

环境试验与观测

光纤光栅传感器及其应用

廖光萌, 何建新, 朱玉琴, 王莞

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 综述了几种典型光纤光栅传感器及在传感领域的应用。首先介绍了光纤光栅传感的基本原理, 然后对布拉格光栅、长周期光栅、倾斜光栅和啁啾光栅的结构、光学特性进行了说明。最后阐述了光纤光栅传感器在温度传感、结构健康监测、腐蚀研究等方面的应用, 以及在应用上的不足和今后的发展方向。

关键词: 光纤光栅; 传感器; 温度传感; 结构健康监测; 腐蚀研究

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)11-0142-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.019

Fiber Grating Sensor and Application

LIAO Guang-meng, HE Jian-xin, ZHU Yu-qin, WANG Wan

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: This article aims to review several typical fiber grating sensors and their applications in the field of sensing. First, the basic principles of fiber grating sensing are introduced, and then the structure and optical characteristics of Bragg gratings, long-period gratings, tilted gratings and chirped gratings are explained. Finally, the application of fiber grating sensors in temperature sensing, structural health monitoring, corrosion research, the shortcomings in application and future development directions are described.

KEY WORDS: fiber grating; sensor; temperature sensing; structural health monitoring; corrosion research

1978年, Hill等^[1]通过驻波法在掺锗石英光纤上写入光栅, 制作了世界上第一只能够实现反向模式耦合的光纤光栅, 从此打开了光纤光栅应用的大门。1996年, Bhatia等^[2]首次将光纤光栅引入传感领域。之后, 随着光纤光栅传感技术的快速发展, 光纤光栅传感器逐渐成为各国研究学者的重点关注对象, 并在航空航天、生物医学、石油化工以及土木工程等领域的应用中大放异彩。与传统的电磁、压电类传感器相比, 光纤光栅传感器表现出明显优势。首先, 光纤本身的材质是基于玻璃纤维或聚合物材料, 传感部分也

不涉及任何电磁元件, 所以以光波作为信息载体的光纤光栅传感器可以不被电磁干扰, 在复杂电磁场环境下也能使用。其次, 光纤光栅尺寸小、质量轻, 不易影响被测环境, 且能够嵌入到材料内部对其状态进行监测。另外, 光纤光栅传感器灵敏度高, 周围环境较小的扰动变化都会引起光纤光栅物理参量的改变, 从而引起光信号参量的改变。光纤光栅传感器还可以实现分布式测量, 在一根光纤中串联多个光栅, 对在光纤传输通道上的各个光栅随时间变化的信息进行测量和实时监控, 这就为工程化应用提供了基础。

收稿日期: 2021-11-04; 修订日期: 2021-12-10

Received: 2021-11-04; Revised: 2021-12-10

作者简介: 廖光萌 (1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为光纤传感。

Biography: LIAO Guang-meng (1994-), Male, Master, Engineer, Research focus: optical fiber sensing.

引文格式: 廖光萌, 何建新, 朱玉琴, 等. 光纤光栅传感器及其应用[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 000-000. [J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 142-149.

LIAO Guang-meng, HE Jian-xin, ZHU Yu-qin, et al. Fiber Grating Sensor and Application[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 142-149.

1 光纤光栅的原理

光纤光栅是一种用于实现纤芯模、包层导模以及包层辐射模之间模式耦合和波长选择的光纤器件, 通过采用光刻和全息干涉等技术, 使纤芯折射率产生周

期性的调制, 本质上相当于一个滤波器。光纤光栅的中心波长主要取决于有效折射率和光栅周期, 因为有效折射率和光栅周期的变化可以反映外界环境的变化, 所以光纤光栅能够作为传感器, 光纤光栅传感原理如图 1 所示。

