

DOI:10.16136/j.joel.2022.03.0389

光纤光栅加速度传感器高灵敏理论模型研究

刘钦朋^{1,2}, 刘望飞^{1,2*}, 王春芳^{1,2}, 张 蓉¹, 樊 伟¹, 禹大宽¹

(1. 西安石油大学 理学院, 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西省油气井控技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 中石油集团公司测井重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:以提高光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)加速度传感器灵敏度为导向,理论研究增敏机理模型,并建立优化和综合性能评价判据。首先,依据惯性器件工作的机理,建立FBG加速度传感器的通用物理新模型,讨论分析传感器的敏感结构体与FBG的设计方式,研究其灵敏度的响应机理。其次,分析惯性质量、封装光纤长度、敏感结构体刚度和光纤的杨氏模量对灵敏度的影响,探寻敏感结构体刚度的阈值边缘条件,实现其高灵敏度。最后,提出FBG加速度传感器“品质因子”的概念,结合传感器的物理参数的阈值条件,研究品质因子与惯性质量和封装光纤长度的关系。这不仅为FBG加速度传感器综合性能的评判提供可靠的依据,还对传感器的设计与优化具有重要的理论指导意义和实际的应用价值。

关键词:加速度传感器; 理论模型; 高灵敏; 品质因子

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)03-0225-05

Research on high sensitivity theoretical model of fiber Bragg grating acceleration sensor

LIU Qinpeng^{1,2}, LIU Wangfei^{1,2*}, WANG Chunfang^{1,2}, ZHANG Rong¹, FAN Wei¹, YU Dakuan¹

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Well Control Technology, Oil and Gas Resources Optical Fiber Detection Engineering Technology Research Center, College of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Key Laboratory of Well Logging, China National Petroleum Corporation, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: Guided by improving the sensitivity of fiber Bragg grating (FBG) acceleration sensors, the sensitivity enhancement mechanism model is theoretically studied, and evaluation criteria is established for optimization and comprehensive performance. First of all, according to the working mechanism of inertial devices, a new general physical model of FBG acceleration sensor is established, the sensitive structure of the sensor and the design method of FBG are discussed and analyzed, and the response mechanism of its sensitivity is studied. Secondly, we analyze the influence of the inertial mass, the length of the encapsulated fiber, the stiffness of the sensitive structure and the Young's modulus of the fiber on the sensitivity, and explore the threshold edge conditions of the stiffness of the sensitive structure to achieve high sensitivity. Finally, the concept of the "figure of merit" of the FBG acceleration sensor is proposed, combined with the threshold conditions of the sensor's physical parameters, we study the relationship between the figure of merit and the inertial mass and fiber length. This not only provides a reliable basis for the evaluation of the comprehensive performance of the FBG acceleration sensor, but also has important theoretical guiding significance and practical application value for the design and optimization of the sensor.

Key words: acceleration sensor; theoretical model; high sensitivity; figure of merit

* E-mail: bwillwf72@163.com

收稿日期: 2021-06-07 修订日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61735014, 61927812)、陕西省自然科学基金项目(2018JQ6011)、陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17Jsl05)、陕西省教育厅科研计划项目(18JS093)和西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划项目(YCS20111008, YCS20111009)资助项目

