

DOI:10.16136/j.joel.2023.04.0235

# 一种基于新型双轴圆弧铰链的二维 FBG 加速度传感器

杨建宇<sup>1</sup>, 段宇星<sup>2</sup>, 童晓玲<sup>2\*</sup>, 梁磊<sup>2</sup>, 米皓坤<sup>2</sup>

(1. 中兴通讯股份有限公司 全球服务工程交付部, 广东 深圳 518000; 2. 武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为了实现大跨度桥梁中拉索构件的二维 (two-dimensional, 2D) 振动信号高精度测量, 本文设计并研究了一种小型化的新型 2D 光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 加速度传感器, 以解决现有 FBG 加速度传感器体积与质量较大的问题。所设计的 FBG 加速度传感器主要由含有质量块的双轴圆弧铰链、4 个固定支架, 以及刻有 4 段阵列 FBG 的光纤组成。通过建立 FBG 加速度传感器的动力学普遍方程, 得到灵敏度与固有频率的理论数值, 另外辅以 Abaqus 软件对其进行有限元仿真以验证理论推导的结果。实验测试数据表明, FBG 加速度传感器的固有频率约为 500 Hz, 双 FBG 的布置使其灵敏度可以达到 595.2 pm/g, 此外对称推挽的圆弧铰链设计还具有优异的横向抗干扰和温度自补偿性能。最后以某中承式钢管混凝土拱桥为实际工程案例, 使用所设计的 2D FBG 加速度传感器实现了吊索索力的有效测量。

**关键词:** 光纤布拉格光栅 (FBG); 二维 (2D) FBG 加速度传感器; 双轴圆弧铰链; 索力测量

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)04-0364-07

## A 2D fiber Bragg grating accelerometer based on a novel biaxial arc hinge

YANG Jianyu<sup>1</sup>, DUAN Yuxing<sup>2</sup>, TONG Xiaoling<sup>2\*</sup>, LIANG Lei<sup>2</sup>, MI Haokun<sup>2</sup>

(1. Global Services Engineering Delivery Department, Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Shenzhen, Guangdong 518000, China; 2. National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract:** In order to realize the high-precision measurement of the two-dimensional (2D) vibration signal of the cable components in the long-span bridge, and to solve the problem of the large volume and mass of the existing fiber Bragg grating (FBG) accelerometer, a new miniaturized 2D FBG accelerometer is designed and studied in this paper. The designed FBG accelerometer is mainly composed of a biaxial arc hinge with a mass block, four fixed brackets, and an optical fiber engraved with four-segment array FBGs. By establishing the general dynamic equation of FBG accelerometer, the theoretical values of sensitivity and natural frequency are obtained. In addition, it is supplemented by Abaqus to carry out finite element simulation to verify the theoretical derivation results. The experimental test data show that the natural frequency of the FBG accelerometer is about 500 Hz. The arrangement of the dual FBGs allows the sensitivity to reach 595.2 pm/g. In addition, the symmetrical push-pull arc hinge design also has excellent lateral anti-interference and temperature self-compensation performance. Finally, taking a middle-supported concrete-filled steel tube arch bridge as an actual engineering case, the designed 2D FBG accelerometer is used to effectively measure the cable force of the sling.

**Key words:** fiber Bragg grating (FBG); two-dimensional (2D) FBG accelerometer; biaxial arc hinge; cable force measurement

\* E-mail: 249802@whut.edu.cn

收稿日期: 2022-04-05 修订日期: 2022-05-26

## 0 引言

对于大跨度悬索桥、斜拉桥和分离式拱肋桥的拉索构件,可采用脉动法以测量拉索的固有频率等动力特性,即拾取由风荷载等各种外部因素引起索结构的微小不规则振动。拉索的固有频率是评价桥梁索力与其健康状况的重要指标<sup>[1]</sup>,而其检测与评价是一个基于实测响应的系统识别问题,重点在于利用性能优异的加速度传感器获取准确的动力响应信号<sup>[2]</sup>。

