

文章编号: 1672-8785(2023)10-0034-09

光纤布拉格光栅振动传感器的研究进展

贾振安^{1,2,3,4} 何 阳^{1,2,3,4*} 禹大宽^{1,2,3,4} 高 宏^{1,2,3,4} 刘钦朋^{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: 随着光纤传感技术的不断发展, 光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)振动传感器在实际应用中的复杂振动测量性能愈发优良可靠。基于 FBG 振动传感器的优势, 简略地阐述了 FBG 振动传感器的工作原理, 并介绍了近 5 年国内研发的部分悬臂梁型、膜片型、铰链型三种结构的优缺点。最后针对 FBG 振动传感器提出了 4 个方面的建议, 并展望了 FBG 振动传感器的发展方向。

关键词: 光纤布拉格光栅; 振动传感器; 悬臂梁; 膜片; 铰链

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.10.005

Research Progress of Fiber Bragg Grating Vibration Sensors

JIA Zhen-an^{1,2,3,4}, HE Yang^{1,2,3,4*}, YU Da-kuan^{1,2,3,4}, GAO Hong^{1,2,3,4}, LIU Qin-peng^{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. Key Laboratory of CNPC-Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the continuous development of optical fiber sensing technology, fiber Bragg grating (FBG) vibration sensor has become more and more excellent in the performance of complex vibration measurement in practical applications. Based on the advantages of FBG vibration sensor, the working principle of FBG vibration sensor is described briefly, and the advantages and disadvantages of some cantilever beam, diaphragm and hinge structures developed in China in the past 5 years are introduced. Finally, four suggestions for FBG vibration sensors are put forward, and the development direction of FBG vibration sensors is prospected.

Key words: fiber Bragg grating; vibration sensor; cantilever beam; diaphragm; hinge

收稿日期: 2023-05-04

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)

作者简介: 贾振安(1959-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 主要从事光纤光学、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: 1593076798@qq.com

0 引言

与传统型传感器相比, FBG 振动传感器具有体积小、反应快、抗电磁扰动、传输信号稳定、使用时间长等优良特性^[1]; 同时, 由于不使用电子线路, 其应用也更加安全^[2]。振动测量在地震检波、医学^[3]、航空航天^[4]、交通运输、电力和机械等现代工程系统中有着非常重要的意义。系统中的大多数异常和故障都容易引起振动, FBG 振动传感器通常用于上述工程系统的故障预警和诊断。此外, 由于 FBG 对光强的波动不敏感, 在检测时只需获取其中心波长的数值就可有效避免光源对信息精度的影响^[5]。

FBG 振动传感器同时还被广泛地应用于石油工业、矿藏开发、地质勘探等领域^[6]。在地质勘探中, 通过利用人工方法激发地震波来定位油气贮藏和矿产资源是最重要、最有效的一种方法。同时, 振动数据采集质量很依赖于 FBG 振动传感器的性能^[7]。因此, FBG 振动传感器成为了当下振动测量领域的热门方向^[8]。本文介绍 FBG 振动传感器的工作原理和力学模型, 并概述近 5 年国内的部分结构设计方案。

1 FBG 振动传感器的工作原理

虽然 FBG 的外形与普通光纤相同, 但其纤芯中有一个特定波长选择性的光栅结构^[9]。当入射光在光纤内遇到光栅后, 符合布拉格波长条件的入射光将会被反射。通过检测其反射光谱可以实现对外界物理量变化的测量。由光纤耦合模理论可知, FBG 的反射光中心波长表达式为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为光纤的有效折射率, Λ 为光栅周期。由式(1)可知, 当 n_{eff} 和 Λ 这两个物理量发生变化时, 反射光中心波长也会随之改变。

1.1 FBG 振动传感器的力学模型

FBG 振动传感器的工作原理是利用 FBG 对应力变化的灵敏性: 当振动信号产生后, 它

会使 FBG 振动传感器的质量块发生运动, 使之与之相连接的 FBG 产生形变; 通过检测 FBG 中心波长的变化量, 就可以获得相应的应变信息。图 1 为 FBG 振动传感器的力学结构模型简图。其中, m 为质量块质量, k 为 FBG 的弹性系数, c 为阻尼系数。

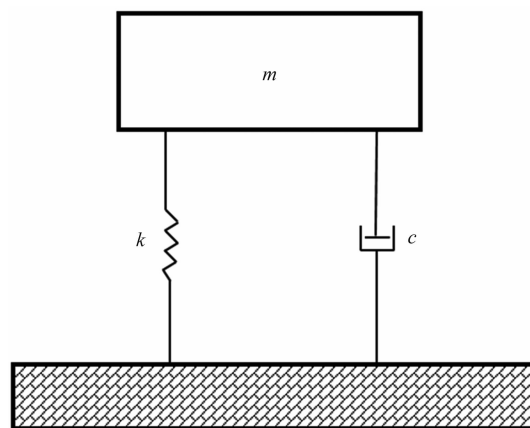


图 1 FBG 振动传感器的力学结构模型简图

1.1.1 固有频率

根据 FBG 振动传感器的力学模型, 当质量块振动时的位移为 z_1 、FBG 长度变化为 z_2 时, 由牛顿第二运动定律可得:

$$c \frac{dz_2}{dt} + m \frac{d^2 z_2}{dt^2} + \frac{EA}{L} z_2 = \frac{EA}{L} z_1 \quad (2)$$

