

文章编号 1004-924X(2022)08-0948-12

光学遥感器光机结构热变形的高精度测量

王庆雷^{1,2}, 孙世君^{1,3*}, 姜宏佳^{1,2}, 郭容光^{1,2}, 王伟之^{1,2}, 周小华^{1,2}

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

2. 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094;

3. 清华大学, 北京 100084)

摘要:空间光学遥感器光机结构在复杂的空间轨道热环境中会产生热变形,影响探测精度。为解决光学遥感器光机结构热变形测量问题,本文提出了基于数字摄影测量和光纤光栅传感的热变形组合监测方法;建立了具有热解耦功能的光纤光栅布局方法和变形测量模型算法,理论分析了光纤光栅光谱变化与应变、温度的关系,采用实验方法标定光纤光栅应变传感器和温度传感器,得出光纤光栅中心波长漂移量与应变、温度的关系;搭建了数字摄影测量试验系统,结合光纤光栅传感网络测量光机结构的应变和温度场,实现了光机结构热应变高精度测量。研究表明:数字摄影和光纤光栅组合测量方法可实现光机结构位移场、应变场和温度场同时测量,热解耦后结构变形测量精度达到0.02 mm,可用于光机结构在轨热变形的合理预测,在空间光学遥感器光机结构在轨监测中具有应用前景。

关键词:光学遥感器;热变形;数字摄影测量;光纤光栅应变传感器;光纤光栅温度传感器;试验验证

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223008.0948

High-precision thermal deformation measurement of optical remote sensor optical-mechanical structure

WANG Qinglei^{1,2}, SUN Shijun^{1,3*}, JIANG Hongjia^{1,2}, GOU Rongguang^{1,2},

WANG Weizhi^{1,2}, ZHOU Xiaohua^{1,2}

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory for Advanced Optical Remote Sensing Technology of Beijing, Beijing 100094, China;

3. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: sunsj26@sina.com

Abstract: In the complex space orbit thermal environment, the optical structure of an optical remote sensor is thermally deformed. Thermal deformation affects detection accuracy. To solve the problem of thermal deformation measurement of the optical-mechanical structure of optical remote sensors, an integrated monitoring method is proposed based on digital photogrammetry and fiber Bragg grating (FBG) thermal deformation. A fiber grating layout method and a deformation measurement model algorithm with a thermal decoupling function are developed. The relationship between the spectral variation of the FBG and strain and temperature is analyzed. A digital photogrammetry experimental system is built to measure the strain and temperature fields of the optical machine structure. The FBG sensing network enables high-pre-

收稿日期:2021-09-20;修订日期:2021-11-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51705024)

cision measurement of the thermal strain of optical machine structures. The results reveal that the integrated system can realize the simultaneous measurement of the displacement field, strain field, and temperature field of an optical machine structure. The accuracy of the structural deformation measurement after thermal decoupling reaches 0.02 mm, which can be used to reasonably predict the thermal deformation of optical machine structures on orbit. The proposed measurement method can potential be applied to the on-orbit monitoring of optical machine structures of space optical remote sensors.

Key words: optical remote sensor; thermal deformation; digital photogrammetry; FBG strain sensor; FBG temperature sensor; experimental verification

1 引言

空间光学遥感器是航天对地观测的主要有效载荷,随着我国遥感卫星的不断发展,对光学遥感器探测范围、分辨率、稳定性等指标要求越来越高^[1-3],使得光学遥感器口径越来越大,对光机结构轻量化要求越来越高。光学遥感器光机结构是遥感器各分系统(如电控系统、热控系统)的承载平台,是光学系统实现功能的关键结构,具有结构尺寸大、接口多、稳定性要求高、精度要求高、刚度要求高、重量要求轻等特点,设计难度很大^[4-5]。

光学遥感器入轨后,会处于复杂的空间轨道热环境中,当遥感器安装于卫星平台舱外时,受空间冷黑背景和太阳辐照等环境影响,温度场分布很不均匀,并经历冷热交变循环,高低温变化幅度大^[6-7]。当遥感器安装于卫星平台舱内时,受卫星热控系统的调节,温度变化幅度小,但卫星平台每一运行周期温差也能达到几十度,仍然会对遥感器温度场造成较大影响^[8]。遥感器光机结构在承受温度交变引起载荷状态产生微小变形时,会导致光学遥感器在成像过程中光学系统视轴的漂移、抖动和光学元件面型变化,影响成像质量,降低分辨率^[9-10]。剧烈的温度场变化甚至会引起光机结构破坏,从而造成遥感器失效^[11-12]。光机结构在轨热变形的预判已变得越来越重要,为了进一步优化光机结构热变形分析模型,完善光机结构设计,保证光学遥感器在轨性能,开展光机结构地面热变形高精度测试已成为光学遥感器研制的一项关键工作,测试精度应优于0.05 mm。

数字摄影测量技术是基于摄影测量的基本原理,应用计算机技术对图像进行处理的高精度

检测技术,具有高精度、非接触、测量方便快捷、自动化程度高等特点^[13-14],在国外广泛应用于航空、航天、汽车等领域。美国Pappa等人利用数字摄影测量技术完成了 $\Phi 5$ m天线的面形测量,精度达到0.05 mm^[15]。国内于江和蒋山平等人建立了摄影测量试验系统,成功测量了 $\Phi 660$ mm反射面天线在不同热工况下的变形,测量精度优于0.05 mm^[16]。许杰等人采用数字摄影测量相机,搭建测控系统,在实验室常温常压环境下对卫星结构件进行了热变形测量试验^[17]。目前国内数字摄影测量技术应用对象主要是天线、卫星结构件等相对平滑、简单的大尺寸表面,而在光学遥感器等具有较多零件、部件的卫星载荷表面上应用较少。

光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有测量精度高、体积小、重量轻、可靠性高、灵敏度高等特点^[18-21],在航空、能源电力、石油化工、医药等领域已经得到很好的应用和发展。近年来,国内外学者对光纤光栅传感器应用于航天器结构温度、应变测量已经开展了一定的研究^[22-23],韩国Park等人将光纤光栅传感器植入复合材料内部,验证了光纤光栅传感器用于测量航天器结构件温度的可行性,测温范围为 $-30\sim 100$ °C^[24]。日本Takeda等人利用光纤光栅传感器对航天器碳纤维复合材料结构件进行了温度和应变测试^[25]。但是针对光学遥感器光机结构的光纤光栅传感器温度、应变测量还未见报道。

