

文章编号: 1672-8785(2020)07-0018-07

光纤布拉格光栅振动传感器研究

贾振安^{1,2,3,4} 赵显锋^{1,2,3,4*} 高 宏^{1,2,3,4} 刘颖刚^{1,2,3,4} 杨凯庆^{1,2,3,4}

- (1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;
2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065;
3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
4. CNPC 重点实验室——油藏光纤动态检测研究室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 随着光纤光栅传感技术研究的不断深入和振动测试技术发展需求的不断增大, 关于光纤光栅振动传感器的研究工作迅速展开。介绍了基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的振动传感器的原理, 然后就不同的结构类型对近几年的FBG振动传感器研究进行了归纳, 并着重对悬臂梁式和膜片式结构进行了总结。阐述了同种结构类型的不同光纤光栅封装方式的优缺点, 分析了现阶段所使用的FBG振动传感器, 并提出了影响其性能优化的四点因素。最后对FBG振动传感器的发展作了进一步展望。

关键词: 光栅; 振动传感器; 悬臂梁; 膜片式; 传感器

中图分类号: TN253; TP212.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.07.004

Research on Fiber Bragg Grating Vibration Sensor

JIA Zhen-an^{1,2,3,4}, ZHAO Xian-feng^{1,2,3,4*}, GAO Hong^{1,2,3,4}, LIU Ying-gang^{1,2,3,4}, YANG Kai-qing^{1,2,3,4}

- (1. Science College, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;
3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;
4. Key Laboratory of CNPC-Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the development of fiber grating sensing and the increasing demand of vibration testing technology, the research on fiber grating vibration sensor has been carried out rapidly. In this paper, the principle of the fiber Bragg grating (FBG) based vibration sensor is introduced. In addition, the research on FBG vibration sensor in recent years is summed up in terms of different structural types, with emphasis on the cantilever

收稿日期: 2020-05-27

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS105); 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划项目(YCS19212066)

作者简介: 贾振安(1959-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 硕士生导师, 主要从事纤维光学、光纤传感、光纤通信和光电子学等领域的教学与研究工作。

* **通讯作者:** E-mail: zhaoxianfeng_zxf@163.com

beam and diaphragm structure. The advantages and disadvantages of different fiber grating packaging methods of the same structure type are expounded. Based on the research and analysis, four factors are proposed to optimize the performance of the FBG vibration sensor. Finally, the development of the FBG vibration sensor is prospected.

Key words: grating; vibration sensor; cantilever beam; diaphragm type; sensor

0 引言

随着近些年传感器研究的不断深入, 不论是在科学研究还是在实际应用中, 传感器都占有重要位置。从 20 世纪 70 年代起, 光纤传感技术研究被普遍关注并且发展迅速。其中尤以 FBG 传感器最为突出。与传统传感器相比, 光纤传感器具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰^[1]、重量轻以及可分布式测量^[2]等突出优点。而 FBG 传感器在保持一般光纤传感器优势的基础上还具有信号稳定、可实现绝对测量、在光纤直径不改变的情况下可直接写入光纤、可多路复用^[3]等优点。因此, 光纤光栅在医学^[4-5]、电力系统^[6-7]、机械结构^[8-9]、地质^[10-11]、交通运输^[12-13]等领域被广泛关注。由于 FBG 传感研究的不断深入以及振动测试技术发展需求的日益增长, FBG 振动传感器成为了一个深入研究的方向。振动传感器的核心设计理念是, 通过设计不同结构并将 FBG 的尺寸特点和传感机理相结合, 然后使用合适的封装方式来提高灵敏度和测量范围等性能。

FBG 振动传感器的结构类型包含悬臂梁式和膜片式等。其中, 悬臂梁式结构简单且容易实现, 因此成为 FBG 振动传感器常用的结构类型。由于自身的结构特点, 该类型传感器的检测范围处于低频波段, 所以其研究热点致力于如何提高灵敏度^[14]。膜片式结构在单一方向上的位移量明显, 而在其他方向上的位移不明显, 因此非常适用于振动传感器设计。各国研究人员在这些结构的基础上, 通过使用不同数目的光纤光栅或不同的封装方式来减少外界因素的干扰或者提高灵敏度。因此, 本文从结构类型和封装方式等方面对近几年的 FBG 振动传感器研究进行概括, 并且分析该领域的

