

文章编号: 1672-8785(2022)09-0020-08

光纤光栅振动传感器结构设计研究

贾振安^{1,2,3,4} 党 硕^{1,2,3,4*} 禹大宽^{1,2,3,4} 任 杰^{1,2,3,4} 姜丽荣^{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 测井重点实验室——油藏光纤动态监测研究室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 传感技术是衡量一个国家信息化程度的重要标志。振动信号的检测在工业尤其在石油勘探方面有着重要作用。其中, 基于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的振动传感器具有诸多优点而备受关注。简单介绍了 FBG 振动传感器的原理, 并根据结构类型对近几年研发出的 FBG 振动传感器进行了分类和总结。阐述了四种 FBG 振动传感器的优缺点, 并重点对悬臂梁式和柔性铰链式结构的 FBG 振动传感器进行了总结。接着从三个方向对现有的 FBG 振动传感器进行了分析并提出了优化建议。最后对 FBG 振动传感器的发展做出了预测与展望。

关键词: 光纤光栅; 振动传感器; 悬臂梁; 铰链; 多分量

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.09.004

Research on Structure Design of Fiber Grating Vibration Sensor

JIA Zhen-an^{1,2,3,4}, DANG Shuo^{1,2,3,4*}, YU Da-kuan^{1,2,3,4}, REN Jie^{1,2,3,4}, JIANG Li-rong^{1,2,3,4}

(1. School of Science, 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. Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs,
Key Laboratory of CNPC, Xi'an 710065, China)

Abstract: Sensing technology is an important symbol to measure the degree of informatization of a country. The detection of vibration signals plays an important role in industry, especially in the exploration of oil. The vibration sensor based on fiber Bragg grating (FBG) has attracted much attention because it has many advan-

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS093); CNPC 测井重点实验室基金项目(20216328); 西安石油大学研究生院创新与实践能力培养计划项目(YCS212147)

作者简介: 贾振安(1959-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 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研究。

***通讯作者:** E-mail: ds_15289461196@163.com

tages. In this paper, the principle of fiber Bragg grating vibration sensor is briefly introduced, and the FBG vibration sensor developed in recent years is classified and summarized according to its structure type. The advantages and disadvantages of four kinds of FBG vibration sensors are described, and the FBG vibration sensors with cantilever beam and flexure hinge structure are summarized. The existing FBG vibration sensors are analyzed from three directions and optimization suggestions are put forward. Finally, the development of FBG vibration sensors is predicted and prospected.

Key words: fiber grating; vibration sensor; cantilever; hinge; multicomponent

0 引言

振动信号的检测在石油勘探^[1]、机械工业生产^[2]、航空航天^[3]、地质监测^[4]等领域都有着重要的现实意义。通过检测振动信号可以更加高效地进行石油勘探,从而提高石油开采率。由于机械振动是引起机械设备发生故障的主要原因之一,通过检测振动信号可以避免大部分设备故障,从而保障设备正常运行。航空航天设备都是精密设备,因此细微的振动都可能导致数据不准确,并且可能会造成巨大的经济损失。而通过检测振动信号则可避免这些情况的发生。

传感器是信息拾取的首要部件,更是现代化检测的首要环节,因此被称为现代信息技术的源头。20 世纪 70 年代,加拿大渥太华研究中心利用光敏效应成功研制出世界上第一根光纤光栅^[5]。自此 FBG 传感器开始被科研人员关注,并进入了迅速发展时期。随着近些年现代信息不断进步,传感技术开始迅猛发展,传感器也在各类工业的实际应用中扮演着重要的角色。由于现代工业在不断地发展,因此工业上对传感器的要求越来越高,比如抗电磁干扰、高灵敏度、小型化、可埋入智能材料等。这些都是传统的电类传感器难以达到的。

与传统的电类传感器相比,光纤传感器具有抗电磁干扰、小型化、寿命长、可实现分布式测量^[6]等优点。光纤光栅传感器不仅保留了传统光纤传感器的优点,而且可实现绝对测量和多路复用,并具有损耗低、制作封装简单等优点。因此,FBG 传感器被广泛应用于地质、运输、医学、电力系统、机械工程、航空航天