针对以上问题,本文提出了基于数字摄影测量和光纤光栅传感的热变形组合监测方法。建立了具有热解耦功能的光纤光栅布局方法和变形测量模型算法,并搭建了数字摄影测量试验系统,结合光纤光栅传感网络测量光机结构的应变和温度场,实现了光机结构热应变高精度测量。

可用于光机结构在轨热变形的合理预测,在在轨监测中具有应用前景。

2 热变形组合测量方法

数字摄影和光纤光栅组合测量方法的原理是采用高精度数字摄影测量系统监测光机结构各靶点位置三维坐标变化,反馈结构关键点的三维位移量;采用具有热解耦功能的光纤光栅布局方法在光机结构表面布设应变和温度传感器,通过模型算法实现应变场和温度场测量和高精度解耦;通过数据融合处理,实现光机结构位移场、应变场和温度场的同时测量。

2.1 数字摄影测量原理

摄影中心、像点和对应的物点三点共线是建立构像方程式的基础。如图 1 所示^[14],物点 P 在坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标为 (X, Y, Z) ,摄影中心 S 在在坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标为 (X_s, Y_s, Z_s) ,像点 p 在坐标系 $S-xyz$ 中的坐标为 (x, y, z) 。由 S, p, P 三点共线,可得:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{aligned} \quad (1)$$

当空间有两个或者两个以上摄影中心时,按照成像方程可以组成 4 个或者 4 个以上的观测方程,拍摄位置和拍摄角度都是已知的,结合像点 p

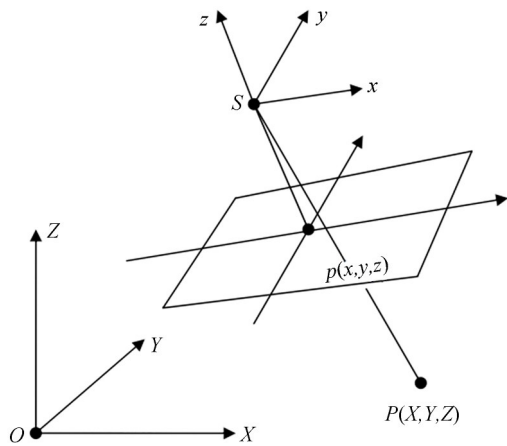


图 1 数字摄影测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital photogrammetry

的位置,经过光束平差可以求解得到物点 P 的空间位置。

2.2 光纤光栅传感原理

光纤光栅传感原理如图 2 所示,宽带光传入 FBG 后,波长等于 FBG 反射中心波长 λ_B 的光会被反射回来。当温度和应变发生波动时,FBG 中心波长将发生漂移,由检测中心波长的偏移量可以得到被测参数^[21]。

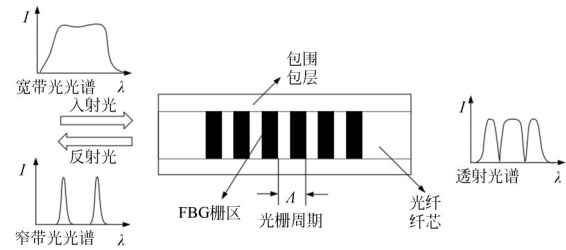


图 2 光纤光栅传感示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fiber grating sensing

根据模式耦合理论可知,FBG 反射中心波长 λ_B 与光纤光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 有关,FBG 反射中心波长 λ_B 可表示为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (2)$$

2.2.1 基于光纤光栅的应变与温度测量

应变作用于 FBG 时,FBG 会产生相应弹性应力和弹性形变,导致其周期发生变化,同时弹光效应也会导致有效折射率发生变化。应变引起的 FBG 中心波长偏移量可以表示为^[26-27]:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (3)$$

即:

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial d} \Delta d \right) + 2 \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \Delta L n_{\text{eff}}, \quad (4)$$

其中: ΔL 为光纤轴向长度变化量, Δd 为光纤直径改变量, $\partial n_{\text{eff}}/\partial L$ 为弹光效应, $\partial n_{\text{eff}}/\partial d$ 为波导效应。不考虑波导效应,引入光纤材料弹光系数 p_{ij} 和光纤轴向应变 ϵ_z ,可得:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \left\{ 1 - \frac{\partial n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} + (p_{11} + p_{12})v] \right\} \epsilon_z = \\ &= (1 - p_e) \epsilon_z = K_e \epsilon_z, \end{aligned} \quad (5)$$

其中: p_e 为有效弹光系数, K_e 为光纤光栅应变灵敏度系数。

温度场作用于 FBG 时,FBG 的热膨胀效应,会产生由热导致的应变,引起 FBG 周期的变化,

同时有效折射率也会因热光效应而随温度变化。类同于FBG应变传感机理,可得温度导致FBG中心波长偏移为^[22,28]:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial d} \Delta d \right] \Lambda + 2 \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T, \quad (6)$$

其中: $\partial n_{\text{eff}}/\partial T$ 表示光纤光栅的热光系数,用 ξ 表示; $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 表示弹光效应; $\partial n_{\text{eff}}/\partial d$ 为波导效应。 $\partial \Lambda/\partial T$ 表示线膨胀系数,用 α 表示。上式可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \Delta T} = 2 \frac{1}{n_{\text{eff}}} \left[\xi + \frac{(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}}{\Delta T} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \alpha} \frac{\Delta \alpha}{\Delta T} \right] + \alpha. \quad (7)$$

忽略波导效应的影响,光纤光栅的相对波长偏移量可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\xi + \alpha) \Delta T = K_T \Delta T, \quad (8)$$

其中, K_T 为光纤光栅温度灵敏度系数。

FBG应变灵敏度系数和温度灵敏度系数可以通过实验的方法来测定,从而得到应变、温度变化与FBG中心波长漂移量的关系,即应变、温度变化可以由FBG传感器的光谱变化来计算。利用插值算法对光机结构表面的应变、温度变化进行拟合,重构出光机结构整个曲面的应变和温度场,实现光机结构应变和温度场的可视化。

