

三分量光纤布喇格光栅地震检波器

王梓琳¹,樊伟¹,高宏¹,乔学光^{2*}

(1.西安石油大学 理学院,西安 710065;2.西北大学 物理学院,西安 710069)

摘要:为了实现地震波的三维采集,设计了一种三分量光纤布喇格光栅(FBG)地震检波器,理论推导了该检波器的固有频率和灵敏度,先后使用 Matlab 软件、COMSOL 软件对检波器进行结构参数优化和模态分析,测试了检波器的幅频响应、横向抗干扰性能和灵敏度响应。实验结果表明:检波器的平坦区为 0.6~50 Hz;一阶、二阶和三阶的固有频率分别为 56 Hz、59 Hz 和 63 Hz,x、y 和 z 方向上灵敏度分别为 218.22 pm/g、284.76 pm/g 和 249.67 pm/g;每个方向上的横向抗干扰度均小于 5%,可实现低频信号的三分量检测。

关键词:光纤布喇格光栅;悬臂梁;三分量;地震检波器

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)03-0047-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Three component fiber Bragg grating geophone

WANG Zilin¹, FAN Wei¹, GAO Hong¹, QIAO Xueguang^{2*}

(School of Science, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China; 2. School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: In order to achieve three-dimensional seismic wave, a three component fiber Bragg grating (FBG) geophone is designed, and the natural frequency and sensitivity of the seismometer are theoretically deduced. Matlab software and COMSOL software are used to optimize the structure parameters and analyze the modal of the seismometer. The amplitude-frequency response, transverse anti-interference performance and sensitivity response of the geophone are tested. The experimental results show that the flat region of geophone is 0.6~50 Hz. The natural frequencies of the first, second and third order are 56 Hz, 59 Hz and 63 Hz, and the sensitivities in x, y and z directions are 218.22 pm/g, 284.76 pm/g and 249.67 pm/g, respectively. The transverse anti-interference degree in each direction is less than 5%, and the three component detection of low-frequency signal can be realized.

Key words: fiber Bragg grating, cantilever beam, three component, geophone

0 引言

近年来,地震勘探技术越来越成熟^[1],促进了地震检波器的飞速发展。过去的井中地震勘探技术多依赖于电类检波器^[2-5],这类检波器在实际应用中存在易受电磁干扰、不耐高温等问题。与电类检波器相比,光纤

收稿日期:2022-03-29。

基金项目:国家重大科研仪器研制项目(61927812)资助;国家自然科学基金委重点项目(61735014)资助;西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划项目(编号:YCS21112079)资助。

作者简介:王梓琳(1996—),女,硕士研究生,本科就读于榆林学院测控技术与仪器专业,现就读于西安石油大学物理电子学专业,主要研究方向为光纤布喇格光栅振动传感技术,已发表相关 SCI 论文 1 篇,获得发明专利 2 项。

***通信作者:**乔学光(1955—),男,理学博士,教授,主要从事光电子技术、光纤通信与传感、油气田光纤测井、物探和油气管线检测等领域的教学与研究工作。



布喇格光栅(FBG)类地震检波器具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高、耐腐蚀、耐高温、安全可靠和可多路复用^[6-13]等优点,已逐渐成为现有地震检波器中的主流检波器。

FBG 地震检波传感器按信息采集维度大致分为单分量 FBG 地震检波器^[14-19]和多分量 FBG 地震检波器^[20-21]。由于单分量 FBG 地震检波器采集信息单一,难以满足技术需求,因此现在研究较多的是采集数据丰富、采集结果更立体的三分量 FBG 地震检波器(多分量 FBG 检波器中的一种)。

2005 年,曾楠等人^[22]提出一种顺变柱体式 FBG 加速度传感器,由 1 个中心轴、2 个环形顺变柱体组成,其中 2 根传感光纤分别缠绕在柱体上形成推挽式结构。该传感器的固有频率为 1100 Hz,灵敏度为 37 pm/g,但这种推挽式传感器结构对光纤缠绕的对称性要求极