式中, A 为光纤的横截面积, E 为光纤的杨氏模量, L 为 FBG 的长度。由式(2)得到系统的频率后, 可进一步得知系统的固有频率:

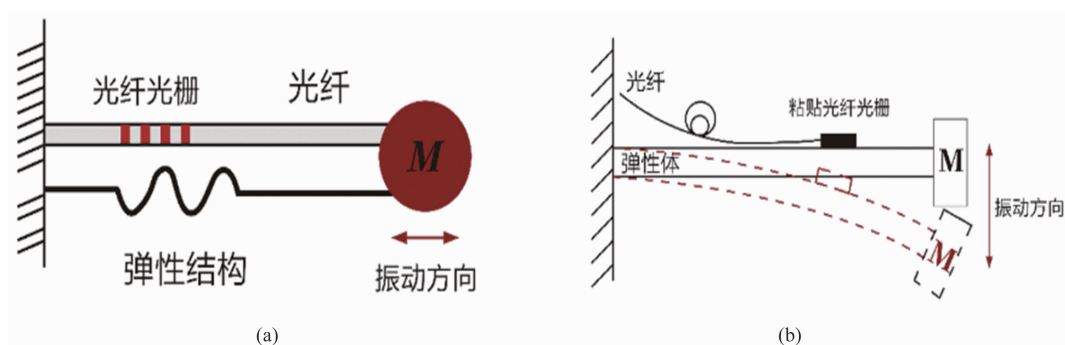
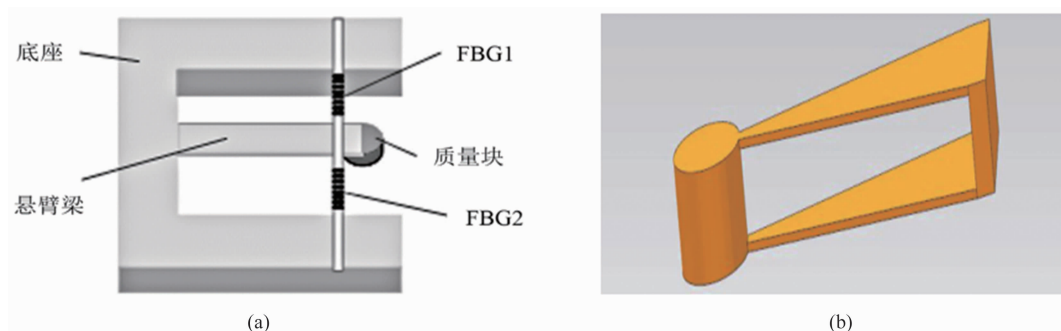
$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EA}{mL}} \quad (3)$$

1.1.2 灵敏度

质量块运动时会受到惯性力的作用。综合 FBG 长度变化量与质量块受到的惯性力关系式, 并结合 FBG 传感原理^[10], 有

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{a} = \frac{0.78\lambda_B m}{EA} \quad (4)$$

式中, S 表示传感器的灵敏度, λ_B 为 FBG 反射光的中心波长, $\Delta\lambda_B$ 为变化量。由式(3)和式(4)可知, 灵敏度 S 与 m 成正比。当 m 增大时, S 随之增大; 当 S 增大时, 固有频率 f_n 将变小。

图 2 悬臂梁型 FBG 振动传感器结构^[13]图 3 (a)“E”型梁结构^[14]; (b)双等强度悬臂梁结构^[15]

2 FBG 振动传感器的结构

2.1 结构分类

FBG 振动传感器主要有悬臂梁型振动传感器、膜片型振动传感器和铰链型振动传感器三种。其中,悬臂梁型振动传感器的优点是抗偏载能力强、准确度高以及结构简单。在受到应力作用时,灵敏度基本相同,所以它特别适用于振动测量。其缺点是横向抗干扰性稍差,振动测量的频带较窄。膜片型振动传感器的优点是容易调整灵敏度,缺点是尺寸小、封装困难。铰链型振动传感器的优点是灵敏度高,其缺点与悬臂梁型振动传感器一样,也是横向抗干扰性稍差^[11]。