等领域。其中,光纤光栅振动传感器是光纤光栅传感器一个重要的研究方向。基于 FBG 的振动传感器还被用于民用基础设施^[7-8]、交通^[9]和机械工程^[10]等的结构健康监测和故障诊断^[6]。近些年,科研人员在这个方向取得了不少成果,但同时也存在许多问题,比如一味追求高灵敏度、对测量范围的关注不够、局限于一个方向的振动信号的测量等。

根据结构的不同,光纤光栅振动传感器可以分为悬臂梁结构振动传感器、铰链结构振动传感器、顺变柱体结构振动传感器和膜片结构振动传感器。本文简单介绍光纤光栅振动传感器的工作原理,然后对近几年悬臂梁式和铰链式光纤光栅振动传感器的研究成果进行概括,并对日后的 FBG 振动传感器的研究方向提出建议。

1 光纤光栅振动传感器的原理

根据被测量对象的不同,可以将振动传感器分为速度振动传感器、加速度振动传感器和位移振动传感器。其中,速度振动传感器和位移振动传感器多用于电类传感器,而基于光纤光栅的振动传感器大多是加速度传感器。

振动传感器由质量惯性体、弹性体、光纤光栅和阻尼系统组成,是以惯性原理为基础的动态测量器件,其结构如图 1 所示。由力学分析可得,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 为弹性体的刚度; c 为阻尼系数; x 为质量块的位移。

光纤光栅振动传感器的原理如下:当 FBG 振动传感器检测到振动信号后,振动信号使质量惯性块发生位移;在弹性体和阻尼块的共同

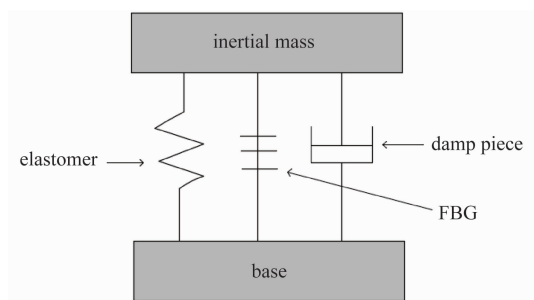


图 1 振动传感器模型图

作用下, 光纤光栅产生拉伸或压缩, 导致光纤光栅的中心波长也发生改变; 最后通过解调系统完成对振动信号的测量。光纤光栅振动传感器的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{\alpha} = \frac{(1 - p_e)m\lambda_B}{k_{eff}L_f} \quad (2)$$

式中, p_e 为有效弹光系数, 通常取值为 0.22; λ_B 为光纤光栅的中心波长; k_{eff} 为传感系统的等效刚度; L_f 为光纤的封装长度。

2 光纤光栅振动传感器的结构分类

根据结构的不同, 光纤光栅振动传感器可以分为悬臂梁结构振动传感器^[11-18]、铰链结构振动传感器^[19-23]、顺变柱体结构振动传感器^[24-26]和膜片结构振动传感器^[27]。其中, 悬臂梁式传感器的优点是结构简单, 表面应变分布均匀; 缺点是横向抗干扰能力较差, 易产生啁啾现象且检测频带窄。铰链式传感器的灵敏度相对较大, 平坦区也较大, 但是其横向抗干扰能力较差。柱体式传感器的抗干扰能力较好, 但很难提高灵敏度。膜片式传感器的优点是灵敏度容易调控, 缺点是结构封装边界条件复杂。本文将主要对悬臂梁式和铰链式光纤光栅振动传感器进行阐述。

2.1 基于悬臂梁结构的光纤光栅振动传感器

悬臂梁式振动传感器主要由底座、悬臂梁和质量块组成, 如图 2 所示。由于结构简单, 它是光纤光栅振动传感器中比较常见的。该传感器的敏感结构是悬臂梁。当振动信号作用于传感器时, 质量块在惯性作用下发生位移, 从而带动悬臂梁也发生位移。梁表面会产生应变, 与之相贴的光纤光栅的波长也会受到应力

的作用, 因此贴在悬臂梁上的光纤光栅的中心波长也会改变。最后, 通过用解调系统测出光纤光栅的波长变化值来获取振动信息。悬臂梁式传感器的优点是结构简单, 表面应变分布均匀; 缺点是横向抗干扰能力较差, 易产生啁啾现象且检测频带窄。因此, 如何克服这三个缺点是目前悬臂梁式光纤光栅振动传感器的重点研究方向。根据所封装光纤光栅是否接触基底材料, 可将光纤光栅振动传感器分为全粘式封装和两点式封装两类。

