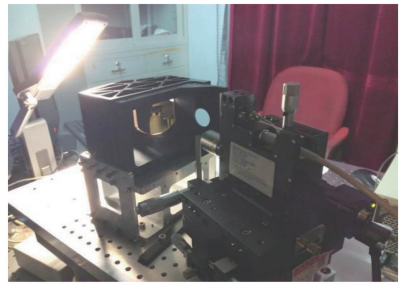


图 11 振动实验前后光学检测
Fig. 11 Optical detection before and after vibration test



图 12 热光学实验现场
Fig. 12 Thermo optical test scene

性能参数变化的检测。热光学实验中不同温度下扫描得到的短波红外单波段图像如图 13 所示,由图可以看出实验中温度变化对成像没有明显影响。

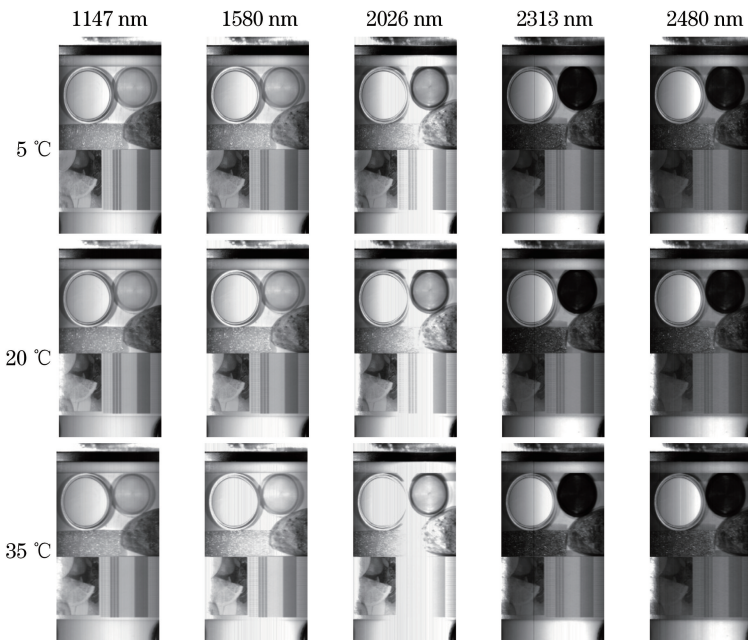


图 13 短波扫描图片
Fig. 13 Short-wave scanning pictures

5.3 温度对光谱数据质量影响的分析

光谱的数据质量体现在波长漂移和光谱分辨率变化,靶标样品中放置一块白云母岩石样品,如图 14(a)中十字丝部位所示。白云母为低温含水蚀

变矿物,化学成分为 $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$,其典型光谱如图 14(b)所示,其中光谱曲线 A 处(1400 nm 附近)为 OH^- 吸收峰,B 处(2200 nm 附近)为 $Al-OH$ 吸收峰。以 A 处和 B 处吸收峰位置

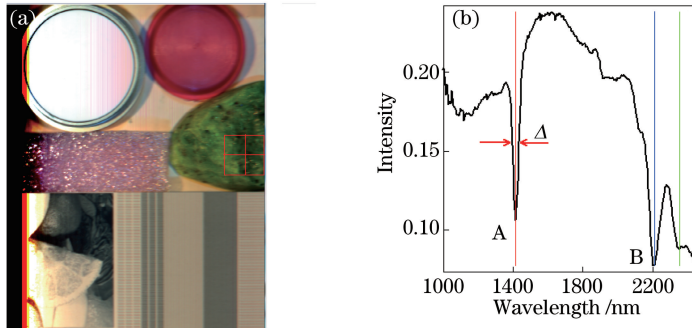


图 14 20 °C 时光谱图像与光谱曲线。(a) 光谱图像；(b) 光谱曲线

Fig. 14 Spectral image and spectral curve at 20 °C. (a) Spectral image; (b) spectral curve

