

# 基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器

魏莉, 刘壮\*, 李恒春, 姜达洲

武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070

**摘要** 采用一种“土”字形梁增敏结构,通过改变质量块的质量和重心位置,设计了两种规格的光纤光栅(FBG)振动传感器。对其灵敏度与谐振频率进行了推导,并在此基础上进行了结构优化设计和有限元仿真。根据理论和仿真分析制作了传感器实物,对其进行了实验测试。实验结果表明:传感器 1 的稳定工作频带为 20~80 Hz,加速度灵敏度为  $120.3 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ ,谐振频率为 237.5 Hz;传感器 2 的稳定工作频带为 50~200 Hz,加速度灵敏度为  $32.9 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ ,谐振频率为 639 Hz。这两种传感器的测量线性度均在 99%以上且有较强的横向抗干扰能力,能满足不同频段对振动加速度检测的要求。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 光纤光栅; 振动加速度检测; 振动传感器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1106004

## Fiber Bragg Grating Vibration Sensor Based on Sensitive Structure for “土”-Shaped Beam

Wei Li, Liu Zhuang\*, Li Hengchun, Jiang Dazhou

School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology,  
Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** Two fiber Bragg grating vibration sensors with different sizes are designed by changing the weight and the center of gravity of mass blocks. Each sensor has an enhanced-sensitivity structure for “土”-shaped beam. The sensitivity and resonance frequency of the sensors are deduced, and their structural optimization design and finite element simulation are performed. The two sensors are fabricated based on theory and simulation analysis, and then experimentally tested. The experimental results demonstrate that the stable operating frequency range of sensor 1 is 20-80 Hz, the acceleration sensitivity is  $120.3 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ , and the resonant frequency is 237.5 Hz. On the other hand, the stable operating frequency range of sensor 2 is 50-200 Hz, the acceleration sensitivity is  $32.9 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ , and the resonant frequency is 639 Hz. The two sensors have a strong lateral anti-interference ability and their linearity is above 99%, allowing to meet the requirement of vibration acceleration in different frequency ranges.

**Key words** fiber optics; fiber optics sensors; fiber Bragg grating; vibration acceleration detection; vibration sensor

**OCIS codes** 060.2370; 130.6010; 060.3735

## 1 引 言

与传统的机械、电子类振动传感器相比,光学类传感器具有动态范围广、响应速度快、精度高,以及抗电磁干扰和辐射等优点<sup>[1-4]</sup>。基于光纤布拉格光栅(FBG)传感技术的振动传感器是一种波长调制型光纤传感器,除具有上述优点外,还具有体积小、质量小、功耗低、光路简单、检测方法灵活,以及便于组成传感网络<sup>[5-7]</sup>等特点,被广泛应用在轨道交通<sup>[8-9]</sup>、管道运输<sup>[10]</sup>、桥梁建筑<sup>[11-12]</sup>和航空航天<sup>[13]</sup>等重要

领域。

FBG 振动传感器的设计十分灵活,因此结构类型有很多,大体可以分为嵌入式<sup>[14]</sup>、梁式<sup>[15-16]</sup>、芯轴式<sup>[17-18]</sup>三种结构类型。与其他两种结构类型相比,梁式结构的 FBG 加速度传感器横向抗干扰能力强、稳定性高,特别适合一维加速度的测量。但传统梁式结构则大多因光栅的粘贴封装方式而易产生啁啾或多峰现象,致使测量结果受到影响。针对上述情况,本文提出了一种“土”字形梁增敏结构,通过改变质量块的质量和重心位置,设计了两种规

收稿日期: 2019-05-28; 修回日期: 2019-07-04; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51405354)

\* E-mail: liuzhuang628@sina.com

格的FBG振动传感器,以适应不同频段振动加速度检测需求;光纤光栅采用悬空方式固定,有效避免了光纤光栅产生啁啾效应,同时双光栅对称布置,可消除温度影响,还可使灵敏度提高一倍。本文阐释了传感器的结构设计及工作原理,完成了传感器的谐振频率和灵敏度的计算公式的推导,并在此基础上进行了优化与仿真,以确定传感器尺寸参数,最后对制作的传感器实物进行了相关实验研究,取得了较好的效果。

## 2 传感器设计

设计了一种光纤光栅振动传感器,该传感器主要由底座、上盖、土字形悬臂梁、质量块、光纤、螺栓等组成,如图1所示(1:螺栓;2:土字形悬臂梁;3:螺母;4:U形块;5:垫圈;6:金属圆筒;7:上盖;8:螺钉;9:底座;10:限位螺钉)。传感器中包括用于产生弯曲变形的土字形悬臂梁,两根光纤以一定预紧力分别对称悬空固定于梁的上下表面。梁一端通过螺栓与底座固定,另一端通过螺栓与质量块紧紧相连。质量块由U形块、金属圆筒、垫圈、螺栓组成,U形块上设有通孔,螺栓通过通孔将圆筒和垫圈与U形块固定在一起,垫圈用于隔离U形块与金属圆筒且使之不留缝隙。通过改变金属圆筒的质量和在U形块上的位置来调整质量块的大小和重心,从而改变传感器的谐振频率,使之适用于不同频段下振动信号的测量。

