

反射型极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感特性

邓欧, 罗彬彬*, 吴德操, 谢浪, 赵明富**, 邹雪, 石胜辉, 刘恩华, 蒋上海

重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054

摘要 提出一种反射型极大倾角光纤光栅(ExTFG)悬臂梁振动传感器。从理论上分析 ExTFG 的弯曲应变特性和振动传感原理, 并利用 ANSYS 构建有限元模型, 对传感器进行模态分析和谐振特性响应分析, 通过实验研究其在受到周期性载荷下发生弯曲振动的动态响应特性。结果表明: 反射型 ExTFG 悬臂梁振动传感器对加速度连续性激励信号展现出良好的动态响应, 可通过调节传感器长度实现其固有频率的改变, 在 1~5g 范围内具有良好的线性响应, 其最大加速度灵敏度相对于透射式 ExTFG 振动传感器提高了约 2.5 倍, 横电模和横磁模时的最大加速度灵敏度分别达到 0.3 V/g 和 0.26 V/g。此外, 该传感器的传感探头尺寸足够小, 以 ExTFG 作为敏感单元, 无需额外封装, 在实际应用中具有潜在价值。

关键词 光纤光学; 极大倾角光纤光栅; 振动传感; 反射型; 悬臂梁; 弯曲

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2006001

Vibration Sensing Characteristics of Reflection-Type Excessively Tilted Fiber Grating Cantilever

Deng Ou, Luo Binbin*, Wu Decao, Xie Lang, Zhao Mingfu**, Zou Xue, Shi Shenghui, Liu Enhua, Jiang Shanghai

Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract A vibration sensor based on the reflection-type excessively tilted fiber grating (ExTFG) cantilever is proposed in this work. The bending strain characteristics and vibration sensing principle of ExTFG are theoretically analyzed, and a finite element model is constructed by ANSYS to analyze the modality and resonance characteristic response of the sensor. The dynamic response characteristics of bending vibration of the sensor under the periodic load are studied experimentally. The results show that the vibration sensor based on the reflection-type ExTFG cantilever exhibits a good dynamic response to the acceleration continuous excitation signal. The natural frequency of the sensor can be changed by adjusting its length. The sensor has a good linear response in the range of 1–5g, and its maximum acceleration sensitivity is increased by about 2.5 times compared to the transmission-type ExTFG vibration sensor. The maximum acceleration sensitivity of the transverse electric mode and transverse magnetic mode reaches 0.3 V/g and 0.26 V/g, respectively. In addition, the size of the sensor probe is small enough, and the ExTFG is used as the sensitive unit without additional packaging, so it has potential value in practical applications.

Key words fiber optics; excessively tilted fiber grating; vibration sensing; reflection-type; cantilever; bending

OCIS codes 060.2370; 120.0280; 060.3735

1 引 言

振动检测是各类工程应用中的关键问题之一, 其检测方法主要分为三类: 机械检测、电子检测和光

学检测。光纤光栅传感技术作为光学检测的发展方向之一, 不仅具有光纤的优点, 而且对温度、应变、应力、弯曲等各种参数敏感, 常被用作振动检测的敏感单元, 在桥梁、铁路、管道等工程中得到了广泛应

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-06-08; 录用日期: 2020-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(61875026)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201901124, KJZD-K201905601)、重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0243)、重庆理工大学创新基金(yxcx20192050, yxcx20192054)

* E-mail: luobinbin@cqut.edu.cn; ** E-mail: zmf@cqut.edu.cn

用^[1-2]。传统的光纤光栅振动传感器通常采用基于波长解调的光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器^[3-5],这类传感器的解调系统相对复杂,且成本较高。近 10 年,国内外学者提出众多不同类型、不同结构的特种光纤光栅振动传感器,其中大多数采用了光强解调的简单方式。例如:2009 年,Guo 等^[6]在倾斜光纤光栅(TFBG)前端进行拉锥,建立包层与纤芯模式的耦合通道,实现对加速度的检测。2014 年,Rong 等^[7]提出一种基于光纤包层中刻蚀光栅的光纤加速度计,通过对包层模谐振峰的功率检测,实现与方向有关的振动(加速度)测量。2017 年,Cai 等^[8]提出一种双包层 TFBG 加速度计,通过反向低阶包层模与纤芯的耦合,实现工作范围在 1~120 Hz 的低频振动测量。上述文献中,基于 TFBG 的振动传感器需提供一种反向传输的包层模与纤芯耦合机制,然而在实现这一目的过程中,传感器存在机械强度降低(如拉锥)、插入损耗增加等问题。