2.2.2 光纤光栅应变与温度解耦方法

采用双光栅交叉粘贴布设的方法解决光纤光栅在进行应变测量时温度影响的问题。其中两光纤光栅的应变和温度测量灵敏度相同,并以一定的夹角 $\theta(0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$ 布设。

在测量过程中,光纤光栅所受的温度和应变分别发生 ΔT 和 $\Delta \epsilon$ 的改变时,光纤光栅1的中心波长漂移量为:

$$\Delta\lambda_1 = K_{T1} \Delta T + K_{\epsilon 1} \Delta \epsilon, \quad (9)$$

其中:光纤光栅1的应变灵敏度系数用 $K_{\epsilon 1}$ 表示,温度灵敏度系数用 K_{T1} 表示。同时,光纤光栅2的中心波长漂移量为:

$$\Delta\lambda_2 = K_{T2} \Delta T + K_{\epsilon 2} \Delta \epsilon \cos \theta, \quad (10)$$

其中: K_{T2} 为光纤光栅2的温度灵敏度系数, $K_{\epsilon 2}$ 为应变灵敏度系数, $\Delta \epsilon \cos \theta$ 为光栅2所受到的轴向应变是被测量应变的 $\cos \theta$ 倍。将上式联立可得:

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 =$$

$$(K_{T1} - K_{T2}) \Delta T + (K_{\epsilon 1} - K_{\epsilon 2} \cos \theta) \Delta \epsilon. \quad (11)$$

在该方案中,光纤光栅传感器需要首先用标准试件进行应变和温度灵敏度标定,选取应变和温度灵敏度偏差小于1%的光纤光栅作为传感元件。此时,其温度及应变灵敏度系数近似相同,可将公式(11)简化为:

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = K_\epsilon (1 - \cos \theta) \Delta \epsilon. \quad (12)$$

因而,可通过两光纤光栅中心波长漂移量做差后消除温度变化的影响,二者差值仅与外界应变的变化量 $\Delta \epsilon$ 有关,且呈线性关系。所以,当选定光纤光栅传感器后,其应变灵敏度仅与两光纤光栅之间的布设夹角 θ 有关,大小为 $K_\epsilon (1 - \cos \theta)$ 。

$K_\epsilon (1 - \cos \theta)$ 的值随 $\theta(0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$ 的变化而变化,当 θ 从 0° 到 90° 变化时, $(1 - \cos \theta)$ 的值是逐渐增加的,即其应变灵敏度随两光栅夹角 θ 的不断增大而增大的。

当 θ 为 90° 时,即双光纤光栅垂直布设,其灵敏度系数 $K_\epsilon (1 - \cos \theta)$ 最大为 K_ϵ ,这时传感系统具有最高的应变灵敏度,该情况下温度补偿方程为:

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = K_\epsilon \Delta \epsilon. \quad (13)$$

因而可得,在一定温度和应变范围内,只要得出光纤光栅的中心波长漂移量 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$,就可以实现温度和应变的解耦,实现应变场的高精度测量。

3 实验方法与装置

光学遥感器在轨运行期间,光机结构在热控系统保障下温度变化范围一般在几度至几十度范围,结构热变形量最高可达毫米量级,据此开展相关实验。实验对象为某光学遥感器光机结构主体,该结构采用箱式结构,由铝蜂窝复合材料夹层结构板组装而成,外形尺寸 $3\,200 \times 1\,500 \times 3\,400$ mm,选用 $1\,500 \times 3\,400$ mm面为测量面。实验温度范围为 $10^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$,该温度范围可模拟一般热控环境下的温度变化区间。高精度测量系统试验验证装置总体设计图如图3所示,包括视觉测量子系统和光纤分布传感监测子系统。采用激光位移传感器(精度 0.001 mm)测量各监测点的热变形,并以其为基准验证组合测

量精度。

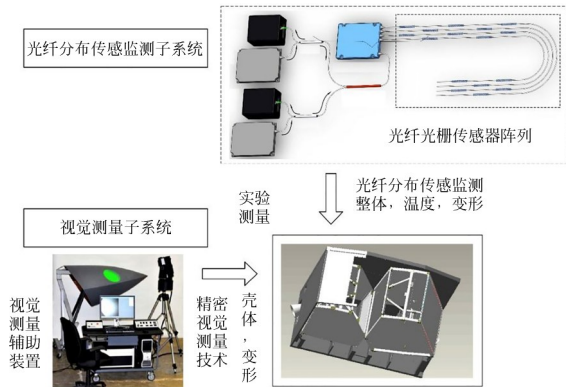


图 3 试验装置总体设计

Fig. 3 Overall design of test device

3.1 数字摄影测量系统

数字摄影测量系统的构成如图 4 所示,实物图如图 5 所示,主要包括成像系统、测量附件和测量软件系统三个部分。数字摄影测量技术的关键是图像数据的处理算法,本系统配备课题组自主开发的自动高精度摄影测量软件 APPs(Automatic and Precise Photogrammetry System),测量软件的系统组成和关键模块如图 6 所示。本测量系统可以实现靶点、编码点的自动识别和匹配,而且仅通过像面坐标信息即可确定其他普通标志点的匹配关系,极大提高了测量过程的自动化程度。

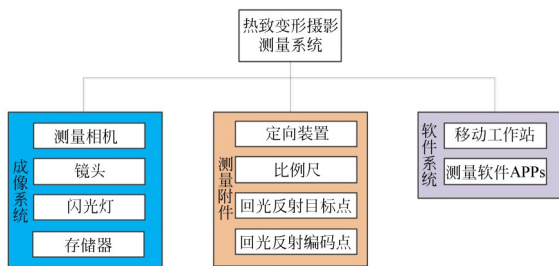


图 4 数字摄影测量系统

Fig. 4 Digital photogrammetric system

在测试前,对单反相机进行标定,在光机结构主体表面粘贴回光反射目标点和编码点,将定向靶标放置在测量空间中稳定、可视范围最大的位置,并保持靶标和光机主体之间相对稳定,同时在测量空间内的合适位置放置稳定的比例尺,使得比例尺在尽可能多的图像中成像。在拍摄范围内,规划合理的拍摄站位,在不同的高度和