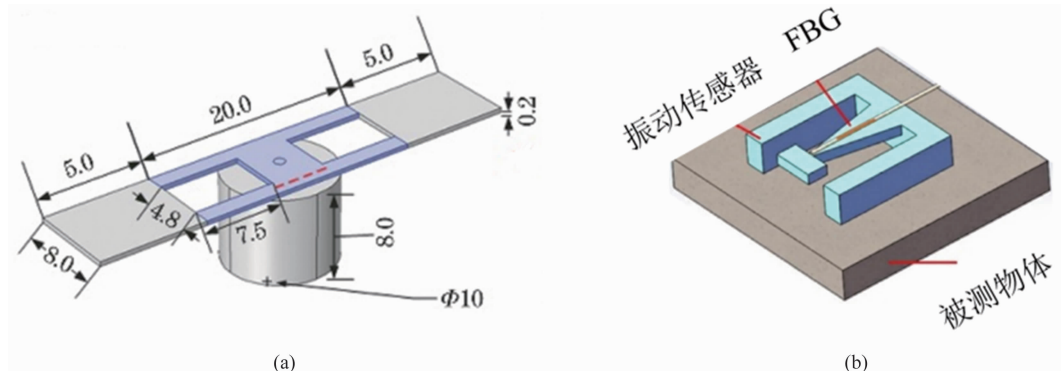
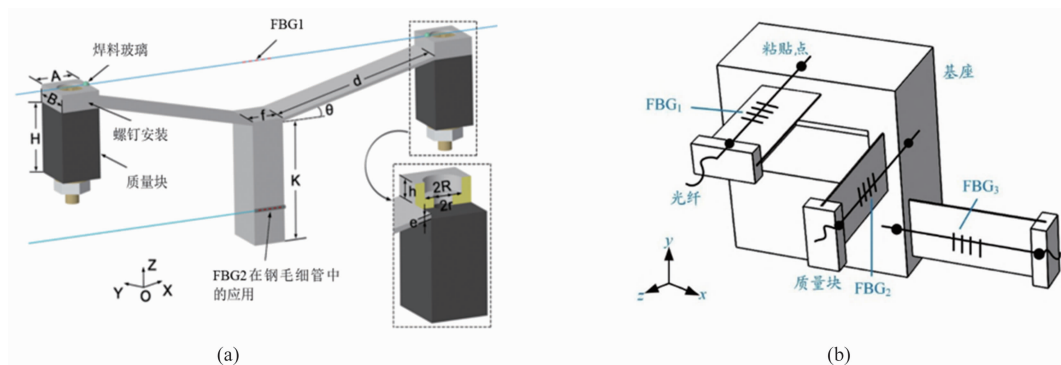
2.1.1 悬臂梁型 FBG 振动传感器

悬臂梁型 FBG 振动传感器主要由质量块、梁结构、FBG 以及基座等四部分构成,其组成结构在 FBG 振动传感器中比较常见。FBG 与悬臂梁的封装方式有两种:一是将 FBG 悬浮在悬臂梁上,不与悬臂梁表面接触(见图 2(a))。在这种两点式封装的传感器中,FBG 本

身作为弹性元件,对弹性体的变化有着直接的响应。二是将 FBG 粘贴在悬臂梁表面(见图 2(b))。这种封装方式被称为全粘式封装。此时质量块的运动带动悬臂梁发生弯曲,产生的应变作用于粘贴在其表面的 FBG 上,用来测量结构的振动状态。悬臂梁型 FBG 振动传感器的缺点是由不一致的手动操作和弹性体表面不均匀的应变分布引起的^[12]。

2020 年,贾振安等人^[14]为了提高悬臂梁型 FBG 振动传感器的灵敏度,提出了一种“E”型梁结构的 FBG 振动传感器(见图 3(a))。实验结果表明,这种传感器的固有频率为 83 Hz,灵敏度高达 481.32 pm/g。该传感器在民用基础设施故障监测等方面起到了非常大的作用。

2021 年,He Z X 等人^[15]为了进一步提高振动测量的稳定性,设计了一种双等强度悬臂梁 FBG 振动传感器(见图 3(b))。实验结果表明,这种传感器的固有频率为 185 Hz,灵敏度为 0.0240 pm/g,进一步验证了传感器测量的稳定性和可靠性。该传感器水平抗干扰能力

图 4 (a)“工”型梁结构^[16]; (b)等腰三角形悬臂质量块结构^[17]图 5 (a) FBG 高可靠振动传感器^[19]; (b)三分量 FBG 地震检波器^[20]

强、振动频率测量精度高,可以很好地保证其故障监测和故障诊断能力。

2021 年,李亦佳等人^[16]设计了一种“工”型梁结构的 FBG 振动传感器(见图 4(a))。实验结果表明,当加速度为 $2.0g$ 时,传感器的固有频率约为 543.9 Hz ,灵敏度约为 6.7 pm/g ,具有良好的线性度和横向抗干扰能力。此传感器的重复性误差约为 1.7% ,横向灵敏度为纵向灵敏度的 4.2% 。