1 引言

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 作为一种波长型光纤器件,自 1978 年诞生以来,在光通信和光传感研究方向取得了长足的发展,特别是光传感研究方向在诸多应用领域取得了广泛的关注,主要归因于其独特的优势。与传统的电类传感器相比,具有抗电磁干扰和体积小的优点。与强度型光纤调制型相比,不受光源波动影响,且有利于波分复用。与相位型光纤传感器相比具有结构简单、体积小、利于复用。与偏振型光纤传感器相比具有结构简单、解调容易、复用简便等优势。作为一种波长反射型光纤器件,在温度、压力、应变等准静态领域已取得显著的研究成果,初步实现在航空航天、土木工程、医学生物、电力工业、核工业以及油气储运等领域的检测应用。近年,随着 FBG 技术的发展,FBG 加速度传感器在资源勘测、地球动力学和土木健康监测等领域逐渐引起研究者们的高度关注^[1-3]。FBG 加速度传感器作为一种惯性器件,主要包括弹性结构、惯性质量体、和封装光纤,依据 FBG 的尺度特点,从封装方式上主要分为两点封装和埋入式封装,基于这两种封装方式的加速度传感器设计追求的目标是“一高”、“二低”、“三宽”,即高灵敏、低交叉、低噪声、宽范围、宽频带、宽平坦,其中高灵敏是最为关键的技术指标,因为 FBG 加速度传感器作为检测系统的前端器件,直接地决定信号的拾取成败,所以在 FBG 加速度传感器研究中,增敏技术是极其重要的研究内容。增敏技术主要是通过设计不同结构来实现加速度灵敏度的提高,或者降低频带宽度来实现增敏。目前,比较典型的 FBG 加速度传感器结构有四种,分别为梁结构^[4-6]、膜片结构^[7-9]、柱体结构^[10-12]以及铰链结构^[13,14]。围绕灵敏度增敏和其他参数的优化,梁结构的研究经历单梁、多梁和特殊梁,谐振频率由几十赫兹到几百赫兹,灵敏度由几十皮米发展到 1 296 pm/G^[6]。膜片结构的研究从单膜片^[7]到双膜片^[8,9],封装方式从埋入封装到两点封装,但灵敏度很难大幅度提高,一般限制在 200 pm/G 以下。柱体结构的研究从不同材料入手,经历单柱体结构^[10]、柱体波纹管结构^[11]和顺变柱体结构^[12],其结构设计简单,但灵敏度较难提高。为了进一步提高灵敏度,研究者们提出铰链结构,灵敏度可达 1 000 pm/G^[14]。以上研究表明,通过设计合理的不同结构可以有效地提高灵敏度,关键是增敏的理论依据是什么?

本文以惯性理论为切入点,以提高灵敏度为

目的,结合 FBG 的尺度特点和封装方式,另辟蹊径,淡化加速度传感器的具体结构,建立两点封装 FBG 加速度传感器的通用物理模型,抽象出灵敏度满足的条件,揭示 FBG 加速度传感器增敏机理。通过引入品质因子,为传感器的优化和判定奠定基础,对 FBG 加速度传感器的高灵敏设计具有重要的指导意义。

2 FBG 加速度传感器物理模型

由耦合模理论知 FBG 反射谱的中心波长 λ_B 为^[15]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \tag{1}$$

式中, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为光栅的周期。

当环境的温度变化或受到应力作用时, n_{eff} 和 Λ 被调制,中心波长 λ_B 发生漂移,当仅受到应力作用时,波长相对漂移量为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon, \tag{2}$$

式中, P_e 为有效弹光系数,对于普通的掺锗单模光纤, $P_e \approx 0.22$, ϵ 为 FBG 受到的轴向应变。

FBG 加速度传感器的设计思想是将 FBG 封装于惯性敏感结构上,惯性力使 FBG 产生轴向应变,导致中心波长 λ_B 发生漂移,通过波长检测实现加速度信号的检测。

基于惯性理论,单维加速度传感器从结构上包括弹性敏感结构体、惯性质量、惯性基座 3 个基本部分,可等效为一个单自由度二阶受迫振动系统,如图 1 所示。图中 K 为系统的总刚度, C 为系统的阻尼, $f(t)$ 为惯性质量的加速度的激励信号,依据惯性理论,惯性质量的位移运动方程为:

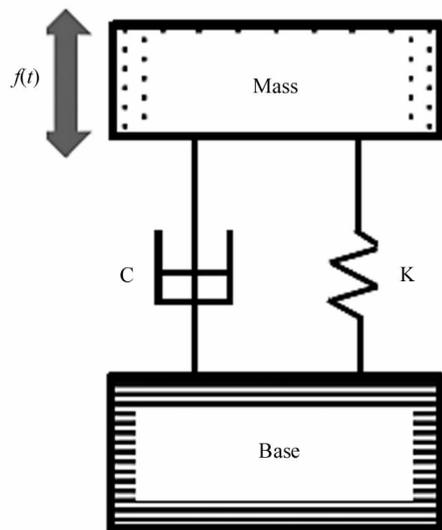


图 1 FBG 加速度传感器惯性模型
Fig. 1 The inertial model of FBG acceleration sensor

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = f(t), \quad (3)$$

式中, $f(t) = A\cos(\omega t + \varphi)$, 其中 A 为振动信号的振幅, ω 为振动信号的激励频率, φ 为振动信号的初相, M 为惯性质量。

结合方程(2), 可得相对波长漂移量为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{(1 - P_e)\Delta x(t)}{L}, \quad (4)$$

式中, L 为封装的光纤的有效长度, $\Delta x(t)$ 为在外界激励信号作用下, 偏移平衡位置的位移。

根据系统的幅频特性, 联立方程(3)和(4), 可得波长的漂移量为:

$$\Delta\lambda_B = \frac{a(1 - P_e)\lambda_B}{\omega_0^2 L \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}, \quad (5)$$

式中, a 为传感器的加速度, ζ 为阻尼比, $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ 为系统的固有频率。则结合方程(4)和(5)得到加速度灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{a} = \frac{M(1 - P_e)\lambda_B}{KL \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}, \quad (6)$$

引入平坦区平坦因子 P , 定义其表达式为:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}. \quad (7)$$

激励频率 ω 越小, 平坦区内平坦因子 P 满足 $P \geq 1$, 则工作频带越平坦, 且频带内的失真度就越小。当 $\omega = \omega_0$ 时, 达到共振, 平坦因子 P 最大。当 $\omega > \omega_0$ 时, 平坦因子 P 急剧下降, 传感器的灵敏度亦急剧下降。

根据振动理论, 系统的谐振频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}. \quad (8)$$

对于确定的弹性结构, 惯性质量越大, 灵敏度越大, 有效频带越窄。然而目前关键的问题是: 如何平衡优化传感器的灵敏度? 如何拓宽传感器的工作频带且维持高灵敏? 如何优化和评价传感器的性能? 这些问题是通用物理新模型必须要解决的问题。

3 FBG 加速度传感器灵敏度和综合响应特性

基于上述理论模型, 淡化传感器的具体结构, 将

传感器的结构特征转化为结构的弹性刚度、惯性质量、封装光纤的长度和杨氏模量等 4 个参量。为了便于讨论其响应特性, 且不失一般性, 假设阻尼系数为零(设计 FBG 加速度传感器时, 一般忽略阻尼), 且满足 $\omega \ll \omega_0$, 讨论实际应用时关注的平坦区灵敏度, 则理想平坦区灵敏度为:

$$S = \frac{M(1 - P_e)\lambda_B}{KL}. \quad (9)$$

3.1 理论分析传感器的设计方式

针对该理论模型, 首先分析系统的总刚度 K , 它由光纤的刚度 K_f 和弹性结构体的刚度 K_s 两部分构成, 其中 $K_f = EA/L$, E 为光纤的杨氏模量, A 为光纤的横截面积。其次讨论传感器的设计方式: 串联与并联。串联总刚度为 $(K_s \cdot K_f)/(K_s + K_f)$, 并联总刚度为 $K_s + K_f$ 。为了便于讨论, 现将弹性结构体的刚度表述为 $K_s = \beta K_f$, β 为刚度比。 β 从 0.8 开始, 以步长为 0.1 递增, 设计方式如图 2 所示。无论是串联还是并联设计方式, 灵敏度均会随着 β 的增加而递减。然串联的设计方式整体上明显地优于并联, 但具体物理结构设计难度大, 并联设计方式相对容易, 因此我们聚焦于并联的设计方式。