图 5 数字摄影测量系统实物图

Fig. 5 Physical picture of digital photogrammetric system

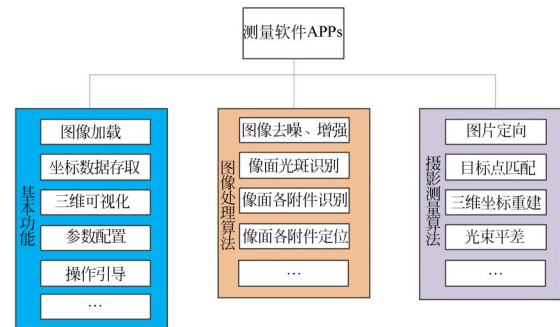


图 6 数字摄影测量软件系统组成和关键模块

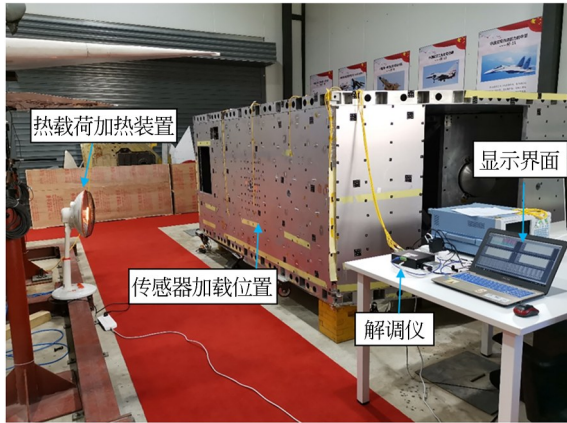
Fig. 6 Digital photogrammetry software system composition and key modules

不同的距离上拍摄,增加拍摄位置的数量,有效增强测量网络的可靠性和测量结果的精度。拍摄每张照片时,要以提高回光反射标志点的成像质量和强化测量网络为目标,为了实现自标定,在某些位置将相机旋转 90° 后拍摄。最后进行图像处理与三维重建。

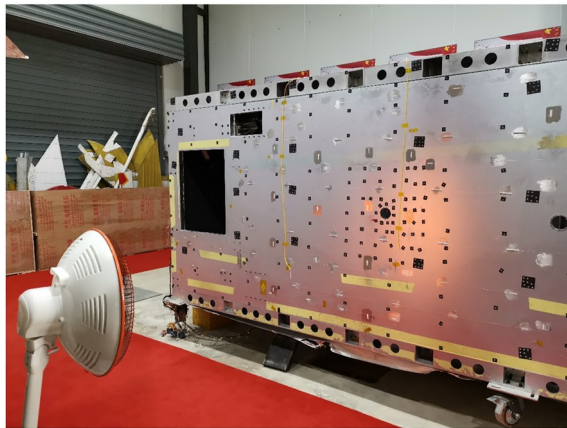
3.2 光纤光栅测量系统

光纤光栅测量系统由光纤光栅应变传感器、光纤光栅温度传感器、光源、解调仪组、连接光缆、计算机及软件等构成,用于高低温载荷影响下光机结构主体温度场及变形监测,可采集、存储和显示光机结构主体各部位温度、变形信息。光纤光栅测量系统试验装置如图 7 所示。

首先对光纤光栅应变传感器和温度传感器进行标定,在光机结构表面粘贴光纤光栅应变传感器和温度传感器,每次测量的布点方式是:两个应变测量点呈 90° 正交排布,可以根据测得的



(a) 远景
(a) Distant view



(b) 近景
(b) Close view

图 7 FBG 测量系统试验装置

Fig. 7 Test equipment of FBG measuring system

正交坐标系应变求出平面坐标系的应变,同时在每个测量点旁布设温度传感器,可以同时得到测量点的温度。

本次测试共分为四种状态:初始状态、升温 1 状态、升温 2 状态和升温 3 状态,温度状态通过调节载荷加热装置的档位和与光机结构的距离来实现。数字摄影测量点共布设 201 个,光纤光栅水平应变传感器 39 个,垂直应变传感器 30 个,光纤光栅温度传感器 26 个。数字摄影测量点布设位置与光纤光栅测量点位置邻近,以在可布设空间范围内保持测点间隙最小为原则。两种测量方法的测点数据可分别拟合重建,在三维空间中重建出光机结构的变形场、应变场和温度场。两种测量方法获得的测量结果可进行单点和全场数据对比,互相验证、修正误差以到达高精度测量。

4 实验分析

4.1 传感器的标定

4.1.1 应变传感器标定

对应变传感器进行标定与特性分析,标定现场如图 8 所示。利用 MTS 试验机(动态材料测试系统)进行载荷加载,解调仪和应变仪同时监控并记录,选用的 FBG 中心波长为 1 534. 583 nm,同时接入一个温度补偿 FBG,其室温下的中心波长 1 539. 145 nm,被测试件材料为 45#钢,拉伸标距 150 mm,厚度为 4 mm,宽度为 51 mm。

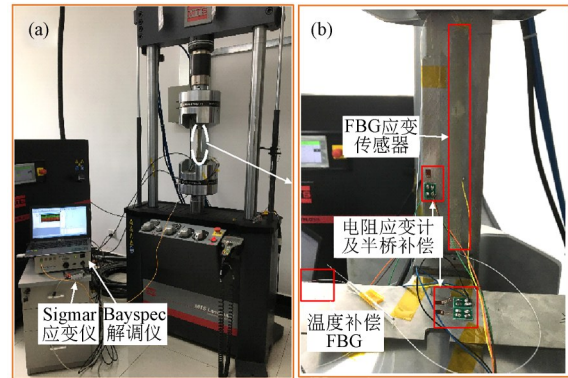


图 8 FBG 应变传感器标定

Fig. 8 Calibration of FBG strain sensor

对试验件连续加载 80 kN,加载 6 min,保载 1 min,卸载 6 min,应变仪采样得到最大应变 5 000 $\mu\epsilon$,减掉温度补偿 FBG 对中心波长影响后,利用最小二乘拟合得到:

$$y = 0.001\ 35x + 1\ 534.851. \quad (14)$$

4.1.2 温度传感器标定

选用 5 种不同波长的 FBG 温度传感器,分别是 1#(1 542. 165 nm)FBG、2#(1 560. 078 nm)FBG、3#(1 564. 054 nm)FBG、4#(1 566. 072 nm)FBG、5#(1 568. 046 nm)FBG,将 FBG 温度传感器接入标定系统进行标定,FBG 温度传感器置于 Fluke 水浴箱中部,并固定在框架上,避免水流动冲击影响 FBG 中心波长变化,如图 9 所示。改变水浴箱的温度,温度控制在 10 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$,每次升温 5 $^{\circ}\text{C}$,温度控制精度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$,稳定时间为 30 min,循环控温,Ibsen 解调仪以 1 Hz 采样率记录 FBG 中心波长随温度的变化。