表 10 不同温度工况下吸收峰波长位置值

Table 10 Absorption position at different temperatures

Peak	Temperature							Mean	Extreme difference
	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C		
A	1414.50	1413.65	1414.30	1415.47	1416.71	1417.81	1417.44	1415.69	2.11
B	2202.45	2202.31	2203.10	2204.06	2200.41	2200.03	2199.91	2201.75	2.30

随温度变化来评估波长漂移,以 A 处吸收峰的半峰全宽(FWHM) Δ 随温度变化来评估光谱带宽变化。

分别得到不同温度工况下,A、B 处吸收峰位置和 A 吸收出的 Δ 值。

从表 10 中可以统计出,A 处波长最大漂移为

2.11 nm,B 处波长最大漂移为 2.30 nm。成像光谱仪的色散为 7.5 nm/pixel,得出温度变化的极值漂移为 0.306 pixel。

表 11 中 A 处光谱宽度最大变化为 4.93 nm,仪器的光谱带宽 Δ 为 10 nm,得出 5~35 °C 范围内光谱带宽极值变化为 0.493 Δ 。

表 11 不同温度工况下光谱带宽大小

Table 11 Spectral bandwidth value under different temperature

5 °C	10 °C	15 °C	Temperature				35 °C	Mean	Extreme difference
			20 °C	25 °C	30 °C				
38.7	36.12	35.57	39.54	43.83	42.88	45.2	40.26	4.93	

6 结 论

根据 Offner 型同心结构凸面光栅分光光学系统的特点,基于整体结构设计思想,对成像光谱仪进行了光机一体化的结构设计。通过对成像光谱仪的结构模态、静载响应及热致响应分析,并利用广义逆矩阵方法对响应分析结果进行处理,以镜体面形精度和动力学响应为优化目标,对光机结构进行了设计,该设计满足环境使用要求。通过振动和温度环境实验验证了结构设计的环境适应性,这对仪器工程化具有重要的实用价值。

参 考 文 献

[1] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. Optics Express, 2006, 14(20): 9156-9168.
 [2] Wang J Y, Shu R, Liu Y N. Introduction to imaging

spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2011.

王建宇,舒嵘,刘银年. 成像光谱技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[3] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C, et al. Design of a SWIR Offner imaging spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(7): 2267-2272.

郑志忠,杨忠,修连存,等. 一种 Offner 型小型短波红外成像光谱仪[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(7): 2267-2272.

[4] Liu W. Design and analysis of structure of compact Offner spectral imaging system [J]. Chinese Optics and Applied Optics Abstracts, 2010, 3(2): 157-163.
 刘伟. 小型 Offner 凸光栅光谱成像系统的结构设计及分析[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 157-163.

[5] Xian G, Yan C X, Wu C J, et al. Effect of temperature on airborne imaging spectrometer optical properties[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015,

- 44(5): 1647-1653.
- 贤光, 颜昌翔, 吴从均, 等. 温度对机载成像光谱仪光学性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1647-1653.
- [6] Zhang J Q, Dong D Y, Wu Q W, et al. Treatment of surface figure error and rigid body motion for mirror/lens in optical remote sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 242-247.
张军强, 董得义, 吴清文, 等. 光学遥感器镜面面形变化及刚体位移处理方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 242-247.
- [7] Ji Y Q, Chen Y H, Liu Q, et al. Convex grating imaging spectrograph with light weight and high fidelity [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7156: 71560K.
- [8] Wang D, Yang H B. Computer simulation of the optical surface[J]. Computer Simulation, 2007, 24(2): 298-301.
王栋, 杨洪波. 光学表面面形的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 298-301.
- [9] Michels G J, Genberg V L. Analysis of thermally loaded transmissive optical elements[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8127: 81270K.
- [10] Michels G J, Genberg V L, Doyle K B. Finite element modeling of nearly incompressible bonds[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4771: 287-295.