

基于膜片与菱形结构的光纤布拉格光栅加速度传感器

魏莉, 余玲玲*, 姜达州, 刘壮, 李恒春

武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070

摘要 提出了一种基于膜片与菱形结构的光纤布拉格光栅(FBG)加速度传感器,理论分析了传感器的加速度检波机理,推导了其灵敏度和谐振频率表达式。利用 ANSYS 和 MATLAB 软件对传感器的结构参数进行了优化设计,得到了尺寸更小但能满足实际应用需求的 FBG 加速度传感器,构建了有限元模型并仿真了传感系统的振动特性。制备了传感器实物并进行了动静态特性测试。结果表明:在 20~90 °C 温度条件下,FBG 传感器具有较好的温度自补偿效果,有效减小 FBG 中温度对加速度测量的影响;该传感器 1 阶固有频率约为 681.4 Hz,在频率为 0~500 Hz 范围内,传感器灵敏度与振动信号频率呈良好的线性关系;膜片与菱形结构的组合应用增强了传感器横向抗干扰能力,并使得横向干扰度小于 5%。

关键词 传感器; 光纤布拉格光栅; 振动监测; 加速度传感器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0910003

Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Diaphragm and Diamond Structure

Wei Li, Yu Lingling*, Jiang Dazhou, Liu Zhuang, Li Hengchun

College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract A fiber Bragg grating (FBG) accelerometer based on diaphragm and diamond structure is proposed. The acceleration detection mechanism of the sensor is explained, and its sensitivity and resonance frequency expression are derived. The structural parameters of the sensor are optimized by using ANSYS and MATLAB softwares, and the FBG accelerometer with small structural size and meeting the practical application requirements is obtained. The finite element model is constructed to simulate the vibration characteristics of the sensing system. The sensor is fabricated and tested for dynamic and static characteristics. The experiments show that the sensor has better temperature compensation effect under the temperature of 20-90 °C, which effectively reduces the influence of temperature on acceleration measurement. The first-order natural frequency of the sensor is about 681.4 Hz. In the range of 0-500 Hz, the sensor's sensitivity has a good linear relationship with the vibration signal frequency. The combined application of the diaphragm and diamond structure enhances the sensor's ability to resist lateral interference with a lateral interference of less than 5%.

Key words sensors; fiber Bragg grating; vibration monitoring; accelerometer

OCIS codes 130.6010; 060.2370; 060.3735; 120.7280

1 引 言

光纤光栅作为一种新型的光学测量传感元件,凭借体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰、易组网及可实现双参量测量^[1-2]等优势,在振动监测领域备受青睐^[3-7],并广泛应用于铁路、桥梁、大坝、航空航天及船舶等重要领域。在工程中,当直接以裸光栅作为

测量元件进行振动信号检测时,光栅极易受到损坏^[8-10],且灵敏度和频率范围通常难以满足工程要求,因此需要通过研究相应的机械结构来提高灵敏度,并拓宽其频率测量范围。

近年来,国内外许多学者提出了各式各样的光纤布拉格光栅(FBG)振动传感器结构^[11-13]。郭永兴等^[13]提出了一种以钢管为弹性元件、4 个光栅均匀

收稿日期: 2018-12-29; 修回日期: 2019-01-25; 录用日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(51405354)

* E-mail: 18883278903@163.com

分布在钢管外围的 FBG 加速度传感器结构,实现了对二维加速度的测量及温度补偿,其谐振频率为 515 Hz,但该结构灵敏度偏低(约为 $8.8 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$)。贾淑红等^[14]将 FBG 两端固定在悬臂梁与垫高块之间,提高了传感器的灵敏度,同时避免了反射波峰的啁啾现象。王侃^[15]对其结构进行了改进,改进后的传感器灵敏度为 $1045.6 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$,但工作频带窄,其谐振频率仅为 70 Hz。Weng 等^[16]提出了一种用于石油与燃气振动检测的传感器,该传感器主要由一个弹性膜片与 2 个 L 形刚性梁组成。当质量块振动时,根据杠杆原理,从两端同时挤压或拉伸 FBG,实现振动的检测。但由于两梁拐点处是通过销钉或铰链与基体固定,在振动过程中难以保证两梁始终处于同一平面内。曾宇杰等^[17]提出了一种基于 L 形刚性梁与弹性膜片结构的 FBG 加速度传感器。L 形刚性梁结构消除了传统悬臂梁引起的 FBG 反射谱的多峰现象,弹性膜片使得该传感结构具有较强的稳定性和抗横向干扰能力。实验结果表明,其加速度灵敏度可达 $220 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$,但该传感器仅适用于频率为 20~70 Hz 的低频信号的检测。张发祥等^[18]提出了一种具有有限振结构的杠杆式 FBG 振动传感器,该结构限制了梁的最大振幅,抗冲击能力强,其谐振频率约为 66 Hz。Liu 等^[19-20]将单膜片改为双层膜片,从而大大提高了传感器频率范围,但其灵敏度提高不明显。董柯等^[21]设计了一种基于对称铰链的中低频 FBG 单维加速度传感器。实验结果表明,传感器的谐振频率约为 400 Hz,灵敏度约为 $230 \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$,横向干扰小于 8%。

在上述文献中,一部分传感器具有较高的检测灵敏度和较低的谐振频率,适用于低频微弱信号的测量;另一部分传感器具有较高的谐振频率,在一定程度上可以拓宽其工程应用范围,但其灵敏度偏低,在许多工程领域应用中仍存在局限性。例如,在油气勘探和天然气管道振动监测等工程中,低频微弱振动信号和中高频振动信号同等重要^[22],这就要求传感器具备良好灵敏度指标的同时还要有较宽的频率测量范围。针对上述情况,本文提出了一种弹性膜片与菱形构件组合的 FBG 振动传感器。圆膜片作为弹性元件,使得传感器的抗横向干扰能力得到提高;将两根 FBG 布置在菱形构件的两条对角线上,采用差分方式实现了温度自补偿,并将灵敏度提高了 1 倍;光纤及菱形构件对膜片的约束力提高了传感系统纵向刚度,并拓宽了其频率测量范围。本文主要理论分析传感器的结构及工作原理,推导了

