

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240233.

光传感与检测技术

何辰靖,李志波,赵强. 光纤布拉格光栅应变传感器应用综述[J]. 光通信研究,2026(4):242-250.

He C J, Li Z B, Zhao Q. Review of the Application of Fiber Bragg Grating Strain Sensors[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):242-250.

光纤布拉格光栅应变传感器应用综述

何辰靖¹,李志波¹,赵 强²

(1. 海南师范大学 物理与电子工程学院,海口 571100; 2. 山东省科学院 海洋仪器仪表研究所,山东 青岛 266061)

摘要:随着传感技术的快速发展,光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器逐渐实用化和商业化。与传统传感器相比,FBG 应变传感器凭借其体积小、灵敏度高、耐腐蚀和抗干扰能力强等优势,被广泛应用于高速公路、建筑、桥梁、大坝、矿区、铁路和油或气库等领域,逐渐成为检测领域的重要传感器之一。目前 FBG 应变传感器发展迅速,延伸出了许多新的方向。文章聚焦于 FBG 应变传感器,逐一分析讨论了其在位移、加速度、湿度、腐蚀和超声波等方向的延伸应用进展,阐述了各延伸应用理论原理,对其性能进行了对比分析,并对 FBG 应变传感技术的延伸应用进行了展望。

关键词:光纤布拉格光栅;应变传感器;延伸应用;灵敏度

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A

Review of the Application of Fiber Bragg Grating Strain Sensors

HE Chenjing¹, LI Zhibo¹, ZHAO Qiang²

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571100, China; 2. Shandong Academy of Sciences, Institute of Oceanographic Instrumentation, Qingdao 266061, China)

Abstract: With the rapid development of sensing technology, Fiber Bragg Grating (FBG) strain sensors have gradually become practical and commercialized. Compared with traditional sensors, FBG strain sensors are widely used in fields such as highways, buildings, bridges, dams, mining areas, railways, oil or gas reservoirs. They have gradually become one of the important sensors in the detection field due to their advantages of small size, high sensitivity, corrosion resistance, and strong anti-interference ability. At present, FBG strain sensors are developing rapidly and extending into many new directions. This article focuses on FBG strain sensors and analyzes and discusses the progress of their extended applications in displacement, acceleration, humidity, corrosion, and ultrasound directions. It details the theoretical principles of each extended application, provides a comparative analysis of their performance, and offers a perspective on future extended applications of FBG strain sensing technology.

Key words: FBG; strain sensor; extended application; sensitivity

0 引 言

随着国家综合国力的飞速发展,早期的器件和设施虽然质量都有所保障,但由于年份久远,不可避免地会出现损耗、腐蚀和老化等问题。如果检测不准确、不及时,会导致财产损失甚至人员安全等严重后果。传统的检测装置存在对设备内部检测能力差和外界抗干扰能力差等问题,不能很好地达到所需要的检测目的。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)凭借自身优异的多样性和可塑性,克服了传统检测装置的问题,成为目前热门的检测设备。

1978 年, Hill 等人^[1-2]运用光敏现象改变光纤折射率原理,首次制造出了 FBG。与传统传感器相比, FBG 具有体积小、灵敏度高、耐腐蚀、可靠性高、

实时性强、抗干扰能力强、寿命长和应用范围广等独特优势。这些特性使得光纤光栅能够满足现代电子电路高集成度的特点以及新型传感器的设计理念和应用要求^[3]。随着 FBG 技术的不断发展, FBG 作为一种先进的传感技术,已广泛应用于各个领域,且其应用范围在应变的基础上得到了扩展。到目前为止, FBG 通过与不同结构和材料的结合,可实现位移、温度、加速度、腐蚀和超声波等参数的检测。

本文概述了 FBG 的工作原理和结构特点,以 FBG 应力传感器为研究基础,综述了国内外近几年 FBG 应变传感器延伸的应用类型和研究进展。本文还对比分析了 FBG 延伸应用的特性参数,并指出了未来可能的发展方向。

收稿日期:2024-11-17; 修回日期:2024-12-18; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:海南省自然科学基金资助项目(521QN0885, 620RC606)

作者简介:何辰靖(1999-),男,云南大理人。硕士,主要研究方向为光纤应变传感器。

通信作者:李志波,高级工程师。E-mail: lizhibo@hainnu.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

1 FBG 应变传感器工作原理

FBG 是一种利用光纤材料的光敏性,在光纤纤芯内形成空间相位光栅,使其折射率呈周期性调制的光纤传感器件,其结构如图 1 所示。

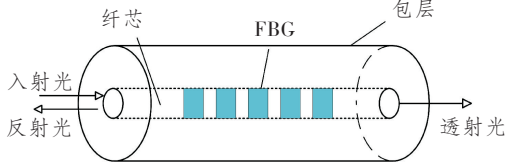


图 1 FBG 结构示意图

Figure 1 Structure diagram of FBG

当一束宽带光入射到 FBG 中心时,会使特定波长的窄带光被折射率周期性结构反射,反射回去的光的中心波长为 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, 式中: n_{eff} 为 FBG 的有效折射率; Λ 为光栅周期^[4]。当 FBG 受到应变和温度的影响时,会使 Λ 和 n_{eff} 发生变化,进而导致 FBG 中心波长变化。同时,光弹效应也会引起光栅折射率变化,从而引起 FBG 中心波长变化。光纤光栅的波长偏移量与应变 ϵ 、温度 T 和光弹效应的关系为^[5]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\epsilon + (\alpha_f + \xi)\Delta T, \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为 FBG 的波长变化量; $P_e = \frac{1}{n} \frac{dn}{d\epsilon}$ 为光纤材料的光弹系数, n 为光纤的折射率; $\Delta\epsilon$ 为 FBG 的应变变化量; $\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ 为光纤的热膨胀系数; $\xi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ 为光纤的热光系数; ΔT 为 FBG 的温度变化量。