极大倾角光纤光栅(ExTFG)作为光纤光栅的一种特殊变体,同时具有 FBG 和长周期光纤光栅(LPFG)的特性,是一种性能优良的无源器件。实验证明,ExTFG 具有比 FBG 更低的温度灵敏度和比普通 LPFG 更高的应变灵敏度^[9],在对单一物理参量测量时可降低传感过程中的温度交叉敏感问题。在基于 ExTFG 的振动传感研究中,本课题组之前开展了基于透射式的 ExTFG 等强度悬臂梁振动传感研究^[10-12],但透射式的 ExTFG 振动传感器在实际应用中不便于使用和安装。此外,由于 ExTFG 粘贴在等强度悬臂梁上,传感器性能受 ExTFG 粘贴方式的影响,这也限制了其在工程领域的进一步应用。因此,本文主要研究反射型 ExTFG 悬臂梁振动传感器,将 ExTFG 本身作为悬臂梁,通过

改变自由端长度实现对传感器共振频率的调节,并通过实验研究分析了该传感器的响应特性和传感性能。

2 理论原理分析

ExTFG 的倾斜角度一般为 78°~83°,实验所采用的 ExTFG 的倾斜角度为 81°,轴向周期约为 28 μm。与 LPFG 类似,ExTFG 的耦合方式为纤芯基模与前向包层模耦合,但是,纤芯中大角度倾斜条纹造成光栅截面不对称,使得 ExTFG 每个包层模中具有横电(TE)模和横磁(TM)模两个简并模式^[9]。根据模式耦合理论,ExTFG 的相位匹配条件为^[13]

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}) \frac{\Lambda_G}{\cos \theta}, \quad i \text{ is TE or TM}, \quad (1)$$

式中: λ_{res} 为谐振波长; $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 和 $n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}$ 分别为纤芯基模和 m 阶包层模的有效折射率; Λ_G 为光栅的周期; θ 为光纤光栅的倾斜角度。

当 ExTFG 受到外界扰动时,光纤光栅发生弯曲形变。如图 1 所示,当 ExTFG 发生弯曲时,ExTFG 可等效为一个倾斜角度更大($>81^\circ$)的倾斜啁啾光纤光栅,此时纤芯有效折射率分布可表示为^[11]

$$n_{\text{co}}^{\text{eff}}(z) = n_{\text{co}}^{\text{eff}} + \bar{n}_{\text{co}}^{\text{eff}}(z') \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_G'} z' + \varphi(z') \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: $z' = x \sin(\theta + \theta_\varphi) + z \cos(\theta + \theta_\varphi) \approx z \cos(\theta + \theta_\varphi)$,其中 θ_φ 为第 φ 个光栅周期的有效折射率横截面增大的倾斜角; ν 为光栅的倾斜条纹可见度; $\bar{n}_{\text{co}}^{\text{eff}}(z')$ 为每个光栅周期的纤芯平均有效折射率; $\Lambda_G' = \Lambda_G \cos(\theta + \theta_\varphi)$ 为等效周期。当 ExTFG 发生弯曲时,倾斜角度增大,导致 ν 和 $\bar{n}_{\text{co}}^{\text{eff}}(z')$ 降低,交差耦合效率 κ ($\kappa = \nu\sigma/2$, σ 为自耦合系数)也降低,

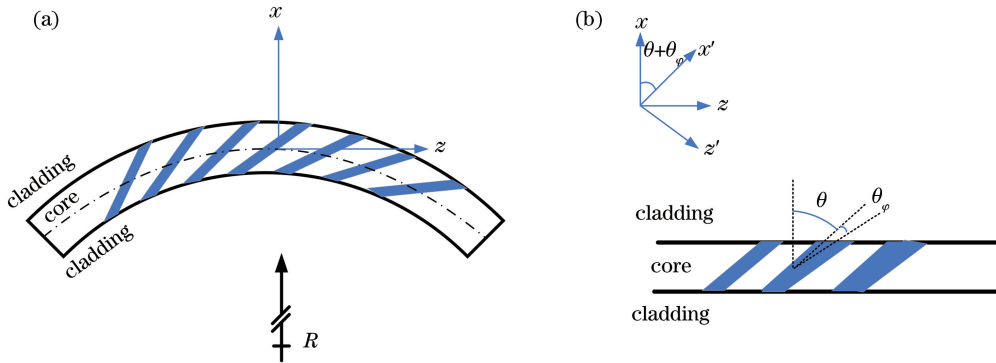


图 1 弯曲 ExTFG 示意图和等效图。(a)弯曲 ExTFG 示意图;(b)弯曲 ExTFG 等效图

Fig. 1 Schematic and equivalent diagrams of bended ExTFG. (a) Schematic diagram of bended ExTFG; (b) equivalent diagram of bended ExTFG

从而使 ExTFG 的损耗峰幅值降低;同时,由 ExTFG 的相位匹配条件可知,由于 $\Delta\epsilon' < \Lambda_G$, 弯曲应变将使得 ExTFG 的谐振波长发生蓝移。