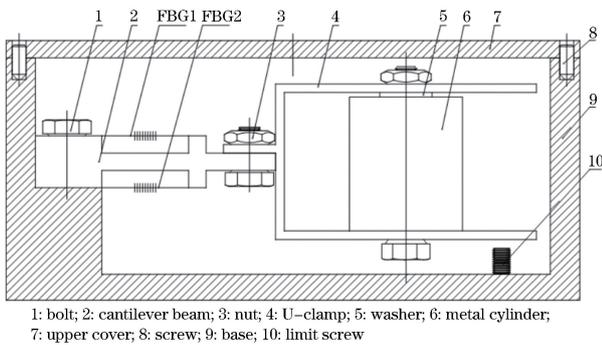


图1 FBG传感器结构图

Fig. 1 Diagram of FBG sensor structure

测量时,将该传感器安装在被测体表面,当被测体产生沿传感器纵向的振动时,在质量块的惯性力作用下,梁发生变形,从而使FBG发生拉伸或压缩,FBG的轴向应变会使其自身的波长发生漂移。建立FBG波长漂移量与振动加速度之间的关系,通过跟踪FBG波长变化可以得到振动信号的加速度幅值和频率。

## 3 理论分析

传感器的传感单元由悬臂梁和质量块构成,其简化的力学模型如图2所示。悬臂梁与垫高台相结合,整体像一个平放的“土”字,高台到梁表面的距离为 $t$ ,两高台的间距为 $l$ ,中间高台到质量块重心的距离为 $r$ ,将FBG1和FBG2两端分别固定在梁上下的高台之间。悬臂梁的有效长度为 $L$ 、宽度为 $b$ 、高度为 $h$ ,悬臂梁的首端与质量块连接,质量块的质量为 $m$ 。悬臂梁尾端与底座连接,固定于底座上。

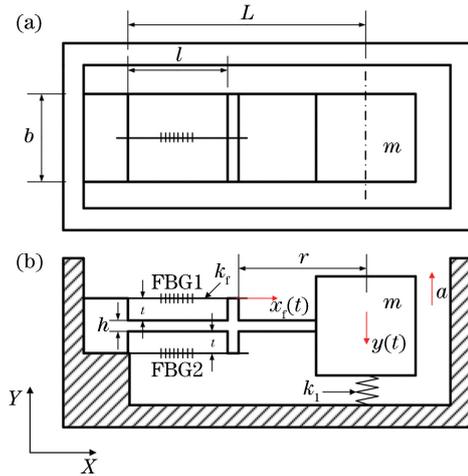


图2 传感单元力学模型结构图。(a)俯视图;(b)主视图

Fig. 2 Structure of mechanics model of sensor unit.

(a) Top view; (b) front view

当传感器感在加速度作用下上下运动时,设底座的位移为 $x(t)$ ,质量块相对于底座的位移为 $y(t)$ ,其可等效为:弹性刚度为 $k_1$ 的弹簧被拉伸或者压缩 $y(t)$ 。同时质量块受到梁的作用力为 $F_1$ ,根据力学理论,对质量块进行受力分析(忽略阻尼),可表示为

$$m\ddot{y}(t) + k_1y(t) + F_1 = -m\ddot{x}(t), \quad (1)$$

式中: $\ddot{x}(t)$ 为加速度 $a$ 。

以悬臂梁的中轴线尾端为坐标原点,可以得到梁的挠曲线方程为

$$Y = \frac{F_1x^2}{6EI}(3L - x), \quad (2)$$

式中: $E$ 为梁的弹性模量; $I$ 为梁的惯性矩; $x$ 为所选截面到坐标原点的距离。

梁的最大挠度为

$$y_B = \frac{F_1L^3}{3EI} = \frac{4F_1L^3}{Ebh^3}, \quad (3)$$

则梁的等效刚度为

$$k_1 = \frac{F_1}{y_B} = \frac{Ebh^3}{4L^3}. \quad (4)$$

质量块对梁的反作用力为  $F_1$ , 光纤光栅对梁的作用力为  $F_2$ , 由杠杆原理可得

$$F_2 t = F_1 r. \quad (5)$$

由于质量块和光纤光栅的位移和形变都很小, 可以认为光纤光栅端点的位移  $x_f(t)$  和质量块重心的位移  $y(t)$  分别等于它们绕支点的弧长, 则由几何理论可得

$$\frac{x_f(t)}{t} = \frac{y(t)}{r}. \quad (6)$$

设光纤光栅的弹性模量为  $E_f$ 、横截面积为  $A_f$ , 可得光纤光栅抗拉刚度为

$$k_f = \frac{E_f A_f}{l}, \quad (7)$$

则有

$$F_2 = 2k_f x_f(t). \quad (8)$$

联立(1)式、(5)式、(6)式和(8)式可推得

$$m\ddot{y}(t) + [k_1 + 2(t/r)^2 k_f]y(t) = -m\ddot{x}(t). \quad (9)$$

$\ddot{x}(t)$  即是加速度  $a$ , 将其代入(9)式中, 并且等式两边同时除以  $m$  可得

$$\ddot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = -a, \quad (10)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{[k_1 + 2(t/r)^2 k_f]}{m}}, \quad (11)$$

式中:  $\omega_n$  为角频率。

该传感器结构的谐振频率  $f_n$  为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{[k_1 + 2(t/r)^2 k_f]}{m}}. \quad (12)$$

悬臂梁的受力分析如图3所示, 在力  $F$  的作用下, 光纤形变量为  $\Delta l$ , 梁上两固定点间的形变量为  $\Delta L$ , 它们之间有如下关系:

$$\frac{\Delta L}{h/2} = \frac{\Delta l}{h/2 + t}. \quad (13)$$

当悬臂梁的自由端所受力  $F = ma$  作用时, 距悬臂梁尾端  $x$  处的应变  $\epsilon_x$  为

$$\epsilon_x = \frac{6F(L-x)}{Ebh^2}, \quad (14)$$

则有

$$\Delta L = \int_0^l \epsilon_x dx = \int_0^l \frac{6F(L-x)}{Ebh^2} dx = \frac{3Fl(2L-l)}{Ebh^2}. \quad (15)$$

光纤光栅 FBG1 的应变为

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} = \frac{h+2t}{h} \cdot \frac{3F(2L-l)}{Ebh^2}. \quad (16)$$