发展前景。

1 FBG 振动传感器的原理

振动传感器主要是以惯性原理为基础的动态测量器件。它是一个由质量惯性体、弹性体和阻尼系统构成的单自由度二阶系统(见图 1)^[15]。由牛顿第二定律可知, 在外力 $f(t)$ 的作用下, 质量块的运动方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (1)$$

式中, m 为质量块的质量, k 为弹簧刚度, c 为阻尼系数, x 为质量块的位移。

FBG 振动传感器的原理如下: 当传感器接收到振动信号时, 质量惯性块发生位移; 在阻尼块和弹性体的共同作用下, 光纤产生轴向应变, 光纤光栅的中心波长随之改变而达到测量振动的效果。

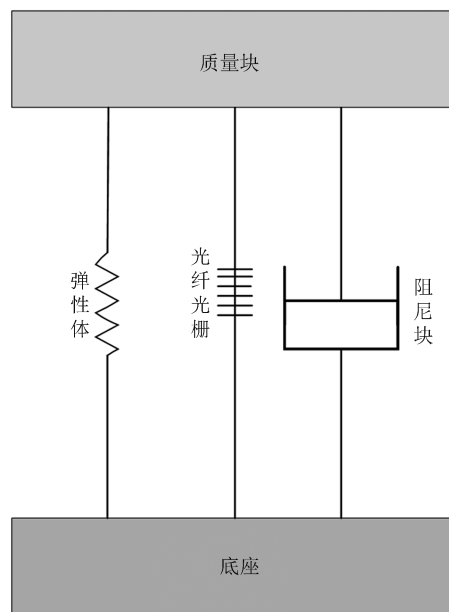


图 1 FBG 振动传感器的力学模型

2 FBG 振动传感器的结构分类

2.1 基于悬臂梁式结构的振动传感器

与其他结构类型相比,悬臂梁式结构较为简单。因此,它在 FBG 振动传感器中属于比较常见的类型之一。如图 2 所示,在悬臂梁式结构中,惯性质量块放置在梁的顶端。当外界振动产生信号时,惯性质量块产生位移,从而使梁发生形变。梁式结构可分为等强度梁和等截面梁两类。在发生形变时,等强度梁上任意点的应力应变都是相同的;而等截面梁沿梁长的任何一处的截面尺寸都相同,因此发生形变时梁上各截面的应力应变是不同的。

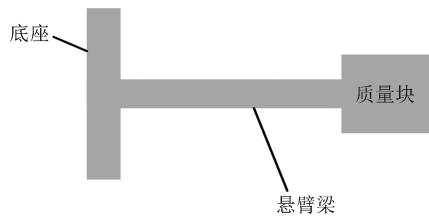


图 2 悬臂梁式结构模型

2.1.1 光纤光栅采用全粘方式封装的悬臂梁式结构

由于等强度梁上任意点的应力应变相同,FBG 振动传感结构中的等强度梁可以采用将光纤光栅全粘在梁上的方式进行封装。这样可以避免由于光纤光栅应力不均而产生啁啾现象。

2013 年,王宏亮等人^[16]设计了一种双等强度悬臂梁式结构。他们将惯性质量块的上下表面分别固定相同材料结构的等强度悬臂梁,提高了梁式结构的抗干扰能力。基于上述设计