传统的压电加速度传感器和磁电速度传感器在索力脉动测试中存在灵敏度低、测试频段低、可靠性差等缺点<sup>[3]</sup>。光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感技术由于其抗电磁干扰能力强、质量轻、本质防爆和组网便捷等诸多优点<sup>[4]</sup>,在桥梁动静载测试领域中具有十分广阔的应用前景<sup>[5]</sup>。通过将 FBG 封装于特殊的机械芯体中,倾斜、振动、位移、压力与沉降等物理参量的变化会引起 FBG 波长的线性偏移<sup>[6]</sup>。目前,常见的 FBG 加速度传感器的结构样式有悬臂梁、膜片式与柔性铰链<sup>[7-9]</sup>。国内外学者关于 FBG 加速度传感器的研究大多数面向于一维 FBG 加速度传感器, QIU<sup>[10]</sup>提出的基于 3 个质量块和 4 个柔性铰链的 FBG 加速度传感器,以及 YAN<sup>[11]</sup>提出的复合铰链式的 FBG 加速度传感器,均只能实现单向振动的测量。王赞<sup>[12]</sup>与 WEI<sup>[13]</sup>分别基于小型铰链与对称多轴铰链结构设计了相应的二维(two-dimensional)FBG 加速度传感器,以上两者的固有频率较高,分别可以达到 368 Hz 与 279 Hz,但其灵敏度分别为 107.3 pm/g 与 220 pm/g,无法满足脉动法测量桥梁拉索动力特性的高灵敏度要求。WANG<sup>[14]</sup>为了实现三维振动的测量,设计了一种尺寸仅为 28 mm×38 mm×38 mm 的薄壁铰链式 FBG 加速度传感器,但其相应的方向解耦算法复杂,不便于推广至实际现场,设计传感器时还应尽量提高其横向抗干扰能力。

一般而言,提升 FBG 加速度传感器的灵敏度不可避免地会压缩其服役的频响测试范围,利用 4 段阵列 FBG 布置与双轴圆弧铰链的设计思路可实现灵敏度倍增的效果,且可实现温度自补偿的功能,高灵敏度且高精度的 FBG 加速度传感器可以精确地捕捉脉动测试中拉索结构中微弱的振动信号,为索力测量等桥梁健康监测工作提供有效数据。

## 1 FBG 加速度传感器结构动力学分析

### 1.1 传感器结构设计

所设计的 2D 加速度传感器的核心元件是 FBG。宽带光源入射光纤经过 FBG 时,与布拉格中心波长  $\lambda_B$  一致的窄带光谱将发生反射,其余波段的光谱将透射。作用于 FBG 的应变  $\Delta\epsilon$  与温度  $\Delta T$  会引起的  $\lambda_B$  线性偏移,其改变量关系可表示为:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_\epsilon\Delta\epsilon + K_T\Delta T, \quad (1)$$

式中,  $K_\epsilon$  与  $K_T$  分别是 FBG 的应变和温度灵敏系数。中心波长  $\lambda_B$  为 1550 nm 的 FBG 应变灵敏系数约为 1.21 pm/ $\mu\epsilon$ , 温度灵敏系数约为 10.6 pm/ $^\circ\text{C}$ , 不同波段 FBG 的灵敏度几乎一致,因此,一根光纤上可串联接入多段中心波长不一致的阵列 FBG, 以实现准分布式测量。

如图 1 所示,为实现对待测桥梁的拉索构件双向振动监测,所设计的 FBG 加速度传感器主要由不锈钢 316 材质的双轴柔性铰链、质量块、底座、4 个固定支架,以及一根刻有 4 段阵列 FBG 的光纤组成。每 2 个 FBG 经预拉伸使其波长漂移 2 nm 后,使用 353ND 胶水固定于质量块与固定支架之间。桥梁结构振动监测信号属于中低频信号,传感器应实现温度自补偿以避免监测现场温度变化所引起 FBG 的温漂效应。FBG 加速度传感器的水平方向各有 2 个 FBG, 在外界振动激励下,质量块在惯性力的作用下绕着双轴圆弧铰链往复旋转,测量方向的 FBG 分别受到拉伸与压缩,因此传感器的灵敏度增大了一倍并实现了温度自补偿。而当传感器受到其余 2 个方向的振动时,测量方向的 2 个 FBG 均为受拉状态,理论上将其波长漂移量相减后数值为 0,该结构设计可以有效提升加速度传感器的横向抗干扰能力。