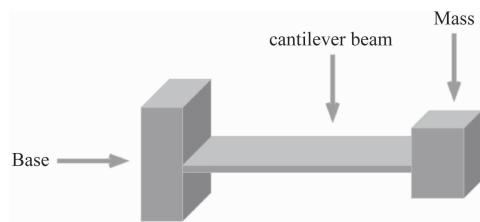


图 2 悬臂梁式振动传感器结构图

2.1.1 全粘式封装

全粘式封装是指用粘合剂将光纤光栅粘贴在基底材料上, 使两者完全贴合。这种封装方式可以保护光纤免受外界力的破坏。

2011 年, 刘钦朋等人^[11]提出了一种基于 Π 相位差温度不敏感的双悬臂梁 FBG 传感器(见图 3(a))。该传感器有两个状态相差 Π 相位的 FBG。将两个串联的 FBG 粘在梁的上下自由端面。不仅通过差分运算实现温度补偿, 而且使灵敏度翻倍。研究表明, 该传感器的工作频带为 0~20 Hz, 线性灵敏度为 15.52 pm/(m·s⁻²)。

2012 年, Basumallick N 等人^[12]通过改变 FBG 传感器轴与悬臂梁中性轴之间的距离(见图 3(b)), 有效地增大了传感器的灵敏度。与传统的类似带宽的悬臂梁式的 FBG 振动传感器相比, 灵敏度几乎提高了 3 倍。结果显示, 灵敏度为 1062 pm/g。

2015 年, Li T 等人^[13]提出了一种全粘式 FBG 的振动传感器, 通过精确调整 FBG 和悬臂梁之间的胶水厚度来改变传感器的灵敏度。实验结果表明, 当光纤纤芯与悬臂梁之间的距离为 1 mm 时, 灵敏度达到最大值。该传感器的灵敏度比传统工艺提高了 2.9 倍。这

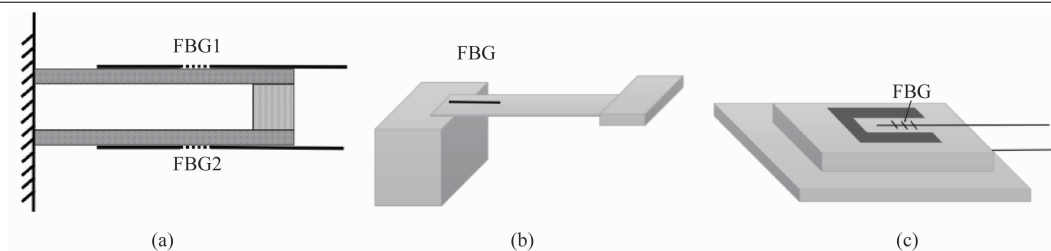


图 3 全粘式光纤光栅振动器结构图

种方法可用于大多数粘贴的基于 FBG 的振动传感器, 以提高灵敏度。但在实际操作中, 胶水的厚度不好把控, 操作难度大。

2018 年, Yao K 等人^[14]研制了一种可测量应力与振动的组合式应力振动传感器(见图 3(c))。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栅既可测量振动又可用于温度补偿。该传感器的振动传感工作范围为 0~6000 Hz, 应力传感工作范围为 0~100 MPa, 相应的振动灵敏度为 0.46 pm/g, 得到的应力灵敏度为 5.94 pm/MPa, 而且结构高度仅为 1 mm, 质量仅为 1.15 g, 有利于实现小型化。

2.1.2 两点式封装

两点式封装将光纤的两点固定, 使 FBG 处于悬空状态。相比于全粘式封装, 两点式封装方式具有两个优点: 一是光栅部分不受胶水的蠕变效应带来的影响; 二是光栅轴向拉压, 不会引起啁啾现象。这些优点使两点式封装的振动传感器成为研究热点。

2016 年, Xiang L H 等人^[15]设计了一种悬臂式 FBG 振动传感器(见图 4(a))。该传感器采用等强度梁为弹性元件, 具有均匀的 FBG 应变区和较高的抗横向干扰能力。将光纤嵌入质量块的内槽中, 并将布拉格光栅悬在悬臂梁结构上方, 有效地避免了中心波长啁啾或展宽的现象, 大大提高了传感器的灵敏度。结果表明, 该 FBG 振动传感器的灵敏度为 750pm/g, 但是其固有频率和灵敏度的公式并没有被提出。