的传感器采用厚度为 0.2 mm 的悬臂梁式结构,其固有频率为 80.74 Hz,加速度灵敏度为 $20.85 \text{ pm/m} \cdot \text{s}^{-2}$,适用于 50 Hz 以下低频信号的实时监测。2018 年, Binbin L 等人^[17]提出了一种基于过度倾斜光纤光栅(Excessively Tilted Fiber Grating, Ex-TFG)的等强度悬臂梁结构(见图 3)。当压电陶瓷的振动使梁产生形变时, Ex-TFG 也会产生均匀的形变。通过实验可知,在等强度梁的厚度为 0.3 mm 时,传感器性能最好且最大加速度灵敏度达到 $81.065 \text{ mv} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ 此外,它结构简单,在低频信号应用中具有极大潜力。2019 年,贾振安等人^[18]对悬臂梁式结构进行了实验研究。他们采用厚度为 1 mm 的等强度悬臂梁,使传感器的固有频率为 90 Hz,且加速度灵敏度提高到 121 pm/g 。同时,他们将结构的疲劳寿命列入考量范围,即通过对悬臂梁结构进行优化,将疲劳寿命提高了 150%。

由于等截面梁的应力不均匀,在封装前对结构应变进行仿真,然后将光纤光栅封装在应变最大处或者通过一些特殊材料的封装增大应变,从而达到提高灵敏度的目的。

2013 年, Basumallick N 等人^[19]提出了一种用背衬片将光纤光栅间接安装在悬臂梁上的结构,即通过对背衬片的贴片材料及厚度进行研究来达到实验目的。基于该结构的传感器的

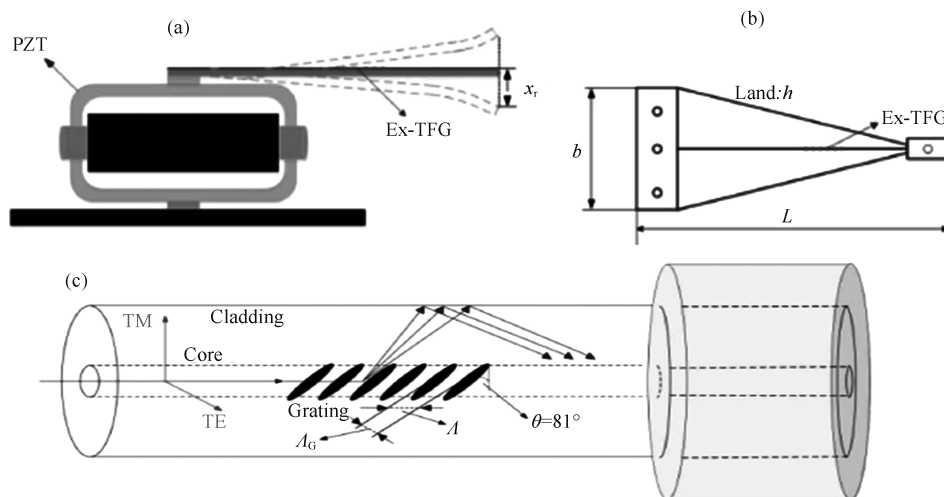


图 3 (a)悬臂梁主视图; (b)悬臂梁俯视图; (c)Ex-TFG 的光耦合模型

灵敏度可达 1062 $\mu\text{m/g}$ 。与带宽相近的悬臂梁结构相比, 该传感器的灵敏度提高了 3 倍, 适用于地震和土木工程测量。2018 年, Yao K 等人^[20]研制了一种可同时测量应力和振动的组合式应力振动传感器。如图 4 所示, 粘贴在测量对象表面上的光栅用于测量应力, 而粘贴在悬臂梁上的光纤既可测量振动也可用于温度补偿。该结构的高度仅为 1 mm, 质量为 1.15 g, 有利于实现小型化。

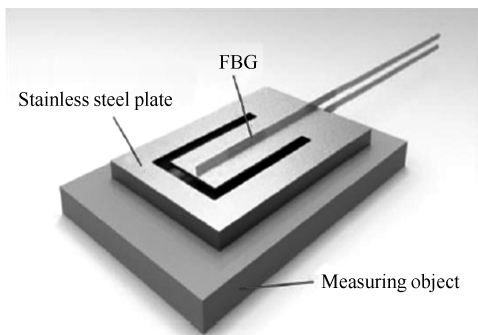


图 4 组合式应力振动传感器的结构图

2.1.2 光纤光栅采用两点式封装的悬臂梁式结构

若悬臂梁式结构采用两点式封装, 则可降低采用全粘式封装时对梁式形状的要求以及封装难度, 并在此基础上有效避免啁啾现象。这些优点使得两点式封装在悬臂梁结构应用中成为热点。