高。2017年,LI T等人^[23]提出一种膜片式FBG地震检波器,2根FBG沿膜片两侧平行对称排列,该检波器的固有频率为300 Hz,在平坦区(10~150 Hz)内的灵敏度只有31.25 pm/g。2021年,JIA Z A等人^[24]提出一种基于FBG的二维悬臂梁振动传感器,将一个双FBG粘贴在基座的两端与悬臂梁的中轴之间,质量块在有振动信号时带动光栅发生形变,从而检测到FBG的波长变化,实现振动测量。但是,该检波器在振动的 x 、 y 方向上的固有频率分别为505 Hz、177 Hz,灵敏度分别为125.85 pm/g、82.32 pm/g,采集的信息却是二维信息。因此,如何在提高检波器灵敏度的同时,实现多分量采集是地震检波器今后研究的重点领域。

本文提出一种三分量FBG地震检波器,该检波器在传统的单分量地震检波器上,将3个悬臂梁正交放置在基座上,实现地震波信息的三维采集。

1 结构设计和工作原理

三分量FBG地震检波器结构如图1所示,主体框架由316L不锈钢一体化加工制作而成,包括基座、悬臂梁、质量块和3个FBG。其中,3个FBG沿悬臂梁中轴线被502胶封装在检波器基座与质量块之间。

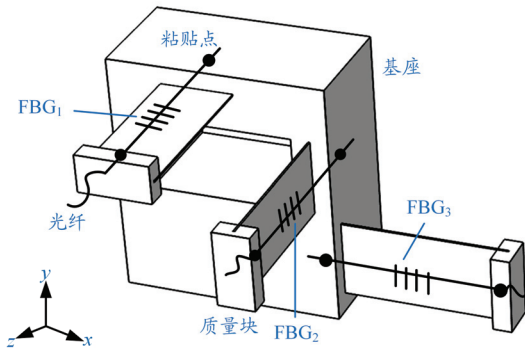


图1 三分量FBG地震检波器结构

检波器工作原理为:首先,将检波器固定在振动台上,当检波器受到不同方向上的振动信号时,质量块在惯性的作用下迫使悬臂梁的自由端产生运动,带动FBG发生应变;然后,FBG被拉长或者压缩,FBG的中心波长也会因此而发生改变,直到振动信号停止,FBG恢复至初始状态。所以,只需测量FBG中心波长的改变量,就可以获得外界环境的振动信号和振动方向。

2 理论分析

2.1 固有频率分析

检波器的振动模型如图2所示,当检波器处于静止状态时,质量块与水平线产生的位移为 y_0 ,此时光

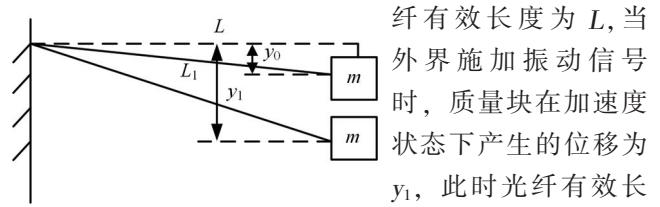


图2 检波器振动模型

纤有效长度为 L ,当外界施加振动信号时,质量块在加速度状态下产生的位移为 y_1 ,此时光纤有效长度为 L_1 , m 为质量块的质量。

当检波器受到竖直 y 方向上的振动信号时,根据牛顿第二定律可得振动加速度为

$$a = \frac{K_{\text{eff}} \Delta L}{M_{\text{eff}}} \quad (1)$$

其中, M_{eff} 为检波器的等效质量, K_{eff} 为检波器的等效刚度, ΔL 为FBG的变化量。

根据梁的质量分布,检波器的等效质量为

$$M_{\text{eff}} = m + 0.45m_1 \quad (2)$$

其中, m_1 为悬臂梁的总质量。

由于检波器的3个悬臂梁和质量块尺寸大小一样,所以三分量FBG地震检波器的一阶、二阶和三阶固有频率相等,其计算公式为

$$f_1 = f_2 = f_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{eff}}}{M_{\text{eff}}}} \quad (3)$$