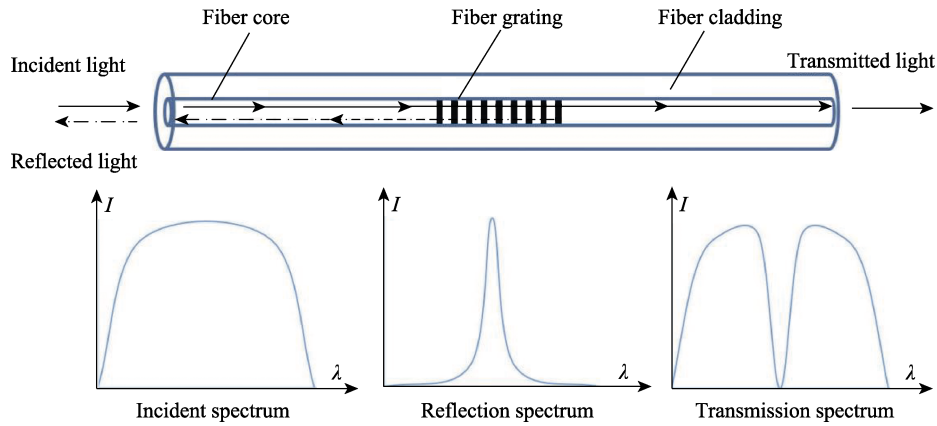


图 1 光纤光栅传感原理

Fig.1 Schematic diagram of fiber grating sensing

2 光纤光栅的分类

随着光纤光栅制作设备和工艺的发展, 光纤光栅开发出不同类型。根据栅格周期分布是否均匀, 可以将光纤光栅分为均匀周期光纤光栅和非均匀周期光纤光栅。均匀周期光纤光栅纤芯的折射率变化周期和折射率变化幅度均沿光纤轴向恒定不变, 代表性的光纤光栅如光纤布拉格光栅、长周期光纤光栅、倾斜光纤光栅。非均匀周期光纤光栅纤芯的折射率变化周期和折射率变化幅度沿光纤轴向变化, 包括啁啾光纤光栅、相移光纤光栅等。下面主要介绍 4 种常见的光纤光栅: 光纤布拉格光栅、长周期光纤光栅、倾斜光纤光栅以及啁啾光纤光栅。

2.1 光纤布拉格光栅

光纤布拉格光栅是极具代表性、应用较为广泛的光纤光栅之一, 又被称为短周期光纤光栅, 光栅周期通常为亚微米级。光纤布拉格光栅的光耦合发生在传输方向相反的模式之间, 属于反射型带通滤波器, 其反射带较窄, 峰值波长称为布拉格波长。当光波通过布拉格光栅时, 对满足相位匹配条件的光会形成强烈反射, 对不满足相位匹配条件的光形成弱反射, 相位匹配条件为^[3]:

$$\lambda = 2n_0\Lambda \quad (1)$$

式中: n_0 表示光栅区的有效折射率; Λ 表示光栅周期。从式 (1) 可以看出, 光纤布拉格光栅通过诱导 n_0 和 Λ 的变化对温度和应变本能的敏感, 所以常用作温度和应变传感器。

当温度变化时, 会引起光栅周期与有效折射率的改变, 使布拉格波长发生偏移。因此, 波长偏移量 $\Delta\lambda_T$ 与温度变化 ΔT 的关系式可以表示为:

$$\Delta\lambda_T = \lambda \cdot \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial T} \right) \cdot \Delta T \quad (2)$$

对于光纤光栅而言, 温度变化主要引起热膨胀效应和热光效应。其中, 热膨胀效应主要对光栅周期造成影响, 热光效应主要对有效折射率造成影响。因此, 关系式可以简化为:

$$\Delta\lambda_T = \lambda \cdot (\alpha + \beta) \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中: α 为光纤材料的膨胀系数; β 为折射率随温度的变化率。从式 (3) 可以看出, 在一定温度范围内, 当 α 与 β 均为常数时, 波长偏移量与温度变化量成正比关系。

光纤布拉格光栅应变传感原理是应变引起光栅周期和有效折射率改变, 从而使布拉格波长发生偏移。因此, 波长偏移量 $\Delta\lambda_\varepsilon$ 与应变 $\Delta\varepsilon$ 的关系式可以表示为:

$$\Delta\lambda_\varepsilon = \lambda \cdot \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial \varepsilon} \right) \cdot \Delta\varepsilon \quad (4)$$

当轴向应力作用于光纤光栅时, 会产生弹光效应和弹性形变, 这 2 种现象会分别引起光栅周期和有效折射率的变化。因此, 化简后, 波长偏移量 $\Delta\lambda_\varepsilon$ 与应变 $\Delta\varepsilon$ 的关系式可以表示为^[4]:

$$\Delta\lambda_\varepsilon = \lambda \cdot (1 - P_e) \cdot \Delta\varepsilon \quad (5)$$