理想的光纤光栅应变传感器应具有高灵敏度,且只对应变参数有响应。由式(1)可知,温度或应变的变化都会引起 FBG 中心波长的改变,引起波长变化的温度交叉敏感性会影响应力测量的准确性,因此在进行应变测试时,温度补偿技术是必要的^[6]。常用的温度补偿方法有:使用两个相同光栅,一个用于应力与温度的检测,另一个仅检测温度的 FBG 串/并联法^[7-8]和在弹性元件两侧粘贴 FBG,采用半桥差动法^[9]等之类的硬件补偿或者利用算法处理数据的软件补偿^[10]。

2 FBG 应变传感器的延伸应用

FBG 传感器可以直接应用于应变的测量。利用裸 FBG 传感器的压力传感最早是由 Xu 等人^[11]

在 1993 年提出。利用裸 FBG 传感器进行低压检测,但灵敏度较低,仅为 -0.00304 pm/kPa , 解决方案之一是使用更高分辨率的光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)。裸 FBG 读取低压的最佳波长分辨率为 $1 \times 10^{-3} \text{ pm}$, 可以感测到 10 kPa 的低压范围。然而,就目前所知,OSA 并不能达到 $1 \times 10^{-3} \text{ pm}$ 的波长分辨率。因此,对传感器自身的灵敏度进行内在或外在的放大更为实用。

FBG 传感器凭借其重量轻、体积小、柔韧性好、灵敏度高、分辨率高、抗电磁干扰、本质安全和易于埋入结构中等优秀的性能,开始不断应用在各领域。近几年,在检测 FBG 应变的基础上,延伸出了更多的检测方向,如位移、加速度、湿度和气体浓度等应用领域,并且都展现出了优异的性能。

2.1 位移传感器

FBG 位移传感器主要分为表面式^[12]和两点式^[13],如图 2 所示,以及其他结构。

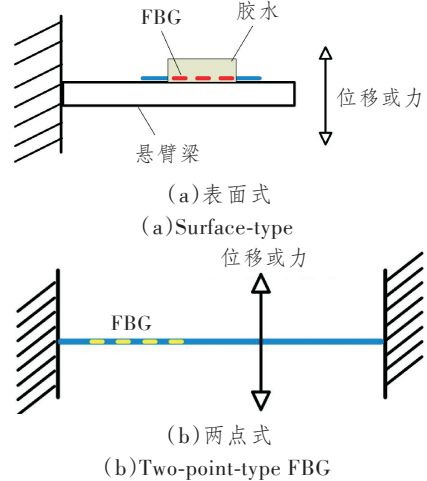


图 2 FBG 位移传感器结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of FBG displacement sensor structure

表面式虽然结构简单且量程较大,但会因为表面的不均匀应变使 FBG 产生啁啾现象,并且对粘贴技术的要求十分严格^[14]。2022 年,郭永兴等人^[15]利用表面式封装,设计了一种双梁互补式光纤光栅位移传感器,通过将两根 FBG 分别封装在两个悬臂梁与滑块组合的结构上,实现正负双向位移的检测,解决了弹性元件易发生蠕变的问题,但其结构较为复杂,且测量范围和灵敏度都较低,分别为 $\pm 50 \text{ mm}$ 和 29.369 pm/mm ; 2022 年, Li 等人^[15]设计了一种拉线式竖向 FBG 位移传感器,利用拉线式的方法减少了结构的复杂性,并且降低了成本。

两点式是将 FBG 两端固定,基于轴向应力场

下光纤的线弹性,研究悬挂张紧的FBG在横向应力下的传感特性^[17]。两点式弥补了表面式的缺点,灵敏度也比表面式高出3~4个量级,近几年的位移传感器大都以两点式为主。2021年,孙丽等人^[18]利用两点式封装,提出了一种压杆式光纤光栅位移传感器,通过改变弹簧刚度可以实现灵活控制测量精度,该传感器量程范围为0~100 mm,灵敏度为18.14 pm/mm;2021年,Wu等人^[19]提出了一种基于平行悬挂式灵敏度可调的双光纤的光纤光栅微位移传感器,该结构解决了啁啾的问题,实现了温度自补偿功能,灵敏度提高到了1518.6 pm/mm;2023年,倪岳等人^[20]设计了一种有自标定功能的FBG位移传感器,将量程范围提高到了0~360 mm。

其他结构的封装方式虽然较少,但也有其独特优势。2022年,朱万旭等人^[17]利用两端夹持式封装,设计出了一种压杆式FBG位移传感器。该结构避免了拉杆式对安装所带来的困难,并且使用细杆状结构减小了安装难度,通过减小压簧刚度实现了测量量程的增大,减少有效圈数提高了传感器位移灵敏度,在15 mm的量程范围内,灵敏度为451.36 pm/mm;2023年,范好好等人^[14]利用两点式与传动系统相结合的方式,提出了一种光纤光栅波峰计数式位移传感器,通过齿轮与悬臂压片相结合的结构,克服了量程与分辨力相互制约的问题,并且可以改变齿条、传动系统和齿轮的数值,实现同时满足大量程和高分辨力的测量需求,传感器的量程为40 mm,分辨力达0.1 mm。