光纤光栅的中心波长漂移量  $\Delta\lambda_B$  与应变  $\epsilon$ 、温度变化  $\Delta T$  的关系为

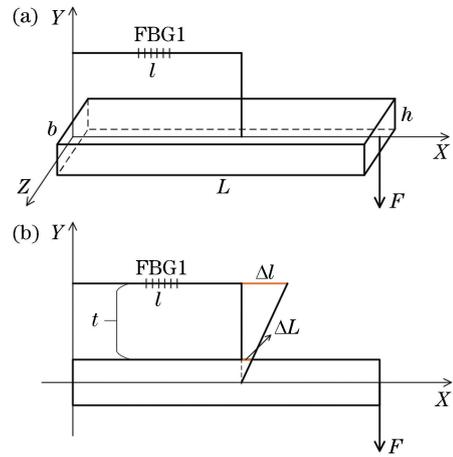


图3 悬臂梁的受力分析。(a)轴测图;(b)主视图

Fig. 3 Force analysis of cantilever beam.

(a) Axonometric drawing; (b) front view

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha_f + \xi)\Delta T, \quad (17)$$

式中:  $\lambda_B$  为光纤光栅的中心波长;  $P_e$  为光纤的弹光系数, 对于普通的光纤材料, 可取  $P_e = 0.22$ ;  $\alpha_f$  为光纤的热膨胀系数;  $\xi$  为光纤材料的热光系数。

给传感器施加一个沿  $Y$  轴正方向的加速度  $a$ , 有以下两种情况:

1) FBG1 被拉伸,  $\Delta l_1 > 0$ , 则有

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = (1 - P_e)\epsilon_1 + (\alpha_f + \xi)\Delta T, \quad (18)$$

2) FBG2 被压缩,  $\Delta l_2 < 0$ , 则有

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = -(1 - P_e)\epsilon_2 + (\alpha_f + \xi)\Delta T. \quad (19)$$

式中:  $\Delta\lambda_{B1}$  为 FBG1 的中心波长漂移量;  $\Delta\lambda_{B2}$  为 FBG2 的中心波长漂移量;  $\lambda_{B1}$  为 FBG1 的中心波长;  $\lambda_{B2}$  为 FBG2 的中心波长;  $\epsilon_2$  为 FBG2 的应变。

由于光纤光栅 FBG1、FBG2 的材料相同、参数相近且呈对称粘贴, 故 FBG1 和 FBG2 产生的应变大小相等, 即  $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 = \epsilon$ 。又因为所选的 FBG1、FBG2 的中心波长相近, 所以  $\lambda_{B1} \approx \lambda_{B2} = \lambda_B$ 。联立(18)式、(19)式可消除温度对光纤光栅波长漂移量的影响, 并可得到

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (1 - P_e)\epsilon_1 + (1 - P)\epsilon_2 = 2(1 - P_e)\epsilon. \quad (20)$$

根据 FBG 振动传感器灵敏度的定义及(20)式, 传感器的灵敏度  $S$  可以表示为

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{a} = \frac{2\lambda_B(1 - P_e)\epsilon}{a} = 2 \cdot \lambda_B \cdot (1 - P_e) \cdot \frac{h+2t}{h} \cdot \frac{3m(2L-l)}{Ebh^2}. \quad (21)$$

从(21)式可知,在该传感器中,波长的变化只和加速度有关,通过双光栅对称布置剔除了温度影响,还使得灵敏度系数变为原来的2倍。同时光纤光栅不是直接粘贴在悬臂梁上,而是悬空地粘贴在高台之间,既有效避免了光纤光栅产生啁啾效应,使其轴向有着均匀的应变,又使得传感器的灵敏度系数增大了 $(h+2t)/h$ 倍。

代入各参量,传感器的灵敏度  $S$  为

$$S = 4.68 \cdot \frac{\lambda_B m (2L - l)(h + 2t)}{Eb h^3} \quad (22)$$

## 4 结构参数优化及仿真分析

### 4.1 数值分析

传感器的振动特性和测量范围与传感器的谐振频率有关,为了获得更高的灵敏度和频率测量范围,需要对传感器的结构参数进行讨论和优化。从理论分析的结果可以看出,悬臂梁的梁长  $L$ 、梁宽  $b$ 、梁高  $h$  以及惯性质量  $m$  是影响传感器的灵敏度  $S$  和谐振频率  $f$  的关键参数。除此之外,参数  $t$ 、 $r$  也对传感器的灵敏度  $S$  和谐振频率  $f$  有一定影响。已知光纤光栅的弹性模量  $E_f = 72 \text{ GPa}$ , 光纤的横截面积  $A_f = 1.227 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ , 光纤跨距  $l = 10 \text{ mm}$ 。考虑到悬臂梁加工难度和经济成本,悬臂梁材料选用45钢,其弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.29$ 。梁上垫高台的高度  $t$  不宜过大,取  $t \leq 6 \text{ mm}$ 。参数  $r$  与  $L$ 、 $l$  有关,  $r \approx L - l$ 。根据(12)式和(22)式,在其他参量已定的情况下,分别研究这4个关键参量对传感器灵敏度和谐振频率的影响。

首先,考虑悬臂梁的梁长  $L$  对传感器的灵敏度  $S$  和谐振频率  $f$  的影响。由图4可知,当  $L$  增大,  $S$  随之线性增大,而  $f$  随之降低。当  $L \leq 20 \text{ mm}$  时,  $f$  随着  $L$  的增大迅速减小;当  $L \geq 45 \text{ mm}$  时,变化趋于平稳。考虑到该传感器是针对低频振动信号的测量,所以应在满足良好的频率范围的同时具有较高的灵敏度,而且传感器的整体尺寸不宜过大,可取  $20 \text{ mm} \leq L \leq 45 \text{ mm}$ 。