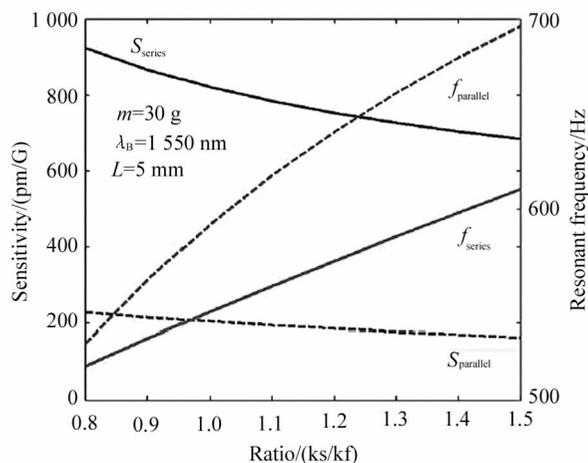


图 2 串联与并联的设计方式

Fig. 2 Design mode of series and parallel connection

3.2 并联模型的理论分析

为了进一步揭示高灵敏加速度传感器的满足条件, 将物理模型与数学模型充分融合, 结合并联设计方式的总刚度, 则式(8)和(9)又可表述为:

$$\begin{cases} S = \frac{M(1 - P_e)\lambda_B}{K_s L + EA} \\ f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_s L + EA}{ML}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中, $K_s L$ 起着决定性的作用。

从传感器微观的角度讲,随着光纤长度的增加,灵敏度与谐振频率均减小。当满足 $K_s L / EA \leq 10\%$ 阈值条件时,该传感器即可实现高灵敏。高灵敏 FBG 加速度传感器的设计理论如图 3 所示。光纤长度分别锁定到 25 mm 和 70 mm,比较 25 mm 对应的光纤刚度和 75 mm 对应的光纤刚度,显然 $K_{f2} < K_{f1}$ 。研究表明光纤的刚度随着光纤长度的增加而递减,此时阈值条件对应的范围也逐渐地缩减,结构体的弹性刚度 K_s 越小,高灵敏越容易实现。

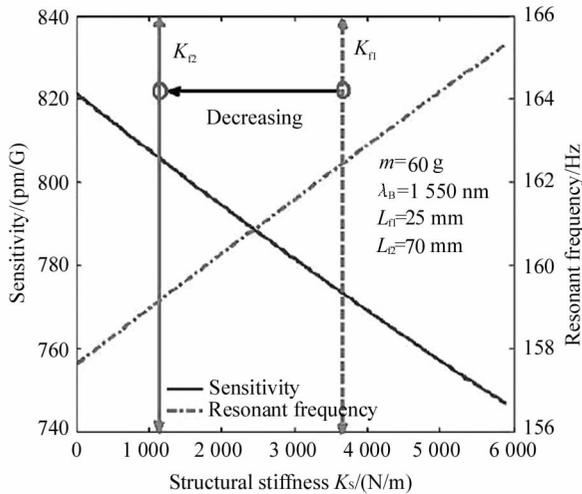


图 3 高灵敏 FBG 加速度传感器的设计理论
Fig. 3 The design theory of high sensitivity FBG acceleration sensor