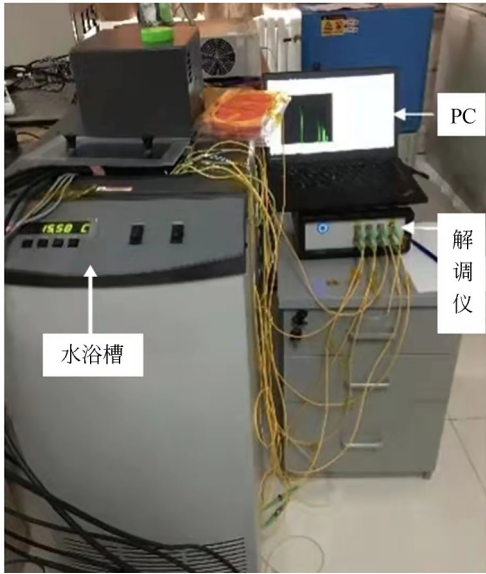


图 9 FBG 温度传感器标定

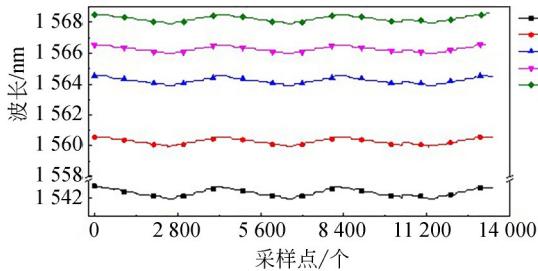
Fig. 9 Calibration of FBG temperature sensor

对数据进行处理,如图 10(a);将 5 个 FBG 中心波长减去各自在 10 °C 下的中心波长,得到如图 10(b),可以看出每个 FBG 的温度灵敏度系数不同,但是趋势相同;图 10(c)是 7 次温度经过 30 °C 的 1#FBG 与 2#FBG 中心波长变化,可以看出在 ±3 pm 变化,重复精度高。

去除温度变化影响,利用最小二乘法拟合可得:

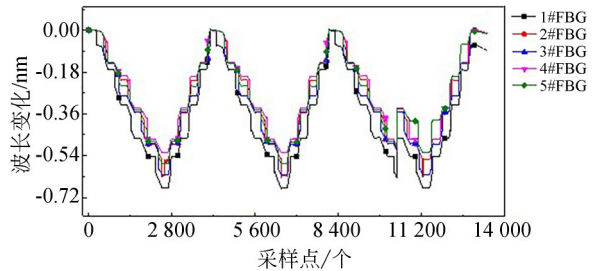
$$\begin{cases} y = 0.013\ 32x + 1\ 541.829, r^2 = 0.986 \\ y = 0.012\ 35x + 1\ 559.824, r^2 = 0.992 \\ y = 0.012\ 05x + 1\ 563.793, r^2 = 0.992. \quad (15) \\ y = 0.010\ 74x + 1\ 565.878, r^2 = 0.984 \\ y = 0.011\ 37x + 1\ 567.816, r^2 = 0.996 \end{cases}$$

式(15)为 FBG 温度传感器与温度关系拟合结果,平均线性度达 0.99。



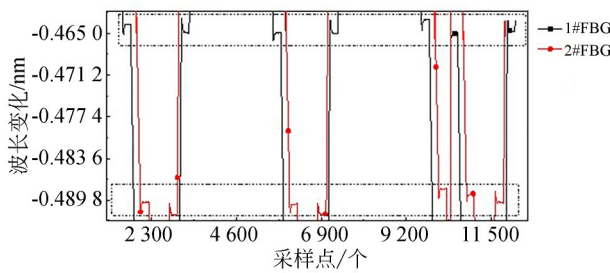
(a) FBG 温度传感器中心波长曲线

(a) Center wavelength curves of FBG temperature sensors



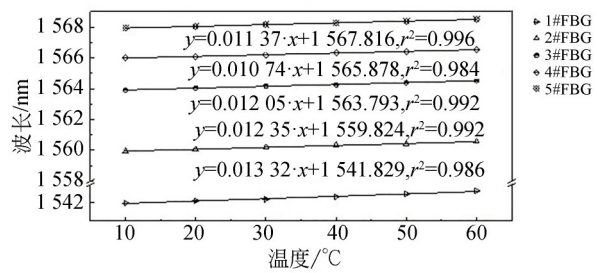
(b) FBG 温度传感器中心波长变化曲线

(b) Center wavelength change curves of FBG temperature sensors



(c) 1#FBG 与 2#FBG 在 30°C 时中心波长变化曲线

(c) Central wavelength variation curves of 1#FBG and 2#FBG at 30°C



(d) Fitting curves between FBG temperature sensor and temperature

(d) Fitting curves between FBG temperature sensor and temperature

图 10 FBG 温度传感器中心波长与温度关系曲线

Fig. 10 Relationship curves between the center wavelength and temperature of FBG temperature sensors

4.2 数字摄影测量结果分析

摄影测量是拍摄的逆过程,将二维图像变换至真实的三维空间,通常需要最少两幅图像来重建空间信息。由于拍摄和图像测量过程都存在误差,因此重建的空间信息也有误差。当拍摄被测物的多幅照片时,可以获得冗余数据,通过数

据平差的方式提高三维求解精度,相机光束线示意图如图 11 所示。

摄影测量采用三角测量获得空间点位置,它通过数学方法求解空间交会光线的交点,而且可以同时解算多个标志点的空间位置。本测量系统使用自标定光束平差技术,在完成测量的同时