此外,当 ExTFG 受到外部应变时,弹光效应引起纤芯和包层有效折射率的变化不同,导致波长谐振峰发生漂移^[10],偏移量为

$$\Delta\lambda_{\text{res}}^m = \left[\frac{1}{n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}} \frac{d(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}})}{d\epsilon} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{d\epsilon} \right] \epsilon = \lambda_{\text{res}}^m (1 - \rho_{\text{cl},m}) \epsilon, \quad (3)$$

其中

$$\rho_{\text{cl},m} = \left[\frac{1}{n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}} \frac{d(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}})}{d\epsilon} \right], \quad (4)$$

式中: λ_{res}^m 为第 m 阶 TE/TM 包层模式的谐振波长; ϵ 为光纤的应变; $\Lambda = \Lambda_G / \cos \theta$ 为光纤光栅轴向周期。根据文献[14],悬臂式 ExTFG 的长度变化量 Δl 为

$$\Delta l = 2 \int_0^l \frac{M_F d}{2EJ} dx = \frac{m' dl^2}{6EJ} a, \quad (5)$$

式中: E 为光纤杨氏模量; $J = \pi d^4 / 64$ 为光纤截面惯性矩; $M_F = \omega(l-x)^2 / 2$ 为弯矩,其中 ω 为梁单位长度受到的力; d 为梁横截面直径; l 为光纤长度; a 为振动加速度; $m' = \rho S l$ 为光纤质量,其中 ρ 为光纤密度, $S = \pi d^2 / 4$ 为光纤截面面积。

结合(3)、(5)式,可得

$$\Delta\lambda_{\text{res}}^m = \lambda_{\text{res}}^m (1 - \rho_{\text{cl},m}) \frac{m' dl}{6EJ} a. \quad (6)$$

由(6)式可知,谐振峰波长漂移量正比于振动加速度 a ,当加载振动信号时,ExTFG 处于动态的弯曲变化状态,会引起光栅的长度、周期和有效折射率的周期性变化,从而导致谐振峰的波长和强度发

生周期性变化。利用光电探测器检测其谐振带宽内的某一固定波长点的光功率变化,以检测光纤光栅弯曲程度,进而实现对振动信号的检测。

传感器中 ExTFG 自由端作为悬臂梁,当振动频率接近固有频率时,发生共振,光纤悬臂梁弯曲振动固有频率表达式为^[15]

$$f = \frac{(\beta_j l)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EJ}{\rho S l^4}}, \quad (7)$$

式中: $\beta_j l$ 为悬臂梁弯曲振动特征方程的解($\beta_1 l \approx 1.875, \beta_2 l \approx 4.694$); $j = 1, 2$ 为光纤悬臂梁振动模式的阶数,此处模式是指机械结构的固有振动特性,悬臂梁的每个振动模式都有特定的固有频率和模式振型。根据(7)式,相对于其他参数而言,作为悬臂梁的光纤长度 l 的变化对传感器固有频率的影响最大,同时也是可以调节的参数。

3 仿真分析

为了获取振动过程中的悬臂式 ExTFG 的振动情况,利用 ANSYS 有限元分析对其模式进行分析,以获得该光纤的固有频率及模式振型。仿真中,所采用的光纤杨氏模量 $E = 73 \text{ GPa}$,密度 $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\sigma = 0.17$,标准单模光纤直径为 $125 \mu\text{m}$,光纤长度 l 分别为 $3.8, 2.9, 2.7 \text{ cm}$ 。在仿真中,约束梁一端的所有自由度,另一端自由。图 2 表示长度 $l = 3.8 \text{ cm}$ 的光纤悬臂梁在 y 方向振动的前 2 阶模式振型,可见,其一阶模式振型的固有频率仿真结果为 70.27 Hz ,二阶模式振型的固有频率仿真结果为 440.37 Hz 。作为对比,使用(7)式对前 2 阶模式振型的固有频率进行理论计算,表 1 列出

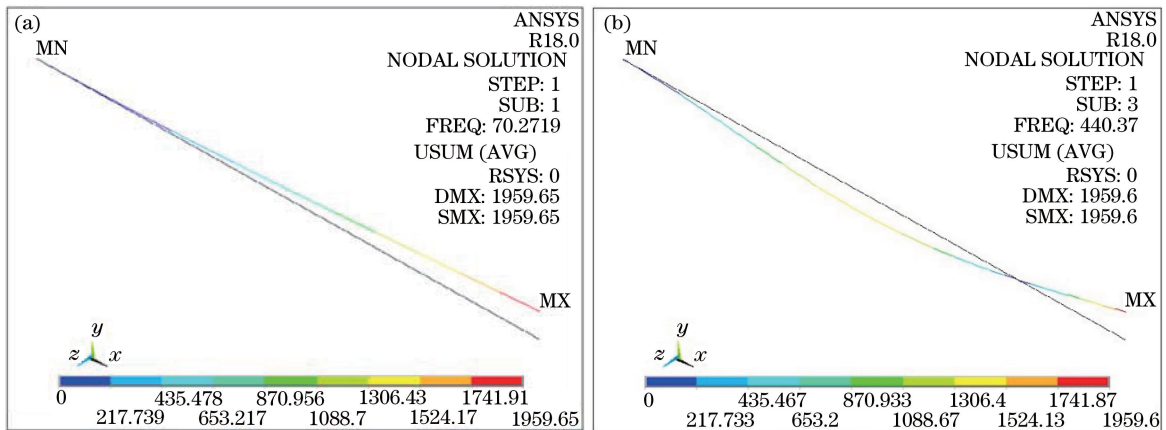


图 2 基于 ANSYS 有限元分析的悬臂式 ExTFG 的模式分析图。(a)一阶模式;(b)二阶模式
Fig. 2 Modal analysis diagrams of cantilever ExTFG based on ANSYS finite element analysis.