现阶段FBG位移传感器研究的主要参数如表1所示。

表1 FBG位移传感器性能对比

Table 1 Performance comparison of FBG displacement sensors

封装	结构	量程/mm	灵敏度/pm/mm
表面式	双梁互补式	0~±50.0	29.369
表面式	拉线式	—	7.870
两点式	压杆式	0~100.0	18.140
两点式	悬挂式	0~0.5	1518.600
两点式	压杆式	0~360.0	5.560
夹持式	压杆式	0~15.0	451.360
两点传动式	波峰计数式	0~40.0	—

FBG位移传感器作为目前的热门研究方向,近几年都在不断出现新的位移传感器,现有研究结果显示其主要存在的问题为量程小,检测结果易受温度、光纤抖动和解调仪误差等影响,量程与分辨率虽

然都在逐渐提高,但还不能做到两者兼得。量程方面,未来可研究采用齿轮和齿条等循环式结构来提高量程。灵敏度方面,未来可考虑研究非粘贴的方式来提高灵敏度。

2.2 加速度传感器

FBG加速度传感器的设计十分多样灵活,所以结构类型较多,大致可以分为悬臂梁式^[21]、铰链式^[22]和膜片式^[23]3种结构类型,如图3所示,和一些其他的特殊结构类型。

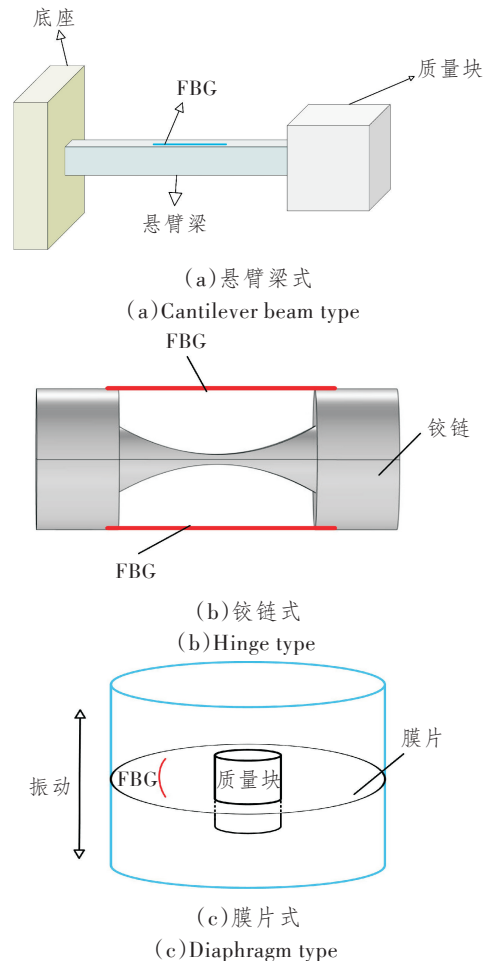


图3 FBG加速度传感器结构示意图

Figure 3 Schematic diagram of FBG accelerometer structure

悬臂梁式传感器主要由底座、悬臂梁和质量块组成,结构较为简单且表面应变均匀,但横向抗干扰能力较差,容易产生啁啾现象。铰链式传感器结构更为简单,在悬臂梁的基础上将质量块与弹性系统结合于一体,在震动过程中无摩擦,灵敏度高,但抗横向干扰能力也较差。膜片式传感器具有可灵活调控灵敏度和宽频响范围等优点,但封装较为复杂^[24]。

2021年,Wang等人^[25]提出了一种双质量块FBG加速度传感器。由一个金属横梁与两个质量

块组成,FBG 粘贴在两个质量块上方的凹槽中。该传感器结构简单,但灵敏度较低,为 26.7 pm/g;2022 年,覃荷瑛等人^[26]提出了一种灵敏度可调的基于等强度悬臂梁的 FBG 加速度传感器,灵敏度提高到 664.53 pm/g;2023 年,蒋宇飞等人^[27]设计出了一种基于悬臂梁式的灵敏度可调紧凑型高频振动传感器,提高了传感器的工作频率,调整前,传感器的频率范围<1 000 Hz,调整后,频率范围<120 Hz;2023 年,于瑞红等人^[28]提出了一种基于悬臂梁的高灵敏度低频双 FBG 加速度传感器,将传感器灵敏度进一步提高到了 1 498.29 pm/g;2023 年,魏莉等人^[29]设计出了一种基于悬臂梁式的增敏型对称简支梁结构的光纤光栅加速度传感器,解决了悬臂梁结构横向抗干扰能力差的问题,FBG 光栅区的悬空设计避免了唧唧现象,两个 FBG 拉伸压缩的相反状态实现了温度自补偿,结构简单,为后续悬臂梁式

加速度传感器的设计提供了较好的思路。

2022 年,宋颖等人^[30]提出了一种基于柔性铰链的中高频 FBG 加速度传感器,该结构中间为单柔性铰链,两侧为轴承支撑的双质量块,两根光纤光栅分别粘贴在质量块上下延伸杆末端。该传感器固有频率为 3 810.7 Hz,工作频带为 10~1 200 Hz,灵敏度为 17.25 pm/g;2023 年,Le 等人^[31]提出了一种对称柔性铰链结构的中高频 FBG 加速度传感器,将灵敏度提高到了 66 pm/g。

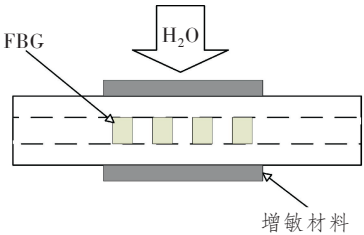
现阶段 FBG 加速度传感器的主要性能指标如表 2 所示。灵敏度与工作频率不能同时提高一直是研究的一大难点。目前所知的 FBG 加速度传感器只能测量一个方向的加速度,并且目前的封装工艺会带来误差,横向干扰也是需要注意的问题。未来可在封装工艺方面增加调整方向的结构以增加传感器测量方向做进一步研究。