然后,分析悬臂梁的梁宽  $b$  的影响。由图5可知,当  $b$  增大,  $f$  随之增大,而  $S$  随之降低。当  $b \leq 8 \text{ mm}$  时,随着  $b$  增大,  $S$  曲线的下降趋势明显;当  $b \geq 16 \text{ mm}$  时,变化趋于平稳。考虑到梁的选材和实际加工情况,可取  $b = 16 \text{ mm}$ 。

其次,考虑悬臂梁的梁高  $h$  的影响。如图6所示,随着  $h$  的增大,  $S$  呈下降趋势,而  $f$  呈上升趋势。综合考虑,梁高  $h$  可在  $1 \sim 2 \text{ mm}$  范围内选取,

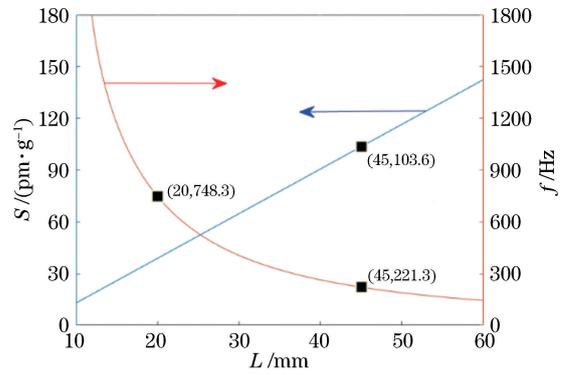


图4  $S$  与  $f$  随  $L$  变化的关系曲线 ( $\lambda = 1550 \text{ mm}$ ,  $b = 16 \text{ mm}$ ,  $h = 2 \text{ mm}$ ,  $t = 5 \text{ mm}$ ,  $m = 40 \text{ g}$ )

Fig. 4 Variations in  $S$  and  $f$  with  $L$  ( $\lambda = 1550 \text{ mm}$ ,  $b = 16 \text{ mm}$ ,  $h = 2 \text{ mm}$ ,  $t = 5 \text{ mm}$ ,  $m = 40 \text{ g}$ )

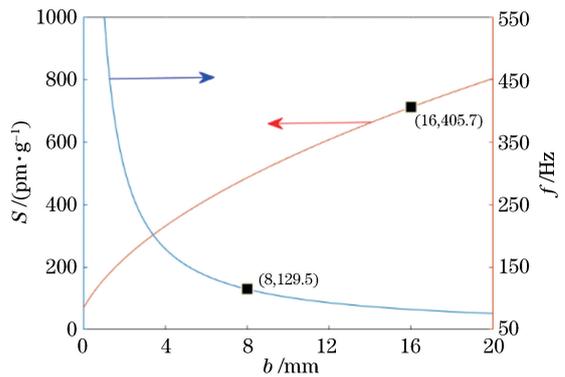


图5  $S$  与  $f$  随  $b$  变化的关系曲线 ( $\lambda = 1550 \text{ mm}$ ,  $L = 30 \text{ mm}$ ,  $h = 2 \text{ mm}$ ,  $t = 5 \text{ mm}$ ,  $m = 40 \text{ g}$ )

Fig. 5 Variations in  $S$  and  $f$  with  $b$  ( $\lambda = 1550 \text{ mm}$ ,  $L = 30 \text{ mm}$ ,  $h = 2 \text{ mm}$ ,  $t = 5 \text{ mm}$ ,  $m = 40 \text{ g}$ )

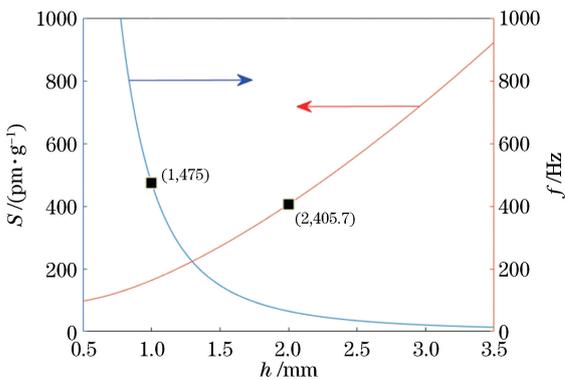


图6  $S$  与  $f$  随  $h$  变化的关系曲线 ( $\lambda = 1550 \text{ mm}$ ,  $L = 30 \text{ mm}$ ,  $b = 16 \text{ mm}$ ,  $t = 5 \text{ mm}$ ,  $m = 40 \text{ g}$ )

Fig. 6 Variations in  $S$  and  $f$  with  $h$  ( $\lambda = 1550 \text{ mm}$ ,  $L = 30 \text{ mm}$ ,  $b = 16 \text{ mm}$ ,  $t = 5 \text{ mm}$ ,  $m = 40 \text{ g}$ )

同时考虑到传感器对灵敏度和谐振频率的要求,可取  $h = 2 \text{ mm}$ 。

最后还要考虑质量块  $m$  对传感器的灵敏度  $S$  和谐振频率  $f$  的影响。由图7可知,随着  $m$  的增

大,  $S$  呈上升趋势, 而  $f$  呈下降趋势。当  $m \leq 20$  g 时, 随着  $m$  增大,  $f$  的下降趋势明显; 当  $m \geq 60$  g 时,  $f$  的变化趋于平稳。综合考虑, 可取  $20 \text{ g} \leq m \leq 60 \text{ g}$ 。