(a) First-order vibration mode; (b) second-order vibration mode

表 1 前二阶振动模态的固有频率仿真结果与理论值比较

Table 1 Comparison of simulation results and theoretical values of natural frequencies for first-order and second-order vibration modes

| Length /cm | First-order natural frequency /Hz | | Second-order natural frequency /Hz | |
|------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| | Simulation result | Calculated value | Simulation result | Calculated value |
| 3.8 | 70.27 | 69.79 | 440.37 | 437.36 |
| 2.9 | 120.66 | 119.83 | 756.09 | 750.95 |
| 2.7 | 139.19 | 138.24 | 872.24 | 866.32 |

光纤长度 l 分别为 3.8, 2.9, 2.7 cm 的仿真分析结果和理论计算结果, 通过比较可知, 两者基本吻合, 从而验证了该传感器的理论模型的可靠性; 而两者在数值上出现微小差别 ($<1\%$) 的原因: 一是理论计算过程中采用了近似保留小数点后两位的方式; 二是仿真中有限单元法的逼近过程会产生误差。

为进一步分析传感器在稳态受迫振动过程中光纤振动幅度对频率的响应, 对所建立的模型施加幅值为 $2g$ ($g=9.8 \text{ m/s}^2$) 的加速度。通过仿真分析在激振频率下光纤光栅节点在 y 方向的位移与频率的关系, $L=3.8, 2.9, 2.7 \text{ cm}$ 的光纤光栅的中心点分别对应 79, 103, 111 号节点, 总节点数为 201。图 3 显示了在前二阶模态振型下, 三种不同长度光纤光栅节点的位移与频率的关系, 从图中可知, 光纤光栅节点达到最大幅值时, 激振频率与传感器固有频率相同, 即光纤光栅弯曲程度达到最大。

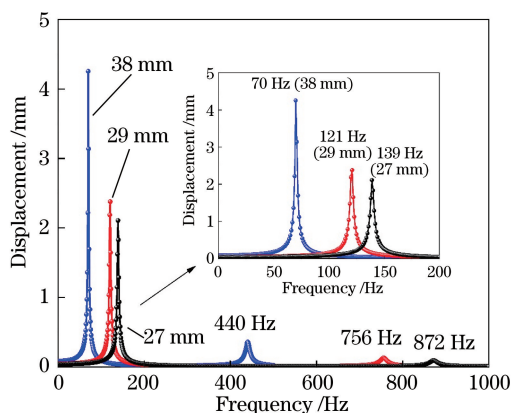


图 3 不同长度的 ExTFG 传感器的前二阶振型频率响应(插图为频率响应局部放大图)

Fig. 3 Frequency response of first-order and second-order vibration modes of ExTFG sensor with different lengths (inset is enlarged view of frequency response)

4 实验与讨论

4.1 传感器制作及实验系统

反射型 ExTFG 的光路原理如图 4(a) 所示, 将

银膜涂敷在光纤端面作为反射镜, 其目的是将耦合的光信号反射回纤芯中, 以便实现对反射光的探测。所设计的三种传感器的光纤固定端到 ExTFG 栅区的长度为 1 cm, 而从 ExTFG 起始端到光纤镀银膜端面的距离分别为 1.7, 1.9, 2.8 cm, 即整个 ExTFG 悬臂梁传感器的长度分别为 2.7, 2.9, 3.8 cm。实验中采用工艺简单、成本低的化学镀膜法进行光纤端面镀银, 将硝酸银 (AgNO_3) 溶液 (质量分数为 0.017 g/mL, 体积为 640 μL) 和氢氧化钾 (KOH) 溶液 (质量分数为 0.0448 g/mL, 体积为 440 μL) 在试管中混合, 直至出现沉淀物氧化银 (Ag_2O), 再加入质量分数为 30% 的一水合氨 ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 溶液并搅拌至沉淀溶解, 将端面切平的光纤垂直放入银镜溶液中, 然后将配制的葡萄糖 (右旋糖) 溶液 (质量分数为 0.045 g/mL, 体积为 64 μL) 滴入试管中, 最后静置 (不能晃动, 否则生成黑色沉淀, 导致镀银失败) 约 30 min 后取出光纤, 并将其在空气中干燥。通过以上步骤后, 光纤端面便会附着一层银膜。所制作的反射型 ExTFG 的偏振相关光谱图如图 4(b) 所示, 其光谱的偏振相关特性与透射式 ExTFG 的相同, 但是由于包层模的反射光经过二次耦合重新返回纤芯, 因此存在能量损失, 导致谐振谱功率整体下移。