2016 年, Xiang L H 等人^[21]为了避免中心波长啁啾现象, 将光纤光栅横向悬挂在悬臂梁

结构上。该传感器结构的固有频率为 125 Hz, 灵敏度为 75 $\mu\text{m/m}\cdot\text{s}^{-2}$, 因此具有广阔的应用前景。2019 年, 魏莉等人^[22]设计了一种特殊的梁式结构(“土”字形梁结构)。通过改变质量块在 U 形块中所处的位置来获得不同的传感器谐振频率。基于图 5(a)所示结构的传感器的固有频率为 237.5 Hz, 灵敏度为 120.3 $\mu\text{m/g}$; 基于图 5(b)所示结构的传感器的固有频率为 639 Hz, 灵敏度为 32.9 $\mu\text{m/g}$, 它可以达到多个频段的测量效果并且具有较强的横向抗干扰能力。2019 年, 王海林等人^[23]为了突破 FBG 振动传感器梁式结构中固有频率与灵敏度相互制约的问题, 研究了一种基于扭转梁的双 FBG 加速度传感器。在结构适用的固有频率范围内, 通过改变扭转圆盘半径的方式来调节灵敏度。

2.2 基于膜片式结构的 FBG 振动传感器

膜片具有的一维尺寸远远小于许多二维平面几何结构, 其传感元件较轻并且在检测信号时方向性很强。这些优点使得结合使用膜片式结构与光纤光栅来测量振动成为可能。

2012 年, Liu Q P 等人^[24]提出了一种膜片式 FBG 加速度传感器, 即采用全粘的方式将光纤光栅固定在膜片上。虽然该结构的横向抗干扰能力很强, 但是膜片的应变不能全部作用到光纤光栅上, 因此会产生误差。

