DOI:10.19650 / j.cnki.cjsi.J2311760

微型化三轴 FBG 振动传感器的角振动测量研究*

黎琪慧[1,2],陈亚新[3],辛璟焘[1,2,4],董明利[1,2,4],李 昆[1,2]

(1.北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192;2.北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016;3.北京空间机电研究所 北京 100089;4.广州南沙光子感知技术研究院 广州 511462)

摘 要:针对微型三轴振动传感器研制,可用空间小且结构复杂和结构零件组合装配困难等问题,提出采用 3 个一体化模块交错组合的传感器设计方法,提高了空间利用率和装配精度。通过理论分析和有限元仿真,完成 15 mm×15 mm×15 mm 微型化传感器的优化设计,搭建显微镜成像封装系统和振动测试系统完成传感器的封装和性能测试。实验表明,该传感器 X、Y、Z 轴的谐振频率分别为 990、975 和 960 Hz,且在 0~700 Hz 频率范围内平坦度好,灵敏度分别为 19.10、19.28 和 20.01 pm/g,具有轻量化和三轴测试性能一致性高的优点。搭建微角振动测试系统,验证传感器的性能,其角位移测量分辨率优于 0.21 μrad,线性度为 0.998。

关键词:光纤布拉格光栅;振动传感器;三轴;微型化;振动测量

中图分类号:TH253 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:406.4035

Research on the angular vibration measurement of miniaturized triaxial FBG vibration sensor

Li Qihui[1,2], Chen Yaxin[3], Xin Jingtao[1,2,4], Dong Mingli[1,2,4], Li Kun[1,2]

(*1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 3. Beijing Institute of Space Electromechanics, Beijing 100089, China; 4. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, China*)

Abstract: To solve the problems of small available space, complex structure, and difficult assembly of structural parts in the development of the miniature three-axis vibration sensor, this article proposes the use of three integrated module staggered combinations of the sensor design method to improve the space utilization rate and assembly accuracy. Through theoretical analysis and finite element simulation, the optimized design of the 15 mm×15 mm×15 mm miniaturized sensor is completed. The microscope imaging packaging system and the vibration testing system are established to complete the packaging and performance testing of the sensor. Experiments show that the resonant frequencies of X, Y, and Z axes of the sensor are 990, 975, and 960 Hz, respectively. The flatness is good in the frequency range of 0~700 Hz, and the sensitivities are 19.10, 19.28, and 20.01 pm/g, respectively, which has the advantages of lightweight and high consistency of the performance of the three-axis test. A micro-angular vibration test system is built to evaluate the performance of the sensor, which has an angular displacement measurement resolution better than 0.21 μrad and a linearity of 0.998.

Keywords: fiber Bragg gratings; vibration sensors; triaxial; miniaturization; vibration measurement

0 引 言

卫星在轨运行期间,运动部件发生的扰动传递到相机安装面,产生的微振动影响星载相机成像时期光学部件,造成摄影模糊扭曲等现象,通过探测相机角振动的图像复原方法能够有效地补偿微角振动造成的图像运动模糊[1]。星载相机微角振动的测量方法如下:利用星上角

收稿日期:2023-08-03 Received Date: 2023-08-03
*基金项目:国家重点研发计划(2021YFA1003504)项目资助

度传感器直接测量角振动角度[2]；利用光纤陀螺测量角振动角速率[3]；利用磁流体力学(magnetohydrodynamics，MHD)传感器测量角振动角速率[4]；使用加速度传感器[5]，通过从线振动到角振动的转化得到角位移[6]。其中角度传感器研制难度大、光纤陀螺测量频率带宽窄，MHD 传感器重量体积较大，不易安装于卫星内狭小空间测点，加速度传感器可同时测量线振动和微角振动，兼顾测点布局便利[7]。