2.2 灵敏度分析

FBG的表面轴向应变 ε_i 与横向位移的关系如下:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sqrt{L^2 + y_0^2} - L}{L} \quad (4)$$

当 $i=1$ 时,表示有振动加速度时FBG的应变;当 $i=0$ 时,表示静止状态下FBG的应变。将FBG固定在悬臂梁之上的基座与质量块之间,此时FBG在基座与质量块两点间固定时的轴向应变 ε 与FBG在悬臂梁表面时的轴向应变 ε_i 之间的关系如下:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_i} = \frac{\frac{h}{2}}{\frac{h}{2} + t} \quad (5)$$

其中, t 为FBG粘贴后与悬臂梁之间的垂直距离。

当振动频率远远小于检波器的固有频率时,悬臂梁的自由端位移为

$$y_1 - y_0 = \frac{a}{(2\pi f)^2} = \left(\sqrt{\varepsilon_1^2 + 2\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_0^2 + 2\varepsilon_0} \right) L \quad (6)$$

根据式(2)~式(6)可得

$$\Delta \varepsilon = \frac{4\beta M_{\text{eff}} \sqrt{\varepsilon_0^2 + 2\varepsilon_0}}{bh^3 EL (\varepsilon_0 + 1)} a \quad (7)$$

其中, $\Delta \varepsilon$ 为光纤的应变变化量,且 $\Delta \varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_0$ 。根据FBG原理,FBG中心波长漂移量为

$$\Delta\lambda_B=\lambda_B(1-P_e)\Delta\varepsilon \quad (8)$$

其中, λ_B 是 FBG 的中心波长, $B=1,2,3$; P_e 是光纤的有效弹光系数。由于三分量 FBG 地震检波器的 3 个悬臂梁和质量块尺寸大小一样, 因此其一阶、二阶和三阶灵敏度计算公式为

$$S_1=S_2=S_3=\frac{\Delta\lambda_B}{a}=\frac{4l^3\lambda_B(1-P_e)M_{eff}\sqrt{\varepsilon_0+2\varepsilon_0}}{bh^3EL(\varepsilon_0+1)} \quad (9)$$

3 仿真和实验结果分析

3.1 参数优化

在制作三分量 FBG 地震检波器实物之前, 本文采用 Matlab 软件仿真确定检波器的各个参数, 以达到优化检波器结构的目的, 得出检波器优化后的结构和材料参数如表 1 所示。

表 1 三分量 FBG 地震检波器参数

参数	值
悬臂梁长度 l/mm	45
悬臂梁宽度 b/mm	20
悬臂梁厚度 h/mm	0.5
光纤有效长度 L/mm	50
封装前 FBG 初始波长 λ_1/nm	1550.082
封装前 FBG 初始波长 λ_2/nm	1550.141
封装前 FBG 初始波长 λ_3/nm	1550.253
封装后 FBG 初始波长 λ_1/nm	1551.334
封装后 FBG 初始波长 λ_2/nm	1551.125
封装后 FBG 初始波长 λ_3/nm	1551.568
质量块质量 m/g	7.5
悬臂梁杨氏模量 E/GPa	210
光纤的杨氏模量 E/GPa	73
光纤的横截面积 A/m^2	1.227×10^{-8}

3.2 固有频率仿真

本文按照表 1 使用 COMSOL 软件对三分量 FBG 地震检波器模型进行模态分析, 得到检波器的一阶、二阶和三阶振型图如图 3 所示。悬臂梁分别朝着 x 、 y 和 z 方向往复运动, 且 3 个悬臂梁所设置的尺寸和材料参数、固定约束以及附加载荷均一样, 因此仿真模拟得到一阶、二阶和三阶的固有频率相等, 为 53.9 Hz, 与根据式 (3) 计算的理论值 (53.89 Hz) 接近, 证明仿真结果可靠。