由于膜片式结构体积小, 采用全粘式封装

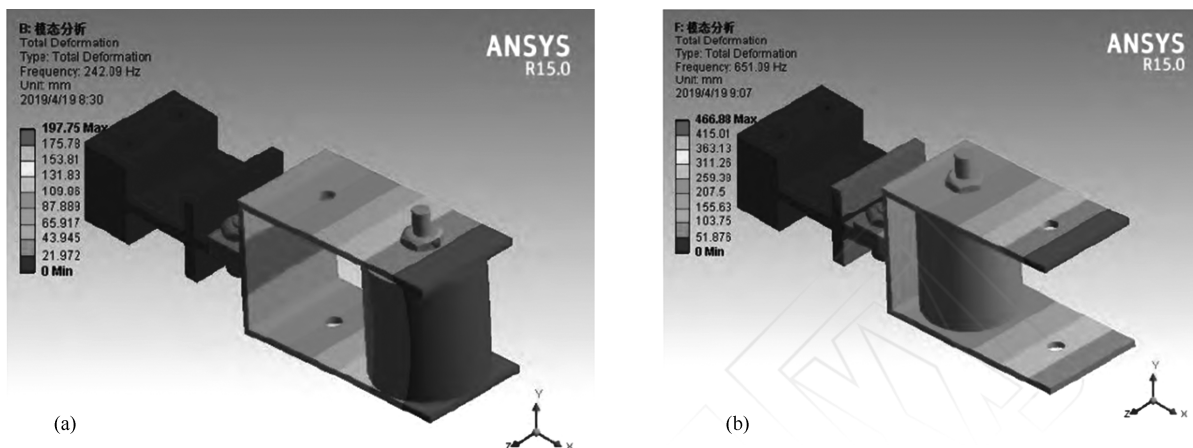


图 5 “土”字形传感器的结构仿真图: (a)传感器 1; (b)传感器 2

会产生封装难度大和应力不均等缺点。而使用两点式封装则可有效减少这些缺点所带来的问题。

2015年,曾宇杰等人^[25]将L形刚性梁和弹性膜片结构相结合,设计了一种FBG加速度传感器。他们在增强结构稳定性的基础上消除了传统悬臂梁结构所产生的啁啾现象或者反射谱多峰现象。该传感器的固有频率为115 Hz,灵敏度高达220 pm/g。2017年,Li T L等人^[26]提出了一种采用两点式封装的膜片式FBG加速度传感器(见图6)。该传感器质量小并且便于对质量敏感的结构进行检测。它使用两个光纤光栅并根据差分运算来实现温度补偿,但是不容易对光纤光栅封装过程中的实际初始横向偏移量进行测量,因此封装难度较大。2017年,Li T L等人^[27]继续在膜片式结构的基础上提出了一种FBG加速度传感器(见图7),实现了温度和加速度的同时解耦与测量,解决了光纤光栅粘贴困难的问题。

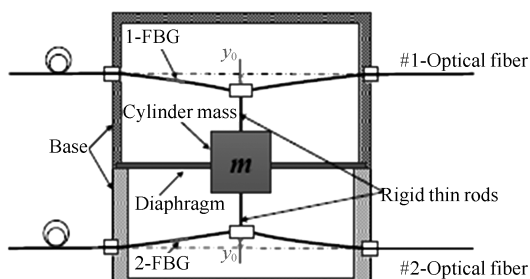


图6 基于两点式封装的膜片式结构图

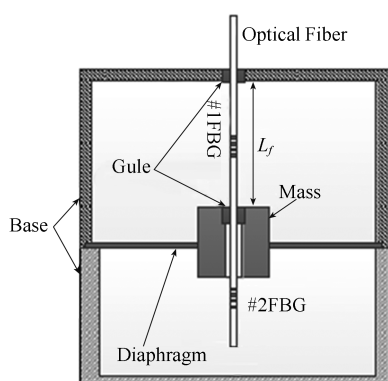


图7 基于改进两点式封装的膜片式结构图

2.3 基于其他结构的FBG振动传感器

光纤光栅的全粘式封装对结构类型和形状

具有一定的限制,而通过两点式封装将光纤光栅作为传感元件则具有设计灵活多样、结构简单等优点,因此吸引了众多学者。

2015年,Li T L等人^[28]研究了一种粘贴式FBG振动传感器。他们通过对两个光纤光栅的中心波长漂移进行加减来实现二维振动的分离。该传感器在 x 和 y 振动方向上的固有频率分别为1300 Hz和20.51 Hz,灵敏度分别为32.84 pm/g和451.3 pm/g,因此可用于基于波分复用的分布式二维振动测量。2016年,Zhang Y S等人^[29]设计了一种由柔性铰链和两个垂直安装在铰链表面上的光纤光栅组成的振动传感器,并可以将其用于二维振动检测。该传感器在 x 和 y 方向上的固有频率分别为1050 Hz和1060 Hz,灵敏度分别达到13.1 pm/g和12.0 pm/g。2016年,Li T L等人^[30]设计了一种直接将光纤作为弹性体的振动传感器(质量块被固定在光纤中间)。该传感器的固有频率为34 Hz,灵敏度高达2362 pm/g,因此可用于微振动测量。