传感器灵敏度和谐振频率表达式,并在此基础上进行结构优化与仿真分析,确定了传感器尺寸;最后对传感器进行相关实验研究。

2 传感器设计

2.1 传感原理

一种膜片与菱形组合结构的 FBG 加速度传感器如图 1 所示,它由质量块、弹性膜片、螺栓、传力件、菱形结构、FBG 以及外壳体组成。长螺栓依次穿过质量块的中心螺纹孔、垫圈、膜片中心孔后与螺母固结,垫圈用于隔离质量块和弹性膜片;长螺栓末端接有传力件,传力件的另一端通过销钉与菱形构件的一个顶点相连,菱形构件上与之对应的对角顶点通过销钉与压块相连,压块固定于外壳内底面。外壳由上壳体和下壳体组成,弹性膜片的边缘固定于上下壳体之间的卡槽内,2 根光纤互不干涉地以一定预紧力分别固定于菱形构件的两组对角线顶点上,2 根光纤悬空部分分别设有一个 FBG。

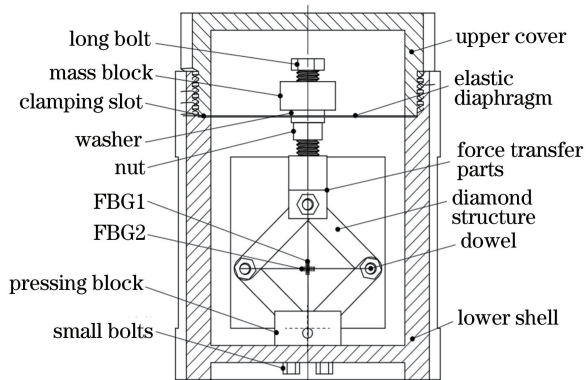


图 1 FBG 传感器结构图

Fig. 1 Structural diagram of FBG sensor

当外界产生沿膜片垂直方向的加速度激励时,在惯性作用下,质量块使得膜片中心发生形变。传力件将该形变量传递到菱形结构,使菱形结构的对角线长度发生变化,从而带动 FBG 拉伸或压缩,实现了将振动的加速度量转化为 FBG 的应变变量,进而实现 FBG 波长调制。通过跟踪 FBG 波长变化即可获得振动信号的振幅和频率信息。在本设计中,以圆膜片为弹性元件可减小横向振动对纵向加速度测量的干扰。将 2 个 FBG 悬空布置在菱形构件的对角线上,不仅避免了反射波峰的啁啾和多峰现象,还使传感器在实现温度自补偿的同时灵敏度提高了 1 倍。

2.2 传感灵敏度与谐振频率分析

在该传感结构中,由于质量块的质量 m_1 较小,不能忽略螺栓、螺母和传力件的附加质量 m_2 对系

统的影响。在对系统的谐振频率和灵敏度进行分析时,将螺栓、传力件、外壳体和菱形结构各连杆看作刚体,只考虑光纤和弹性膜片的弹性系数。为保证2根光栅的一致性,粘贴时使得光纤跨距相等,此时菱形结构各邻边相互垂直,对角线长度 $l_1 = l_2 = \sqrt{2}b = l$,其中 b 表示菱形边长, l_1 表示 FBG1 的粘贴跨距, l_2 表示 FBG2 的粘贴跨距, l 表示菱形构件为正方向时的对角线长度。如图 2 所示,当弹性膜片在沿 y 轴正方向加速度为 a 的振动激励下产生挠度 Δy 时,FBG1 的拉伸量也为 Δy 。

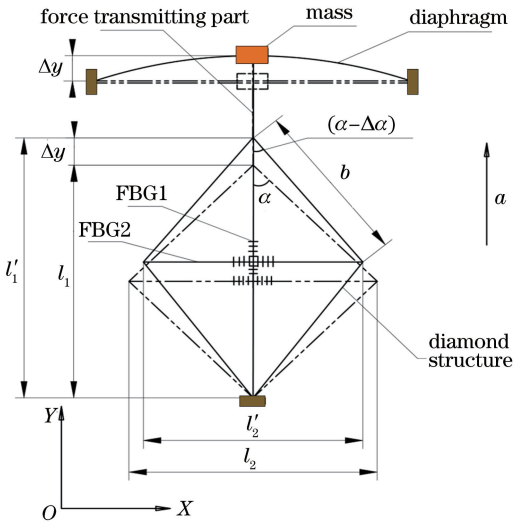


图 2 传感系统受力分析图

Fig. 2 Analysis of force of sensing system

FBG1 和 FBG2 受力前的跨距 l_1 和 l_2 以及 FBG1 和 FBG2 受力后的跨距 l'_1 和 l'_2 满足

$$l'_1 = l_1 + \Delta y = \sqrt{2}b + \Delta y, \quad (1)$$

$$l'_1/2 = \sqrt{2}b/2 + \Delta y/2 = b \cos(\alpha - \Delta\alpha), \quad (2)$$

$$l'_2 = 2b \sin(\alpha - \Delta\alpha) = \sqrt{2}b [\cos(\Delta\alpha) - \sin(\Delta\alpha)], \quad (3)$$

式中: $\alpha = \pi/4$ 表示菱形结构各棱边与光纤的夹角; $\Delta\alpha$ 表示夹角的变化量;由于 Δy 很小,菱形结构各角度变化量 $2\Delta\alpha$ 趋近于零,此时有 $\cos(\Delta\alpha) \approx 1$, $\sin(\Delta\alpha) \approx \Delta\alpha$ 。代入(2)式可得

$$\sqrt{2}b \Delta\alpha = \Delta y, \quad (4)$$

从而可得

$$l_2 - l'_2 = \sqrt{2}b - \sqrt{2}b [\cos(\Delta\alpha) - \sin(\Delta\alpha)] = \Delta y. \quad (5)$$

由(5)式可知,FBG2 的收缩量近似等于 Δy 。2 个光纤与弹性膜片共位移,即 2 根光纤与弹性膜片并联,图 2 可简化为图 3 所示的振动模型。因此,该传感系统的等效刚度可表示为