表 2 FBG 加速度传感器性能对比
Table 2 Performance comparison of FBG accelerometer

传感结构	固有频率/Hz	工作频率/Hz	灵敏度/pm/g	备注
悬臂梁式	1 000.0	0~250	26.70	双质量块
悬臂梁式	49.0	0~34	664.53	等强度悬臂梁
悬臂梁式	1 481.0	调整前<1 000	9.02	紧凑型
	185.0	调整后<120	136.37	
悬臂梁式	65.0	3~45	1 498.29	刚性梁
悬臂梁式	294.6	30~130	307.00	对称简支梁
铰链式	3 810.7	10~1 200	17.25	单柔性铰链
铰链式	1 550.0	400~1 000	66.00	对称柔性铰链

2.3 湿度传感器

由于 FBG 自身对湿度变化并不敏感,该传感器主要研究涂敷在 FBG 上的增敏材料。通过涂敷的增敏材料吸收水分发生膨胀带动传感器产生应变,实现对湿度的检测,其结构如图 4 所示。目前常用的增敏材料有聚酰亚胺^[32]和聚乙烯醇^[33]。



注:H₂O 为水。

图 4 FBG 湿度传感器结构示意图
Figure 4 Schematic diagram of FBG humidity sensor structure
2021 年,邢心魁等人^[34]基于聚酰亚胺材料设计出了一种 FBG 湿度传感器。将聚酰亚胺涂敷到 FBG 上,聚酰亚胺吸收水分发生膨胀,从而引起

FBG 产生应变,灵敏度为 5.5 pm/%RH;2021 年,Li 等人^[35]提出了一种聚酰亚胺和石墨烯薄膜涂覆的 FBG 湿度传感器,通过将石墨烯涂覆在聚酰亚胺的表面,增加聚酰亚胺与外界的接触面积,将灵敏度提高到了 19.8 pm/%RH;2022 年,邵敏等人^[36]设计了一种基于氧化石墨烯-聚乙烯醇薄膜的 FBG 湿度传感器,在 50~60 %RH 湿度范围内的灵敏度为 2.3 pm/%RH,60~70 %RH 湿度范围内的灵敏度为 7.7 pm/%RH,70~80 %RH 湿度范围内的灵敏度为 47.2 pm/%RH;2023 年,杨萌等人^[37]设计了一种基于三氧化二铝-聚乙烯醇的 FBG 湿度传感器,在湿度为 40~58 %RH 时,灵敏度提高到了 6 pm/%RH,湿度为 58~70 %RH 时,灵敏度提高到了 32.3 pm/%RH;2023 年,陈鹏宇等人^[38]提出了一种基于壳聚糖/聚乙烯醇/纳米碳粉复合物涂敷的 FBG 湿度传感器,在相对湿度为 20~90 %RH 范围内,灵敏度达到 57.7 pm/%RH。

目前 FBG 湿度传感器主要性能参数如表 3 所示。灵敏度在不断提升,但灵敏度数值仍较低,并且还存在响应时间长和准确性低等问题。未来可研究采用对湿度敏感、易变形的新材料与 FBG 结合来提升灵敏度。

表 3 湿度传感器性能对比

Table 3 Performance comparison of FBG humidity sensor

湿敏材料	相对湿度范围/%RH	灵敏度/ $\mu\text{m}/\%\text{RH}$
聚酰亚胺	30~98	5.5
聚酰亚胺-石墨烯	30~70	19.8
氧化石墨烯-	50~60	2.3
聚乙烯醇	60~70	7.7
	70~80	47.2
三氧化二铝-	40~58	6.0
聚乙烯醇	58~70	32.3
壳聚糖/聚乙烯醇		
纳米碳粉	20~90	57.7

2.4 氢气传感器

FBG 本身对氢气(H_2)并不敏感,氢气传感器主要以涂敷在 FBG 表面上的氢敏材料为研究对象,其结构如图 5 所示。通过氢敏材料吸收外界氢气,发生膨胀或放热反应,使 FBG 中心波长变化,达到检测目的。

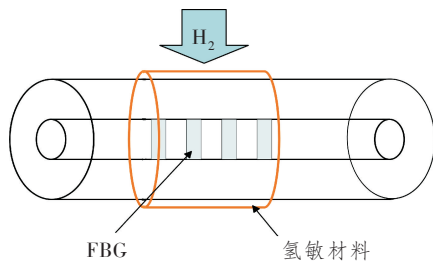


图 5 FBG 氢气传感器结构示意图

Figure 5 Schematic diagram of FBG hydrogen sensor structure

2020 年,周贤等人^[39]设计了一种纳米棒掺铂三氧化钨(Pt-WO_3)螺旋微结构 FBG 氢传感器,当 Pt-WO_3 膜与氢气结合后,会产生放热反应,温度的变化使 FBG 中心波长发生偏移,实现对氢气浓度的检测。该传感器对光纤包层进行了螺旋微结构的设计,提高了 FBG 的灵敏度,但响应时间较长,为 15~30 s;2021 年,洪婉玲等人^[40]提出了一种基于介孔型掺铂三氧化钨(Pt/WO_3)粉末的 FBG 氢气传感器,响应时间缩短至 10 s;2020 年,辛鑫等人^[41]提出了一种基于聚多巴胺(PDA)辅助化学镀的 FBG 氢气传感器,通过在钯膜表面涂覆一层氧化