反射型 ExTFG 悬臂梁振动传感系统原理如图 5(a) 所示, 可调谐激光光源提供窄线宽激光 (线宽 $<100 \text{ kHz}$), 其输出波长调节为 ExTFG 的 TE 模或 TM 模的谐振峰 3 dB 波长点, 光经过隔离器、起偏器、偏振控制器 (PC)、光纤环形器到达反射型 ExTFG。图 5(b) 为振动传感区域, 利用光纤旋转器夹持反射型 ExTFG 一端, 另一端为自由端, 并将其固定于便携式振动传感器校准仪 (型号: ECS-9102P) 上。最后, 通过光纤环形器将调制后的光信号经光电转换后在示波器上实时显示。机械可调节衰减器 (VOA) 可使输出信号的光功率保持在光电探测器 (PD) 的线性工作范围内。

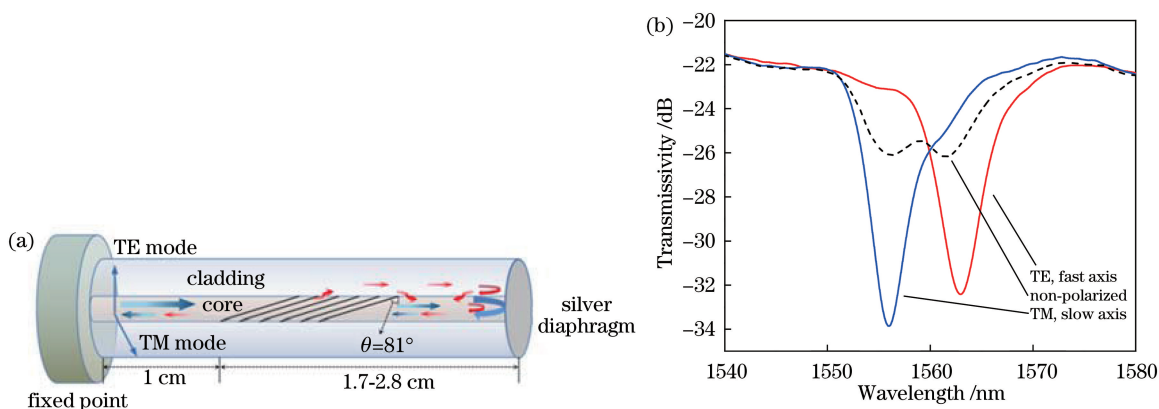


图 4 反射型 ExTFG 的光路原理图和反射型 ExTFG 在 C+L 波段的偏振相关光谱图。(a)反射型 ExTFG 的光路原理图；(b)反射型 ExTFG 在 C+L 波段的偏振相关光谱图

Fig. 4 Light path diagram of reflective ExTFG, and polarization dependence spectrum of reflective ExTFG at C+L band.
(a) Light path diagram of reflective ExTFG; (b) polarization dependence spectrum of reflective ExTFG at C+L band

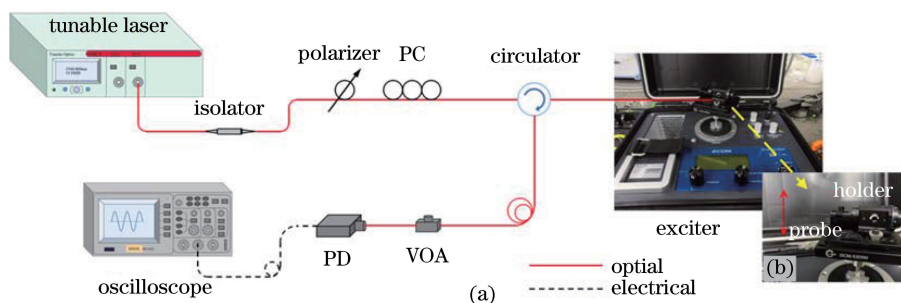


图 5 振动传感系统示意图以及 ExTFG 传感探头放大图。(a)振动传感系统示意图；(b) ExTFG 传感探头放大图
Fig. 5 Schematic of vibration sensing system and magnified view of ExTFG sensing probe.
(a) Schematic of vibration sensing system; (b) magnified view of ExTFG sensing probe

4.2 幅频响应测试

为了获取传感器的幅频响应特性,采用本课题组之前研究的优化方案^[11],即利用 ExTFG 的 TE 模和 TM 模谐振峰 3 dB 波长点进行振动检测,振动校准仪提供输出信号频率为 35~200 Hz、加速度为 2g 的激励信号,分别对三种不同长度(L = 3.8, 2.9, 2.7 cm)的悬臂梁进行振动传感测试。