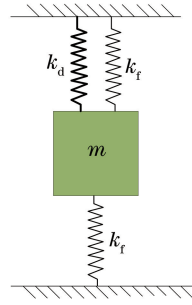


图 3 振动模型

Fig. 3 Vibration model

$$k_e = 2k_f + k_d. \quad (6)$$

该系统的谐振频率可表示为

$$f = \frac{\sqrt{(k_d + 2k_f)/m}}{2\pi}, \quad (7)$$

式中: k_f 表示光纤抗拉刚度; k_d 表示带硬心弹性膜片的刚度; m 表示质量块 m_1 与附加质量 m_2 之和。由以上分析可知,当弹性膜片在外界激励下产生大小为 Δy 的位移时,惯性力 F 对整个传感系统的作用力可分为 F_d 和 F_f 两部分,其中 F_d 使弹性膜片中心产生大小为 Δy 的偏移,而 F_f 为通过传力件和菱形结构传递到光纤上的力,并使光纤跨距产生大小为 Δy 的变化量,此时有

$$F = ma = F_d + F_f = (k_d + 2k_f) \cdot \Delta y. \quad (8)$$

设光纤的杨氏模量为 E_f ,横截面积为 A_f ,可得光纤抗拉刚度为

$$k_f = \frac{E_f A_f}{l}. \quad (9)$$

设弹性膜片的杨氏模量为 E_d , μ 为泊松比,膜片厚度为 h 。根据材料力学知识,弹性膜片的弯曲刚度可表示为

$$D = \frac{E_d h^3}{12(1 - \mu)^2}. \quad (10)$$

定义无量纲系数为

$$A = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{4 \ln^2(R/r)}{(R/r)^2 - 1}, \quad (11)$$

式中: R 和 r 分别表示弹性膜片的工作半径和与连接螺栓中心接触的半径。由于圆膜片周向被传感器外壳固定,中心与质量块相连形成半径为 r 的硬心。根据小挠度理论,作用于膜片中心处垂直方向的惯性力 F_d 引起的弹性膜片中心的偏移可表示为

$$y_F = \frac{AR^2}{16\pi D} F_d = \frac{3(1 - \mu^2)}{4\pi} \cdot \frac{F_d R^2}{E_d h^3} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{4 \ln^2(R/r)}{(R/r)^2 - 1} \right]. \quad (12)$$

因此,带硬心弹性膜片的刚度系数 k_d 可表示为

$$k_d = \frac{F_d}{y_F} = \frac{16\pi D}{AR^2}. \quad (13)$$

由以上推导过程可得到该加速度传感工作时, FBG 的应变变量 ϵ 与弹性膜片中心加速度之间的关系为

$$\epsilon = \frac{\Delta y}{l} = \frac{F}{lk_e} = \frac{ma}{l(k_d + 2k_f)} = \frac{maR^2 A}{16\pi D l + E_f A_f R^2 A}. \quad (14)$$

当外界应力和温度变化作用在 FBG 上时, 光纤材料的弹性应变和热膨胀导致 FBG 周期 Λ 发生变化。此外, 由于光纤本身所具有的弹光效应、波导效应和热光效应等因素, 有效折射率 n_{eff} 也会发生变化。FBG 的波长漂移量与应变、温度变化的关系为

$$\Delta\lambda/\lambda = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha_f + \xi_f)\Delta t, \quad (15)$$

式中: λ 表示 FBG 的中心波; $\Delta\lambda$ 表示 FBG 的波长漂移量; P_e 表示光纤的弹光系数, 对于刻写光栅所使用的掺锗石英光纤, 通常取 $P_e = 0.22$; α_f 表示光纤的热膨胀系数, ξ_f 表示光纤的热光系数; Δt 表示温度变化。

对于被拉伸的 FBG1 和 FBG2, 有

$$\Delta\lambda_1 > 0, \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = (1 - P_e)\epsilon_1 + (\alpha_f + \xi_f)\Delta t, \quad (16)$$

$$\Delta\lambda_2 < 0, \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = -(1 - P_e)\epsilon_2 + (\alpha_f + \xi_f)\Delta t, \quad (17)$$

式中: λ_1 和 λ_2 分别表示 FBG1 和 FBG2 预拉伸后的中心波长; $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别表示 FBG1 和 FBG2 预拉伸后的中心波长漂移量; ϵ_1 表示 FBG1 预拉伸后的应变变量; ϵ_2 表示 FBG2 预拉伸后的应变变量。由于所选用的光栅温度灵敏度系数相同, 中心波长、应变大小近似相等, 即 $\lambda_1 \approx \lambda_2 = \lambda$, $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 = \epsilon$ 。联立(16)式和(17)式, 消去温度对光栅波长漂移量的影响, 得到如下关系:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} =$$

$$(1 - P_e)\epsilon_1 + (1 - P_e)\epsilon_2 = 2(1 - P_e)\epsilon. \quad (18)$$

根据 FBG 加速度传感器灵敏度定义公式, 可得传感器灵敏度计算式为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{a} = \frac{2\lambda(1 - P_e)\epsilon}{a} = \frac{6\lambda(1 - P_e)mR^2(1 - \mu^2)A}{4\pi l E_d h^3 + 3E_f A_f R^2(1 - \mu^2)A}. \quad (19)$$

由(19)式可知, 采用菱形结构与膜片相结合的形式, 不仅消除了温度的影响, 还将传感器的灵敏度

扩大了 1 倍。此外, 传感系统谐振频率可表示为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_e}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{16\pi D l + 2E_f A_f R^2 A}{(m_1 + m_2) l R^2 A}}. \quad (20)$$

3 仿真分析

3.1 数值仿真

传感器的振动特性和测量范围与传感器的最小谐振频率密切相关, 为了获得更高的灵敏度和更大的频率测量范围, 需要对传感器的结构参数进行优化设计。由理论分析结果可以看出, 弹性膜片厚度 h 、工作半径 R 、膜片硬心半径 r 以及惯性质量 m 是影响加速度传感器灵敏度 S 和谐振频率 f 的 4 个关键参数。在传感器制作中选用普通不锈钢材料作为弹性膜片, 其杨氏模量 $E_d = 200$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.28$ 。根据(19)、(20)式, 在已知光纤光栅弹性系数 k_f 、光纤横截面积 A_f 和光纤跨距 l 等参数的情况下, 分别考虑传感器结构中几个关键参量对传感器灵敏度和谐振频率的影响, 以确定最佳尺寸参数。