硅疏水层,消除了温度和湿度对实验结果的影响,提高了传感器的检测准确度和使用寿命;2023 年,王蓉等人^[42]利用钯(Pd)、氧化硅超疏水溶胶和倾斜光纤光栅设计了一种氢气传感器,将灵敏度提高到了 $-15.29 \mu\text{m}/\%$ 。

目前 FBG 氢气传感器的主要性能参数如表 4 所示。灵敏度方面仍有较大的提升空间,并且响应时间也有待提高。未来可以优化氢敏材料向稳定性和重复性以及更高的灵敏度方向提升。

表 4 FBG 氢气传感器性能对比

Table 4 Performance comparison of FBG hydrogen sensor

氢敏材料	灵敏度/ $\mu\text{m}/\%$
Pt-WO_3	89.00
Pt/WO_3	11.69
PDA	10.80
Pd	-15.29

2.5 腐蚀传感器

根据被测物的腐蚀特性、腐蚀原理和腐蚀发展规律,目前对腐蚀的检测可以分为直接对被测物腐蚀区域的 pH 进行检测或者对被测物受腐蚀后发生体积的改变而使 FBG 产生应变的间接检测两种方法。

2021 年,李忠等人^[43]设计了一种混凝土结构钢筋腐蚀的 FBG 传感器,在钢筋与混凝土保护层之间放置 3 根与钢筋垂直且平行的塑料管,等距布设且与钢筋的距离由近及远,将 3 个 FBG 分别放入 3 根塑料管中,根据 3 个 FBG 不同的停止工作时间,可实现对裂缝大小和钢筋腐蚀状态的实时检测;2023 年,覃荷瑛等人^[44]研制了一种光纤光栅索力传感器,在金属承压块上刻制凹槽,用两种不同的环氧树脂分别将 FBG 固定在凹槽中,分为 A 和 B 两类进行对照实验,A 类传感器在 $\text{pH}=6.5$ 的环境中,使用寿命约为 44 年,B 类传感器在 $\text{pH}=8.5$ 的环境中,使用寿命约为 39 年;2023 年,Zhou 等人^[45]提出将 FBG 粘贴在埋入混凝土中的钢筋上,用于监测钢筋的腐蚀状况,研究结果显示,粘贴在砂浆材料上的 FBG 传感器对钢筋腐蚀过程的监测范围更大,两点粘贴的 FBG 传感器更能准确地监测钢筋的腐蚀过程,使用 3 光栅更能准确地评估钢筋的腐蚀过程,当 FBG 传感器与砂浆材料两点粘接时,对钢筋锈蚀过程的监测效果最好。

2022 年,江雪等人^[46]利用丙烯酸-甲基丙烯酸羟乙酯共聚单体水凝胶设计了一种预应力锚索用腐蚀传感器。将水凝胶涂敷在 FBG 表面后,水凝胶

因环境 pH 值的变化发生溶胀,从而引起 FBG 产生应变。该传感器经历 10 次以上干湿循环后会失效,重复性有待提高,响应灵敏度为 25 pm/pH。

目前 FBG 腐蚀传感器方向的研究较少,主要

特性如表 5 所示。对 pH 值直接测试的 FBG 传感器重复使用率较差,还达不到长期检测的目的。未来可研究材料与 FBG 的结合方式,提高传感器的重复性和适用范围。

表 5 FBG 腐蚀传感器总结

Table 5 Summary of FBG corrosion sensor

被测物	作用	备注
混凝土结构钢筋	实时监控裂缝大小	重复性差,检测范围比较局限且较小
拉索	对斜拉索全生命周期的监测	灵敏度,耐久性有待研究
混凝土结构钢筋	监测钢材的腐蚀状况	灵敏度,使用寿命有待研究
锚索	持续对环境的 pH 值进行监测	重复性较差,灵敏度较低

2.6 超声波传感器

目前国内外对 FBG 超声波传感器的研究相对较少,主要以研究能汇聚超声波的结构为主,再使其传播到 FBG 中进行检测。

2019 年,史镜名等人^[47]提出了一种基于耦合锥结构的 FBG 超声波传感器,通过耦合锥结构将超声波信号从底部汇聚到顶端,将 FBG 与顶端相连,超声波信号从顶端传输到 FBG,使 FBG 产生轴向应变,进而对 FBG 的光栅周期和有效折射率产生周期性调制,实现对超声波信号的检测;2023 年,李剑芝等人^[48]设计了一种基于双斜锥耦合结构的高灵敏度 FBG 超声波传感器,该传感器可检测 20~130 kHz 范围内的超声波,在 40~70 kHz 检测频率范围内,信噪比为 10~19 dB。

FBG 超声波传感器与光纤法布里-珀罗(F-P)超声波传感器相比,主要性能参数如表 6 所示,FBG 的检测范围较大,但信噪比低于 F-P 传感器。并且目前的 FBG 超声波传感器在加工和安装方面都比较困难。

表 6 超声波传感器性能对比

Table 6 Performance comparison of ultrasonic sensors

传感元件	频率范围/kHz	信噪比/dB
FBG	20~130	10~19
F-P ^[49]	20~80	>25

2.7 其它应用

除了上述提及的应用外,FBG 应变传感器还有许多应用。诸如:王芳等人^[50]设计了等离子体光纤光栅超痕量汞离子传感器,为重金属污染物识别和临床诊断早期低浓度离子检测等方面提供了新的方法;朱万旭等人^[51]设计了基于正弦式波纹膜片的压差式 FBG 静力水准仪,克服了传统静力水准仪精度低等问题,提高了检测不均匀沉降的准确性;周源等人^[52]设计了一种基于稀土磁光晶体和光纤光栅