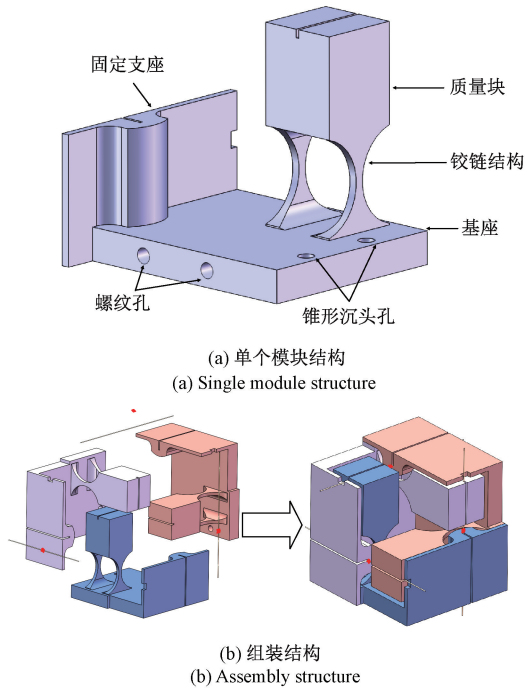
采用光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating，FBG)的加速度振动传感器作为一种新技术，具有抗电磁干扰、易组网多点监测等优点，受到广泛的关注。在星载相机实际应用中，振动传感器要从多个方向监测振动，同时，由于卫星对光学设备要求不断提高，传感器要具备轻量化特点，所以，设计测量多轴振动的微小型 FBG 振动传感器具有重要的研究意义。

近年来，国内外学者对多轴 FBG 振动传感器的设计进行了大量研究，严超凡等[8]提出了组合式的三轴振动传感器，将 3 个不同铰链结构的传感器组合连接，再固定于底座外壳完成 58 mm×52 mm×38 mm 的三轴传感器设计，该传感器 X、Y 和 Z 轴方向的谐振频率分别为 673、667 和 1 376 Hz，灵敏度分别为 72.3、70.2 和 83.1 pm/g。Wang 等[9]在文献[8]的基础上提出新组合式方式，将两个铰链式的单轴传感器合二为一，再与测 Z 轴的传感器连接，实现三轴测量，将传感器尺寸缩小至 50 mm×50 mm×42 mm。Wang 等[10]提出了一种复合柔性铰链的三轴振动传感器，该传感器尺寸为 25 mm×25 mm×30 mm，谐振频率分别为 800、1 125 和 1 750 Hz，灵敏度分别为 51.9、39.5 和 20.3 pm/g。目前传感器主要采用外壳、质量块和弹性梁分立组合进行三轴振动传感器的设计，其空间利用率低，传感器体积难以压缩。因此，多轴振动传感器的微小型设计是需突破的技术难点。

本文提出一种采用 3 个弹性元件、质量块和基座一体结构的模块交错组合构成三轴振动传感器的设计方法。提高了空间利用率，增大了单位体积质量块的重量，保证了传感器的降低组合难度，提高三轴测量性能的一致性。该传感器能安装于卫星狭小空间实现微型、轻质、三轴的线振动和角振动测量。

1 传感器结构设计

为实现光纤光栅振动传感器的三轴测量，将传感器设计成 3 个结构相同的零件模块，每个模块由质量块、铰链、基座和 FBG 组成。为缩小传感器的整体尺寸，使传感器的结构更加紧凑、空间利用率提高，传感器设计成空间上形成交错形式的结构。但这导致内部结构复杂，光纤封装困难，故在传感器表面增设 U 型槽的固定支座封装光纤。由于设计的微型化三轴 FBG 振动传感器结构复杂，机械加工和 3D 打印等技术无法实现一体成型，因此，本文传感器设计为模块组合式的结构，如图 1 所示。



(a) 单个模块结构
(a) Single module structure

(b) 组装结构
(b) Assembly structure

图 1 传感器结构示意

Fig. 1 Diagram of the sensor structure

将质量块、铰链、基座和固定基座设计为一体模块，并将基座直接扩展为外壳，如图 1(a)所示。3 个一体化模块通过两两呈垂直交错组合的连接方式形成一个整体，如图 1(b)所示。而分立外壳的组合结构设计如图 2 所示，是直接将 3 组质量块、铰链和基座设计为 3 个结构相同的零件，再连接在外壳上。

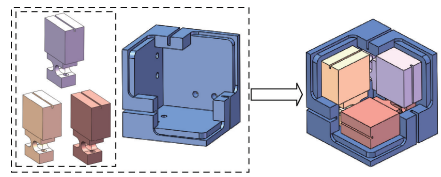


图 2 分立外壳结构

Fig. 2 Structure diagram of the discrete shell

两种结构经封装对比后发现，由于传感器整体尺寸小，分立外壳的结构要求零件加工和装配的精度高达 0.1 mm；同时为保证螺钉牢固连接外壳和基座，传感器贴合面的平整度也有较高的要求，但现有的加工技术难达到要求。故本文设计的微型化三轴 FBG 振动传感器结构由 3 个模块交错组合，单个模块为一个包含质量块、铰链、外壳基座的一体零件。