首先, 由于期望传感器的整体尺寸应尽可能小(便于实际安装使用), 可取菱形边长 b 为 12 mm, 从而得到光栅跨距 l 为 17 mm。通过改变膜片工作半径 R , 来考察 S 和 f 的变化。图 4 是当 $E_d = 200$ GPa, $k_f = 72$ GPa, $l = 17$ mm, $\lambda = 1500$ nm, $r = 2$ mm, $h = 0.1$ mm 以及 $m = 15$ g 时, S 与 f 随膜片 R 变化的关系曲线。由图 4 可以看出, 在所取变化范围内, 当 R 增大时, S 随之增大, 而 f 迅速降低, 并且当 $R > 15$ mm 时, S 与 f 的变化基本趋于平稳。为了拓宽传感器频率范围并兼顾灵敏度指标, 可取 $5 \text{ mm} \leq R \leq 15 \text{ mm}$ 。

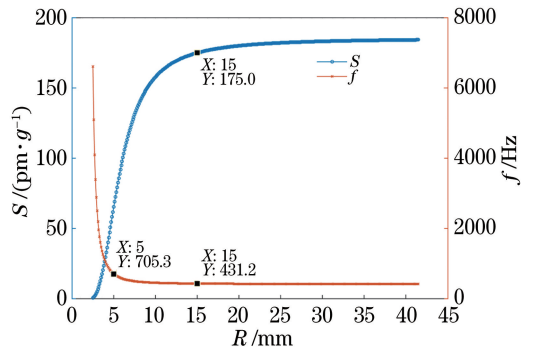


图 4 S 与 f 随 R 变化的关系曲线

Fig. 4 Variations in S and f with R

当 $E_d = 200$ GPa, $k_f = 72$ GPa, $l = 17$ mm, $\lambda = 1500$ nm, $r = 2$ mm, $R = 30$ mm 以及 $m = 10$ g 时, 分析了膜片厚度 h 对 S 和 f 的影响。由图 5 可

知,当 $h < 0.05$ mm 时, S 和 f 均缓慢变化,具有较高的灵敏度;当 h 处于 $0.05 \sim 0.40$ mm 时,随着 h 的增大, S 迅速降低,而 f 增大;当 $h > 0.4$ mm 时,随着 h 的增加, f 曲线的上升趋势更加明显,而 S 逐渐趋于平稳。故要获得较高灵敏度,膜片需尽量薄一些。考虑到实际的选材及加工条件,膜片厚度可选取为 $0.1 \sim 0.4$ mm。

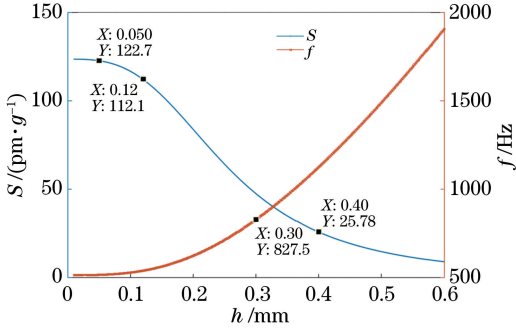


图 5 S 与 f 随 h 变化的关系曲线
Fig. 5 Variations in S and f with h

考虑膜片硬心半径 r 对 S 与 f 的影响,如图 6 所示。当 $E_d = 200$ GPa, $k_f = 72$ GPa, $l = 17$ mm, $\lambda = 1500$ nm, $h = 0.1$ mm, $R = 30$ mm 以及 $m = 15$ g 时,随着 r 的增大, S 呈下降趋势,而 f 呈上升趋势;当 $r > 7$ mm 时,这种趋势更加明显。与膜片工作半径 R 相比,硬心半径 r 对 f 的影响较小,因此可通过减小 r 来提高灵敏度。但考虑到单维传感器横向干扰等因素,质量块与膜片应具有一定的连接刚度,故 r 不能过小,在此可取 $r = 2$ mm。

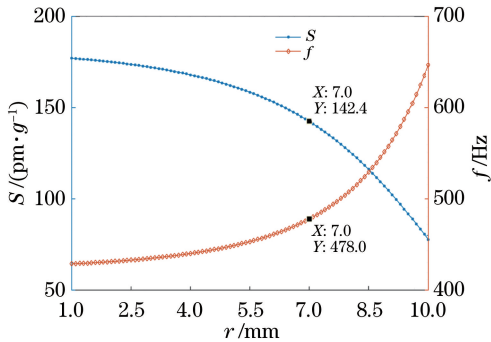


图 6 S 与 f 随 r 变化的关系曲线
Fig. 6 Variations in S and f with r

当 $E_d = 200$ GPa, $k_f = 72$ GPa, $l = 17$ mm, $\lambda = 1500$ nm, $h = 0.2$ mm, $R = 30$ mm 以及 $r = 2$ mm 时,分析了 m 对 S 与 f 的影响。由图 7 可知, m 与 S 呈线性正相关,而 m 与 f 呈负相关;当 $m < 5$ g 时,随 m 的增大, f 迅速减小;当 $m > 15$ g 时, f 逐渐趋于平稳。但考虑尺寸因素, m 无法做得太大,因此需选用密度较大的金属作为质量块的材料,

并取 5 g $< m < 12$ g。以上分析给出了 4 个关键参数对传感器灵敏度与谐振频率的影响,并设定 FBG 加速度传感器结构及材料特性参数,如表 1 所示。仿真结果显示,当 $h = 0.2$ mm, $R = 15$ mm, $m = 8 \times 10^{-3}$ kg, $r = 2$ mm 时,该传感器灵敏度为 67 pm·g $^{-1}$ (g 为地球表面重力加速度),谐振频率为 696.7 Hz。

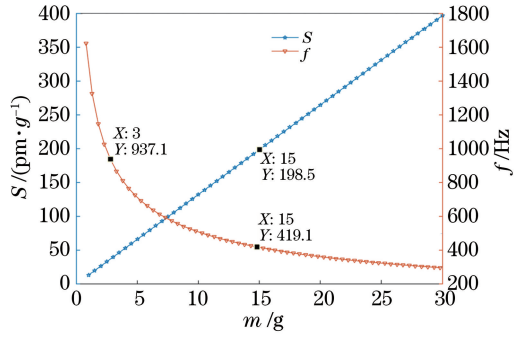


图 7 S 与 f 随 m 变化的关系曲线
Fig. 7 Variations in S and f with m

表 1 FBG 加速度传感器结构及材料特性参数
Table 1 Parameters of FBG accelerometer structure and material properties