2019 年, Parida O P 等人^[16]提出了一种基于 FBG 的新型双“L”悬臂梁式振动传感器(见图 4(b))。采用两点法将 FBG 悬空封

装在“L”形悬臂梁两侧。这种封装方式不仅避免了啁啾现象, 而且还提高了传感器的灵敏度。实验证明, 该模型的固有频率为 86 Hz, 灵敏度为 406.7 pm/g。但是传感器的横向抗干扰能力没有被提到, 且灵敏度实验的重复性不够。

2020 年, 贾振安等人^[17]提出并设计了一种基于“E”型梁结构的光纤光栅振动传感器(见图 4(c))。该传感器在传统梁式 FBG 振动传感器的基础上, 对 FBG 采用新的封装方式, 把具有双 FBG 的光纤悬空封装在传感器结构上。这种全新的封装方式不仅可以避免啁啾效应, 同时还提高了传感器的灵敏度。但是, 在实验中没有提到该传感器的横向抗干扰能力。实验结果表明, 该 FBG 振动传感器在平坦区 15~60 Hz 范围内的固有频率为 83 Hz, 灵敏度高达 481.32 pm/g。

2021 年, 郭永兴^[18]等人提出一种以十字梁为弹性体的一体式三维光纤光栅振动传感器(见图 4(d))。该传感器采用了五根光纤光栅, 可以测量出 x 、 y 、 z 三个方向上的振动信号。其中, 四根光栅分别封装在四根梁上表面距离中心柱与梁的结合处 2~7 mm 区域的中心线上, 第五根光栅封装在其中一个梁的下表面距离中心柱与梁的结合处 1.3~6.3 mm 区域的中心线上。该传感器在 x 、 y 和 z 方向上的谐振频率分别为 2000 Hz、1920 Hz 和 1160 Hz, 工作频带分别为 20~1400 Hz、20~1300 Hz 和 10~800 Hz, 灵敏度分别为 1.36 pm/g、1.70 pm/g 和 1.31 pm/g。但是其结构封装困难, 并且采用多根光纤光栅, 在实际应用中不易操作。