的宽温区反射式光纤磁场传感器,为磁场传感检测提供了新思路;周会娟等人^[53]设计了一种双面感压式光纤土压力传感器,实现了对岩土工程结构的检测。

目前 FBG 应变传感器的发展迅速,性能在不断突破,应用范围也在不断扩大,但在灵敏度、检测范围、重复性和封装工艺等方面还需进一步研究。

3 结束语

本文对 FBG 应变传感器的延伸应用进行了综述,得出以下结论:

①基于 FBG 的位移传感器研究方面:灵敏度最高能够达到 1 518.6 pm/mm,量程范围最高扩展到 0~360 mm。现阶段的主要研究瓶颈是不能做到两者兼得。量程小,易受温度、光纤抖动和解调仪误差等影响还有待解决。

②基于 FBG 的加速度传感器研究方面:灵敏度最高可达 1 498.29 pm/g,工作频率最高可达 1 200 Hz。目前的主要研究瓶颈是灵敏度与工作频率不能兼得。封装工艺带来的误差和横向干扰问题也需要克服。

③湿度传感器与氢气传感器两者现阶段都存在灵敏度低、响应时间长和准确性低等瓶颈。都需要在增敏材料方面进行优化。

④腐蚀传感器与超声波传感器目前国内外研究都较少,灵敏度和重复率等方面都有待研究。

FBG 应变传感器经过多年的发展,已经从实验室走向商业化,相关的各项技术已经相对成熟,凭借自身的一些独特优势,其应用领域在不断拓展。

参考文献:

[1] 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.
- [2] 丁宝艳,赵强,陈东营,等. 光纤布拉格光栅压力传感技术与应用进展[J]. 光通信研究, 2024(3): 230018.
Ding B Y, Zhao Q, Chen D Y, et al. Technology and Application Progress of Fiber Bragg Grating Pressure Sensing[J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230018.
- [3] 路万里, 黄志慧, 胡焕然. 光纤光栅传感器工作原理及其应用[J]. 中国科技信息, 2024(17): 67-69.
Lu W L, Huang Z H, Hu H R. Working Principle and Application of Fiber Grating Sensor[J]. China Science and Technology Information, 2024(17): 67-69.
- [4] 周莹梦, 张晓丽, 连帅彬, 等. 基于光纤光栅传感器的变压器储油柜油位计研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2019, 32(2): 307-311.
Zhou Y M, Zhang X L, Lian S B, et al. Research on Oil Level Gauge of Transformer Oil Conservator based on Fiber Bragg Grating Sensor[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 32(2): 307-311.
- [5] 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]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 70-77.
Du Y, Si J H, Chen T, et al. Quasi-Distributed High Temperature Sensor based on Fiber Bragg Grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 70-77.
- [6] Vorathin E, Hafizi Z M, Ismail N, et al. Review of High Sensitivity Fibre-Optic Pressure Sensors for Low Pressure Sensing [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105841.
- [7] Huang J, Zhou Z, Wen X, et al. A Diaphragm-Type Fiber Bragg Grating Pressure Sensor with Temperature Compensation[J]. Measurement, 2013, 46(3): 1041-1046.
- [8] Zhang W, Li F, Liu Y. FBG Pressure Sensor based on the Double Shell Cylinder with Temperature Compensation[J]. Measurement, 2009, 42(3): 408-411.
- [9] Leal-Junior A, Frizzera A, Marques C. A Fiber Bragg Gratings Pair Embedded in a Polyurethane Diaphragm: Towards a Temperature-Insensitive Pressure Sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 131: 106440.
- [10] 韦兆碧, 刘晔, 马志瀛, 等. 基于RBF网络的光纤位移传感器温度补偿研究[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(2): 42-45.
Wei Z B, Liu Y, Ma Z Y, et al. Research on Temperature Compensation of Optical Fiber Displacement Sensor based on RBF Neural Network [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(2): 42-45.
- [11] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, et al. Optical In-Fibre Grating High Pressure Sensor[J]. Electronics Letters, 1993, 29(4): 398.
- [12] Wang S, Zhu L, Xin J, et al. Fiber Grating Displacement Sensor of Tape Measure Structure[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102107.
- [13] Li T, Ren H. A Hybrid FBG Displacement and Force Sensor with a Suspended and Bent Optical Fiber Configuration[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 268: 117-125.
- [14] 范好好, 赵强, 杜大伟, 等. 高抗噪光纤光栅波峰计数式位移传感器[J]. 光子学报, 2024, 53(6): 0606003.
Fan H H, Zhao Q, Du D W, et al. High Anti-Noise Displacement Sensor Base on Fiber Bragg Grating Peak Counting [J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(6): 0606003.
- [15] 郭永兴, 杨慧, 朱家静, 等. 一种双梁互补式光纤光栅位移传感器及在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 光子·激光, 2023, 34(8): 851-860.
Guo Y X, Yang H, Zhu J J, et al. A Double-Beam Complementary Fiber Bragg Grating Displacement Sensor and Its Application in Underpass Tunnel Deformation Monitoring [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2023, 34(8): 851-860.
- [16] Li S, Liang Z, Guo P. A FBG Pull-Wire Vertical Displacement Sensor for Health Monitoring of Medium-Small Span Bridges [J]. Measurement, 2023, 211: 112613.
- [17] 朱万旭, 宋天明, 刘丰荣, 等. 压杆式光纤光栅位移传感器的研制[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(4): 83-87.
Zhu W X, Song T M, Liu F R, et al. Research and Fabrication of FBG Displacement Sensor with Pressure Rod [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(4): 83-87.
- [18] 孙丽, 孙欣欣, 李闯, 等. 基于光纤光栅的高精度压杆式位移传感器[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(5): 779-786.
Sun L, Sun X X, Li C, et al. High-Precision and Pressure Rod Type Displacement Sensor based on Fiber Bragg Grating[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(5): 779-786.
- [19] Wu D, Li T, Khyam M O, et al. A Temperature Self-Compensation Submicron Displacement Fbg Sensor with Tilt Parallel-Suspended Dual-Optical Fibers[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 332: 113200.
- [20] 倪岳, 辛璟焘, 宋言明, 等. 具有自标定功能的光纤光栅位移传感器[J]. 激光与红外, 2024, 54(1): 148-153.
Ni Y, Xin J T, Song Y M, et al. Fiber Bragg Grating Displacement Sensor with Self-Calibration