图 6(a)和(b)分别为反射型 ExTFG 传感器在 TE 模和 TM 模谐振峰 3 dB 点的频率响应曲线。由图可见,L = 3.8, 2.9, 2.7 cm 的传感器的一阶固有频率分别为 68, 115, 135 Hz。与表 1 的理论仿真结果相比,相对误差分别为 3.23%、4.69% 和 3.01%,产生误差的主要原因是光纤自由端面镀有银膜,增加了其尾端质量^[14]。当振动频率接近固

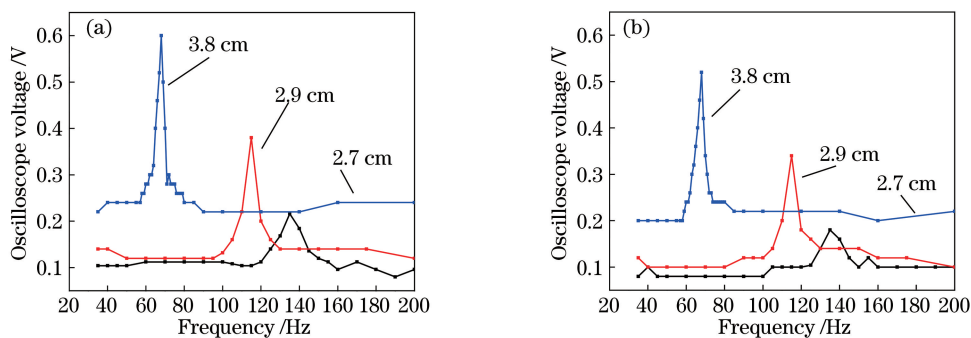


图 6 一阶振型下不同长度传感器的幅频响应。(a) TE 模式；(b) TM 模式
Fig. 6 Amplitude-frequency response of sensor with different lengths at first-order vibration mode.
(a) TE mode; (b) TM mode

有频率时,传感器输出幅值达到最大,并且随传感器长度的减小,最大加速度灵敏度减小。振动加速度灵敏度计算式^[10]为

$$S = V/a, \quad (8)$$

式中: V 是示波器的输出电压幅值; a 是传感器加速度。由(8)式可得到反射型 ExTFG 传感器的最大加速度灵敏度, $L=3.8, 2.9, 2.7$ cm 时,TE 模的最大加速度灵敏度分别为 0.3, 0.19, 0.103 V/g, TM 模的最大加速度灵敏度分别为 0.26, 0.17, 0.09 V/g。相比于 L 为 2.9 cm 和 2.7 cm 两种长度, $L=3.8$ cm 的反射型 ExTFG 传感器的最大加速度灵敏度最大,该实验结果与仿真分析结论(图 3 插图)一致。振动频率接近传感器固有频率时,在同一振动加速度下,传感器长度越短,光纤光栅振动幅值越小,即光纤光栅弯曲程度越小,故传感器最大加速度灵敏度随传感器长度 L 的减小而降低。同时,本文 $L=3.8$ cm 的反射型 ExTFG 的最大加速度灵敏度约为基于等强度悬臂梁的透射式 ExTFG 振动传感器^[11]的最大加速度灵敏度的 2.5 倍,其主要原因是:反射型 ExTFG 传感器直接采用光纤光栅作为敏感单元,不受其他媒介制约,从而提升了振动加速度灵敏度。

此外,进一步研究了在二阶振型下的频率响应,图 7 为 $L=3.8$ cm 的反射型 ExTFG 二阶振型下的频率响应实验结果,该实验结果与仿真分析结论(图 3)吻合,同时也证实了在相同条件下,TE 模比 TM 模具有更高的振动响应灵敏度,这是因为同一包层

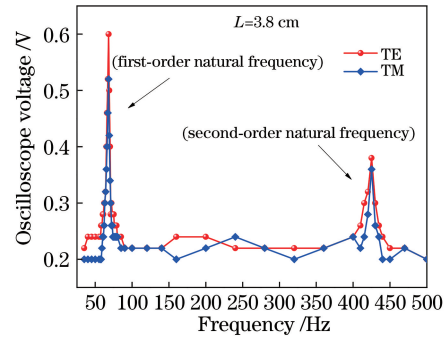


图 7 反射型 ExTFG(长度为 3.8 cm)的前二阶振型幅频响应

Fig. 7 Amplitude-frequency response of first-order and second-order vibration modes of reflective ExTFG with 3.8 cm length