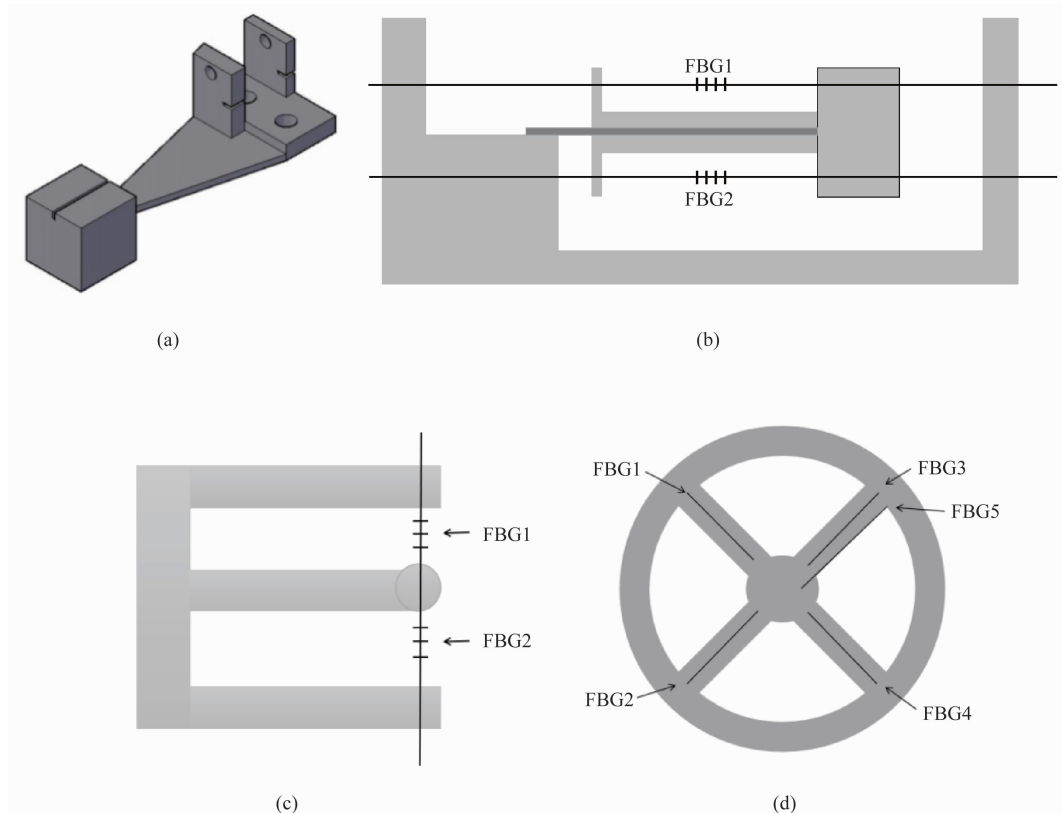


图 4 两点式光纤光栅结构图

2.2 基于铰链结构的振动传感器

在悬臂梁的设计基础上使质量块与弹性系统成为一体,比悬臂梁式传感器结构更加简单。柔性铰链的 FBG 振动传感器由于自身特性而具有诸多优点:质量块和铰链是一体的,在振动中无摩擦,不会磨损传感器,且易于加工、易实现小型化、灵敏度高。因此,该传感器被广泛应用在精密测量等领域中。根据传递运动自由度的不同,柔性铰链可以分为单轴、双轴和全向柔性三种。由于结构的特殊性,大多数铰链结构采用两点封装技术来固定光纤光栅。

2016 年, Yang Y 等人^[19]研制出二维 FBG 加速度振动传感器(见图 5(a))。该传感器由一个万向柔性铰链和两个 FBG 组成。其中, FBG 垂直封装在铰链表面上。实验结果表明,该传感器在 x 和 y 方向上的谐振频率分别为 1050 Hz 和 1060 Hz, 振动传感器的频率响应范围为 50~900 Hz, 在 x 和 y 方向上的灵敏度分别为 13.1 pm/g 和 12.0 pm/g。

2019 年, Wei L 等人^[20]提出了一种基于多轴柔性铰链的二维 FBG 振动传感器(见图 5(b))。该传感器采用对称多轴柔性铰链, 传感探针在两个测量方向上具有相同的灵敏度。利用相反一组 FBG 的差分输出可以抑制温度效应和交叉干扰。实验结果表明, 传感器灵敏度高达 220 pm/g, 且两个测量方向的交叉干扰不超过 4%, 谐振频率为 279.2 Hz。

2019 年, 王赞等人^[21]设计出一种圆形柔性铰链布拉格光栅双向振动传感器(见图 5(c))。该传感器实现了两个方向的振动信号测量, 实际谐振频率约为 368 Hz, 工作频率范围为 0~120 Hz, 敏感方向上的灵敏度约为 107.3 pm/g, 横向抗干扰度约为 4.8%。

2019 年, Xie Z C 等人^[22]提出一种基于刚性铰链的高灵敏度 FBG 加速度振动传感器。该传感器采用刚体旋转运动, 而不是现有的弹性变形。结构采用对称设计, 使光纤光栅的伸长率提高了两倍。因此传感器的灵敏度也提高了两倍。实验研究表明, 该振动传感器的固有