- Function[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(1): 148–153.
- [21] 魏莉, 刘壮, 李恒春, 等. 基于“土”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): 1106004.
- Wei L, Liu Z, Li H C, et al. Fiber Bragg Grating Vibration Sensor based on Sensitive Structure for “土” - Shaped Beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106004.
- [22] Yan B, Liang L. A Novel Fiber Bragg Grating Accelerometer based on Parallel Double Flexible Hinges [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(9): 4713–4718.
- [23] 魏莉, 余玲玲, 姜达州, 等. 基于膜片与菱形结构的光纤布拉格光栅加速度传感器[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 910003.
- Wei L, Yu L L, Jiang D Z, et al. Fiber Bragg Grating Accelerometer based on Diaphragm and Diamond Structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46 (9) : 910003.
- [24] 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.
- Jia Z A, Dang S, Yu D K, et al. Research on Structure Design of Fiber Grating Vibration Sensor[J]. *Infrared*, 2022, 43(9): 20–27.
- [25] Wang D, Wu Y, Song Y, et al. A Double-Mass Block Acceleration Sensor based on FBG [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 66: 102681.
- [26] 覃荷瑛, 李纯德, 祝健强, 等. 基于等强度悬臂梁的低频高灵敏度FBG加速度传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2024, 35(2): 113–121.
- Qin H Y, Li C D, Zhu J Q, et al. Study on Low-Frequency and High-Sensitivity FBG Acceleration Sensor based on Equal Strength Cantilever Beam[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2024, 35(2): 113–121.
- [27] 蒋宇飞, 陶传义, 李梦影, 等. 基于光纤光栅的紧凑型高频振动传感器的设计与应用[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(12): 252–260.
- Jiang Y F, Tao C Y, Li M Y, et al. Design and Application of Compact High-Frequency Vibration Sensor based on Fiber Bragg Grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(12): 252–260.
- [28] 于瑞红, 姚振静, 罗青山, 等. 面向低频振动测量的双光纤光栅加速度传感器研究[J]. *中国测试*, 2024, 50(8): 157–163.
- Yu R H, Yao Z J, Luo Q S, et al. Research on Double Fiber Grating Acceleration Sensor for Low Frequency Vibration Measurement [J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2024, 50(8): 157–163.
- [29] 魏莉, 吴宇昌, 丁华雷, 等. 增敏型对称简支梁结构的光纤光栅加速度传感器[J]. *光电子·激光*, 2025, 36(5): 499–505.
- Wei L, Wu Y C, Ding H L, et al. Fiber Bragg Grating Acceleration Sensor with Sensitized Symmetrical Simply Supported Beam Structure[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2025, 36(5): 499–505.
- [30] 宋颖, 张浩然, 李剑芝, 等. 基于轴承和柔性铰链的布拉格光纤光栅加速度计[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(5): 1109–1120.
- Song Y, Zhang H R, Li J Z, et al. Fiber Bragg Grating Accelerometer based on Flexure Hinge and Bearing[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1109–1120.
- [31] Le H D, Chiang C C, Nguyen C N, et al. Design and Optimization of Medium-High Frequency FBG Acceleration Sensor based on Symmetry Flexible Hinge Structure[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 78: 103308.
- [32] Wang N, Tong J, Wang J, et al. Polyimide-Sputtered and Polymerized Films with Ultrahigh Moisture Sensitivity for Respiratory Monitoring and Contactless Sensing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(9): 11842–11853.
- [33] Sun D, Chen J, Fu Y, et al. A Real-Time Response Relative Humidity Sensor based on a Loop Microfiber Coated with Polyvinyl Alcohol Film[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110359.
- [34] 邢心魁, 蒋雪, 刘凡凡, 等. 基于聚酰亚胺材料的光纤布拉格光栅湿度传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1328002.
- Xing X K, Jiang X, Liu F F, et al. Fiber Bragg Grating Humidity Sensor based on Polyimide Material [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59 (13) : 1328002.
- [35] Li Z, Dong B, Chen E, et al. High Sensitivity FBG Humidity Sensor Coated with Graphene and Polyimide Films[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 66: 102635.
- [36] 邵敏, 杨萌, 张文松, 等. 基于氧化石墨烯-聚乙烯醇薄膜的光纤光栅湿度传感器[J]. *光电子·激光*, 2024, 35(7): 673–682.
- Shao M, Yang M, Zhang W S, et al. Fiber Grating Humidity Sensor based on Graphene Oxide - Polyvinyl Alcohol Film [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2024, 35(7): 673–682.
- [37] 杨萌, 邵敏, 刘颖刚, 等. 基于三氧化二铝: 聚乙烯醇的光纤光栅湿度传感器[J]. *光电技术应用*, 2023, 38(6): 55–59.
- Yang M, Shao M, Liu Y G, et al. Fiber Grating Humidity Sensor based on Aluminum Trioxide - Polyvinyl Alcohol Coating [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2023, 38(6): 55–59.
- [38] 陈鹏宇, 钟年丙, 何雪丰, 等. 壳聚糖/聚乙烯醇/纳米碳粉复合物涂覆光纤布拉格光栅湿度传感器[J]. *光学学报*, 2024, 44(4): 0428003.