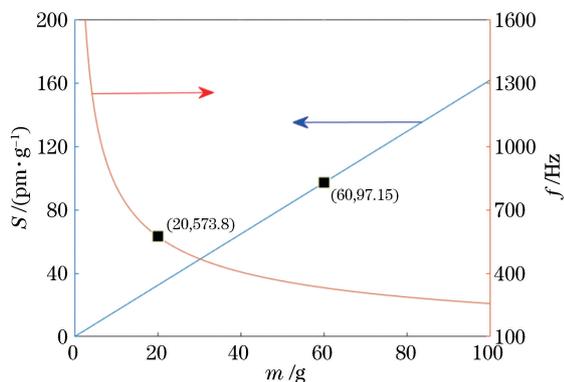


图 7  $S$  与  $f$  随  $m$  变化的关系曲线 ( $\lambda=1550$  mm,  $L=30$  mm,  $b=16$  mm,  $h=2$  mm,  $t=5$  mm)

Fig. 7 Variations in  $S$  and  $f$  with  $m$  ( $\lambda=1550$  mm,  $L=30$  mm,  $b=16$  mm,  $h=2$  mm,  $t=5$  mm)

通过分析 4 个关键参量对传感器灵敏度和谐振频率的影响, 设计了两种规格的振动传感器, 其结构参数及材料特性参数如表 1 所示。仿真结果显示, 当  $m=60$  g,  $L=36$  mm 时, 传感器 1 灵敏度可达  $120.5 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ , 谐振频率为  $252.1$  Hz; 当  $m=28$  g,  $L=24$  mm 时, 传感器 2 灵敏度可达  $34.5 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ , 谐振频率为  $678.3$  Hz。其中  $g$  为地球表面重力加速度,  $g=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

表 1 FBG 振动传感器结构及材料参数

Table 1 Structure and material parameters of FBG vibration sensor

Parameter	Value
Length of cantilever beam $L$ /mm	36(or 24)
Optical fiber span $l$ /mm	10
Width of cantilever beam $b$ /mm	16
Height of cantilever beam $h$ /mm	2
Height of platform $t$ /mm	5
Quality of mass block $m$ /g	60(or 28)
Grating wavelength $\lambda$ /nm	1550
Young's modulus of cantilever $E$ /GPa	210
Young's modulus of optical fiber $E_f$ /GPa	72
Cross section area of optical fiber $A_f$ /( $10^{-8} \text{ m}^2$ )	1.227

#### 4.2 有限元模态分析

为了得到传感器多阶模态频率和和振型的理论值, 更好地研究传感器的动态特性, 首先对传感器的

有限元模型进行模态分析。传感器 1 的金属圆筒采用红铜, 整个质量块约为 60 g, 金属圆筒安装在远离悬臂梁一端, 悬臂梁的有效长度  $L=36$  mm。传感器 2 的金属圆筒以铝合金作为材料, 质量块整体约为 28 g, 圆筒安装在靠近悬臂梁一端, 悬臂梁的有效长度  $L=24$  mm。在悬臂梁螺钉固定孔处施加固定约束, 对有限元模型进行求解, 得到两个传感器的一阶模态云图, 如图 8 和图 9 所示。由图可知, 传感器 1 的谐振频率为  $242.09$  Hz, 传感器 2 的谐振频率为  $651.09$  Hz, 都与理论计算十分接近, 仿真分析很好地校验了前面的理论计算。

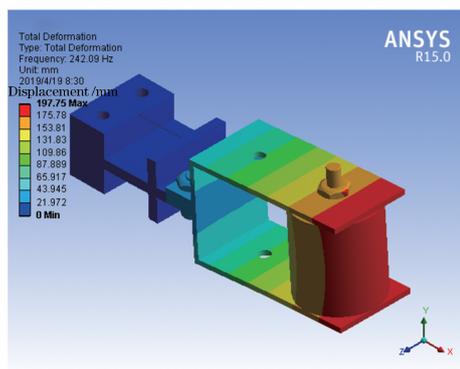


图 8 传感器 1 的一阶模态振型图

Fig. 8 First-order mode shape diagram of sensor 1

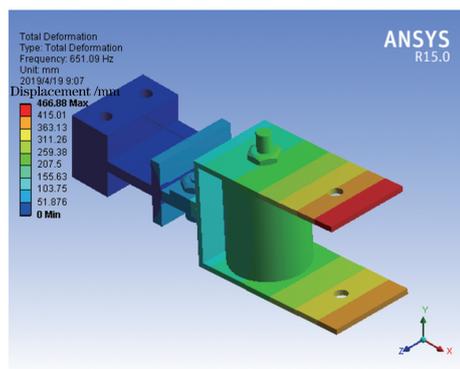


图 9 传感器 2 的一阶模态振型图

Fig. 9 First-order mode shape diagram of sensor 2

## 5 实验研究

采用图 10 所示的实验系统对传感器进行标定, 在该实验系统中, FBG 振动传感器通过夹紧装置固定在激振器上, 激振器信号由信号发生器发出, 经过功率放大器放大后传递至激振器, 从而驱动激振器输出相应的振动信号。用 502 胶水将 SN194395 压电式振动传感器固定在激振器面板上, 利用 LMS 振动噪声测试系统(LMS)可以获知压电式振动传感器的振动信号, 从而得到激振器激励信号的加速