2021 年, Wu H 等人^[17]设计了一种可以用来测量高频振动信号的 FBG 振动传感器(见图 4(b)),其总体结构为等腰三角结构。它由悬臂质量块结构和粘贴在悬臂上的 FBG 组成。他们使用铝合金来进一步提高其固有频率。实验结果表明,此传感器拥有良好的可靠性,其谐振频率为 8193 Hz ,灵敏度为 45.82 pm/g 。该传感器具有频率高、灵敏度高的优点,可应用于轨道交通轴承等系统。

2021 年,张绪成等人^[18]提出用一种基于“L”型悬臂梁的 FBG 振动传感器来测量低频

小信号。实验结果表明,传感器谐振频率为 280 Hz ;在充装硅油后测得其带宽为 $1\sim 240\text{ Hz}$,灵敏度可达到 52 pm/g ,横向抗干扰性较好,达到 4.2% 。故此传感器可以应用在需要测量低频信号的场所。

2021 年, Li S S 等人^[19]针对现有光纤振动传感器在石油和天然气资源勘探领域可靠性低的问题,提出了一种基于 FBG 的高可靠性振动传感器(见图 5(a))。实验结果表明,传感器的工作频率范围为 $0.1\sim 30\text{ Hz}$,灵敏度为 290 pm/g ,最大横向干扰度为 3.6% 。采用玻璃焊接封装的传感器在长期高温下可以保持良好的稳定性。此外,该传感器对严重的温度冲击能够快速响应,并且可在循环热冲击后保持测量精度。因此,该传感器能够可靠地用于井下等恶劣环境中的微振动测量。

2022 年,王梓琳等人^[20]设计了一种三分量 FBG 地震检波器来实现地震波的三维测量(见图 5(b))。这种结构的地震检波器的 $1\sim 3$ 阶固有频率分别为 56 Hz 、 59 Hz 和 63 Hz ,三

个方向上的灵敏度分别为 218.22 pm/g、284.76 pm/g 和 249.67 pm/g。这种结构的传感器可实现低频信号的三分量检测且精度较高, 具有非常实际的应用价值。

2.1.2 膜片型 FBG 振动传感器

膜片型 FBG 振动传感器重量轻盈, 在信号检测方向性上拥有较高的精度。这种结构的传感器由于体积小巧, 比较适用于两点式封装, 可以避免全粘式封装导致的应力分布不均匀的问题。

2019 年, Liu Q 等人^[21]设计了一种双膜片型 FBG 振动传感器(见图 6(a))。该传感器的固有频率为 441 Hz, 灵敏度为 152 pm/g, 横轴灵敏度小于主轴灵敏度的 3.6%。

2021 年, Wei F 等人^[22]为了满足低频振动监测的要求, 提出了一种新的膜片型 FBG 振动传感器(见图 6(b))。该传感器采用了圆筒状结构, 在内部等间距分布着 4 根用作弹性

元件的悬臂梁。实验结果表明, 这种新型传感器的固有频率为 90 Hz, 灵敏度达到 485.75 pm/g, 同时传感器有着较强的横向抗干扰性。因此, 该传感器为地震勘探等实际应用提供了一种新的解决方法。

2.1.3 铰链型 FBG 振动传感器

2020 年, 苏李等人^[23]提出了一种基于柔性铰链结构的 FBG 振动传感器(见图 7(a))。实验结果表明, 其测量带宽较窄, 仅为 0.5~55 Hz, 灵敏度为 1.94 nm/g, 实现了低频信号的高精度测量。此外, 该传感器的纵向灵敏度结果高于横向灵敏度, 其横向抗干扰能力较强。

2020 年, Han S 等人^[24]设计了一种新型铰链结构的二维 FBG 振动传感器(见图 7(b))。其在 x 方向和 y 方向上的谐振频率分别约为 1275 Hz 和 1482 Hz, 在两个方向上的灵敏度分别为 41.2 pm/g 和 34.5 pm/g, 并且两个方

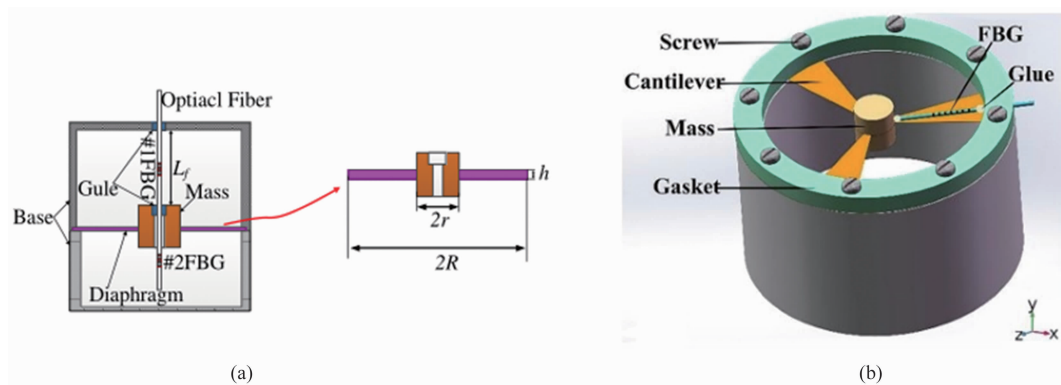


图 6 (a)双膜片型结构^[21]; (b)新的膜片型结构^[22]