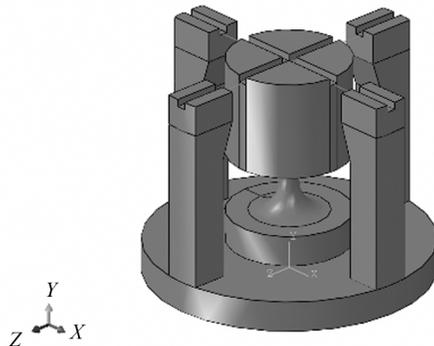


图 1 二维 FBG 加速度传感器结构图

Fig. 1 Structural diagram of 2D FBG accelerometer

### 1.2 传感器固有频率分析

为了得到FBG加速度传感器的灵敏度与固有频率,选取传感器Y-Z平面进行分析,利用达朗伯原理与虚位移原理推导其动力学普遍方程。令 $F_i$ 、 $N_i$ 与 $G_i$ 分别为作用于质点 $i$ 的主动力、约束反力与惯性力合力,表达式如下:

$$F_i + N_i + G_i = 0. \quad (2)$$

设质点 $i$ 的虚位移为 $\delta r_i$ ,由虚位移原理则有:

$$\sum (F_j + N_i + G_i) \times \delta r_i = 0. \quad (3)$$

设其质点之间的约束均为理想约束,约束反力在虚位移上所做的功为0,因此可得动力学普遍方程:

$$\sum (F_j + G_i) \times \delta r_i = 0. \quad (4)$$

将FBG加速度传感器的双轴柔性铰链简化为理想球铰,其理想化力学模型见图2,同时附加力矩 $M$ 以表示变形体具有一定的抵抗变形能力,力矩 $M$ 、转角 $\alpha$ 以及转动刚度 $K_x$ 三者关系见下式:

$$M = K_x \alpha. \quad (5)$$

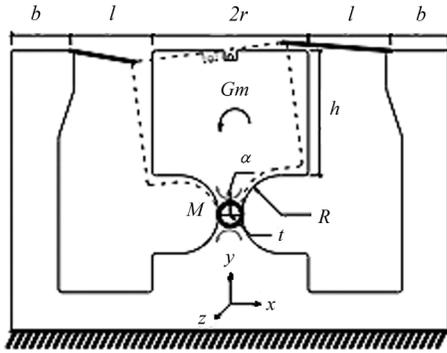


图2 自由振动下FBG加速度传感器的理想化力学模型

Fig.2 Ideal mechanical model of FBG accelerometer under free vibration

双轴圆弧铰链转动刚度 $K_x$ 的倒数为其柔度 $C_x$ ,表达式为<sup>[15]</sup>:

$$C_x = \frac{64}{\pi EK^3} \left[ \frac{2s^4(20s^3 + 16s^2 + 4s + 1)}{(1 + 4s)^3(1 + 2s)} + \frac{4s^5(10s^2 + 6s + 1)}{(1 + 4s)^3(1 + 2s)^2} + \frac{8s^6(2s + 1)}{3(1 + 4s)^3(1 + 2s)^3} + \frac{16s^5(5s^2 + 4s + 1)}{(1 + 4s)^{3.5}} \arctan(\sqrt{1 + 4s}) \right], \quad (6)$$

式中, $s$ 表示双轴圆弧铰链半径与其厚度的比值。

FBG加速度传感器在振动激励下变形较小,其力学模型满足小变形假设,因此可认为转角 $\alpha$ 满足:

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{x}{h + R}. \quad (7)$$

令 $F_f$ 为FBG弹性预应力, $J$ 为质量块绕铰链的转动惯量, $G_m$ 为质量块的惯性力矩,表示为:

$$F_f = K_f x, J = \frac{1}{12} m(3r^2 + h^2), G_m = -J \ddot{\alpha}. \quad (8)$$

由式(4)动力学普遍方程可得:

$$(-M + G_m) \delta \alpha - 2F_f \delta x = 0. \quad (9)$$

由于虚位移任意性,FBG加速度传感器的振动方程为:

$$J \ddot{\alpha} + [K_x + 2K_f(h + R)^2] \alpha = 0. \quad (10)$$

FBG加速度传感器可以等效为弹簧质量系统,等效质量为转动惯量 $J$ ,等效刚度为 $[K_x + 2K_f(h + R)^2]$ 。

由于加速度传感器的变形体与质量块部分是旋转体结构,因此其一阶与二阶固有频率均为:

$$f_{1,2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{[K_x + 2K_f(h + R)^2]}{J}}. \quad (11)$$

### 1.3 传感器灵敏度分析

计算FBG加速度传感器的稳态强迫振动响应,需要求得加速度 $a$ 作用下的静态响应,再根据式(12)进行稳态强迫振动振幅与激励频率计算即可。

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta \lambda_{st}}{1 - (\omega/2\pi f_1)^2}, \quad (12)$$

式中, $\Delta \lambda$ 为稳态强迫振动下振幅, $\Delta \lambda_{st}$ 为静态波长偏移量, $\omega$ 为强迫振动激励频率。

计算静态响应时, $G_m$ 不再是质量块的惯性力矩,而是惯性力,因此 $G_m = m \cdot a$ ,式(4)动力学普遍方程为:

$$-M \delta \alpha + G_m \delta x - 2F_f \delta x = 0. \quad (13)$$

静态角位移为:

$$\alpha = \frac{m(h + R)}{K_x + 2K_f(h + R)^2} a. \quad (14)$$

由于加速度传感器各个测量方向均是双光栅结构,其灵敏度 $S$ 表达式为:

$$S = \frac{2\Delta \lambda}{a} = \frac{2(1 - P_e) \cdot \Delta \epsilon \cdot \lambda}{a [1 - (\omega/2\pi f_1)^2]} = \frac{2(1 - P_e) \cdot \lambda m (h + R)^2}{[1 - (\omega/2\pi f_1)^2] l [K_x + 2K_f(h + R)^2]}. \quad (15)$$

表1显示了双轴圆弧铰链的2D FBG加速度传感器的尺寸参数,代入式(11)可以计算其前两阶固有频率均为502 Hz。稳态强迫振动下,激励频率的变化会得到不同的灵敏度,代入式(15)中理论灵敏

度在 50 Hz、100 Hz 和 150 Hz 激励频率下的灵敏度分别数值为 603.4 pm/g、622.1 pm/g 和 656.0 pm/g。

表 1 FBG 加速度传感器尺寸参数

Tab. 1 Dimension parameter of FBG accelerometer

Symbol	Meaning	Value/mm
$R$	Radius of arc hinge	6
$t$	Thickness of arc hinge	1.8
$h$	Height of mass	12
$r$	Radius of mass	8
$l$	Length of FBG	5
$b$	Bracket fiber groove	8

## 2 FBG 加速度传感器仿真与实验测试

### 2.1 传感器有限元分析

根据表 1 设定的尺寸参数,利用有限元软件 ABAQUS 进一步验证 FBG 加速度传感器动力学理论计算的正确性。由于 FBG 较于传感器整体而言尺寸小质量轻,因此有限元模拟中不考虑 FBG 的影响。传感器金属部分采用实体单元 C3D8R 模拟,边界条件设定传感器底面为固定端约束。分析结果为传感器前两阶固有频率与对应模态,以及 1 g 振动幅值下 2 个 FBG 的波长变化量,频率范围设置为 50—700 Hz。图 3 为 FBG 加速度传感器的一阶模态变形云图。根据仿真结果,FBG 加速度传感器前两阶固有频率均为 495.8 Hz,经分析其在 50 Hz、100 Hz 和 150 Hz 激励频率下灵敏度分别为 625.6 pm/g, 644.5 pm/g 与 680.1 pm/g。说明理论分析与有限元模拟具有较好的一致性,灵敏度数值的最大误差仅为 3.7%,该误差产生的主要原因是理论分析中仅考虑了双轴圆弧铰链结构的弯曲变形而忽略了其剪切变形。