2　传感器理论分析

当振动传感器受到振动时,质量块在惯性的作用下绕着底部铰链中心进行往复运动,该运动使 FBG 发生轴向应力变化,从而使 FBG 的中心波长发生漂移,通过检测 FBG 中心波长的漂移量,实现检测振动的目的[11]。当传感器受到沿 Y 轴方向、加速度为 a 的外界力时,质量为 m 的质量块会绕着铰链中心作往复运动,传感器的力学分析图如图 3 所示。

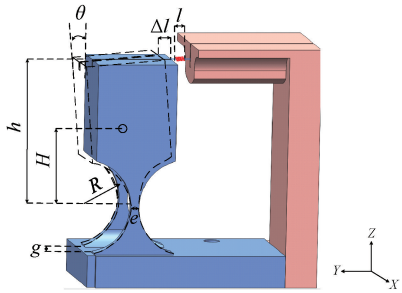


图 3　力学分析图

Fig. 3　Diagram of the mechanical analysis

振动传感器处于稳定状态时,力矩动平衡方程可表示为:

$$maH - K_f \Delta l h - K\theta = 0 \tag{1}$$

式中:H 为质量块的质心到铰链中心的距离;K_f 为光纤的刚度;Δl 为光纤光栅的长度变化量;h 为光纤光栅到铰链中心的距离;K 为铰链的转动刚度;θ 为铰链转动的角度。其中,光纤的刚度 K_f 可表示为:

$$K_f = \frac{A_f E_f}{l} \tag{2}$$

式中:l 为固定支座与质量块两胶点之间光纤光栅的有效长度;A_f 和 E_f 分别表示光纤的横截面积与杨氏模量。

根据几何关系可以得到光纤的长度变化量 Δl 与光纤光栅到铰链中心距离 h 的关系:

$$\Delta l = h\theta \tag{3}$$

光纤在质量块运动的带动下轴向伸缩,根据耦合定理,FBG 初始中心波长 λ 与中心波长漂移量 $\Delta\lambda$ 的关系可以表示为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - Pe)\frac{\Delta l}{l} \tag{4}$$

式中:P_e 为 FBG 的有效弹光系数。

传感器的灵敏度公式为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{a} \tag{5}$$

当振动传感器处于自由状态时,动力学平衡方程可表示为:

$$J\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} + (K_f h^2 + K)\theta = 0 \tag{6}$$

式中:J 为质量块相对于铰链中心的转动惯量。J 可表示为[12]:

$$J = H^2 m \tag{7}$$

结合式(6)和(7),传感器的谐振频率 f 的计算公式可表示为:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_f h^2 + K}{H^2 m}} \tag{8}$$

谐振频率 f 和灵敏度 S 是 FBG 振动传感器的两个重要性能指标,分别表示传感器的测量频率范围和对振动的感知敏感度,理论分析可知两者之间存在相互制约的关系,传感器结构设计需综合考虑传感器性能和尺寸的关系。

3　建模及有限元仿真

由式(5)和(8)可知,传感器封装的 FBG 长度 l 会直接影响灵敏度,与谐振频率无关,固定点间的光栅有效长度 l 越小,FBG 中心波长的漂移量 $\Delta\lambda$ 越大,灵敏度 S 则越大。为提高灵敏度,光栅长度应尽量小,结合实际情况,本文将使用栅区长度 l 为 1 mm 的超短光纤光栅,并将质量块与固定支座之间的距离设为 1.5 mm 避免胶影响栅区。在微型化传感器中,光纤刚度对谐振频率和灵敏度特性影响大,而光纤直径直接影响其轴向刚度,由式(2)可知,光纤的直径越小,光纤刚度就越小,传感器的灵敏度越大[13]。

传感器整体尺寸仅为 15 mm×15 mm×15 mm,结构是将 3 个模块通过底座增设的螺纹孔连接,故将底座厚度只设定为 2 mm。3 个模块在交错组合时,不同模块上质量块和固定支座的光纤槽组装时需处于同一直线上,故增大铰链的半径 R。由式(4)和(5)可知,在一定的外界激励下,铰链中心到光纤光栅距离 h 越大,光纤长度变化量 Δl 越大,传感器灵敏度越大,所以距离 h 应增大。为提高传感器的灵敏度,综合考虑结构紧凑和组装实施的可行性,铰链参数 R 确定为 3 mm。