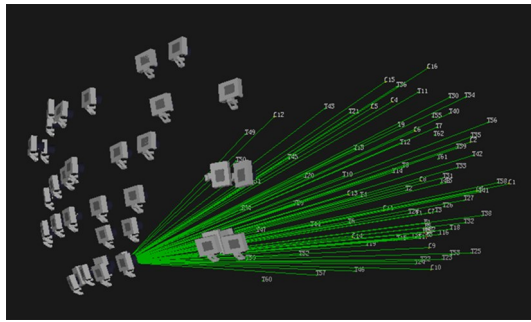


图 11 相机光束线

Fig. 11 Camera beam line

也完成了相机的标定,并确定每张图片拍摄时的外方位参数,提高了相机标定的环境适应性和测量的精度。结合标志点在像面的位置恢复空间光线,每张图像都可以恢复一条空间光线,这些光线束的空间交点也就是标志点的空间位置,空间点光束线如图 12 所示。

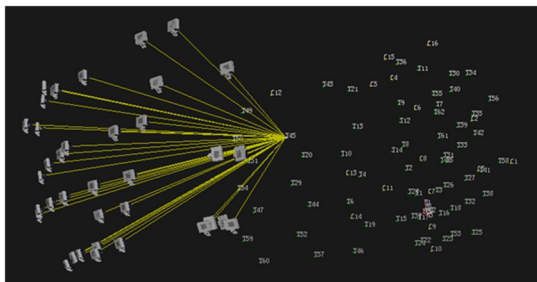


图 12 空间点光束线

Fig. 12 Spatial point beam line

应用 APPs 进行图像处理,分析解算光机结构表面目标点坐标值,去除坐标均方根误差大于 0.05 的粗大误差点,得到目标点的空间位置,三维重建结果示意图如图 13 所示。

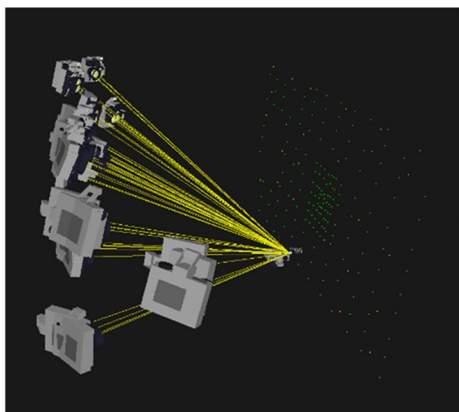


图 13 目标点三维重建结果

Fig. 13 Results of 3D reconstruction of the target point

以升温 3 状态为例,光机结构主体沿 X 轴(长边)变形最大值为 -0.7923 mm ,沿 Y 轴(短边)变形最大值为 0.7544 mm 。对摄影测量数据进行可视化处理,根据测量点的位置和变形值,进行插值处理,得到光机结构沿 X 轴和 Y 轴方向变形分布图分别如图 14 和图 15 所示。

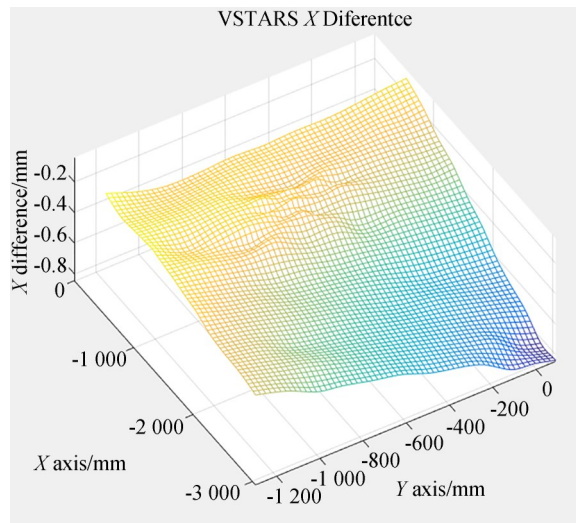


图 14 升温 3 状态光机结构主体 X 轴方向变形分布图

Fig. 14 X-axis deformation distribution of the main body of the optical-mechanical structure in the heating state 3

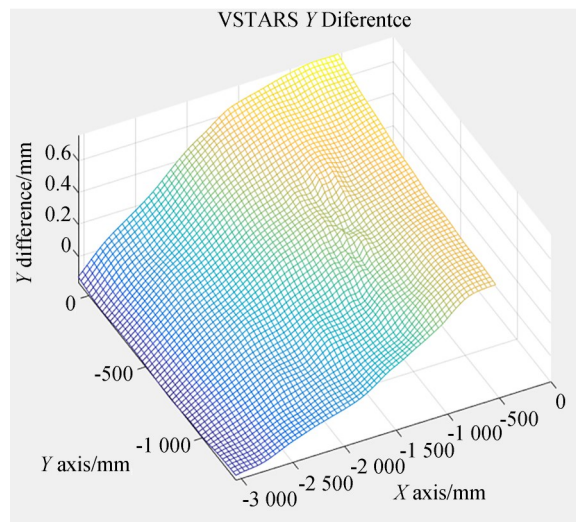


图 15 升温 3 状态光机结构主体 Y 轴方向变形分布图

Fig. 15 Y-axis deformation distribution of the main body of the optical-mechanical structure in the heating state 3

4.3 FBG 应变和温度传感器测量结果分析

采用选频光栅与光电阵列探测扫描相结合的方法来实现光纤光栅传感器的反射光谱的采集与记录。利用衍射光栅等分光元件,将FBG应变和温度传感器的反射谱经衍射光栅在空间分离展开,当光栅所检测的应变或温度发生变化时,其反射谱的中心波长也随之发生漂移,数据处理系统将该信息记录下来,完成光信号对电信号的调制解调。

解调仪可以解算测量点中心波长值和光谱变化值,经过标定的FBG应变和温度传感器可直接计算得到对应的应变和温度值。对升温3状态,光机结构主体沿X轴(长边)最大应变值为 $527.9\ \mu\epsilon$,沿Y轴(短边)最大应变值为 $664\ \mu\epsilon$,温度最大值为 $18.6\ ^\circ\text{C}$ 。

对数据进行可视化处理,坐标系与摄影测量坐标系一致。根据测量点的位置计算得到的应变和温度,进行插值处理,得到光机结构主体沿X轴(长边)、Y轴(短边)方向应变分布图和温度分布示意图分别如图16~18所示。