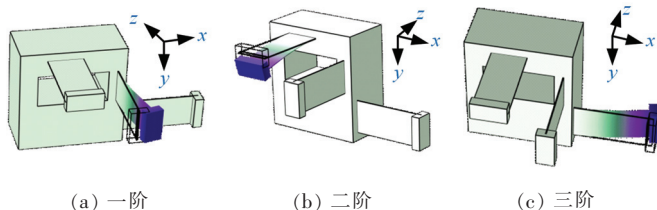


图 3 一阶、二阶和三阶检波器振型图

3.3 实验验证

三分量 FBG 地震检波器实验示意图如图 4 所示。该实验系统由计算机、FBG 动态解调器 (微光 Optics, sm130)、气浮振动器 (ETZ-186-400)、信号发生器 (IM1208C) 和功率放大器 (FDD-1) 组成。检波器被固定在空气浮动振动平台上; 动态解调器由自发发射 (ASE) 激光源和解调器组成, 其波长范围和扫描频率分别为 1510~1590 nm 和 1 kHz; 计算机记录检波器的中心波长。

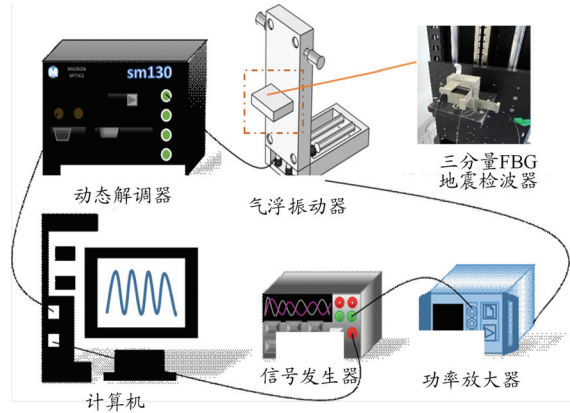


图 4 检波器实验示意图

3.3.1 幅频响应测试

为了测量检波器 3 个方向上的固有频率, 首先, 将检波器分别按照 x 、 y 和 z 方向固定在振动台上; 然后, 将加速度固定为 0.1 g, 振动频率从 0.6 Hz 开始, 测量步长为 5 Hz, 当接近固有频率时测量步长变为 1 Hz; 最后, 将所采集到的数据进行数据处理后得到检波器的幅频响应测试曲线如图 5 所示。可以看出, 检波器的一阶、二阶和三阶固有频率分别为 56 Hz、59 Hz 和 63 Hz; 在 0.6~50 Hz 范围, x 、 y 和 z 这 3 个方向都有较好的频率平坦响应, 即传感器的工作频率在 50 Hz 以下。

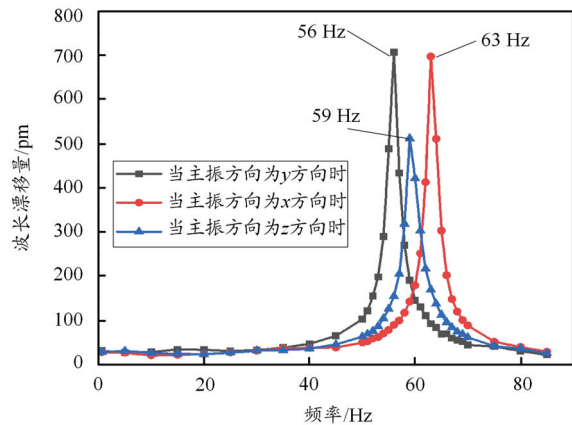


图 5 检波器在 x 、 y 和 z 方向上的幅频响应测试曲线

3.3.2 横向抗干扰测试

检波器的横向抗干扰能力是辨别振动信号方向来源时的重要指标。为了验证检波器的横向抗干扰能力,将检波器按照 x 、 y 和 z 工作方向放置在工作台上进行实验,分别得到了这3个方向上的工作频率范围如图6所示。由于检波器的工作频带只在其平坦区范围内,于是,本文选取范围中20 Hz这个工作频段,在3个方向上分别施加0.1 g加速度后得到图7所示的横向抗干扰曲线。测试表明,无论是在哪个方向工作,