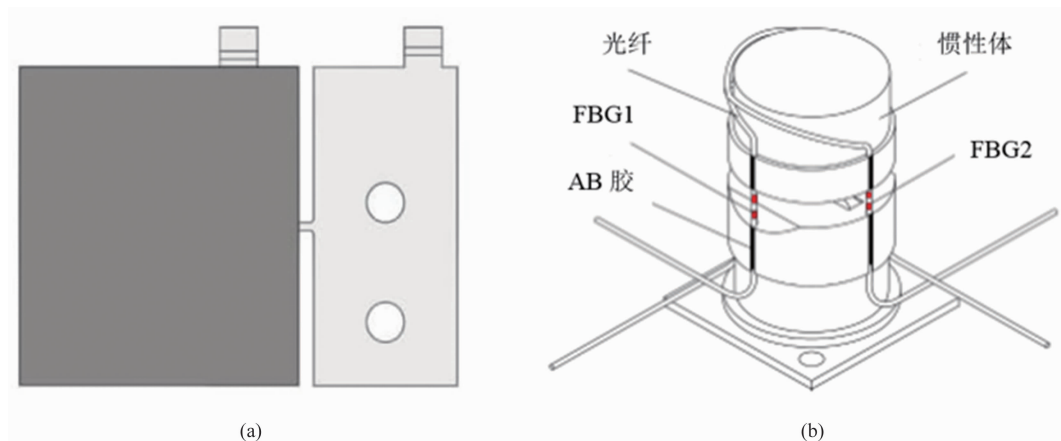


图 7 (a)柔性铰链结构^[23]; (b)正交弯曲铰链结构^[24]

向的交叉干扰小于 6%。这种传感器频率高, 交叉灵敏度低, 适用于机械设备的结构健康监测。柔性铰链特殊的空间分布使传感器在两个方向上的测量相互独立, 交叉干扰小, 抗扭转能力强。这允许在两个方向上具有相同的灵敏度。

2021 年, 刘文敏等人^[25]设计了一种基于双 FBG 的变宽度椭圆铰链式低频振动传感器(见图 8(a))。实验结果表明, 这种传感器的工作频带为 0~10 Hz, 谐振频率为 36 Hz, 灵敏度为 1496 pm/g。该传感器具有较高的灵敏度, 能够满足工程中的测量要求。

2021 年, 李立新等人^[26]提出了一种基于椭圆铰链的中高频双 FBG 振动传感器。实验结果表明, 这种传感器的谐振频率约为 780 Hz, 灵敏度为 132.53 pm/g, 横向抗干扰度小于 3.3%。其所采用的双光纤差分解调法可以提高传感器的灵敏度, 在高频的振动中有着更广泛的应用。

2021 年, Qiu Z C 等人^[27]为了研究中高频振动信号对桥梁、铁路和隧道等大型结构的健康监测的影响, 并解决中高频光纤加速度传感器灵敏度低、横向抗干扰能力差的问题, 提出了一种基于双弹性板的铰链型 FBG 振动传感器(见图 8(b))。实验结果表明, 这种传感器的谐振频率为 1300 Hz, 灵敏度基本能达到 20 pm/g, 光纤中心波长漂移和加速度具有良好的线性

和稳定性, 而横向抗干扰约为 3.16%, 为大型结构中高频振动信号的监测提供了新思路。

2022 年, 严超凡等人^[28]基于柔性铰链设计了一种 FBG 三维加速度传感器(见图 9(a))。实验结果表明, 这种传感器在 x 轴上的谐振频率为 673 Hz, 灵敏度为 72.3 pm/g; 在 y 轴上的谐振频率为 667 Hz, 灵敏度为 70.2 pm/g; 在 z 轴上的谐振频率为 1376 Hz, 灵敏度为 83.1 pm/g。该传感器能够满足三维振动信号测量的要求。