传感器铰链的刚度与传感器两个性能指标密切相关,直接影响铰链刚度的结构参数是镂空长度 g 和铰链厚度 e。用已确定的结构参数建模,铰链镂空长度 g 和厚度 e 的范围分别为 0~3 mm 和 0.5~2 mm。再对传感器模型进行有限元仿真,得到传感器的性能,通过不断的仿真和加工迭代优化,得到谐振频率为 1 000 Hz 附近适合测量中频振动传感器的结构参数 g 和 e 分别为 2 和 0.5 mm。光纤光栅和传感器结构的优化后的参数如表 1 所示。

表 1 优化后传感器相关参数

Table 1 Optimized sensor-related parameters

参数	含义	数值
H	从质心到铰链中心的距离	7.2 mm
h	从光纤光栅到铰链中心的距离	8.5 mm
R	铰链半径	3 mm
e	铰链厚度	0.5 mm
g	铰链底部镂空的长度	2 mm
l	光纤光栅的栅区有效长度	1 mm
E_f	光纤的杨氏模量	72 GPa
A_f	光纤的横截面积	0.005 026 mm^2

将优化后模型结构参数重新建模进行有限元仿真。传感器材料定为杨氏模量 90 GPa,泊松比 0.324 的黄铜后,进行模态分析,对传感器模型划分网格、添加固定约束后,得到振型图如图 4 所示。一阶模态是传感器在外界的激励作用下沿光纤轴方向振动的模态,也即是传感器要进行检测的模态[14]。由图 4 可知,传感器一阶谐振频率仿真结果为 1 009 Hz。

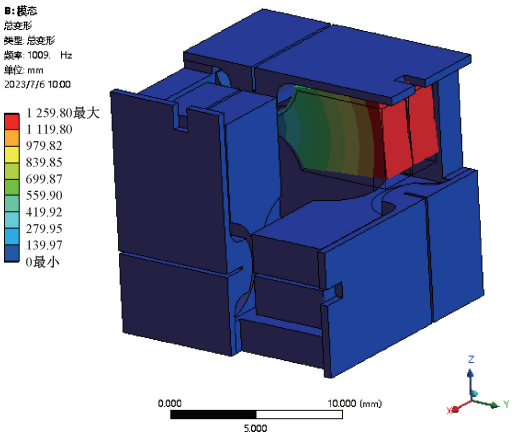


图 4 模态振型图

Fig. 4 Modal shape diagram

最后进行谐响应分析,对传感器模型的固定支架施加固定约束,分析不同频率正弦载荷作用下的系统动态响应。设置频率范围为 0~1 500 Hz,步长为 10 Hz,正弦载荷大小为 1g,得到的传感器动态响应如图 5 所示。

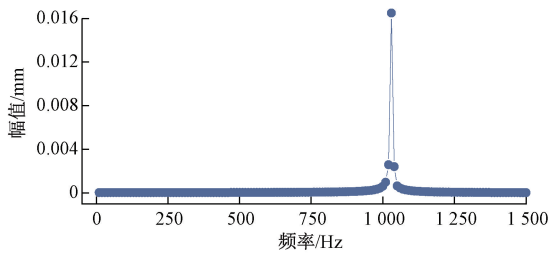


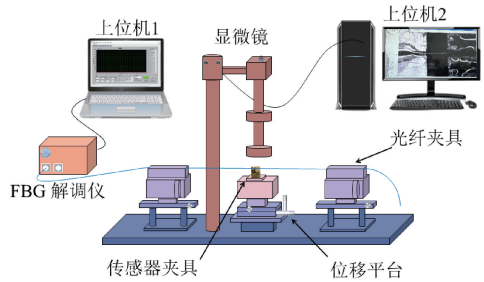
图 5 谐响应仿真分析

Fig. 5 Harmonic response simulation analysis

由图 5 可知,该传感器的谐振峰位于 1 009 Hz,且在 0~800 Hz 曲线相对较平缓,有利于实现测量中低振动的预期目标。

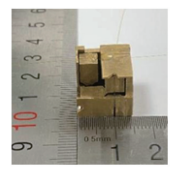
4 传感器封装

将 3 个使用黄铜材料加工的零件两两垂直,使用胶和螺钉进行组合封装。再将准分子激光器结合相位掩模板刻写的 FBG 采用两点式封装在固定支座和质量块之间,避免了啁啾现象[15]。为完成微型化传感器的封装,需搭建一套显微镜成像封装系统如图 6(a)所示。该封装系统涉及的设备有传感器夹具、光纤夹具、位移平台、显微镜、上位机和光谱仪。封装前,将光纤光栅连接光谱仪,传感器和光纤固定于相应的夹具中,通过显微镜和上位机的图像处理软件将光栅区完全显现出来。在光纤槽中注射适量的胶后,微调位移平台,将光纤缓慢匀速的放入光纤槽中,加热固化,完成传感器封装。封装完成的传感器如图 6(b)所示,体积仅为 15 mm×15 mm×15 mm。