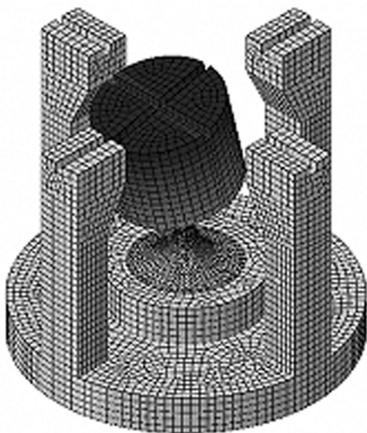


图 3 FBG 加速度传感器一阶模态位移云图

Fig. 3 First-order modal displacement cloud diagram of FBG accelerometer

### 2.2 实验测试数据分析

加工封装后的 FBG 加速度传感器尺寸大小约为  $\phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。将传感器放置在由 LAN-XI 激振系统、OP-FBG 500 高速光纤光栅解调器和计算机组成的振动测试系统中进行测试。解调器的波长测试分辨率为 1 pm,采样率设置为 5 000 Hz。经过预拉伸后,4 段阵列 FBG 的中心波长值分别为 1542.286 nm、1550.507 nm、1558.321 nm 与 1 562.626 nm,上述 FBG 均在同一根光纤上复用。其中前 2 段 FBG 位于 Y-Z 平面内,后 2 段 FBG 位于 X-Y 平面内。

由于所设计 FBG 加速度传感器具有高灵敏度的特征,当激振频率接近固有频率时,会导致传感器内的 FBG 断裂失效。为了在共振频段有更良好的平整度并保护加速度传感器,测量其频响范围前,使用 6306 无色阻尼润滑油密封填充传感器的腔体。对 FBG 加速度传感器施加振幅为 1 g,频率范围为 50—700 Hz 的正弦激励信号。图 4 显示了有限元仿真与实验结果的对比曲线,其中有限元仿真忽略了阻尼润滑油对传感器的保护作用。结果表明,加速度传感器的固有频率约为 500 Hz。阻尼润滑油几乎不会影响非共振频段的灵敏度,但是有效地降低 FBG 加速度传感器的共振幅值。

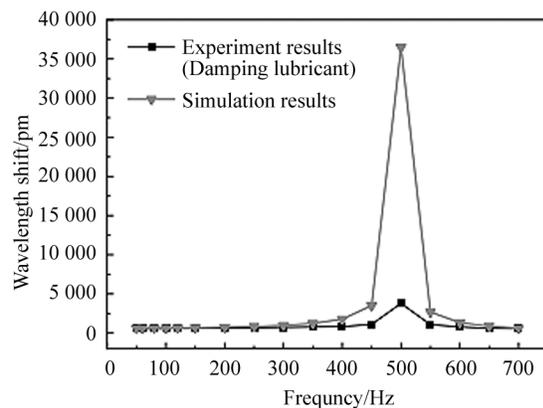


图 4 FBG 加速度传感器的幅频曲线

Fig. 4 Amplitude frequency curve of FBG accelerometer

对 FBG 加速度传感器在 Y-Z 平面上施加频率为 50 Hz、100 Hz 和 150 Hz 的正弦激励信号。激励幅值范围为 0.4—2 g,间隔步长为 0.2 g,输出信号为 2 段 FBG 之间的波长差。如图 5 所示,实验数据经线性拟合后,传感器在 50 Hz、100 Hz 与 150 Hz 下的灵敏度分别为 573.4 pm/g、588.4 pm/g 和 623.7 pm/g,3 次灵敏度测试中,线性相关度可达