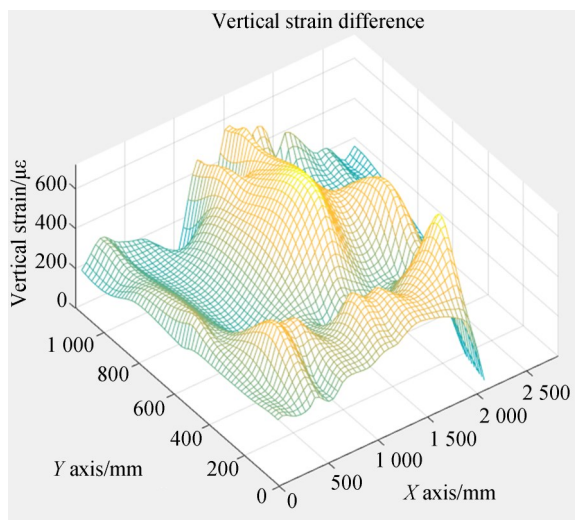


图16 升温3状态光机结构主体X轴方向应变分布图
Fig. 16 Strain distribution in X-axis direction of main body of optical-mechanical structure in heating state 3

4.4 FBG 应变和温度传感器测量结果分析

利用数字摄影和光纤光栅组合测量方法,实验得出结构应变场和位移场数据,在各监测点处与激光位移传感器测试数据对比得出组合测量

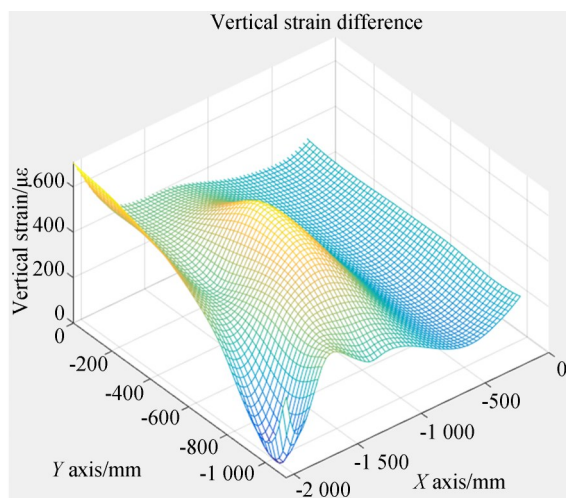


图17 升温3状态光机结构主体Y轴方向应变分布图
Fig. 17 Strain distribution in Y-axis direction of main body of optical-mechanical structure in heating state 3

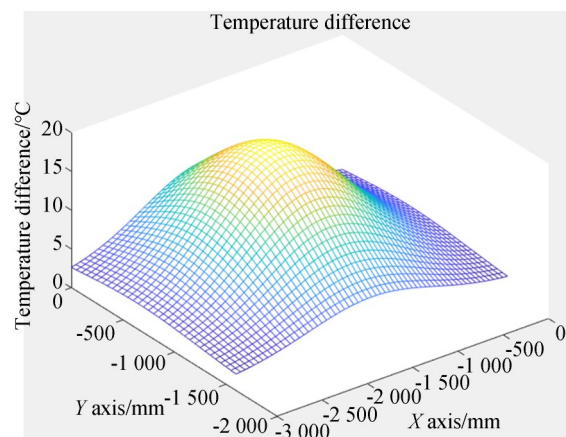


图18 升温3状态光机结构主体温度分布图
Fig. 18 Temperature distribution diagram of main body of optical-mechanical structure in heating state 3

方法的热变形测量精度可达 $0.02\ \text{mm}$ 。影响测量精度的主要因素包括:光纤光栅传感器标定精度、传感器布设一致性以及信号解调精度,摄影测量靶点位置误差以及环境引入的误差等。

5 结 论

(1)针对光学遥感器光机结构热变形测量问题,提出了基于数字摄影测量和光纤光栅传感的热变形组合监测方法,建立了具有热解耦功能的光纤光栅布局方法和变形测量模型算法,并搭建了试验平台完成试验验证。

(2)采用高精度数字摄影测量法获取光机结构三维位移数据,结合光纤光栅传感网络测量应变和温度场,实现了光机结构位移场、应变场和温度场同时测量,热变形测量精度达0.02 mm。

(3)数字摄影和光纤光栅组合测量方法能够实现多参数高精度测量,可用于光机结构在轨热变形的合理预测,在空间光学遥感器光机结构在轨监测中具有应用前景。

参考文献:

- [1] 王小勇. 空间光学技术发展展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 79-86.
WANG X Y. Development and prospect of space optical technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(4): 79-86. (in Chinese)
- [2] 黄杰, 罗达, 侯鹏, 等. 光学遥感卫星平台结构热变形试验及测量技术研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(2): 114-118.
HUANG J, LUO D, HOU P, *et al.* Research on thermal deformation test and measurement technology of optical remote sensing satellite platform [J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(2): 114-118. (in Chinese)
- [3] 李波, 张旭辉. 空间光学遥感器天然辐射效应数据库研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(4): 37-44.
LI B, ZHANG X H. Research of space radiation database system for remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, 26(4): 37-44. (in Chinese)
- [4] 黄宇飞, 白绍竣, 高冀, 等. 大口径空间光学反射镜面形动力学响应分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 181-186.
HUANG Y F, BAI S J, GAO J, *et al.* Dynamic surface response analysis of large-aperture space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 181-186. (in Chinese)
- [5] GIBBS B. GOES image navigation and registration integral systems [J]. *Inc Sat Magazine*, 2008, 12(2): 23-28.
- [6] 黄洪昌, 解晓莉, 顾军. 航天器太阳电池阵空间外热流环境模型及分析[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(3): 275-279.
HUANG H C, XIE X L, GU J. Modelling and analysis of spacecraft external heat flux environment for the solar array [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(3): 275-279. (in Chinese)
- [7] 寿秋爽, 赵啟伟, 周佐新. GEO卫星大型固面反射器背部高频箱热环境分析[J]. 航天器工程, 2020, 29(4): 93-98.
SHOU Q S, ZHAO Q W, ZHOU Z X. Analysis of thermal environment of RF box mounted on back of large solid reflector for GEO satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(4): 93-98. (in Chinese)
- [8] 李晓春, 藏磊. 某光学遥感器热试验的定温边界模拟技术[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(6): 588-592.
LI X C, ZANG L. Temperature boundary simulation for thermal test of optical remote sensors [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2018, 35(6): 588-592. (in Chinese)
- [9] 赵希婷, 张超, 冀翼, 等. 超宽视场离轴光学系统畸变一致性校正技术[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 1032-1036.
ZHAO X T, ZHANG C, JI Y, *et al.* Distortion consistency correction technique for ultra-wide field of view off-axis optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 1032-1036. (in Chinese)
- [10] 孟庆亮, 杨涛, 于志, 等. 空间遥感器用环路热管瞬态数值模拟与在轨验证[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(11): 2045-2055.
MENG Q L, YANG T, YU Z, *et al.* Transient numerical simulation and on-orbit verification of loop heat pipe used for space remote sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(11): 2045-2055. (in Chinese)
- [11] 贾学志, 张雷, 安源, 等. 空间光学遥感器精密调焦机构设计与试验[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 25-30.
JIA X Z, ZHANG L, AN Y, *et al.* Design and experiment research on precision focusing mechanism of space remote sensor [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(13): 25-30. (in Chinese)
- [12] 王阳, 孟庆亮, 郭楠. 多模式控温在航天光学遥感器上的应用[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(3): 79-85.
WANG Y, MENG Q L, GUO N. Application of a multimode thermal control method on space optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Re-*