(a) 显微镜成像封装平台

(a) Microscope imaging encapsulation platform



(b) 传感器实物

(b) Actual image of the sensor

图 6 传感器封装示意图

Fig. 6 Diagram of the package

5 传感器性能测试

传感器封装结束后,需要对其性能进行测试。振动测试系统示意图如图 7 所示,主要分为振动台配套系统和信号解调系统两部分。振动台配套系统包含信号发生器、功率放大器以及振动台,为测试实验提供不同的振动频率和加速度,通过数据采集卡采集数据并在计算机上显示;信号解调系统是使用实验室自发研制且解调精度为 2 pm 的 CCD 光纤光栅解调仪对 FBG 中心波长进行解调与分析,最后在计算机上完成数据的处理和显示。

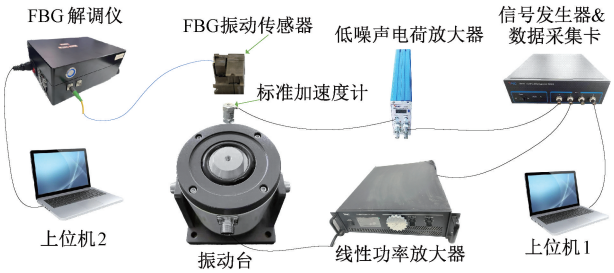


图 7　传感器测试系统示意图

Fig. 7　Diagram of the sensor test system

在标准振动系统的振动台上固定好传感器,使光纤的工作轴垂直于台面,调节输出的激励,利用解调仪进行采集和分析。采用振动测试系统进行传感器的幅频响应特性和灵敏度响应特性的测试。相比于振动引起 FBG 中心波长高速变化,温度引起的 FBG 中心波长的变化是极慢的,可以认为是常量。FBG 振动传感器加速度的大小正比于中心波长变化关于时间的二次导数,因此温度变化不影响振幅和频率的测量。

5.1　幅频响应特性

为测试传感器的幅频响应特性,将振动传感器三轴分别依次垂直固定在振动台台面上,振动台输出的激励加速度设置为 0.5 g,再以 100 Hz 步长在范围为 100~800 和 1 200~1 500 Hz 内采集数据,以 25 Hz 步长在范围为 800~1 200 Hz 内采集数据,并绘制 FBG 中心波长漂移量变化曲线,如图 8 所示。从图 8 可知,传感器的谐振频率分别为 990、975 和 960 Hz,在 0~700 Hz,幅频响应曲线平坦,可作为传感器的工作范围。

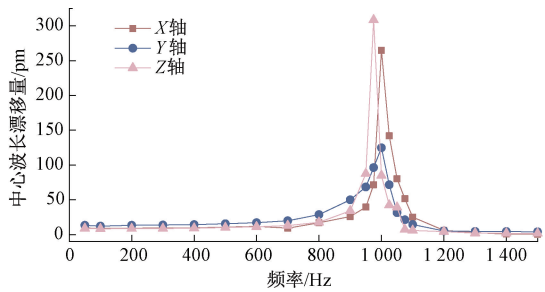


图 8　幅频响应曲线

Fig. 8　Amplitude frequency response curve

5.2　灵敏度响应特性

传感器的灵敏度是衡量传感器性能的一个重要指标,需对传感器灵敏度进行测试。振动台的输出频率设置为 100 Hz,激励加速度由 0.25 g 上升至 2 g,步长为 0.25 g,分别采集传感器 3 个轴向上受不同加速度影响的中心波长变化,通过线性拟合绘制 FBG 波长漂移量与不同激励加速度的关系,如图 9 所示。