模的 TE 模比 TM 模具有较高的弯曲应变灵敏度^[11]。

4.3 输入-输出特性测试

为测试传感器的加速度响应特性,实验中将传感器校准仪的激励保持在某一固定频率,在 1~5g 范围内调节加速度变化量。测试了 $L=2.9$ cm 的反射型 ExTFG 传感器(一阶固有频率实验值为 115 Hz)的响应特性。如图 8 所示,通过拟合 105, 115, 125 Hz 振动频率下传感器输出幅值 V_{P-P} 与振动加速度之间的关系,得到传感器 TE 模和 TM 模在谐振峰 3 dB 点的输出幅值 V_{P-P} 与输入加速度 g 呈良好的线性关系,当振动频率接近传感器固有频率时,其电压输出幅值明显增大,这主要是因为此时悬臂梁振动幅度达到最大。

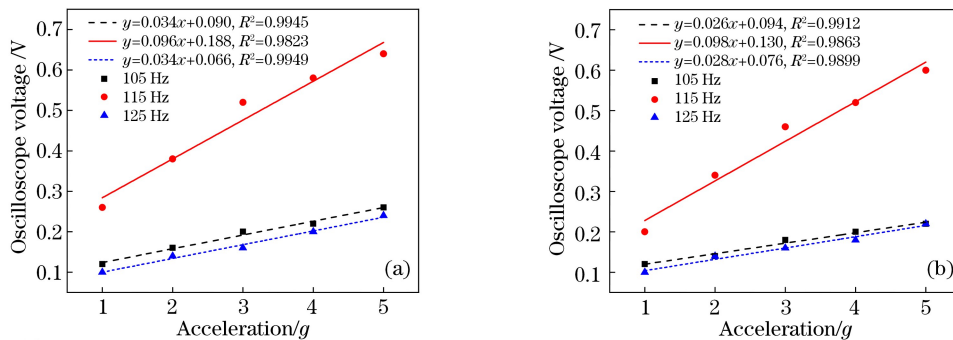


图 8 反射型 ExTFG(长度为 2.9 cm)在不同频率下(105, 115, 125 Hz)输出幅值对输入加速度的响应特性。

(a) TE 模;(b) TM 模

Fig. 8 Response of output amplitude of reflective ExTFG versus input acceleration at different frequencies of 105, 115, and 125 Hz. (a) TE mode; (b) TM mode

4.4 信噪比分析

为进一步分析传感器的传感特性,对 $L=2.9$ cm 的反射型 ExTFG 的 TE 模和 TM 模谐振峰 3 dB 点输出信号(频率分别为 105 Hz 和

115 Hz)进行快速傅里叶变换(FFT),结果如图 9 所示。可见,当振动信号接近固有频率(115 Hz)时,TE 模和 TM 模都会出现明显的倍频信号,而非谐振频率点(105 Hz)倍频分量相对很低。这是

因为在固有频率(115 Hz)处,传感器的振动幅度最大,因此各阶倍频信号更容易被激发出来。此外,图9中结果表明,TE模的信噪比(SNR)分别为49.36 dB(115 Hz)和44.91 dB(105 Hz),TM模的SNR分别为48.81 dB(115 Hz)和42.43 dB

(105 Hz),TE模与TM模的SNR相当。但是,从图9中插图の時域信号可见,传感器的输出噪声较大,这是因为系统基于光强度解调方式,振动时ExTFG的松动及其他外界干扰因素对光强检测的干扰影响较大。