- mote Sensing*, 2020, 41(3): 79-85. (in Chinese)
- [13] 黄高爽, 王庆民, 黄桂平, 等. 像片数目对工业摄影测量精度影响研究[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(5): 70-75.
HUANG G S, WANG Q M, HUANG G P, *et al.* Study on the influence of photograph number on industrial photogrammetry accuracy [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2020, 40(5): 70-75. (in Chinese)
- [14] 柏宏武, 王勇, 黄桂平, 等. 一种卫星天线真空热变形测量方法[J]. 空间电子技术, 2016, 13(3): 20-25.
BAI H W, WANG Y, HUANG G P, *et al.* A method of thermal distortion measurement of satellite antennas [J]. *Space Electronic Technology*, 2016, 13(3): 20-25. (in Chinese)
- [15] PAPPAS R S, GIERSCHE L R, QUAGLIAROLI J M. Photogrammetry of a 5m inflatable space antenna with consumer-grade digital cameras[J]. *Experimental Techniques*, 2001, 25(4): 21-29.
- [16] 于江, 蒋山平, 杨林华. 基于数字近景摄影测量的天线变形测量[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 56-258.
YU J, JIANG S P, YANG L H. Displacement measurement of antennas by means of digital close range photogrammetry [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(1): 56-58.
- [17] 许杰, 蒋山平, 杨林华, 等. 卫星结构件常压热变形的数字摄影测量[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2667-2673.
XU J, JIANG S P, YANG L H, *et al.* Digital photogrammetry for thermal deformation of satellite structures in normal environment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2667-2673. (in Chinese)
- [18] HE Y L, ZHU L Q, SUN G K, *et al.* Design, measurement and shape reconstruction of soft surgical actuator based on fiber Bragg gratings [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1773.
- [19] SONG S, LI Z, YU H Y, *et al.* Electromagnetic positioning for tip tracking and shape sensing of flexible robots [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(8): 4565-4575.
- [20] CHILDERS B A, GIFFORD D K, DUNCAN R G, *et al.* Fiber optic position and shape sensing device and method relating thereto: US7781724[P]. 2010-08-24.
- [21] 何彦霖, 张旭, 孙广开, 等. 复合基底柔性光纤曲率传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(6): 1263-1269.
HE Y L, ZHANG X, SUN G K, *et al.* Flexible curvature sensor based on composite substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6): 1263-1269. (in Chinese)
- [22] 卢建中, 孟凡勇, 闫光, 等. 卫星镜头结构光纤光栅温度传感器研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(10): 1252-1259.
LU J Z, MENG F Y, YAN G, *et al.* Research on fiber Bragg grating temperature sensor of satellite lens structure [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(10): 1252-1259. (in Chinese)
- [23] 韩放, 廖韬, 苏新明, 等. 用于航天环境的布拉格光栅温度传感器灵敏度与精度研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 289-293.
HAN F, LIAO T, SU X M, *et al.* Study on sensitivity and accuracy of Bragg grating temperature sensor for spacecraft environment [J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(10): 289-293. (in Chinese)
- [24] PARK S O, MOON J B, LEE Y G, *et al.* Usage of fiber Bragg grating sensors in low earth orbit environment [C]. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008*. DiegoSan, California. SPIE, 2008, 6932: 526-533.
- [25] TAKEDA S I, AOKI Y, NAGAO Y. Damage monitoring of CFRP stiffened panels under compressive load using FBG sensors [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(3): 813-819.
- [26] 魏晋和, 崔建军, 张福民, 等. 光纤光栅应变传感器校准的环境温度测量系统及其标定方法研究[J]. 计量学报, 2019, 40(S1): 42-46.
WEI J H, CUI J J, ZHANG F M, *et al.* Research on multi-point temperature field measurement system for fiber Bragg grating measurement environment [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(S1): 42-46. (in Chinese)
- [27] 魏莉, 刘芹, 王兢兢, 等. 光纤光栅应变传感在扭振测量中的应用[J]. 机械设计与制造, 2020(4): 204-207.
WEI L, LIU Q, WANG J J, *et al.* The application of fiber Bragg grating strain sensor in the tor-

sional vibration measurement [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(4): 204-207. (in Chinese)

- [28] 徐福胜, 闫光, 钟国舜, 等. 卫星环境温度监测的光纤光栅传感器研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48

(6): 762-768.

XU F S, YAN G, ZHONG G S, *et al.* Study on FBG sensor for satellite ambient temperature monitoring [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(6): 762-768. (in Chinese)

作者简介:



王庆雷(1987—),男,山东聊城人,北京空间机电研究所高级工程师,主要研究领域:空间光学遥感器光机结构设计及仿真分析。E-mail: 18001096205@163.com

通讯作者:



孙世君(1969—),男,吉林磐石人,北京空间机电研究所研究员,空间光学遥感器测绘领域专家,清华大学在读博士,主要研究领域:空间光学遥感器总体设计。E-mail: sunsj26@sina.com