- Chen P Y, Zhong N B, He X F, et al. Chitosan/Polyvinyl Alcohol/Nanocarbon Powder Composite Coated Fiber Bragg Grating Humidity Sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(4): 0428003.
- [39] 周贤, 杨沫, 张文, 等. 纳米棒Pt-WO₃微结构光纤氢气传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 212-217.
- Zhou X, Yang M, Zhang W, et al. Micro-Structured Fiber Hydrogen Sensor based on Nanorod Pt-WO₃[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 212-217.
- [40] 洪婉玲, 赵春柳, 徐睿, 等. 涂覆介孔型Pt/WO₃膜的光纤布喇格光栅氢气传感器[J]. *光通信技术*, 2021, 45(11): 6-10.
- Hong W L, Zhao C L, Xu R, et al. Fiber Bragg Grating Hydrogen Sensor Coated with Mesoporous Pt/WO₃ Film[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(11): 6-10.
- [41] 辛鑫, 吴永武, 刘慧敏, 等. 一种新的光纤Bragg光栅氢气传感器制作方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0406002.
- Xin X, Wu Y W, Liu H M, et al. A New Fabrication Method of Fiber Bragg Grating Hydrogen Sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0406002.
- [42] 王蓉, 马永军, 钟用, 等. 准确检测液相中氢气浓度的倾斜光纤光栅传感器[J]. *压电与声光*, 2023, 45(3): 450-453.
- Wang R, Ma Y J, Zhong Y, et al. A Tilted Fiber Grating Sensor for Accurate Detection of H₂ Concentration in Liquid Phase[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2023, 45(3): 450-453.
- [43] 李忠, 崔宏, 汪红星, 等. 一种混凝土结构钢筋腐蚀的光纤传感监测装置[J]. *兰州理工大学学报*, 2021, 47(4): 111-115.
- Li Z, Cui H, Wang H X, et al. A Optical Fiber Sensing Monitoring Device for Reinforcement Corrosion in Concrete Structures[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2021, 47(4): 111-115.
- [44] 覃荷瑛, 祝健强, 李纯德, 等. 光纤光栅索力传感器的酸碱耐久性[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(20): 8606-8614.
- Qin H Y, Zhu J Q, Li C D, et al. Acid-Base Durability of Fiber Bragg Grating Cable Force Sensor[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(20): 8606-8614.
- [45] Zhou H, Wang Y, Zhou Z, et al. Effects of Bonding on Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor for Monitoring Steel Corrosion Condition in Concretes[J]. *Measurement*, 2023, 222: 113565.
- [46] 江雪, 徐建丰, 刘丰荣, 等. 预应力锚索用腐蚀传感器的设计[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(4): 92-95.
- Jiang X, Xu J F, Liu F R, et al. Design of Corrosion Sensor for Prestressed Anchor Cable[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(4): 92-95.
- [47] 史镜名, 郑狄, 潘炜, 等. 基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器及其无损检测研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1206004.
- Shi J M, Zheng D, Pan W, et al. Fiber Grating Ultrasonic Sensor based on Coupling Cone Structure and Its Application in Nondestructive Detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1206004.
- [48] 李剑芝, 史宇承, 吉喆, 等. 双斜锥光纤布拉格光栅超声波传感装置[J]. *光学学报*, 2024, 44(11): 1106005.
- Li J Z, Shi Y C, Ji Z, et al. Design of Fiber Bragg Grating Ultrasonic Sensor with Dual-Slant Cone Structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(11): 1106005.
- [49] 鞠玲, 翁蓓蓓, 牛锡玲, 等. 基于膜片式光纤法布里-珀罗传感器的超声波检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(15): 1506002.
- Ju L, Weng B B, Niu X L, et al. Ultrasonic Detection based on Diaphragm Optical Fiber Fabry-Perot Sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(15): 1506002.
- [50] 王芳, 廉岚淇, 卢梦迪, 等. 等离子体光纤光栅超痕量汞离子传感器[J]. *光学学报*, 2024(9): 0928002.
- Wang F, Lian L Q, Lu M D, et al. Plasmonic Fiber Grating Sensors for Ultra-Trace Mercury Ion Detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024(9): 0928002.
- [51] 朱万旭, 吴尧, 黄家柱, 等. 基于正弦式波纹膜片的压差式FBG静力水准仪[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(5): 109-112.
- Zhu W X, Wu Y, Huang J Z, et al. Differential Pressure Type FBG Static Level based on Sinusoidal Corrugated Diaphragm[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(5): 109-112.
- [52] 侯越, 周淦, 欧阳希, 等. 基于磁光晶体和光纤光栅的反射式磁场传感器[J]. *光学学报*, 2024, 44(11): 1128004.
- Hou Y, Zhou Q, Ouyang X, et al. Reflective Magnetic Field Sensor based on Magneto-Optical Crystal and Fiber Bragg Grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(11): 1128004.
- [53] 周会娟, 余尚江, 陈晋央, 等. 一种双面感压式光纤土压力传感器[J]. *兵工学报*, 2023, 44(S1): 132-137.
- Zhou H J, Yu S J, Chen J Y, et al. An Optical Fiber Soil Pressure Sensor with Double Sensitive Surfaces[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(S1): 132-137.