Parameter	Parameter description	Value
b /mm	Diamond side length	12
l /mm	Optical fiber span	17
R /mm	Working radius of diaphragm	15
r /mm	Hard core radius of diaphragm	2
h /mm	Thickness of diaphragm	0.2
m /kg	Quality of copper block	8×10^{-3}
λ /nm	Grating wavelength	1500
A_f /m 2	Cross section area of optical fiber	1.227×10^{-8}
E_d /GPa	Young's modulus of diaphragm	200
μ	Poisson's ratio of diaphragm	0.28

3.2 有限元模态分析

为进一步研究传感器的动态特性,在此采用 ANSYS 软件对传感器模型进行模态分析。在该传感模型中,圆膜片和光纤光栅组成的弹性系统直接承受质量块的惯性力,因此该系统对传感器的动态特性有着决定性作用。

按照表 1 所给尺寸参数并利用 MATLAB 软件对传感器进行 3 维建模,并将各螺纹配合部分简化为直径等于螺纹中径的圆柱配合;将建好的模型导入 ANSYS 软件,按照如表 2 所列的参数设置各零部件材料属性,完成网格划分;在距膜片外圆 2 mm 宽的圆环上施加固定约束,在不考虑菱形构件及光纤作用力的情况下,得到 1 阶模态云图,如图 8(a) 所示,其谐振频率为 467.87 Hz;将菱形构件和 2 根

带有预应力光纤等效为具有相同作用效果的弹簧约束,并进行模态分析,得到了前3阶模态振型及变形云图。该传感系统1阶模态的振型为沿 z 轴方向的纵向振动,如图8(b)所示。对比图8(a)、(b)可知,在考虑菱形构件的作用力后,其1阶谐振频率明显得到提高,其值约为686.04 Hz,仅比理论计算值

(696.7 Hz)略小,理论与仿真相互得到了验证。传感系统2阶、3阶模态的振型分别是沿 x 轴和 y 轴方向的横向摆动,分别如图8(c)、(d)所示,其谐振频率分别为1016.3 Hz和1086.8 Hz。计算可知,传感器横向振动谐振频率高出主向谐振频率48%~58%,说明了该传感系统具有较强的抗横向干扰能力。

表2 传感器主要零件的物理参数

Table 2 Physical parameters of main parts of sensor

Part	Material	Young's modulus /GPa	Poisson ratio	Density /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Diaphragm	Stainless steel	200	0.247	7930
Mass block	Brass	96	0.380	8500
Force transmission parts	Aluminum alloy	71	0.330	2770
Bolt	30 carbon steel	235	0.300	7890

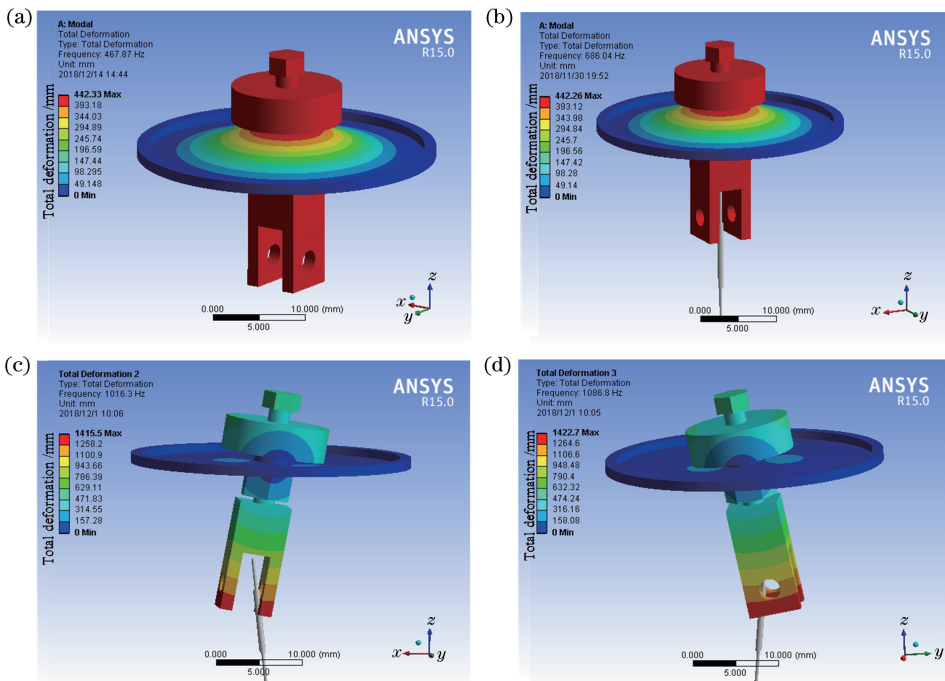


图8 有限元模态分析变形图。(a)不考虑菱形构件及光纤作用力时的1阶模态;
(b)~(d)考虑菱形结构及光纤作用力时的前3阶模态

Fig. 8 Deformation diagrams obtained by finite element modal analysis. (a) First-order mode without considering fiber force and diamond structure and fiber; (b)-(d) first-order, second-order, and third-order modes considering fiber force and diamond structure, respectively

4 实验研究

图9(a)为FBG传感器标定实验系统示意图。将FBG传感器固定在激振器振动台上,激振信号由信号发生器发出,经功率放大器放大后传递至激振器,进而驱动激振器产生相同幅值和频率的振动信号。353B18压电式振动传感器(灵敏度为 $9.93\text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$,量程为500 g,频率范围为0.5~10.0 kHz)被粘贴在激振器振动台上,通过学习管理系统(LMS)可以实时获知压电加速度传感器的振

动信号,从而得到激振器激励加速度幅值和频率,并以此为参考对FBG传感器进行参数标定。将FBG振动传感器的输出信号接入光纤光栅解调仪(其内部集成了宽带光源,输入光功率为10 mW,可解调波长范围为1525~1565 nm,最大采样率为4 kHz,分辨率为0.1 pm),并通过计算机实时显示FBG波长漂移信号。