度幅值和频率,并以此为参考对 FBG 振动传感器进行参数标定。FBG 振动传感器的光纤光栅波长漂移量可以通过光纤光栅解调仪获得,并在计算机端显示。

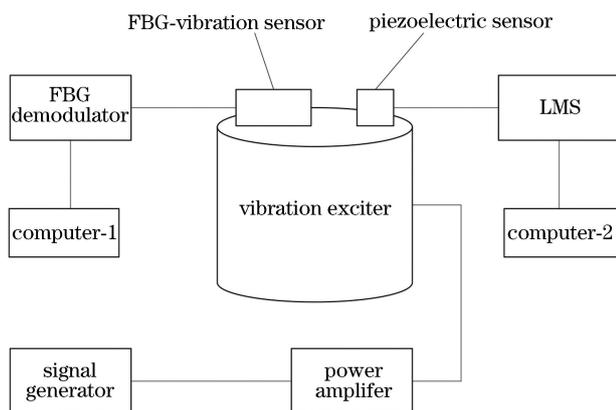


图 10 传感器实验系统示意图

Fig. 10 Experimental system diagram of sensor

### 5.1 幅频特性实验

通过调节信号发生器使激振器的激振信号的加速度幅值固定为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,对振动传感器 1 进行扫频测试,扫频范围为  $20 \sim 300 \text{ Hz}$ ,步长为  $20 \text{ Hz}$ ,确定传感器固有频率的大致范围,然后取步长为  $10 \text{ Hz}$ 进行重复实验,当接近固有频率时,适当缩小步长。经标准压电传感器标定得到传感器 1 的幅频响应曲线,如图 11 所示。传感器 1 的一阶谐振频率约为  $237.5 \text{ Hz}$ ,与有限元仿真结果( $242.09 \text{ Hz}$ )基本一致;将传感器 1 换为传感器 2,重复上述实验步骤,得到传感器 2 的幅频响应曲线,如图 12 所示。传感器 2 的一阶谐振频率约为  $639 \text{ Hz}$ ,与有限元仿真结果( $651.09 \text{ Hz}$ )较为接近。

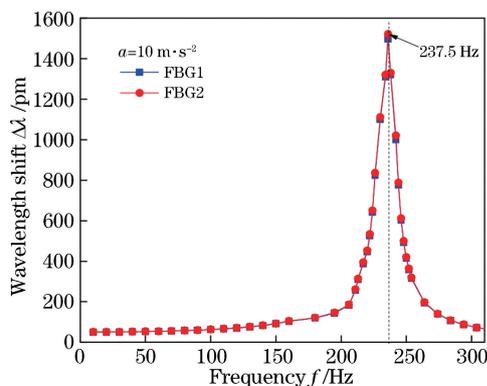


图 11 传感器 1 幅频响应曲线

Fig. 11 Amplitude-frequency response curves of sensor 1

### 5.2 线性响应实验

为了研究传感器 1 在不同频率下的线性度和灵敏度,调整激振器使其输出信号的频率分别为  $20$ ,

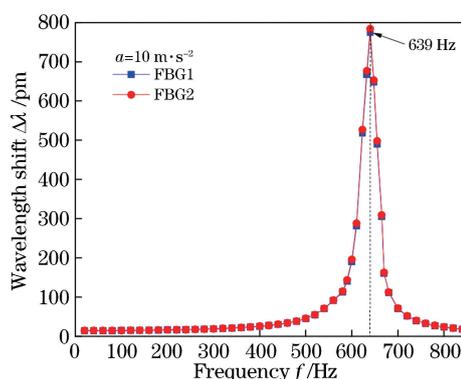


图 12 传感器 2 幅频响应曲线

Fig. 12 Amplitude-frequency response curves of sensor 2  $50, 80 \text{ Hz}$ ,激振加速度幅值从  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  上升至  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,步长取  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,对不同频率、不同幅值激励下的 FBG 波长信号进行采集。图 13 是加速度信号频率为  $50 \text{ Hz}$ 、幅值为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  时,传感器 1 中两个 FBG 的时域图。由图可知,两个 FBG 的响应信号均为正弦信号,且 FBG1 与 FBG2 的相位相差  $180^\circ$ 。根据 (20) 式和 (21) 式可知,将两个 FBG 波长漂移量作差,不仅可以消去温度对测量的影响,还可以将传感器灵敏度扩大 1 倍。因此对数

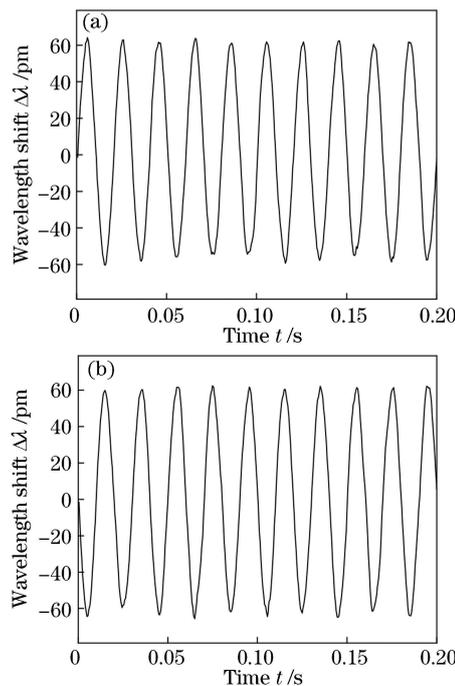


图 13 当激振加速度幅值为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、频率为  $50 \text{ Hz}$  时,传感器 1 中两 FBG 波长变化量的时域图。(a) FBG1;(b) FBG2

Fig. 13 Time domain diagrams of two FBGs of sensor1 when frequency is  $50 \text{ Hz}$  and amplitude of excitation acceleration is  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . (a) FBG1; (b) FBG2

坐标分析时,以两个 FBG 波长漂移量差值的绝对值为  $y$  轴,以加速度幅值为  $x$  轴,建立传感器 1 的线性度曲线,如图 14 所示。曲线的线性拟合度均在 99% 以上,传感器 1 的线性度良好。将传感器 1 换为传感器 2,分别选定 50,100,200 Hz 的激振频率,加速度从  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  上升至  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,步长取  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,采集数据后进行分析处理,得到传感器 2 的线性度曲线,如图 15 所示。由图 15 可知,传感器 2 的线性度良好。