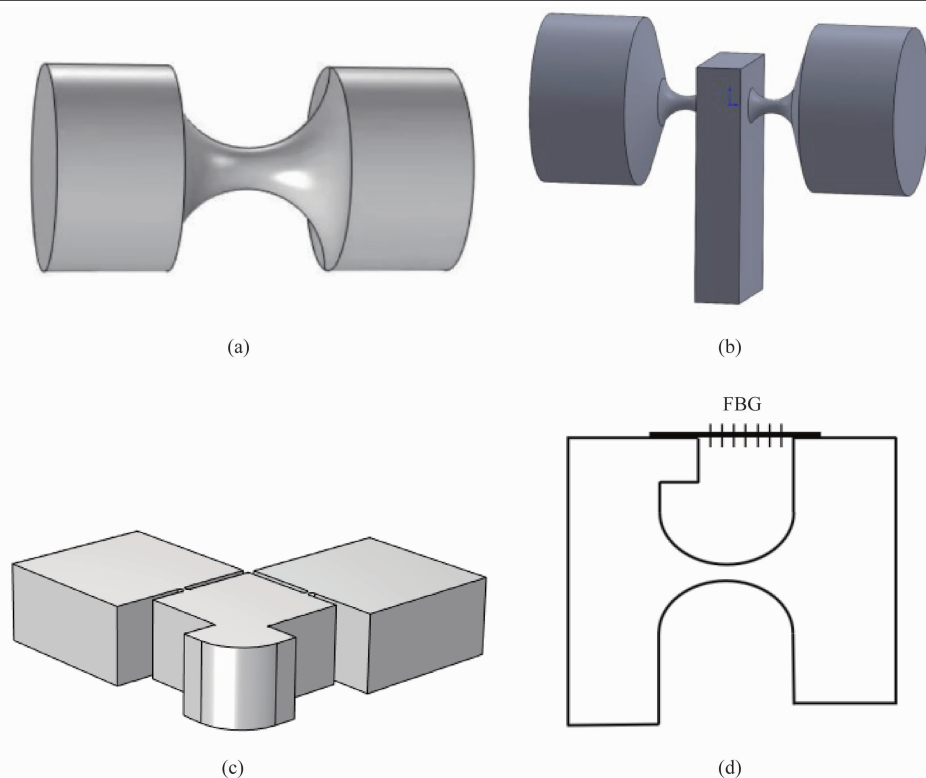


图 5 铰链式光纤光栅振动传感器结构图

频率为 39 Hz, 15 Hz 时传感器的灵敏度为 949.2 pm/g, 交叉干扰小于 6.49%, 适用于精度测量。

2020 年, 苏李等人^[23]设计出一种大量程高灵敏度的光纤光栅低频振动传感器(见图 5(d))。该传感器采用柔性铰链结构, 固有频率为 91 Hz, 在 0.5~55 Hz 频率范围内拥有良好的工作状态, 并且具有良好的横向抗干扰能力。灵敏度为 1.94 nm/g, 线性度为 99.99%。但在测量灵敏度时, 没有重复性实验。

3 归纳分析与优化建议

通过对近些年光纤光栅振动传感器的归纳总结不难看出, 现有的光纤光栅振动传感器大多是在较低频率范围内进行测量, 因此研究人员应扩大传感器的频率范围, 使传感器拥有较大的测量范围, 从而使光纤光栅振动传感器应用于更多的领域。

大多数光纤光栅振动传感器只能对一个方向的振动信号进行测量。在实际应用中, 若想实现多分量测量, 只能使用多个传感器, 不利

于传感器的小型化。研究人员应尝试研究二维或三维传感器, 缩小多分量传感系统体积, 使光纤光栅振动传感器在实际应用中实现小型化。

整合近几年传感器结构中固有频率和灵敏度的关系(见图 6)。从图中可以明显看出, 光纤光栅振动传感器的灵敏度随着固有频率的升高而下降。因此, 如何在提高灵敏度的同时扩大频率也是研究人员需要解决的问题。

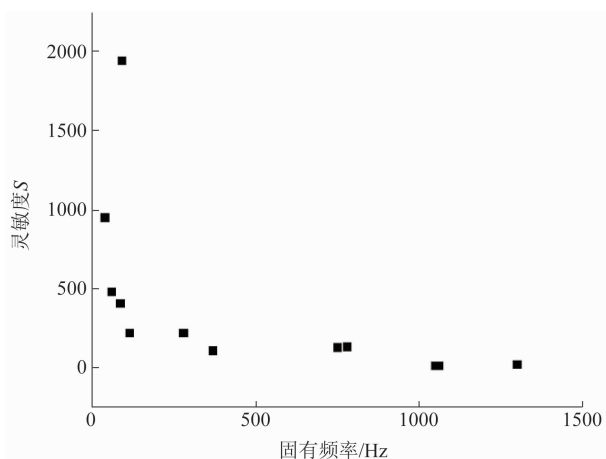


图 6 固有频率和灵敏度的关系图

4 结束语

本文通过归纳总结近年来不同结构的光纤光栅振动传感器,对今后光纤光栅振动传感器的发展提出了优化建议。近年来,随着光纤光栅传感技术的不断发展,它已经在航空航天、桥梁建筑、石油天然气、电力工业、现代医学等各个领域发挥着自身价值。光纤光栅振动传感器的性能比传统的电类传感器更加稳定、更加灵敏、更加实用。总而言之,光纤光栅振动传感器具有非常广阔的发展前景。