FBG传感器光信号解调原理如图9(b)所示。具体解调过程为:宽带光源输出的光波经隔离器后,从耦合器#1端口进入耦合器,再通过#2端口输出

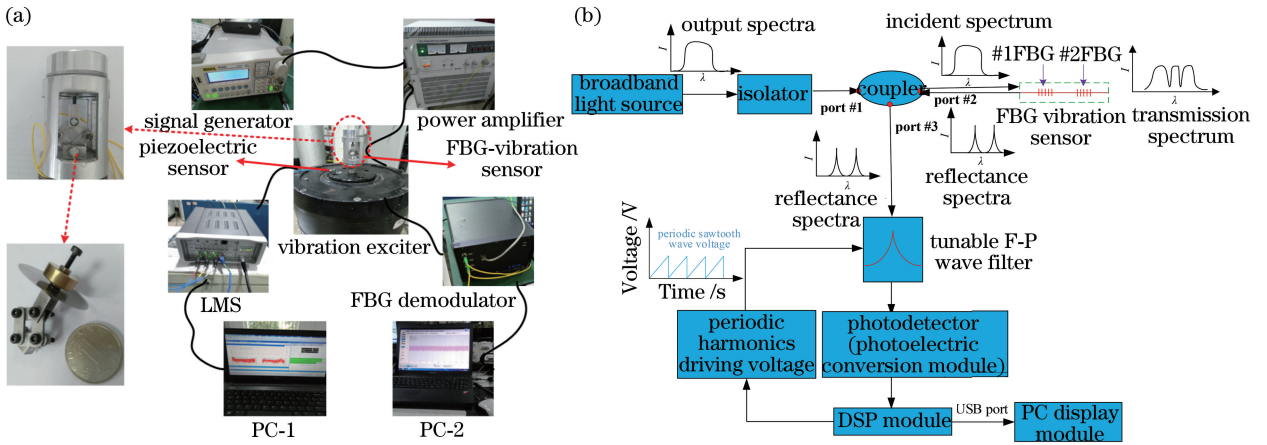


图 9 FBG 传感器实验系统。(a)标定实验系统示意图；(b)光信号解调原理图
Fig. 9 Sensor experimental system. (a) Diagram of calibration experimental system;
(b) demodulation principle of optical signal

到 #1FBG、#2FBG 传感器；被 FBG 传感器反射的光波经耦合器 #3 端口输出到可调谐法布里-珀罗腔(F-P 腔)滤波器；当 F-P 腔的透射波峰与 FBG 的反射波峰重合时，光电探测器检测到最大光强，对其进行光电转换，形成电压，用于驱动安装在 F-P 腔的高反射镜上的压电陶瓷，压电陶瓷的伸缩变化会改变 F-P 腔的腔长，使透过 F-P 腔的光波波长发生改变；通过光电探测器将光信号转化为电信号，并经电信号传输给数字信号处理模块(DSP)进行处理；最后通过通用串行总线(USB)在计算机(PC)端实时显示 FBG 波长信息。

4.1 幅频特性实验

利用图 9 所示的实验装置进行激振实验时，调节信号发生器，使激振器激振加速度幅值为 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 且保持不变，激振频率在 $0\sim 900 \text{ Hz}$ 内变化，记录传感器各 FBG 波长变化情况，重复进行 3 次实验。提取各频率采样点下载传感器的 FBG 中心波长漂移的半峰值，得到传感器的幅频响应曲线如图 10 所示。从图 10 中的曲线可知：1)传感器的 1 阶谐振频率约为 681.4 Hz ，这与理论计算值 (696.7 Hz)和有限元仿真结果 (686.04 Hz)基本一致，图中 2 个 FBG 测量所得的谐振频率略有偏差，原因可能是在传感器装配和安装固定过程中引入了误差；2)谐振频率在 $0\sim 500 \text{ Hz}$ 范围内时，随着谐振频率的增大，FBG 漂移量也随之增大，且波长漂移量与谐振频率呈现良好的线性关系。

4.2 线性响应实验

为了获得传感器对不同频率振动信号的灵敏度，在此调节信号发生器，使其输出信号频率保持不变，并控制激振器激振加速度幅值从 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 上

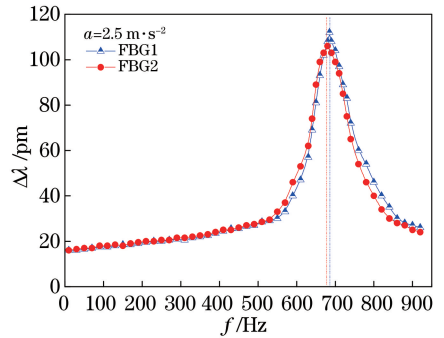


图 10 传感器的幅频响应曲线

升至 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ，每隔 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 记录一次实验数据，实验重复 3 次。当激振加速度信号幅值为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 、输出信号频率为 100 Hz 时，得到传感器 2 个 FBG 的时域响应图和频域图，如图 11 所示。由图可知，2 个 FBG 的响应均为等频率的正弦信号，并且 FBG1 与 FBG2 的相位相差 π 。根据(18)式和(19)式，将 2 个 FBG 波长漂移量相减，不仅可以消除温度对测量结果的影响，还可使传感器的灵敏度提高 1 倍。

图 12 为 $10\sim 500 \text{ Hz}$ 频段内 $|\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2|$ 与激振加速度的关系曲线。通过最小二乘法拟合得到了不同频率的振动激励下传感器波长漂移量与激振加速度的线性关系和拟合方程，如表 3 所示(这里 a 为激振加速度，取 $g=10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)。从图 12 和表 3 可以看到，随着激振信号频率的升高，激振加速度的灵敏度也随之升高。在一些中高频信号衰减严重的工程振动测试中，该特性可对信号起到较好的补偿作用^[20]。FBG 加速度传感器是利用光栅实时波长与其初始中心波长(激振加速度为 0 时的波长)之差的

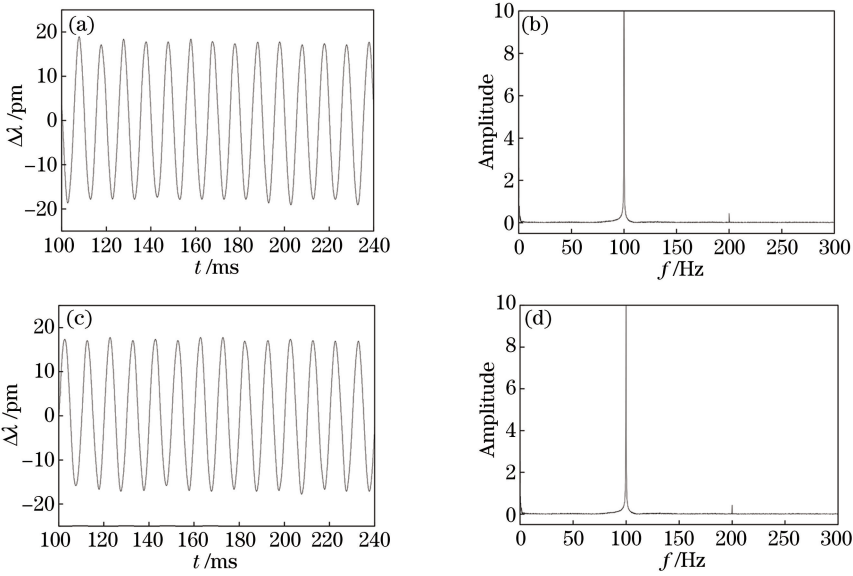


图 11 当激振加速度信号幅值为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 及输出信号频率为 100 Hz 时,各 FBG 波长变化量的时/频域信号。(a) FBG1,时域信号;(b) FBG1,频域信号;(c) FBG2,时域信号;(d) FBG2,频域信号