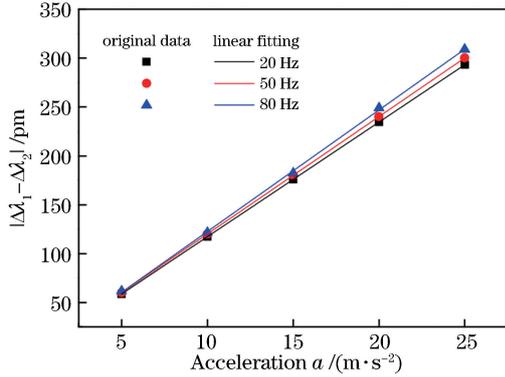


图 14 传感器 1 的线性度曲线

Fig. 14 Linearity curve of sensor 1

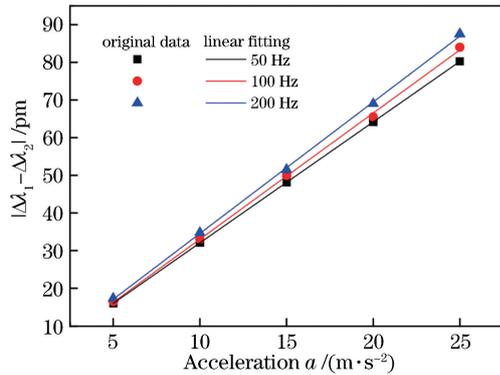


图 15 传感器 2 的线性度曲线

Fig. 15 Linearity curve of sensor 2

FBG 振动传感器在不同激振频率下的灵敏度如表 2 所示,在激振频率为 20,50,80 Hz 时,传感器 1 的灵敏度分别为 117.3,120.1,123.6  $\text{pm} \cdot \text{g}^{-1}$ ,平均值为  $120.3 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ ,灵敏度误差在 2.5% 左右;在激振频率为 50,100,200 Hz 时,传感器 2 的灵敏度分别为 32.0,32.6,34.1  $\text{pm} \cdot \text{g}^{-1}$ ,平均值为  $32.9 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ ,灵敏度误差在 3.5% 左右。通过上述的传感器标定实验,测得传感器 1 的灵敏度为  $120.3 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ ,谐振频率为 237.5 Hz,可用于探测 80 Hz 以内的结构振动;传感器 2 的灵敏度为  $32.9 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ ,谐振频率为 639 Hz,适合检测 200 Hz 以内的振动信号。

表 2 FBG 振动传感器在不同激振频率下的灵敏度

Table 2 Sensitivity of FBG vibration sensor under different excitation frequencies

Frequency /Hz	20	50	80	100	200
Sensitivity of sensor 1 / ( $\text{pm} \cdot \text{g}^{-1}$ )	117.3	120.1	123.6		
Sensitivity of sensor 2 / ( $\text{pm} \cdot \text{g}^{-1}$ )		32.0		32.6	34.1

动态范围是传感器的重要参数指标之一,对于 FBG 振动传感器来说,动态范围  $D_R$  与传感器可检测的最大波长漂移值  $\lambda_{\text{max}}$  和最小波长漂移值  $\lambda_{\text{min}}$  有关,其关系表达式为

$$D_R = 20 \lg \left( \frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{min}}} \right) \quad (23)$$

而最大波长漂移值  $\lambda_{\text{max}}$  主要受传感器弹性元件弹性形变范围及光栅预紧力的制约;最小波长漂移值  $\lambda_{\text{min}}$  主要由 FBG 解调系统分辨率决定。在该传感器的封装过程中,在梁的弹性形变范围内,预紧力引起的波长漂移量为 2 nm,FBG 解调系统分辨率为 0.1 pm,计算可得传感器 1 和传感器 2 的动态范围可达 86 dB。

### 5.3 抗横向干扰特性实验

抗横向干扰能力对一维加速度传感器来说是需要考虑的一项重要性能指标。实验中,将传感器旋转  $90^\circ$  后固定在激振器上,使振动的方向垂直于传感器的测振主轴方向。给传感器 1 施加频率为 100 Hz、幅值为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  的加速度激励信号,给传感器 2 施加频率为 300 Hz、幅值为  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  的加速度激励信号,将输出波长的漂移量与各自在测振主轴方向的结果进行对比,得到传感器 1 和传感器 2 的横向抗干扰特性曲线如图 16 和图 17 所示。处理数据可得,传感器 1 横向波长漂移量为 5.6 pm,主向波长漂移量为 127.9 pm,横向干扰度小于 5%;传感器 2 横向波长漂移量为 1.0 pm,主向波长漂移量为 36.2 pm,横向干扰度小于 3%。这表明传感器 1 和传感器 2 都具有良好的抗横向干扰能力。

## 6 结 论

提出了一种基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器,设计了一种易于改变质量和重心位置的质量块结构。通过调整这种质量块,得到了两种规格的 FBG 振动传感器。通过仿真分析与实验验证相结合的研究方法,对设计的传感器进行了优化设计和动静态特性测试。研究结果表明:传感