2023 年, 赵慧枝等人^[29]提出了一种小型化、宽频段、高灵敏度的 FBG 振动传感器(见图 9(b))。他们采用“杠杆铰链”作为应变的传递结构, 通过质量块尾端镂空的办法来调节整体质量块重心位置, 提高了传感器的固有频率。这种结构可在灵敏度小幅降低的情况下提升传感器的固有频率。实验结果表明, 该传感器的激振频率为 750 Hz, 固有频率为 1250 Hz, 灵敏度大于 83.3 pm/g, 横向抗干扰能力较强, 交叉灵敏度小于 4%。

3 归纳分析和优化建议

通过 Web of Science 学术数据库对 1992~2020 年间的光纤振动传感器进行了总结(见图 10)^[31]。从饼状图中可以清楚地观察到, 基于波长解调的 FBG 振动传感器的应用高达 65%。该类型的传感器具有分布式传感能力, 能够抵抗光强波动和不必要的光纤弯曲损耗^[30]。

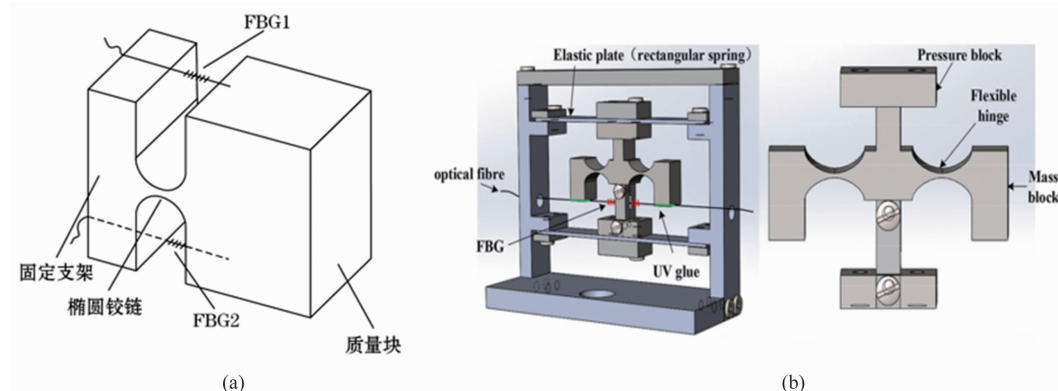


图 8 (a)变宽度椭圆铰链结构^[25]; (b)双弹性板铰链式结构^[27]

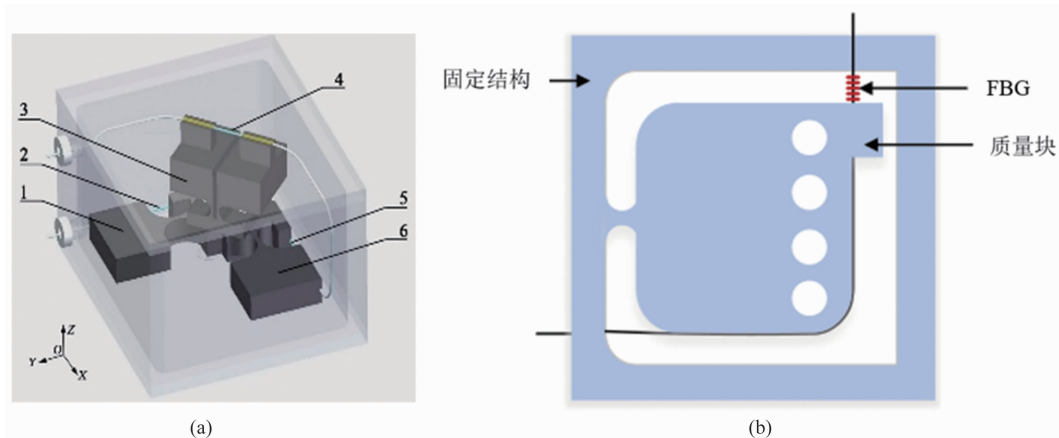


图 9 (a)柔性铰链 FBG 三维结构^[28]; (b)微型宽频振动结构^[29]

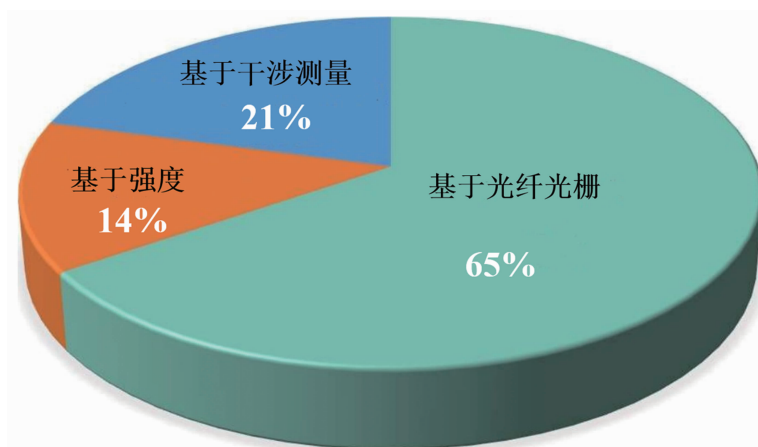


图 10 不同类型光纤振动传感器相关文献的百分比图^[31]