加速度传感器的灵敏度和谐振频率是封装光纤长度的函数。不同的封装光纤长度的归一化灵敏度和谐振频率,如图 4 所示。随着光纤长度的增加,传

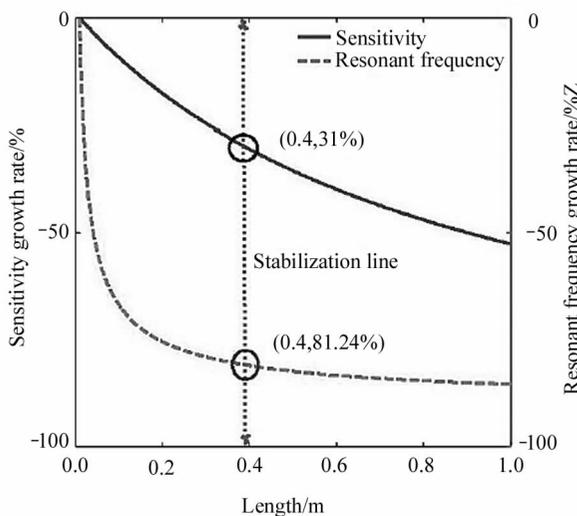


图 4 不同的封装光纤长度的归一化灵敏度和谐振频率
Fig. 4 The normalized sensitivity and resonant frequency of different encapsulated fiber lengths

感器的灵敏度几乎不变,但谐振频率却急剧降低。以光纤长度 0.1 m 为步长,传感器的灵敏度每 0.1 m 下降约 5.1%,而谐振频率变化相当地剧烈。当光纤长度大于 0.4 m 时,谐振频率几乎不发生变化,其最大变化量约为 81.24%。利用该机理,本文可以合理地调节光纤长度来维持传感器的高灵敏,并有效地拓宽工作频带。

3.3 传感器综合性能的评判——品质因子

加速度传感器的两个主要技术参数——灵敏度和谐振频率,其相互关系如图 5 所示。二者相互制约,提高灵敏度,谐振频率必然减小。在给定的频段内,提高灵敏度,势必引起谐振频率的变化,因此不能单纯地依靠高灵敏(或低频段)来评判传感器性能的优良,故本文提出了灵敏度与谐振频率的乘积作为品质因子 (figure of merit, FM), 即:

$$FM = S \cdot f, \tag{11}$$

式中, FM 可以全面地、客观地反映出传感器的综合性能,避免了一味追求“高灵敏”的盲目性。

根据目前所发表的文献^[4-14],单光纤光栅加速度传感器的品质因子,最大约为 $80 \text{ nm} \cdot \text{Hz}/\text{G}$,因此突破 $80 \text{ nm} \cdot \text{Hz}/\text{G}$ 是目前需要攻克的问题。通过调节惯性质量与光纤长度,利用品质因子来锁定设计的传感器的参数。在图 5 中,惯性质量约为 40 g,光纤长度为 20 mm,相比较于目前的传感器,品质因子可突破 $80 \text{ nm} \cdot \text{Hz}/\text{G}$,则传感器的综合性能是最好的,设计相应的物理参数是最优的。

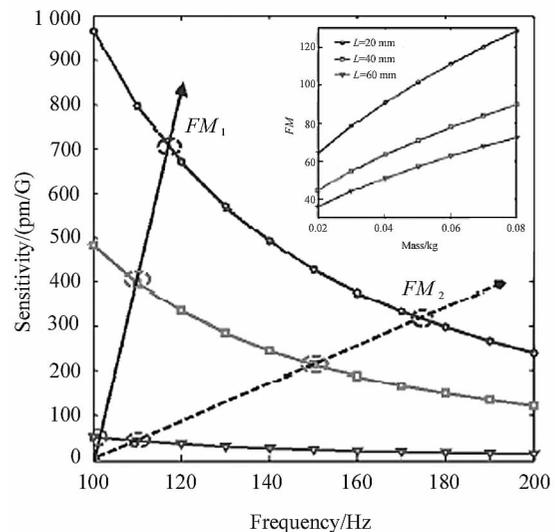


图 5 传感器物理参数的设计与优化
Fig. 5 Design and optimization of physical parameters of sensors