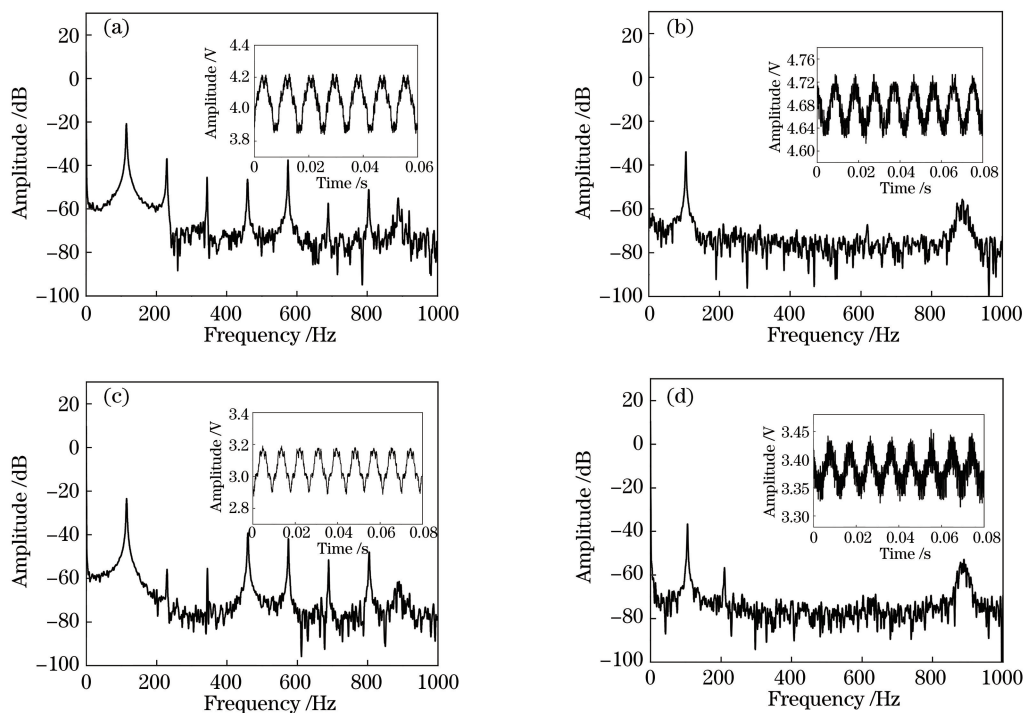


图9 长度 $L=2.9$ cm的反射型ExTFG传感器特性。(a) TE模谐振峰3 dB点在115 Hz的频域响应图;(b) TE模谐振峰3 dB点在105 Hz的频域响应图;(c) TM模谐振峰3 dB点在115 Hz的频域响应图;(d) TM模谐振峰3 dB点在105 Hz的频域响应图(插图为对应的时域响应图)

Fig. 9 Sensing characteristics of reflective ExTFG when $L=2.9$ cm. (a) Frequency domain response diagram of 3 dB resonant peak at 115 Hz for TE mode; (b) frequency domain response diagram of 3 dB resonant peak at 105 Hz for TE mode; (c) frequency domain response diagram of 3 dB resonant peak at 115 Hz for TM mode; (d) frequency domain response diagram of 3 dB resonant peak at 105 Hz for TM mode

5 结 论

提出并研究了一种反射型ExTFG悬臂梁振动传感器,通过对传感器振动传感特性的理论及实验研究,发现可通过改变传感器自由端的长度调节传感器的谐振频率和幅频响应;同时,该传感器具有良好的线性响应特性和动态响应特性,相比于透射式的ExTFG等强度悬臂梁振动传感器而言,其最大加速度灵敏度提高了约2.5倍;此外,该传感器结构简单、体积小、灵敏度高,能够有效避免温度串扰,并且解调方式简单、成本低,适用于工程领域的低频振动检测。

参 考 文 献

[1] Zhang D S, Li W, Guo D, et al. Real-time monitor

system of bridge-cable force based on FBG vibration sensor and its application [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(12): 2720-2723.
张东生, 李微, 郭丹, 等. 基于光纤光栅振动传感器的桥梁索力实时监测[J]. 传感技术学报, 2007, 20(12): 2720-2723.

[2] Xue J F, Song H, Wang W J. Application of optical fiber grating in health monitoring for aircraft structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(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, 55(22): 45-49.

[3] Li K, Chan T H T, Yau M H, et al. Experimental verification of the modified spring-mass theory of fiber Bragg grating accelerometers using transverse forces[J]. Applied Optics, 2014, 53(6): 1200-1211.

- [4] Feng D Y, Qiao X G, Yang H Z, et al. A fiber Bragg grating accelerometer based on a hybridization of cantilever beam[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3): 1532-1537.
- [5] Parida O P, Thomas J, Nayak J, et al. Double-L cantilever-based fiber Bragg grating accelerometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11247-11254.
- [6] Guo T, Shao L Y, Tam H Y, et al. Tilted fiber grating accelerometer incorporating an abrupt biconical taper for cladding to core recoupling [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20651-20660.
- [7] Rong Q Z, Qiao X G, Guo T, et al. Orientation-dependent fiber-optic accelerometer based on grating inscription over fiber cladding [J]. Optics Letters, 2014, 39(23): 6616-6619.
- [8] Cai S S, Nan Y G, Xie W P, et al. Fiber-optic accelerometer using tilted grating inscribed in depressed cladding fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2171-2174.
- [9] Zhou K M, Zhang L, Chen X F, et al. Optic sensors of high refractive-index responsivity and low thermal cross sensitivity that use fiber Bragg gratings of >80 degrees tilted structures [J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1193-1195.
- [10] Luo B B, Yang W M, Hu X Y, et al. Study on vibration sensing performance of an equal strength cantilever beam based on an excessively tilted fiber grating [J]. Applied Optics, 2018, 57(9): 2128-2134.
- [11] Luo B B, Xie L, Wang Y J, et al. Performance optimization of excessively tilted fiber grating cantilever beam vibration sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0806006.
罗彬彬, 谢浪, 王亚杰, 等. 极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感器性能优化 [J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0806006.
- [12] Xie L, Luo B B, Zhao M F, et al. Orientation-dependent optic-fiber accelerometer based on excessively tilted fiber grating [J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 125-128.
- [13] Yan Z J, Wang H S, Wang C L, et al. Theoretical and experimental analysis of excessively tilted fiber gratings [J]. Optics Express, 2016, 24(11): 12107-12115.
- [14] Wu X Q, Wang X, Li S L, et al. Cantilever fiber-optic accelerometer based on modal interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1632-1635.
- [15] Hu H Y. Mechanical vibration basics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 110-114.
胡海岩. 机械振动基础 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 110-114.