0.999,其平均值为 595.2 pm/g。图 5 中波长偏移与加速度幅值呈良好的线性关系。与理论分析值的最大误差为 5.7%,而与仿真结果的最大误差为 9.6%,实验测试数据偏小,主要来源于机械加工偏差、振动测试平台存在初始角度以及 FBG 粘贴胶层的应变损失等因素。

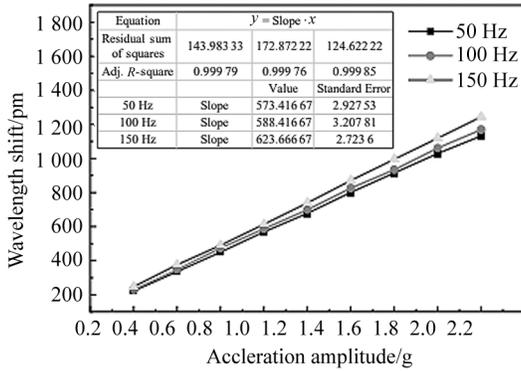


图 5 FBG 加速度传感器的灵敏度  
Fig. 5 Sensitivity of FBG accelerometer

振动信号是具有方向性的矢量,对 2D FBG 加速度传感器必须考虑其交叉灵敏度,从而判断其横向抗干扰能力。通过调整加速度传感器在振动台上的位置,输入 3 个方向的频率为 100 Hz,振动幅值为 1 g 的激励信号,仅输出 Y-Z 平面上两个 FBG 的波长差。传感器各个方向的正弦拟合曲线如图 6 所示。100 Hz 时,沿 Z 方向振动下 FBG 波长差的幅值约为 587 pm/g。同时,沿 Y 与 X 方向振动下 FBG 波长差的幅值分别为 14 pm/g 与 12 pm/g。可以发现 FBG 加速度传感器横向干扰偏差均小于 3%,具有优异的横向抗干扰能力。

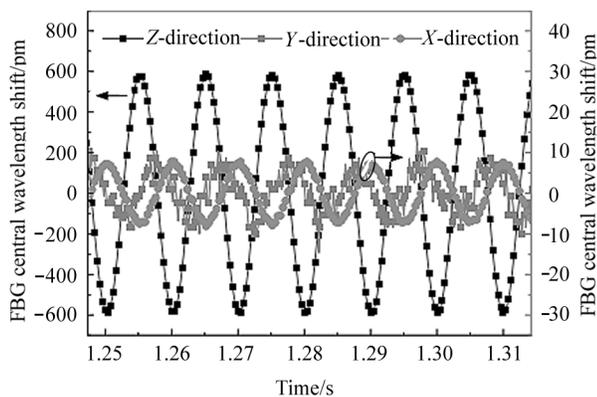


图 6 FBG 加速度传感器的横向抗干扰测试曲线  
Fig. 6 Lateral anti-interference test curve of FBG accelerometer

### 3.3 实际项目应用索力监测

在脉动测试中,拉索构件会有可能仅沿某一个方向振动,若加速度传感器恰好布置于其垂直方向,则无法拾取微弱的脉动信号,而 FBG 双向加速度传感器可以实现双向振动测量,从而避免了该问题的产生。本文依托某座大桥的长期健康监测项目,其结构形式为中承式钢管混凝土拱桥,全桥共计 38 根吊索,其索力测量使用本文所设计的 FBG 双向加速度传感器,分上、下游对称布置于各吊索长度的 1/2 处。以桥梁跨中位置的上游侧 10 号吊索为研究对象,采样频率设置为 50 Hz,在自然环境随机激励下,两个方向的 FBG 波长经过解析后,某时间段的上游侧 10 号吊索加速度信号如图 7 所示。