从图 9 可看出,当激励频率不变时,FBG 波长漂移量随激励加速度的增加而增加。当激励频率为 100 Hz 时,

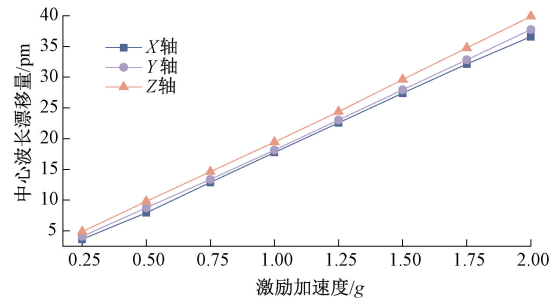


图 9　灵敏度线性拟合

Fig. 9　Sensitivity linear fitting

得到传感器在 3 个轴向的灵敏度分别为 19.10、19.28 和 20.01 pm/g。由幅频响应和灵敏度响应实验结果可知,传感器 3 个测量轴的传感性能具有较好的一致性。

将本文设计的传感器与同等工作频段的 FBG 多轴振动传感器的性能和尺寸进行对比,如表 2 所示,可知本文设计的传感器灵敏度相当,体积最小。

表 2　多轴 FBG 传感器性能比较表

Table 2　Multi-axis FBG sensor performance comparison table

方法	频率/Hz	灵敏度/(pm·g^{-1})	尺寸/mm
文献[15]	1 050、1 060	13.1、12.0	15×15×32
文献[10]	800、1 125、1 750	51.9、39.5、20.3	25×25×30
文献[16]	980、960、640	9.7、10.1、7.5	67×67×26
本文	990、975、960	19.1、19.3、20.0	15×15×15

5.3　横向抗干扰特性

横向抗干扰特性是研究传感器工作与非工作方向上受激励后波长漂移量变化的关系。为了检测传感器的横向抗干扰能力,将传感器翻转 90°施加垂直于光纤轴的振动,振动台输出的激励加速度幅值设置为 0.5g、激励频率为 200 Hz,传感器工作与非工作方向的时域特性曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,在同等大小激励的情况下,传感器非工作轴向的横向干扰占工作轴向的比例

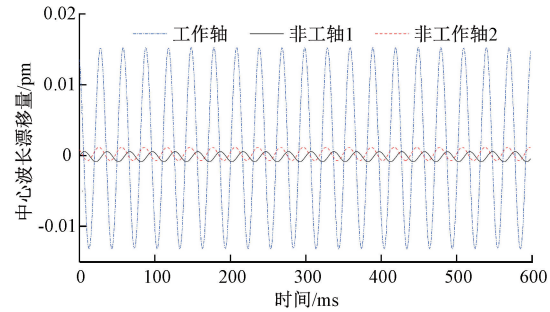


图 10　工作方向与非工作方向的时域特性曲线

Fig. 10　Sensitivity linear fitting of time-domain characteristic curves in working and cross directions

小于 5%，表明该传感器具有很好的横向抗干扰能力。

6 微角振动测试应用

为验证传感器测量微角振动的性能，搭建微角振动测试系统如图 11 所示。测试平台主要由振动台、支柱、轴承钢棍、角振动台、标准压电传感器和 FBG 振动传感器组成。当振动台受到激励后，相连接的角振动台会发生微角振动，在角振动台上的 FBG 传感器测量的线位移可用简谐运动表示为 $s(t)=S\sin(wt+\varphi)$，得到线加速度 $a(t)=A\sin(wt+\varphi)$。再将 $a(t)$ 经过转换公式得到角加速度，公式表示为[17]：

$$\ddot{\theta}(t)=\frac{[a_1(t)-a_2(t)]}{L}\times 57.3 \tag{9}$$

式中：$\ddot{\theta}(t)$ 为角加速度；$a_1(t)=A_1\sin(w_1t+\varphi_1)$，$a_2(t)=A_2\sin(w_2t+\varphi_2)$，分别为两个 FBG 振动传感器测量的线加速度；$L$ 为两个传感器之间的距离。