3 归纳分析与优化建议

图8和图9所示为对近年来FBG振动传感器^[16-30]所适用的工作频率、固有频率以及灵敏度的归纳分析数据。

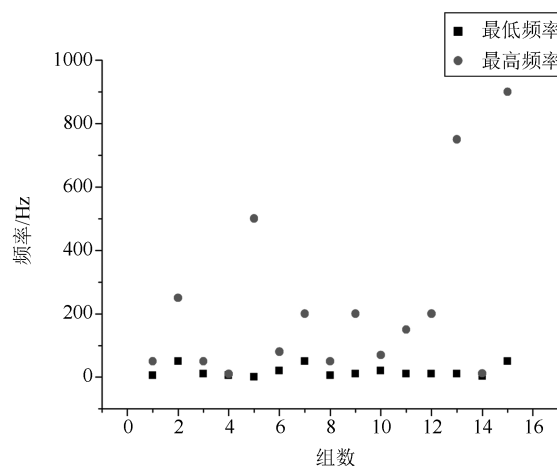


图8 工作频率范围的分布图

由图8可知,目前的FBG振动传感器研究主要以中低频段为主(通常用于地震波检测和桥梁振动监测等),而在高频段中的应用却

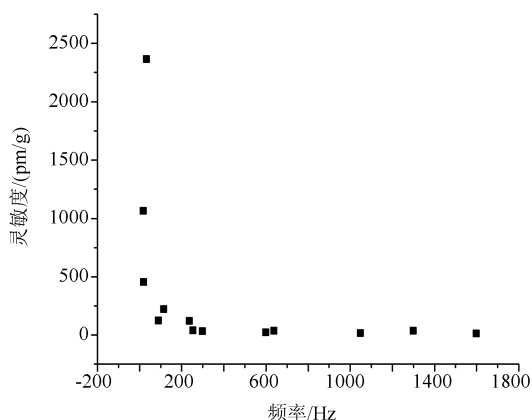


图 9 频率与灵敏度的关系图

很少提及。由图 9 可知, 在当前的研究中, 振动灵敏度随着固有频率的升高而呈现下降趋势。因此, 针对当前的主要研究提出以下几点建议:

(1) 需要根据不同的应用环境对传感器结构进行设计, 使得 FBG 振动传感器的测量结果保持稳定, 以避免不同环境的干扰因素对传感器带来的影响。

(2) 研究的频段需要更加丰富, 使 FBG 振动传感器可以应用于各个领域。

(3) 设计新型传感器结构以及光纤光栅的封装方式, 从而增加传感器的使用寿命, 并使其能够多次重复利用。

(4) 在提高灵敏度的基础上, 突破固有频率的约束。

4 结束语

本文以 FBG 振动传感器的结构类型和封装方式为出发点, 对近几年学者们的研究结果进行了归纳分析, 并针对相同结构类型的不同封装方式的优缺点进行了阐述。

随着光纤光栅技术的不断成熟, FBG 振动传感器研究也在不断深入。例如, 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室和中国科学院半导体研究所^[31]将 FBG 加速度计作为研究重心。目前关于 FBG 振动传感器的研究工作主要是由高校和研究所承担的, 并正由实验阶段走向实际应用阶段。而由于实验室与实际工程环境的差异, 要使 FBG 振动传感器完全步

入市场, 则需针对实际环境进行不断的深入研究。随着我国经济的快速发展和国家对于科研项目的大力支持, 学者们可以尽快找到解决 FBG 振动传感器所遇到问题的方法。相信在不久的将来, FBG 振动传感器将可实现产业化并能得到大规模的推广。