4 结 论

本文建立了FBG加速度传感器的通用物理新模型,通过对比FBG加速度传感器的敏感结构体与光纤光栅的设计方式(串联与并联),将物理模型与数学模型相结合,结果表明串联方式整体上优于并联,但设计难度大,并联相对容易实现。通过分析惯性质量、弹性体的结构刚度、封装的光纤长度和杨氏模量等4大特征参量,锁定光纤的杨氏模量与惯性质量,在满足传感器的阈值条件时,调节光纤长度,既可以维持高灵敏,也可以拓宽工作频带。利用品质因子,不仅对传感器的设计进行优化,还可以对综合性能进行评估。这种理论设计思想为后续研制出高灵敏加速度传感器的设计奠定了坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] CHEN S Z, WU G, FENG D C, et al. Multi-cross reference method for highway-bridge damage identification based on long-gauge fiber Bragg-grating sensors[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(6): 1-16.
- [2] GUO Y, CHEN M, XIONG L, et al. Fiber Bragg grating based acceleration sensors: a review [J]. *Sensor Review*, 2021, 41(1): 101-122.
- [3] LI T L, GUO J X, TAN Y G, et al. Recent advances and tendency in Fiber Bragg Grating-based vibration sensor: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(20): 12074-12087.
- [4] JIA Z A, ZHAO X F, YANG K Q, et al. A FBG vibration sensor based on E-beam structure[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2020, 31(12): 1239-1244.
贾振安, 赵显锋, 杨凯庆, 等. 一种基于'E'型梁结构的光纤光栅振动传感器[J]. *光电子 • 激光*, 2020, 31(12): 1239-1244.
- [5] DENG O, LUO B B, WU D C, et al. Vibration sensing characteristics of reflective fiber Bragg grating cantilever[J]. *Journal of Optics*, 2020, 40(20): 57-64.
邓欧, 罗彬彬, 吴德操, 等. 反射型极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感特性[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 57-64.
- [6] ZHANG X L, RONG Q Z, SUN H, et al. Low-frequency fiber Bragg grating accelerometer based on a double-semicircle cantilever[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(3): 190-193.
- [7] LIU Q P, QIAO X G, JIA Z A, et al. The optimal design of acceleration sensor based on single diaphragm FBG[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(1): 15-19.
刘钦朋, 乔学光, 贾振安, 等. 基于单膜片FBG的加速度传感器优化设计[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(1): 15-19.
- [8] ZHANG F X, JIANG S D, 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.
- [9] LIU Q P, HE X, QIAO X G, et al. Design and modeling of a high sensitivity fiber Bragg grating-based accelerometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5439-5445.
- [10] WANG J, ZENG Y J, LIN C Y, et al. A miniaturized FBG accelerometer based on a thin polyurethane shell [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1210-1216.
- [11] YU D K, LIU Q P, GAO H, et al. High frequency accelerometer based on elastic thin-walled tube [J]. *Study on Optical Communication*, 2016, 42(3): 50-52.
禹大宽, 刘钦朋, 高宏, 等. 基于弹性薄壁管的光纤光栅高频加速度检波器[J]. *光通信研究*, 2016, 42(3): 50-52.
- [12] ZHANG Y S, QIAO X G, LIU Q P, et al. Study on a fiber Bragg grating accelerometer based on compliant cylinder [J]. *Optic Fiber Technology*, 2015, 26(Part B): 229-233.
- [13] HU P, YI M N. Analysis of fiber Bragg grating acceleration sensor based on single elliptical hinge [J]. *Journal of Electron Microscopy*, 2020, 39(1): 102-103.
胡璞, 易名农. 基于单一椭圆铰链的光纤光栅加速度传感器分析[J]. *电子显微学报*, 2020, 39(1): 102-103.
- [14] Xie Z C, Tan Y G, Huang B, et al. High sensitivity fiber Bragg grating acceleration sensor based on rigid hinge [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(15): 8223-8231.
- [15] LIU Q P. Research on FBG acceleration detection technology in crosswell seismic [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015: 19-50.
刘钦朋. 井间地震中光纤光栅加速度检波技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015: 19-50.

作者简介:

刘望飞 (1993—), 男, 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 主要从事光纤传感器制作与封装技术的研究。