将角加速度转换角位移 $\theta(t)$ 的公式表示为：

$$\theta(t)=\iint\ddot{\theta}(t)\,\mathrm{d}t^2 \tag{10}$$

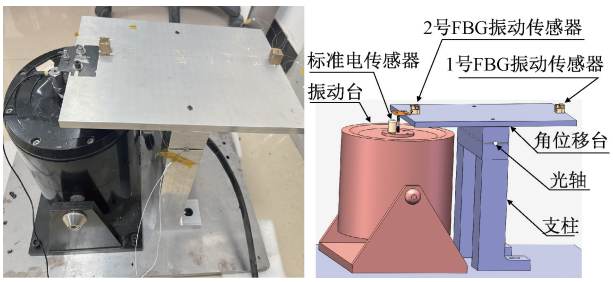


图 11 微角振动测试图

Fig. 11 Micro-angle vibration test diagram

两个 FBG 传感器分别安装于角振动台距离平衡处的两端，距离 L 为 24 cm，测量的线位移相位相反。设置振动台激励频率为 100 Hz，加速度分别为 50、100、150 和 200 mg，FBG 传感器测量值如表 3 所示。

表 3 角振动试验测试数据

Table 3 Angular vibration test data

激励加速度/mg	50	100	150	200
1 号传感器线加速度值/mg	39.51	81.88	112.47	152.41
2 号传感器线加速度值/mg	41.41	82.01	119.05	157.23
角位移幅值/μrad	8.37	16.95	23.95	32.03

将 FBG 传感器测量的线加速度通过计算得到角位移。在不同的激励加速度下，角位移变化如图 12 所示，角位移振幅与激励加速度具有良好的线性关系。

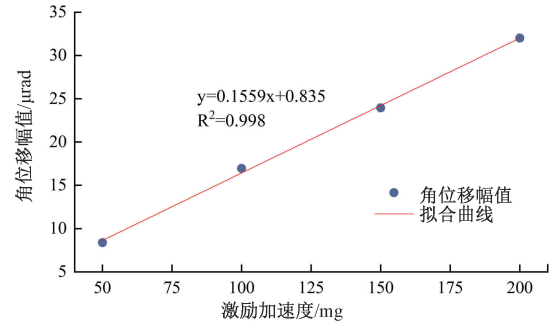


图 12 FBG 角位移幅值测试

Fig. 12 FBG angular displacement amplitude test

在实际应用中传感器的分辨率十分重要，因此本文对 FBG 振动传感器分辨出的最小角位移幅值进行了测量。微调振动台加速度幅值，由式(9)和(10)可得角位移幅值，其变化曲线如图 13 所示，其分辨率优于 0.21 μrad。

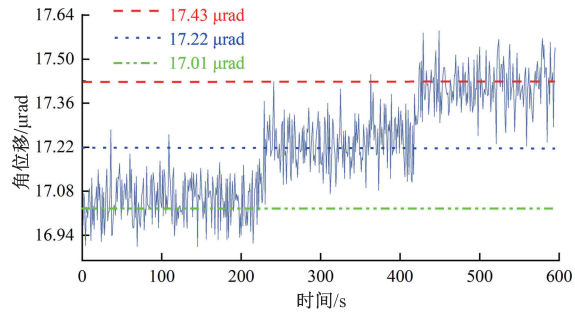


图 13 角位移幅值变化曲线

Fig. 13 Angular displacement amplitude change curve

7 结 论

本文设计了一种尺寸仅为 15 mm×15 mm×15 mm、质量约为 15.9 g 的微型化三轴 FBG 振动传感器，将 3 个一体化模块通过空间上交错组合完成传感器的装配。通过有限元仿真分析了传感器的性能，搭建了封装监测系统、振动测试系统和微角振动测试系统完成传感器的封装和测试。实验结果表明，该传感器在 X、Y、Z 轴方向的谐振频率分别为 990、975 和 960 Hz，且在 0~700 Hz 频率范围内具有良好的平坦区，三轴的灵敏度分别为 19.10、19.28 和 20.01 pm/g，角位移测量分辨率优于 0.21 μrad。本文提出的设计方法实现微型、轻质、三轴的振动测量，为三轴传感器的微型化提供了新思路；设计的传感器具有三轴测试性能一致性高的优点，能测量线振动的同时，反演计算间接测量测量点部位的微角振动，为微振动测试提供技术支持。

参考文献

[1] 吴国栋. 一种三线阵测绘相机 CCD 像面的装调方法[J]. 仪器仪表学报,2009,30(11):2395-2398.
WU G D. Alignment method of CCD image plane for three-line array mapping camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2009,30(11): 2395-2398.

[2] SKORMIN V A. Jitter rejection technique in a satellite-based laser communication system [J]. Optical Engineering, 1993, 32(11): 2764-2769.