参考文献

- [1] Jiao S X, Zhao Y, Gu J J. Simultaneous measurement of humidity and temperature using a polyvinyl alcohol tapered fiber Bragg grating [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2017, **46**(5): 463-474.
- [2] Umesh S, Kumar R R, Pant S, et al. Fiber Bragg grating based two-dimensional accelerometer [C]. Bangalore: International Conference on Smart Sensors & Systems, 2015.
- [3] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用 [J]. *中国光学*, 2013, **6**(3): 306-317.
- [4] Tosi D, Aliakhmet A A K, Saccomandi P, et al. Fiber Bragg grating sensors for spatially resolved measurements in ex-vivo pancreatic laser ablation [C]. Benevento: IEEE International Symposium on Medical Measurements & Applications, 2016.
- [5] Zhang C, Miao C, Gao H, et al. Research on fiber Bragg grating heart sound sensing and wavelength demodulation method [C]. *SPIE*, 2010, **7853**: 78531Q.
- [6] Mohammed A, Djurovic S. A study of distributed embedded thermal monitoring in electric coils based on FBG sensor multiplexing [J]. *Microprocessors & Microsystems*, 2018, **62**(10): 102-109.
- [7] Wan X D, Nan J, Xu T, et al. On-line monitoring technology of UHV composite insulator based on FBG sensor [C]. Beijing: IEEE Sustainable Power & Energy Conference, 2019.
- [8] Liu B, Zhang S, He J. Deformation measurement of glass structure using FBG sensor [J]. *Photonic Sensors*, 2019, **9**(4): 367-375.
- [9] Liu M, Zhou Z, Tan Y, et al. Fiber Bragg grating sensors-based mechanical structure damage identification [J]. *Mechanika*, 2012, **18**(1): 108-112.

- [10] Ren G, Li T, Hu Z, et al. Research on new FBG soil pressure sensor and its application in engineering [J]. *Optik*, 2019, **185**: 759–771.
- [11] Gómez T, Cano C, Perilla C, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using bare FBG sensors in the early age of concrete shrinkage [C]. Medellín: Latin America Optics and Photonics Conference, 2016.
- [12] Liang L, Wang R L, Xu G, et al. Analysis and study of FBG sensor in crack monitoring of aircraft structure [J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, **300**: 022111.
- [13] Shrestha P, Park Y, Kwon H, et al. Low velocity impact monitoring of composite wing structure under simulated wing loading condition using fiber Bragg grating sensors [C]. Jeju: Optical Fiber Sensors Conference, 2017.
- [14] 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): 5–12.
- [15] 刘钦朋, 何雪, 贾振安, 等. 高灵敏光纤光栅加速度检波器理论模型研究 [J]. *应用光学*, 2019, **40**(5): 910–917.
- [16] 王宏亮, 周浩强, 高宏, 等. 基于双等强度悬臂梁的光纤光栅加速度振动传感器 [J]. *光电子激光*, 2013, **24**(4): 635–641.
- [17] Binbin L, Wanmeng Y, Xinyu H, 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.
- [18] 贾振安, 张星, 李康, 等. 一种悬臂梁式光纤光栅振动传感器研究 [J]. *压电与声光*, 2019, **41**(1): 21–24.
- [19] Basumallick N, Biswas P, Dasgupta K, et al. Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, **194**: 31–39.
- [20] Yao K, Lin Q J, Jiang Z D, et al. Modeling and analysis of a combined stress-vibration fiber Bragg grating sensor [J]. *Sensors*, 2018, **18**(3): 743.
- [21] Xiang L H, Jiang Q, Li Y B, et al. Design and experimental research on cantilever accelerometer based on fiber Bragg grating [J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(6): 1–6.
- [22] 魏莉, 刘壮, 李恒春, 等. 基于“士”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器 [J]. *光学学报*, 2019, **39**(11): 90–98.
- [23] 王海林, 刘爱莲, 姚敏, 等. 扭转梁式双光纤 Bragg 光栅加速度传感器的设计与有限元分析 [J]. *化工自动化及仪表*, 2019, **46**(5): 389–393, 405.
- [24] 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.
- [25] 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): 98–106.
- [26] Li T L, Shi C Y, Tan Y G, 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.
- [27] Li T L, Tan Y G, Han X, et al. Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation [J]. *Sensors*, 2017, **17**(12): 218.
- [28] 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.
- [29] Zhang Y S, Qiao X G, Gao H, et al. A two-dimensional fiber Bragg grating accelerometer based on universal hinge [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **17**(3): 614–618.
- [30] Li T L, Tan Y G, Zhou Z D. A fiber Bragg grating sensing-based micro-vibration sensor and its application [J]. *Sensors*, 2016, **16**(4): 547.
- [31] 付友昱. 光纤加速度计专利申请分析 [J]. *中国科技信息*, 2019, **31**(9): 30–32.