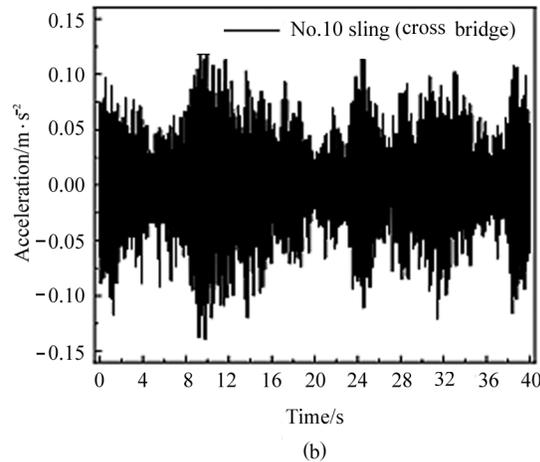
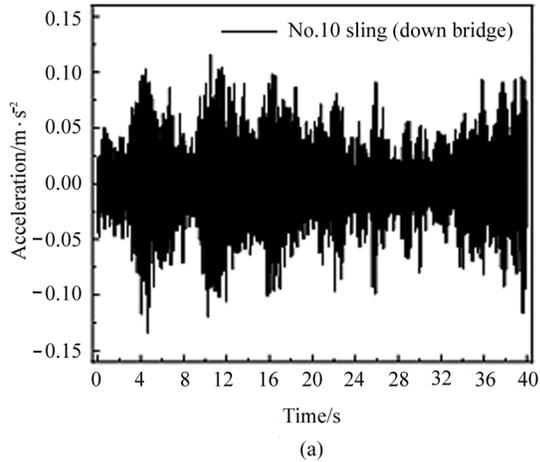


图 7 上游 10 号吊索加速度信号:  
(a) 顺桥向信号; (b) 横桥向信号

Fig. 7 Upstream No. 10 sling acceleration signal:  
(a) Down bridge signal; (b) Cross bridge signal

将上游 10 号吊索加速度信号数据代入 MATLAB 编写的 FFT 计算程序中,吊索基频识别结果见图 8,前 3 阶频率分别为 5.15 Hz、10.40 Hz 与

17.28 Hz,且 FBG 加速度传感器的顺桥向与横桥向所识别的吊索基频结果相似。当吊索的边界条件可以简化为铰接时,吊索的索力  $T$  计算可按式(16)计算<sup>[1]</sup>:

$$T = 4mL^2 f_1^2 - EI \frac{\pi^2}{L^2}, \quad (16)$$

式中,  $EI$  为吊索横截面的弯曲刚度,  $f_1$  为吊杆与斜拉索的第 1 阶振动频率,  $L$  为吊杆与斜拉索计算长度,  $m$  为吊杆与斜拉索单位长度质量。根据设计图纸与监测数据,上游 10 号吊索的上述 4 个参数数值分别为 62.79 cm<sup>4</sup>, 5.15 Hz, 17.81 m 与 24.1 kg/m, 代入至式(16)中可得上游 10 号吊索当前索力数值为 811 kN, 与设计吊索索力 813.5 kN 的误差为 0.3%, 证明了所设计的 2D FBG 加速度传感器测量拉索构件索力的有效性。