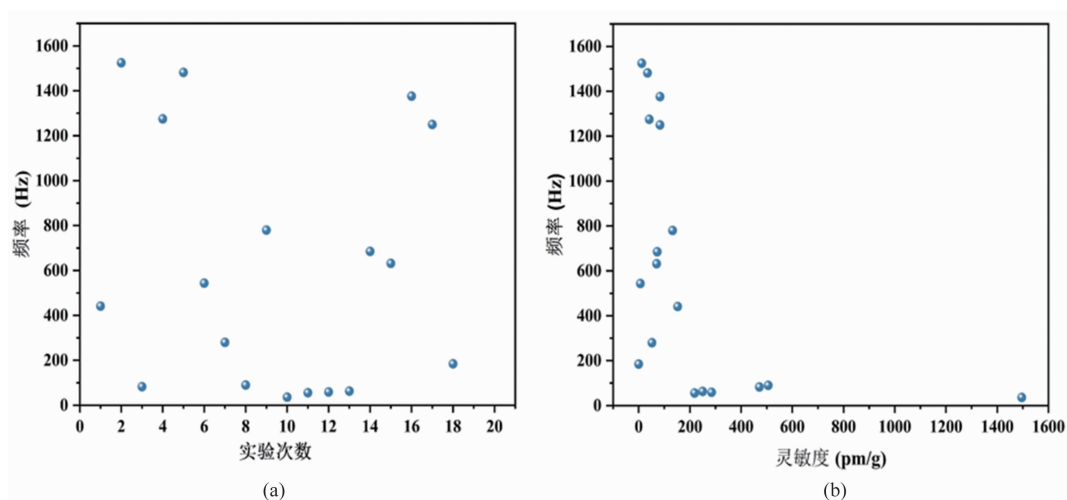


图 11 (a)实验的固有频率分布图; (b)实验的灵敏度-频率关系图

对国内近 5 年来部分 FBG 振动传感器^[11-33]的数据进行归纳总结后发现, FBG 振动传感器研究主要以中低频段为主, 但是近 3 年内在高频段中的应用也在增多(见图 11(a))。

在近 5 年的研究中, FBG 振动传感器的固有频率和灵敏度之间存在着相互制约的问题。高灵敏度传感器的固有频率较低(见图 11(b))。如何在保证高灵敏度的同时保持较高的固有频率

是目前需要解决的核心问题。因此, 针对近5年的研究提出以下4点建议:

(1)拓展传感器的应用频段, 同时保证灵敏度维持在较高水平。

(2)有针对性地设计传感器, 以免传感器在不同应用环境下受影响而导致测量结果不准确。

(3)制造新型传感器, 更新FBG的封装模式, 延长传感器的使用寿命, 多次重复利用。

(4)从多个维度研究FBG振动传感器, 使得传感器可以测量多个维度的振动信息, 同时控制传感器体积, 提高实用化水平。

4 结束语

本文介绍了悬臂梁型、膜片型和铰链型这三种结构FBG振动传感器的优缺点, 概述了近5年国内学者对这三种结构研究的丰硕成果, 并对FBG振动传感器的发展提出了4点建议。随着FBG传感技术的不断成熟, FBG振动传感器研究也在不断深入, 其在地震检波、医学、航空航天、交通运输、电力、机械、石油工业、矿藏开发、地质勘探、民用基础设施等各个领域都发挥着极其重要的作用。要使FBG振动传感器的性能更加稳定、应用更加广泛, 目前亟需解决以下几个问题: (1)通过公式推导可以得知FBG振动传感器的灵敏度与振子质量成正比关系, 与固有频率成反比关系, 具有约束作用。突破这层约束关系是提升FBG振动传感器性能的研究难点。(2)不同环境对传感器的性能存在影响, 有针对性地设计新结构来减小环境对传感器的影响同样是研究重点。(3)可从多个维度研究FBG振动传感器, 使其应用范围更广。如果解决上述问题, 则可使FBG振动传感器得到大范围的应用。总之, FBG振动传感器具有非常广阔的发展前景, 值得广大相关科研人员深入研究。

参考文献

[1] 贾振安, 赵显锋, 高宏, 等. 光纤布拉格光栅振动传感器研究[J]. 红外, 2020, 41(7): 18-24.