[3] 边志强,曾擎,王皓,等. 光纤陀螺测量卫星结构角振动的地面试验验证[J]. 航天器工程,2016,25(2):133-138.
BIAN ZH Q, ZENG Q, WANG H, et al. FOG measures satellite structure angle vibration method[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016,25(2):133-138.

[4] ECKELKAMPBAKER D, SEBESTA H R, BURKHARD K. Magnetohydrodynamic inertial reference system[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2000, 4025: 99-110.

[5] WITTIG M, VAN HOLTZ L,TUNBRIDGE D, et al. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA′s communication satellite OLYMPUS[C]. Proceedings of SPIE, 1990,1218: 205-214.

[6] TOYOSHIMA M,TAKAYAMA Y, KUNIMORI H, et al. In-orbit measurements of spacecraft microvibrations for satellite laser communication links [J]. Optical Engineering, 2010, 49(8): 083604.

[7] 赵伟,高青松,王海明,等. 石英挠性加速度计测量航天器微振动的方法[J]. 航天器环境工程,2016,33(2):199-205.
ZHAO W, GAO Q S, WANG H M, et al. Measurement of spacecraft micro-vibration based on quartz-flexibility-accelerometer[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(2):199-205.

[8] 严超凡, 戴玉堂, 杨雨微, 等. 基于柔性铰链的 FBG 三维加速度传感器[J]. 半导体光电, 2022, 43(4): 697-703.
YAN CH F, DAI Y T, YANG Y W, et al. FBG three-dimensional acceleration sensor based on flexible hinge[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(4): 697-703.

[9] WANG Y, DAI Y T, MUMTAZ F, et al. A combined tri-dimensional fiber Bragg grating accelerometer for multi-directional measurements [J]. Optical Fiber Technology, 2023, 79:103360.

[10] WANG H, LIANG L, ZHOU X B, et al. New fiber Bragg grating three-dimensional accelerometer based on composite flexure hinges[J]. Sensors, 2021, 21(14): 4715.

[11] 贾振安, 赵显锋, 杨凯庆, 等. 一种基于‘E’型梁结构的光纤光栅振动传感器[J]. 光电子·激光, 2020, 31(12): 1239-1244.
JIA ZH AN, ZHAO X F, YANG K Q, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on ‘E’ beam structure[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2020, 31(12): 1239-1244.

[12] 赵慧枝, 董明利, 辛璟焘, 等. 微型宽频 FBG 振动传感器设计及特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024,61(9):268-275.
ZHAO H ZH, DONG M L, XIN J T, et al. Structural design and characteristic research of micro broadband FBG vibration sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024,61(9):268-275.

[13] 王启东. 基于正交柔性铰链的小型光纤光栅振动传感器研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2021.
WANG Q D. Research on small fiber Bragg grating vibration sensor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.

[14] 李立新, 孙睿, 于瑞红, 等. 中高频椭圆铰链双光纤光栅加速度传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2021 (8): 22-26.
LI L X, SUN R, YU R H, et al. Middle and high frequency double fiber grating acceleration sensor based on ellipse hinge[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(8): 22-26.

[15] ZHANG Y SH, ZHANG W G, ZHANG Y X, et al. 2-D medium-high frequency fiber Bragg gratings accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(3): 614-618.

[16] XIONG L, GUO Y X, ZHOU W H, et al. Fiber Bragg

grating-based three-axis vibration sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(22): 25749-25757.

[17] 王晓雷,南宫自军,龙梁,等. 惯组飞行角振动环境测量与环境条件设计[J]. 宇航总体技术,2018,2(1):37-40.
WANG X L, NANGONG Z J, LONG L, et al. Measure of IMU's angular vibration environment during a rocket flight and design of test condition [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018,2(1):37-40.

作者简介

黎琪慧,2022 年于攀枝花学院获得学士学位,现为北京信息科技大学硕士研究生,主要研究方向为光纤传感器与光纤器件。
E-mail: liqihui66@163.com

Li Qihui received her B. Sc. degree from Panzhihua University in 2022. She is currently a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optical fiber sensing and optoelectronic devices.

董明利(通信作者),分别在 1986 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位,2009 年于北京理工大学获得博士学位,现为北京信息科技大学教授,北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院院长,主要研究方向为光电与视觉测量、光纤传感与器件。
E-mail: dongml@bistu.edu.cn

Dong Mingli (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hefei University of Technology in 1986 and 1989, and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2009, respectively. She is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University and the dean of School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optoelectronic and visual measurements, optical fiber sensing and devices.