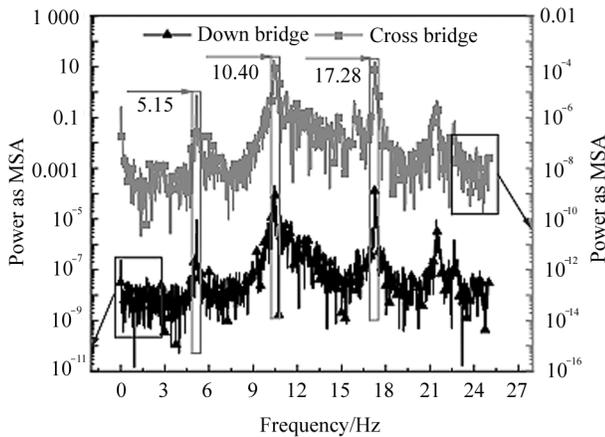


图 8 上游 10 号吊索频率识别

Fig. 8 Upstream No. 10 sling frequency identification

## 4 结 论

本文设计了一种基于新型双轴圆弧铰链结构的 2D FBG 加速度传感器,封装后传感器的体积大小约为  $\phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,具有小型化、温度自补偿以及横向抗干扰等特点。利用动力学普遍方程得到了 FBG 加速度传感器固有频率与灵敏度的数学模型。测试结果表明,FBG 加速度传感器的固有频率约为 500 Hz,双 FBG 的布置方式使其灵敏度可以达到 595.2 pm/g,横向干扰偏差均小于 3%,且实验结果与理论以及仿真分析的数值具有较好的一致性。最后将所设计的传感器应用于某座大桥的索力监测中,其索力监测结果与设计吊索索力值相近,说明基于双轴圆弧铰链的 FBG 加速度传感器应用于桥梁健康监测中具有较大的优势。

## 参考文献:

- [1] ALOISIO A, ALAGGIO R, FRAGIACOMO M. Time-domain identification of the elastic modulus of simply supported box girders under moving loads: Method and full-scale validation [J]. *Engineering Structures*, 2020, 16 (1): 110619.
- [2] BEDON C, BERGAMO E, IZZI M, et al. Prototyping and validation of mems accelerometers for structural health monitoring—the case study of the pietratagliata cable-stayed bridge [J]. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2018, 7(3):30.
- [3] IWABUKI H, FUKADA S, OSAFUNE T, et al. Contribution of large-vehicle vibration and bridge vibration to low-frequency noise generation characteristics [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 155(12):150-166.
- [4] VORATHIN E, HAFIZI Z M, AIZZUDDIN A M, et al. A highly sensitive multiplexed FBG pressure transducer based on natural rubber diaphragm and ultrathin aluminium sheet [J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 106:177-181.
- [5] XU H, LI F, ZHAO W, et al. Fiber optic displacement sensor used in railway turnout contact monitoring system [J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, 15(3):165-169.
- [6] SAHOTA J, GUPTA N, DHAWAN D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(6):1-35.
- [7] ZHANG X, SUN Z, YANG Y, et al. Fiber Bragg Grating accelerometer based on L-shaped cantilever beam [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2021, 32(7):696-702.  
张绪成, 孙志慧, 杨元元, 等. 基于 L 型悬臂梁的光纤光栅加速度传感器 [J]. *光电子 • 激光*, 2021, 32(7): 696-702.
- [8] HE Z, ZHANG Z, LI L, et al. A novel fiber Bragg grating vibration sensor with double equal-strength cantilever beams [J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, 17(6):321-327.
- [9] ZHANG F, JIANG S, WANG C, et al. Broadband and high sensitivity FBG accelerometer based on double diaphragms and h-shaped hinges [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(1):353-359.
- [10] QIU L, LIANG L, LI D, et al. Theoretical and experimental study on FBG accelerometer based on multi-flexible hinge mechanism [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, (38):

142-146.

- [11] YAN B, LIANG L. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on parallel double flexible hinges[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(9): 4713-4718.
- [12] WANG Y, DAI Y, LIU W, et al. Optimization design of fiber Bragg grating two-dimensional accelerometer based on flexure hinge[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8): 0806003.  
王赞, 戴玉堂, 刘文敏, 等. 基于柔性铰链的光纤光栅二维加速度传感器的优化设计[J]. 光子学报, 2019, 48(8): 0806003.
- [13] WEI L, YU L, WANG J, et al. An FBG-sensing two-dimensional vibration sensor based on multi-axis flexure hinge[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(10): 3698-3710.
- [14] WANG H, YAN B, LIANG L. A 3d FBG accelerometer based on two pairs of flexible hinges[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19): 21586-21593.
- [15] YANG J, LIANG L, TANG H, et al. High sensitivity two-directional FBG inclination sensor with temperature compensation[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2020, 31(4): 351-356.  
杨建宇, 梁磊, 唐浩冕, 等. 一种温度自补偿的高灵敏度FBG双向倾角传感器[J]. 光电子·激光, 2020, 31(4): 351-356.

作者简介:

童晓玲 (1979—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新型传感器器件与桥梁健康监测方面的研究.