其余2个方向上的横向干扰度均小于5%。因此,该检波器横向抗干扰能力良好,能识别基本的振动方向。

3.3.3 灵敏度响应测试

为了测量检波器的灵敏度,实验时将频率固定在30 Hz处,以步长为0.1 g调节加速度幅值从0.1 g到1 g,记录在每一种加速度下所对应的波长漂移量。本文进行了3次重复实验,得到检波器在 x 、 y 和 z 方向上的灵敏度曲线如图8所示。可以看出,该检波器在 x 、 y 和 z 方向上的灵敏度分别为218.22 pm/g、284.76 pm/g和

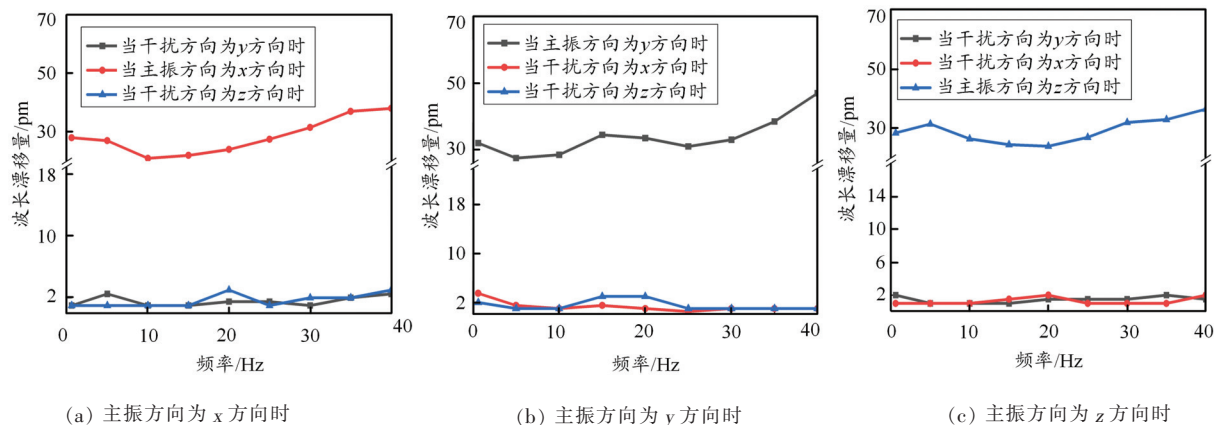


图6 检波器在 x 、 y 和 z 方向上的工作频率范围

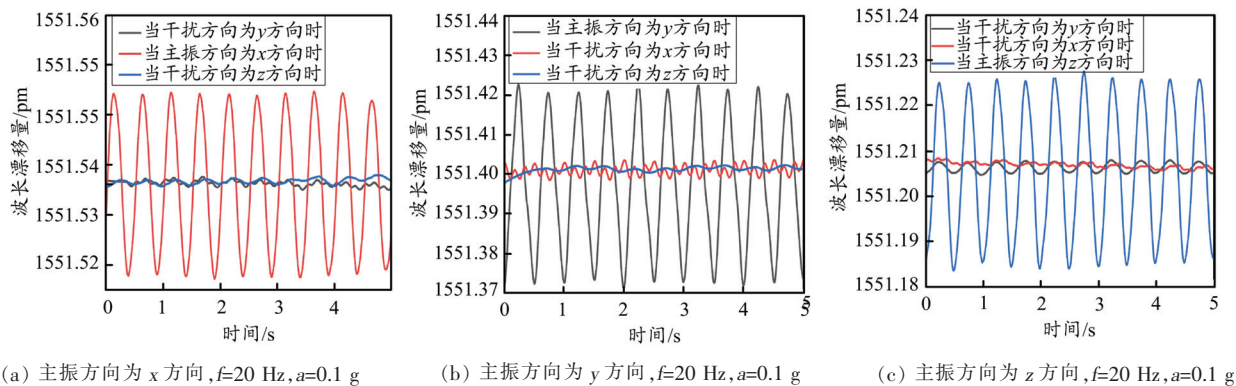


图7 检波器在 x 、 y 和 z 方向上的检波器横向抗干扰测试曲线

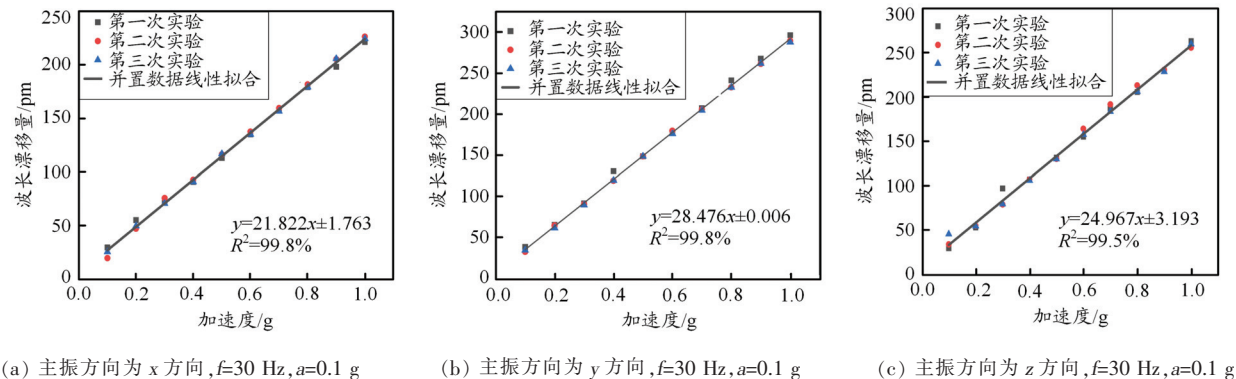


图8 检波器在 x 、 y 和 z 方向上的灵敏度测试曲线

249.67 pm/g,波长漂移量与加速度具有非常好的线性关系,平均线性度高达 99.8%。这说明该检波器重复性能良好且响应灵敏。

4 结束语

本文将结构简单、性能稳定的悬臂梁正交放置,设计了一种三分量 FBG 地震检波器,通过理论计算与仿真确定了检波器的优化结构参数,使该结构不仅能良好地完成地震波的三分量采集,而且保证了该检波器拥有较好的灵敏度响应。实验结果表明:检波器的平坦区为 0.6~50 Hz,一阶、二阶和三阶固有频率分别为 56 Hz、59 Hz 和 63 Hz,在 x 、 y 和 z 方向上的灵敏度分别为 218.22 pm/g、284.76 pm/g 和 249.67 pm/g,横向干扰度小于 5%,实验结果与理论值接近。与传统的单分量检波器相比,三分量 FBG 地震检波器从检测精度、实际应用价值等方面都具有更深远的研究意义,为地震探测提供了新的思路。

参考文献:

- [1] PEI X D. Signal acquisition method for 3D seismic exploration in high density coal mining area[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(15): 17-40.
- [2] 王怀秀,仇帅,朱国维,等. 基于 MEMS 与 LwIP 的煤矿三分量地震数据采集系统[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 8-14.
- [3] 王全全,冯博,朱辉. 基于 STM32 和 LWIP 的井场传感器远程监控系统[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(4): 13-14.
- [4] 李光磊,王金波,陈连宏,等. 基于力平衡负反馈的电化学地震检波器[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(7): 89-92.
- [5] 冯文亮,李怀良,庾先国,等. 轻便小型压电陶瓷震源系统设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 95-100.
- [6] GUO T, ZHANG T X, LI Y Z, et al. Highly sensitive FBG seismometer with a 3D printed hexagonal configuration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 39: 1-1.
- [7] DENG M, ZHANG T H, NAN H X, et al. Enhanced sensitivity of optical fiber vibration sensor based on radio-frequency Michelson interferometer[J]. Optics Letters, 2021, 46(24): 6079-6082.
- [8] ANDERSEN J K, PAULSSON B N P. New fiber optic geophone improves 4D seismic[EB/OL]. [2022-03-29]. https://www.researchgate.net/publication/296520005_New_fiber_optic_geophone_improves_4D_seismic.
- [9] SUN Z H, YANG Y Y, ZHANG X C, et al. Laboratory performance test of downhole fiber laser geophone[C]//SPIE. Proceedings of seventh symposium on novel photoelectronic detection technology and applications. Kunming: SPIE, 2021: 11763-1-11763-3.
- [10] 叶海峰,钱勇,刘亚东,等. 基于光纤 Bragg 光栅的局放检测技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 225-230.
- [11] 杜勇,司金海,陈涛,等. 准分布式光纤布拉格光栅高温传感器[J]. 激光与电子学进展, 2016, 53: 100606-1-100606-8.
- [12] 马国明,周洪扬,刘云鹏,等. 变压器局部放电光纤超声检测技术及其复用方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1768-1780.
- [13] MARQUES C A F, BILRO L, KAHN L, et al. Acousto-optic effect in microstructured polymer fiber Bragg gratings: simulation and experimental overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1551-1558.
- [14] NANDINI B, PALAS B, KAMAL D, et al. Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity [J]. Sensors and Actuators A, 2013, 194: 31-39.
- [15] KUN Y, QI J L, ZHUANG D J, et al. Modeling and analysis of a combined stress-vibration fiber Bragg grating sensor[EB/OL]. [2022-03-29]. <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/743>.
- [16] LI T, YUE G T, ZU D Z. A fiber Bragg grating sensing-based micro-vibration sensor and its application[J]. Sensors, 2016, 16(4): 1-14.
- [17] 梁磊,蔡彦璞,戴玉堂,等. 一种基于单一椭圆铰链的 FBG 加速度传感器[J]. 光电子·激光, 2019, 30(3): 234-340.
- [18] 禹大宽,刘钦朋,高宏,等. 基于弹性薄壁管的 FBG 高频加速度检波器[J]. 光通信研究, 2016(3): 50-52.
- [19] 刘文敏,戴玉堂,魏禹. 基于双 FBG 的高灵敏度低频加速度传感器[J]. 光电子·激光, 2021, 32(9): 911-918.
- [20] LI T, TAN Y, ZHOU Z, et al. Pasted type distributed two-dimensional fiber Bragg grating vibration sensor [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(7): 57-59.
- [21] ZHOU R, CHEN F, LI S, et al. Three-dimensional vector accelerometer using a multicore fiber inscribed with three FBGs [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(10): 3244-3250.
- [22] 曾楠,施纯峥,张敏,等. 一种可用于油藏监测的 3 分量光纤加速度传感器[J]. 光电子·激光, 2005, 18(8): 901-905.
- [23] LI T, SHI C, TAN Y, et al. A diaphragm type fiber Bragg grating vibration sensor based on transverse property of optical fiber with temperature compensation[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(4): 1021-1029.
- [24] JIA Z A, ZHAO X F, FAN W, et al. A two-dimensional cantilever beam vibration sensor based on fiber Bragg grating [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61(5): 102447-1-102447-9.