- [2] 张亚旭. 探讨光纤传感器在石油测井中的应用[J]. 粘接, 2021, 48(10): 127-131.
- [3] Michael B, Matthew H, Cyril H, et al. Fiber-Optic Bragg Gratings for Temperature and Pressure Measurements in Isotope Production Targets for Nuclear Medicine [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4610.
- [4] Hegde G, Asokan S, Hegde G. Fiber Bragg grating sensors for aerospace applications: a review [J]. *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, 2022, 11(1): 257-275.
- [5] Zhang X L, Liu X M, Zhang F X, et al. Reliable high sensitivity FBG Geophone for low frequency seismic acquisition [J]. *Measurement*, 2018, 129: 62-67.
- [6] Wang Z, Fan W, Gao H, et al. Optical fiber grating geophone assisted with a hollow triangle beam [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(24): 27489-27494.
- [7] Liu W F, Liu Q P, Wang C F, et al. Modelling and design of high quality factor fiber Bragg grating-based geophone [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102799.
- [8] 张健. 基于光纤光栅振动传感技术的机场围界入侵报警系统[J]. 民航学报, 2021, 5(5): 24-27.
- [9] Guo Y X, Chen M, Li X, et al. Fiber Bragg grating based acceleration sensors: a review [J]. *Sensor Review*, 2021, 41(1): 101-122.
- [10] 周雪芳, 梁磊. 光纤光栅地震检波器结构与性能仿真研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 26(3): 177-180.
- [11] 贾振安, 党硕, 禹大宽, 等. 光纤光栅振动传感器结构设计研究[J]. 红外, 2022, 43(9): 20-27.
- [12] 李天梁, 谭跃刚, 张翔, 等. 受弯件上粘贴型光纤布拉格光栅的应变传递规律[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1254-1264.
- [13] Li T L, Tan Y G, Zhou Z D. String-Type Based Two-Dimensional Fiber Bragg Grating Vibration Sensing Principle and Structure Optimization [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 259: 85-95.

- [14] 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.
- [15] He Z X, Zhang Z Y, Li L, et al. A novel fiber Bragg grating vibration sensor with double equal-strength cantilever beams [J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, **17**(6): 321–327.
- [16] 李亦佳, 王正方, 王静, 等. 基于光纤布拉格光栅振动传感器和极限学习机的工字钢梁损伤识别 [J]. *中国激光*, 2021, **48**(16): 170–181.
- [17] Wu H, Lin Q J, Han F, et al. Design and analysis of high-frequency fiber Bragg grating vibration sensor [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, **32**(2): 025108.
- [18] 张绪成, 孙志慧, 杨元元, 等. 基于 L 型悬臂梁的光纤光栅加速度传感器 [J]. *光电子·激光*, 2021, **32**(7): 696–702.
- [19] Li S S, Feng Z Y, Ma Q Q, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on symmetrical tilting cantilever beams and solder glass packaging for harsh environment [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, **65**: 102579.
- [20] 王梓琳, 樊伟, 高宏, 等. 三分量光纤布拉格光栅地震检波器 [J]. *光通信技术*, 2022, **46**(3): 47–51.
- [21] Liu Q, He X, Qiao X, et al. Design and modeling of a high sensitivity fiber Bragg grating-based accelerometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, **19**(14): 5439–5445.
- [22] Fan W, Wen J, Gao H, et al. Low-frequency fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm-type cantilever [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, **70**: 102888.
- [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] Han S, Wang Q D, Liu M Y, et al. A novel Fiber Bragg Grating vibration sensor based on orthogonal flexure hinge structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, **20**(10): 5277–5285.
- [25] 刘文敏, 戴玉堂, 魏禹. 基于双光纤光栅的高灵敏度低频加速度传感器 [J]. *光电子·激光*, 2021, **32**(9): 911–918.
- [26] 李立新, 孙睿, 于瑞红, 等. 中高频椭圆铰链双光纤光栅加速度传感器 [J]. *仪表技术与传感器*, 2021, **50**(8): 22–26.
- [27] Qiu Z C, Zhang J Q, Teng Y T, et al. Hinge-type FBG acceleration sensor based on double elastic plate [J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1): 24319.
- [28] 严超凡, 戴玉堂, 杨雨微, 等. 基于柔性铰链的 FBG 三维加速度传感器 [J]. *半导体光电*, 2022, **43**(4): 697–703.
- [29] 赵慧枝, 董明利, 辛璟焘, 等. 微型宽频 FBG 振动传感器设计及特性研究 [J/OL]. *激光与光电子学进展*, 2023, **60**(21): 1–16 [2023-05-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20230104.1353.042.html>.
- [30] Wei L, Jiang D Z, Yu L L, et al. A novel miniaturized Fiber Bragg Grating vibration sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, **19**(24): 11932–11940.
- [31] 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.
- [32] Yan B, Liang L. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on parallel double flexible hinges [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, **20**(9): 4713–4718.
- [33] 梁磊, 蔡彦璞, 戴玉堂, 等. 一种基于单一椭圆铰链的光纤光栅加速度传感器 [J]. *光电子·激光*, 2019, **30**(3): 234–240.