Fig. 11 Time domain and frequency domain signals of two FBGs of sensor when $f=100 \text{ Hz}$ and $a=5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. (a) FBG1, time domain signal; (b) FBG1, frequency domain signal; (c) FBG2, time domain signal; (d) FBG2, frequency domain signal

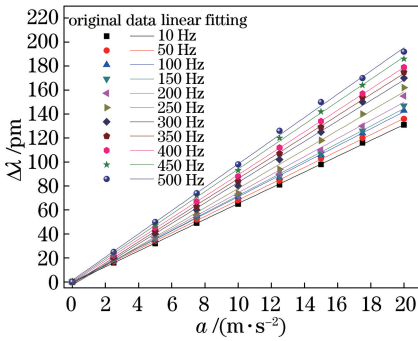


图 12 不同激振频率下, $|\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2|$ 随激振加速度变化的关系曲线

Fig. 12 $|\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2|$ versus excitation acceleration under different excitation frequencies

幅值,与激振加速度幅值成正比的关系来检测振动;但由于影响 FBG 中心波长的环境因素(温度、声波、风波等振动信号)时刻变化,以及采集系统 F-P 腔驱动电压等存在波动,即使在激振器的激振加速度为 0 时,各 FBG 中心波长也是时刻波动的(小于 $\pm 2 \text{ pm}$)。在此忽略环境噪声以及采集系统对 FBG 波长的影响。将非激振条件下的 FBG 反射波长平均值作为 FBG 初始波长(传感器零点波长),当激振加速度为 0 时,FBG 波长变化量也为 0,实验所得各频率下的灵敏度曲线相交于坐标原点(零点)。通过拟合方程可计算得到相应激振频率下的灵敏度,为了进一步研究传感器灵敏度与激振信号频率的关系,绘制了灵敏度与激振频率的关系曲线,并利用最

小二乘法拟合得到了传感器 $S-f$ 的拟合直线,如图 13 所示,其拟合方程可表示为 $S = (0.07f + 63.31) \text{ pm}\cdot\text{g}^{-1}$,其中 f 表示激振频率。在粘贴光栅时,各光栅的预拉伸量约为 1000 pm 。计算可知当振动信号频率为 500 Hz 时,该传感器可检测到的最大激振加速度值约为 20 g 。

表 3 传感器在不同激振频率激振下的灵敏度参数

Table 3 Sensitivity parameters of sensor under different excitation frequencies

Excitation frequency / Hz	Fitting equation / $(\text{pm}\cdot\text{g}^{-1})$	Sensitivity / $(\text{pm}\cdot\text{g}^{-1})$
10	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 65.86a - 0.53$	65.33
50	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 68.20a + 0.02$	68.22
100	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 70.93a + 0.07$	71.00
150	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 72.53a - 0.53$	72.00
200	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 75.53a - 1.20$	74.33
250	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 80.06a - 2.65$	77.35
300	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 85.47a - 2.47$	83.00
350	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 87.80a - 1.68$	86.12
400	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 89.60a - 0.27$	89.33
450	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 93.67a + 0.44$	94.11
500	$ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 97.00a + 1.33$	98.33

4.3 抗干扰特性实验

对于单维加速度传感器,除灵敏度和谐振频率等重要参数外,其横向抗干扰能力也是一个重要的参数指标。在实验中,将传感器翻转 90° 并将其固定在激振器振动台上,给传感器施加一个幅值为

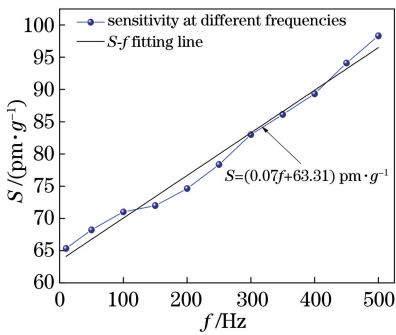


图 13 传感器灵敏度随激振信号频率的变化关系

Fig. 13 Sensor sensitivity versus frequency of excitation signal

$5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、频率为 100 Hz 的激励信号。图 14 显示了加速度传感器在该激励信号下的主向和横向加速度响应曲线。可以看出,传感器的横向干扰度小于 5%,这表明所设计的传感器具有良好的抗横向干扰能力。

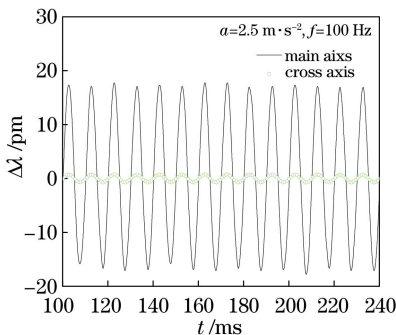


图 14 加速度传感器的主向和横向加速度曲线

Fig. 14 Principal and transverse accelerations of accelerometer

4.4 温度补偿特性实验

FBG 除了对应变比较敏感外,还对温度也十分敏感。从(16)~(19)式可知,所提出的传感器采用差分方式消除了温度对振动测量的影响,其前提条件是:1)菱形构件上 2 个 FBG 的温度灵敏度系数基本相等;2)2 个 FBG 距离较近,可视为同一温度场。为了验证 FBG 传感器的温度自补偿特性,在此组建了温度补偿特性实验系统,该系统由温控箱(可调温度范围为 $-10 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$,分辨率为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)、解调仪(该解调仪宽带光源输出功率为 3 mW ,可解调波长范围为 $1525 \sim 1565 \text{ nm}$,采样率为 1 Hz ,波长分辨率为 1 pm)和 PC 端组成。首先,将 FBG 传感器放置在温控箱内,传感器信号输出端接入 FBG 解调仪,通过 PC 端可实时观察 FBG 波长变化。调节温控箱控制传感器的环境温度从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升至 $90 \text{ }^\circ\text{C}$,每次调节的温度间隔为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$,待箱内温度波动不超