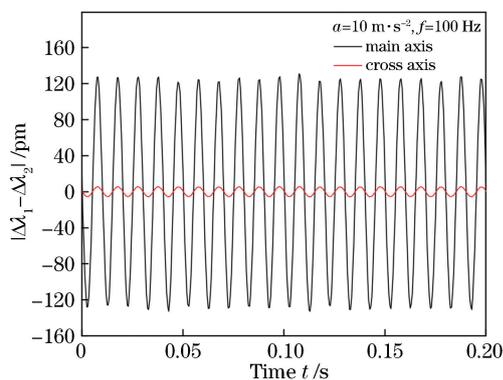


图 16 传感器 1 横向抗干扰特性曲线

Fig. 16 Curve of cross-axis anti-interference characteristic of sensor 1

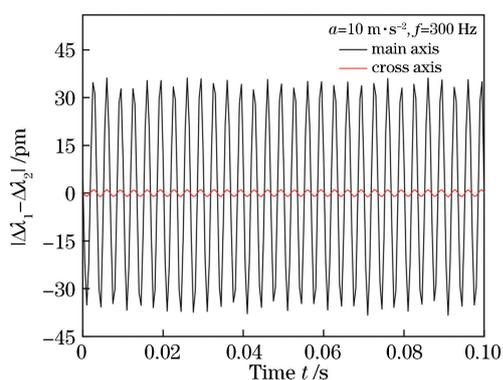


图 17 传感器 2 横向抗干扰特性曲线

Fig. 17 Curve of cross-axis anti-interference characteristic of sensor 2

器 1 的谐振频率为 237.5 Hz, 灵敏度系数为  $120.3 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ , 可用于探测 80 Hz 以内的结构振动; 传感器 2 的谐振频率为 639 Hz, 灵敏度系数为  $32.9 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$ , 适合检测 200 Hz 以内的振动信号。本次实验研究还有不足之处: 将传感器用于动态监测时, 每天的振动可能有几十万次。日积月累, 传感器可能存在疲劳磨损。因此后续还应对传感器进行疲劳强度试验。

## 参 考 文 献

- [1] Wang J J, Wei L, Li R Y, *et al.* A fiber Bragg grating based torsional vibration sensor for rotating machinery[J]. *Sensors*, 2018, 18(8): 2669.
- [2] Wei T, Qiao X G, Jia Z A. Simultaneous sensing of displacement and temperature with a single FBG[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(1): 26-29.
- [3] Xu D S, Yin J H, Cao Z Z, *et al.* A new flexible FBG sensing beam for measuring dynamic lateral displacements of soil in a shaking table test [J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 200-209.
- [4] Guo Y X, Zhang D S, Zhou Z D, *et al.* Research progress in fiber-Bragg-grating accelerometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060001.  
郭永兴, 张东生, 周祖德, 等. 光纤布拉格光栅加速度传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060001.
- [5] Bai L, Yang H Y, Luo H. Study on fiber Bragg grating-based geophone[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 110601.  
白龙, 杨华勇, 罗洪. 光纤布拉格光栅地听器设计研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110601.
- [6] Lu W G, Sun Q Z, Wo J H, *et al.* High sensitivity micro-vibration sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728006.  
鲁文高, 孙琪真, 沃江海, 等. 基于分布布拉格反射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0728006.
- [7] Guo Y X, Zhang D S, Li J Y, *et al.* Two dimensional fiber Bragg grating accelerometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1214001.  
郭永兴, 张东生, 李杰燕, 等. 光纤光栅二维加速度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214001.
- [8] Ye M S, Liu D. Application of fiber Bragg grating sensing technology in rail transit vehicles[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2018, 15(12): 84-85.  
叶明盛, 刘丹. 光纤光栅传感技术在轨道交通车辆的应用[J]. *科技创新导报*, 2018, 15(12): 84-85.
- [9] Wang S G, Yan L S, Pan W, *et al.* Investigation of track sensor based on matched fiber Bragg gratings [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(9): 68-71.  
王圣根, 闫连山, 潘炜, 等. 基于匹配光栅解调的FBG轨道传感器研究[J]. *铁道学报*, 2011, 33(9): 68-71.
- [10] Zhuang X Y, Wang J P, Deng Y G, *et al.* Optical fiber sensing technologies for pipeline leakage detection[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(5): 543-550.  
庄须叶, 王浚璞, 邓勇刚, 等. 光纤传感技术在管道泄漏检测中的应用与进展[J]. *光学技术*, 2011, 37(5): 543-550.
- [11] Pan J Y, Wang L, Liu Y H, *et al.* Structural monitoring for the super high-rise building based on the fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Construction Technology*, 2015, 44(20): 40-42.  
潘金炎, 王立, 刘亚辉, 等. 基于光纤光栅传感技术的超高层建筑结构监测[J]. *施工技术*, 2015, 44

- (20): 40-42.
- [12] Li X. Analysis of fiber Bragg grating sensing technology in bridge safety monitoring [J]. China Building Materials Science & Technology, 2017, 26(4): 3-4.  
李旭. 桥梁安全监测中的光纤光栅传感技术浅析[J]. 中国建材科技, 2017, 26(4): 3-4.
- [13] Xue J F, Song H, Wang W J. Application of optical fiber grating in health monitoring for aircraft structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(22): 45-49.  
薛景锋, 宋昊, 王文娟. 光纤光栅在航空结构健康监测中的应用前景[J]. 航空制造技术, 2012(22): 45-49.
- [14] Berkoff T A, Kersey A D. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(12): 1677-1679.
- [15] Weng Y Y, Qiao X G, Feng Z Y, *et al.* Compact FBG diaphragm accelerometer based on L-shaped rigid cantilever beam [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(10): 100604.
- [16] Zeng Y J, Wang J, Yang H Y, *et al.* Fiber Bragg grating accelerometer based on L-shaped rigid beam and elastic diaphragm for low-frequency vibration measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1206005.  
曾宇杰, 王俊, 杨华勇, 等. 基于 L 形刚性梁与弹性膜片结构的低频光纤光栅加速度传感器 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1206005.
- [17] Yu Y, Meng Z, Luo H. Study on fiber Bragg grating vibrating sensors with symmetry push-pull configuration [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(1): 118-122.  
于洋, 孟洲, 罗洪. 对称推挽式光纤光栅振动传感器设计研究 [J]. 半导体光电, 2011, 32(1): 118-122.
- [18] Zhang Y S, Qiao X G, Liu Q P, *et al.* Study on a fiber Bragg grating accelerometer based on compliant cylinder [J]. Optical Fiber Technology, 2015, 26: 229-233.