目前,光纤光栅振动传感器的研究主要集中在以下几个方面:扩大研究频段,使光纤光栅振动传感器应用于各个领域;设计新型传感器结构以及光栅封装方式,从而提高传感器的使用寿命;降低系统成本,减小体积并提高实用化水平;提高灵敏度,并协调好固有频率对灵敏度的约束;研究二维及三维振动传感器,缩小多分量振动传感器系统的体积。随着我国经济的快速发展和国家对科研项目的大力支持,相信在不久的将来,光纤光栅振动传感器会实现产业化并得到大力推广。

参考文献

- [1] 周锐. 基于多芯光纤光栅的井中地震波三维矢量检波技术研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [2] 姜达洲. 小型光纤光栅加速度传感器传感特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [3] 李婧怡. 光纤光栅传感技术在航空航天领域中的应用与发展[J]. 中国新通信, 2018, 20(4): 67-69.
- [4] Han X Y, Wen H Q, Liu S, et al. Dual-fiber-Bragg gratings accelerometer for the detection of geosound caused by debris flow[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(5): 1-4.
- [5] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Applied physics letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [6] Liu X, Jin B, Bai Q, et al. Distributed fiber-optic sensors for vibration detection[J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1164.
- [7] Mita A, Yokoi I. Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring[C]. Sydney: 5th International Conference on Motion and Vibration Control, 2000.
- [8] Mita A. Fiber Bragg grating-based acceleration sensors for civil and building structures[C]. Weimar: International Workshop on Present and Future in Health Monitoring, 2000.
- [9] Bocciolone M, Bucca G, Cigada A, et al. An application of FBG accelerometers for monitoring pantographs of underground trains[C]. *SPIE*, 2010, 7653: 765341.
- [10] Bindu S, Thomas V V. Diagnoses of internal faults of three phase squirrel cage induction motor—A review[C]. Manipal: International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014.
- [11] 刘钦朋, 乔学光, 赵建林, 等. 双光栅 π 相位差温度不敏感加速度传感技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 170-175.
- [12] Basumallick N, Chatterjee I, Biswas P, et al. Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 173(1): 108-115.
- [13] Li T, Tan Y, Zhou Z, et al. Research on pasted FBG-based accelerometer's sensitization process method and its characteristics[J]. *IEICE Electronics Express*, 2015, 12(17): 83.
- [14] Yao K, Lin Q, Jiang Z, et al. Modeling and analysis of a combined stress-vibration fiber Bragg grating sensor[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 743.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.

- [18] 郭永兴, 陈敏, 熊丽, 等. 一体式光纤光栅三维加速度传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, **58**(21): 1–10.
- [19] Yang Y, Wang Z M, Change T Y, et al. Seismic Observation and Analysis Based on Three-Component Fiber Optic Seismometer [J]. *IEEE Access*, 2019, **8**: 1374–1382.
- [20] Wei L, Yu L L, Wang J J, et al. An FBG-sensing two-dimensional vibration sensor based on multi-axis flexure hinge [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, **19**(10): 3698–3710.
- [21] 王赞, 戴玉堂, 刘文敏, 等. 基于柔性铰链的光纤光栅二维加速度传感器的优化设计 [J]. *光子学报*, 2019, **48**(8): 82–88.
- [22] 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*, 2019, **20**(15): 8223–8231.
- [23] 苏李, 张晓彤, 吕沛桐, 等. 大量程高灵敏度的光纤光栅低频振动传感器研究 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(S2): 314–320.
- [24] 丁桂兰, 刘振富, 崔宇明, 等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 340–343.
- [25] 张芸山. 微地震中光纤振动传感技术研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- [26] 侯跃峰, 路智敏, 张文涛, 等. 三分量光纤加速度传感器探头设计进展 [J]. *传感器与微系统*, 2012, **31**(8): 1–4.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Li T, Tan Y, Han X, et al. Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation [J]. *Sensors*, 2017, **17**(1): 218.
- [30] 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*, 2016, **17**(4): 1021–1029.