过 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 后记录波长信息;然后,将温控箱温度从 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,每隔 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 记录波长信息;重复实验 3 次,计算不同温度下各 FBG 多次实验的波长漂移平均值,从而得到 FBG 加速度传感器的温度响应曲线,如图 15 所示。由图可知,单个 FBG 的中心波长漂移量随温度近似成线性变化,其灵敏度约为 $11 \text{ pm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;而补偿后的波长漂移量 $\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2$ 对温度变化不敏感,在所测温度范围内,其幅值在 $-8 \sim 11 \text{ pm}$ 内波动,这表明该 FBG 传感器具有良好的温度自补偿效果。

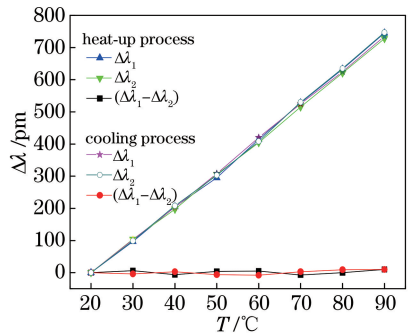


图 15 FBG 加速度传感器的温度响应曲线

Fig. 15 Temperature response curves of FBG accelerometer

5 结 论

设计了一种弹性膜片与菱形结构组合应用的 FBG 加速度传感器,理论分析了传感器的加速度检波机理。仿真分析结合实验,对所设计的传感器进行了优化设计和动静态特性测试。结果表明:在 $20 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度条件下,传感器具有较好的温度自补偿效果;采用菱形构件提高了传感系统的纵向刚度,其 1 阶固有频率约为 681.4 Hz ;在频率为 $0 \sim 500 \text{ Hz}$ 范围内,传感器灵敏度随振动信号频率的升高而增大,其灵敏度为 $(0.07f + 63.31) \text{ pm} \cdot \text{g}^{-1}$,并具备较强的抗横向干扰能力。所设计的传感器既具有较高的固有频率,又兼顾了高灵敏度和较强的抗横向干扰能力,为 FBG 加速度传感器的工程应用提供了一种新颖可靠的方法。但本设计尚存在不足之处,如在结构设计过程中未考虑到传感器过载情况,后续的工作将会考虑过载保护等方面,从而对传感结构进行改进和完善。

参 考 文 献

[1] Cao H J, Si J H, Chen T, *et al.* Temperature and strain dual-parameter heterogeneous fiber Bragg grating sensor made by femtosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702009.

- 曹后俊, 司金海, 陈涛, 等. 飞秒激光制备异质光纤光栅的温度应变双参数传感器[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702009.
- [2] Tan Z, Liao C R, Liu S, *et al.* Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206007.
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206007.
- [3] Antunes P, Lima H, Varum H, *et al.* Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: abode wall case study[J]. Measurement, 2012, 45(7): 1695-1705.
- [4] 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.
- [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] Guru Prasad A S, Omkar S N, Vikranth H N, *et al.* Design and development of fiber Bragg grating sensing plate for plantar strain measurement and postural stability analysis[J]. Measurement, 2014, 47(1): 789-793.
- [8] Li G L, Zhai L X, Li Z Q. Structure design of temperature compensated fiber Bragg grating acceleration sensing probe [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(4): 505-507.
李国利, 翟力欣, 李志全. 温度补偿型光纤光栅加速度传感探头结构设计[J]. 压电与声光, 2013, 35(4): 505-507.
- [9] Li T L, Tan Y G, Liu Y, *et al.* A fiber Bragg grating sensing based triaxial vibration sensor [J]. Sensors, 2015, 15(9): 24214-24229.
- [10] Li T L, Tan Y G, Zhou Z D, *et al.* Pasted type distributed two-dimensional fiber Bragg grating vibration sensor [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(7): 075009.
- [11] Bai L, Yang H Y, Luo H, *et al.* Research progress of fiber Bragg grating-based accelerometer [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(6): 767-771.
白龙, 杨华勇, 罗洪, 等. 基于光纤布拉格光栅加速度传感器的研究进展[J]. 半导体光电, 2012, 33(6): 767-771.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Jia S H, Wang X Y, Wang K. A high-sensitivity fiber grating acceleration sensor design and simulation [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(5): 643-646.
贾淑红, 王晓宇, 王侃. 一种高灵敏度 FBG 加速度传感器设计与仿真[J]. 传感技术学报, 2013, 26(5): 643-646.
- [15] Wang K. Enhanced-sensitivity fiber grating acceleration sensor design[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(1): 10-12, 16.
王侃. 增敏型光纤光栅加速度传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2015(1): 10-12, 16.
- [16] Weng Y Y, Qiao X G, Guo T, *et al.* A robust and compact fiber Bragg grating vibration sensor for seismic measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(4): 800-804.
- [17] 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.
- [18] Zhang F X, Lü J S, Jiang S D, *et al.* High sensitive fiber Bragg grating micro-vibration sensor with shock resistance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0822002.
张发祥, 吕京生, 姜邵栋, 等. 高灵敏抗冲击光纤光栅微振动传感器[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0822002.
- [19] Liu Q P, Qiao X G, Zhao J L, *et al.* Novel fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm[J].

- IEEE Sensors Journal, 2012, 12(10): 3000-3004.
- [20] Liu Q P, Qiao X G, Jia Z A, *et al.* Large frequency range and high sensitivity fiber Bragg grating accelerometer based on double diaphragms[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(5): 1499-1504.
- [21] Dong K, Dai Y T, Yin G L, *et al.* Medium-low frequency fiber optic acceleration sensor based on symmetrical gemel and its optimization design [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017, 28(1): 6-11.
- 董柯, 戴玉堂, 殷广林, 等. 基于对称铰链的中低频光纤加速度传感器及其优化设计[J]. 光电子·激光, 2017, 28(1): 6-11.
- [22] Wang X L. Research on acceleration sensor of earthquake motion[D]. Taiyuan: North University of China, 2007: 1-14.
- 王晓丽. 地震动加速度传感器的研究[D]. 太原: 中北大学, 2007: 1-14.