式中: P_e 为弹光系数, 通常 P_e 可以看作一个常数。从式 (5) 可以看出, 波长偏移量与轴向应力两者呈线性关系。

对光纤布拉格光栅而言,温度的影响一直存在,所以光纤布拉格光栅应力传感器的波长偏移量会同时受到应力和环境温度的影响,如果要想实现应力的精确测量,必须考虑温度的影响。2013年,Huang等^[5]制备了一种具有温度补偿的膜片式压力传感器,2个光纤布拉格光栅沿径向直接粘合在膜片上,利用正负应变的2个布拉格波长位移差作为传感信号,补偿了温度交叉的影响,压力与波长的线性度达到99.996%,但传感器灵敏度不高,在0~1 MPa的压力范围内只有1.57 pm/kPa。2017年,Liang等^[6]人开发了一种采用膜片和悬臂梁作为传感单元的光纤光栅压力传感器,极大地提高了压力传感灵敏度,同时避免了温度交叉的影响。它是将2个光纤布拉格光栅分别贴合在悬臂的顶面和底面,利用这2个位置光栅的布拉格波长差作为测量信号,传感器可以实现0~10 MPa压力范围内的测量,线性拟合度高达99.997%,灵敏度高达339.956 pm/MPa。光纤布拉格光栅对温度、应力的测量已经趋于成熟,但对光纤布拉格光栅的研究还未止步,例如如何使用光栅进行光栅横向应变感测、1个光栅如何同时感测温度和应变的变化,以及如何实现更高的灵敏度等问题,都是光纤布拉格光栅未来的研究方向。

2.2 长周期光纤光栅

1996年,Vengsarkar等^[7]第一次在氢载硅锗光纤上实现了长周期光纤光栅的制备,拉开了长周期光纤光栅研究的序幕。对于长周期光纤光栅而言,光栅周期为数十或数百微米,与布拉格光纤光栅的传输特性和测量原理不同,它是纤芯模式与前向传输的包层模式的耦合,属于透射型带阻滤波器。光源通过光栅后,传输光谱产生相应谐振波长的传输损耗,呈现出1个或多个衰减带,这些谐振波长需要满足相位匹配条件^[8]:

$$\lambda = (n_{co} - n_{cl}) \cdot \Lambda \quad (6)$$

式中: n_{co} 和 n_{cl} 分别表示纤芯模和包层模的有效折射率。由式(6)可以看出, Λ 或者 n_{cl} 的变化会引起谐振波长的偏移,所以长周期光纤光栅可以作为温度、折射率传感器。

长周期光纤光栅表征包层模特征的有效折射率对光纤周围环境非常敏感。根据此原理,2007年,Tang等^[9]利用长周期光纤光栅进行了氯离子浓度检测,在不同盐浓度的水溶液中,测量精度约0.6%。另外,采用在长周期光纤光栅表面涂覆一层胶体金纳米颗粒的方法,使得传感器灵敏度提高了约2倍。2016年,Urrutia等^[10]通过纳米组装技术开发了聚丙烯胺盐酸盐和聚丙烯酸半包裹的长周期光纤光栅,使得长周期光纤光栅对环境湿度变得敏感,通过监测湿度引起的波长变化来达到测量相对湿度(RH)的目的。

经测试,在RH为20%~80%内,灵敏度到达了63.23 pm/%。2019年,Wang等^[11]将聚乙二醇/聚乙烯醇复合膜涂覆在长周期光纤光栅表面,制备了一种高灵敏度光纤湿度传感器,在RH为50%~70%内,灵敏度高达2.485 nm/%,此传感器同时具备较好的可逆性和稳定性。利用长周期光纤光栅对外界折射率敏感的特征,将外界浓度变化与光纤包层模有效折射率结合,可对气体、液体浓度进行实时在线监测,这使得长周期光纤光栅有望在健康诊断、环境监测、生物医学上取得重要应用。

2.3 倾斜光纤光栅

倾斜光纤光栅与普通光纤光栅最大的区别就是光栅条纹与光纤法线存在一定角度 θ ,如图2所示。因为光栅倾斜角的引入,倾斜光纤光栅不仅使前向传导的入射光被有效激发至后向传导的包层模,同时保留了布拉格光栅反向传输的光模式,所以倾斜光纤光栅一般对外界折射率、光纤弯曲较为灵敏。

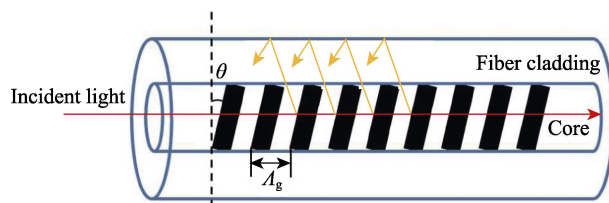


图2 倾斜光纤光栅
Fig.2 Tilted fiber grating

布拉格光栅偏转角度 θ 就得到倾斜光栅,如图3所示。因此,倾斜光纤光栅的光栅周期 Λ_g 可以表示为:

$$\Lambda_g = \frac{\Lambda}{\cos \theta} \quad (7)$$

倾斜光纤光栅的相位匹配条件则表示为^[12]:

$$\lambda = (N_{co} + N_{cl}) \times \frac{\Lambda}{\cos \theta} \quad (8)$$

式中: N_{co} 为光纤纤芯的有效折射率; N_{cl} 为包层的有效折射率。

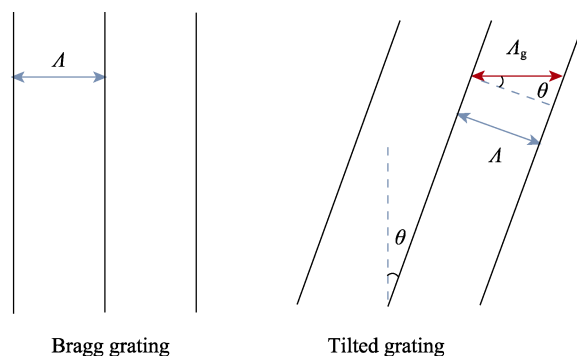


图3 布拉格光栅周期与倾斜光栅周期
Fig.3 Bragg grating period and tilted grating

倾斜光纤光栅具有丰富的光学特性, 对于其在腐蚀、湿度、应变传感上的应用研究十分广泛。Islam 等^[13]报道了倾斜光纤光栅在腐蚀监测中的应用, 采用外加电流法对在 NaCl 溶液中的钢筋进行加速腐蚀, 根据包层谐振波长变化监测腐蚀过程, 与布拉格波长的低阶包层共振相比, 高阶包层共振表现出更高的灵敏度。2017 年, Chiu 等^[14]制备了一种在光栅表面涂覆石墨烯氧化物作为湿度敏感层的倾斜光纤光栅湿度传感器, 该传感器的线性度为 0.996, 具有 0.01 nm/% 的灵敏度, 可实现有效的相对湿度监测。2018 年, Liu 等^[15]利用倾斜光纤光栅实现了折射率和液体表面张力的测量, 通过倾斜光纤光栅截止波长的波长位移来确定折射率, 然后测量倾角最大包层谐振波长的强度变化得到表面张力。倾斜光纤光栅独特的光栅结构, 使光信号可以出现更多的可能性, 这将使倾斜光纤光栅拥有更大的开拓潜力和发展空间。

2.4 啁啾光纤光栅

1995 年, Putnam 等^[16]利用氢氟酸刻蚀的方法制备了啁啾光纤光栅, 通过在锥形光纤受到一定的轴向拉力的情况下写入光栅, 在去除拉力时, 光栅周期自然收缩, 形成的光栅周期沿着光纤轴向单调、连续变化。线性啁啾光纤光栅的周期是随着 z 轴而变化的, 光栅周期 $\Lambda(z)$ 以表示为^[17-18]:

$$\Lambda(z) = \frac{\Lambda_0}{1 + F \frac{z}{L}} \quad (9)$$

式中: Λ_0 为初始光栅周期; F 为啁啾系数, 表征啁啾程度的常数; z 为沿光栅的位置; L 为光栅长度。啁啾光纤光栅的反射光波长则可以表示为:

$$\lambda(z) = 2n_0\Lambda(z) \quad (10)$$

啁啾光纤光栅的特点是栅格周期沿纤芯轴向不为常数, 轴向不同位置可以反射不同波长的光, 所以它的反射谱带宽一般比均匀周期光纤光栅宽。利用这个特点, 2017 年, Wei 等^[19]介绍了一种啁啾光纤光栅传感器测量爆速的方法, 利用啁啾光纤光栅长度与时间的关系提取爆速, 速度相对不确定度小于 1%。2018 年, Korganbayev 等^[20]又制备了一种可同时用于温度、温度梯度、折射率测量的啁啾光纤光栅传感器, 通过蚀刻线性啁啾光纤光栅的一部分, 获得刻蚀和未刻蚀 2 个不同的区域。由于这 2 个区域的光谱不同, 因此该传感器可以实现温度和折射率的交叉补偿, 但对小折射率值难以测量。2021 年, Ayupova 等^[21]提出了一种同时用于双折射和温度传感的金包层锥形啁啾光纤光栅, 折射率和温度灵敏度分别达到 382.83 dB/RIU 和 9.893 pm/°C。啁啾光纤光栅是一种多参数功能的传感元件, 具有反射带宽、色散稳定等优点, 可以用于实时温度分布、结构健康监测和爆速测试等。

3 光纤光栅传感器的应用

3.1 光纤光栅在温度传感上的应用

对于光纤光栅传感器而言, 不仅可以实现单点传感测量, 还可以实现分布式测量。早在 19 世纪 80 年代就有人提出了分布式测量的概念^[22-23], 将多个中心波长不同的光栅串联在光纤上, 当宽带光源在光纤中传播, 每个光栅过滤出不同中心波长的光, 通过波长解调系统, 对中心波长的变化进行解析, 从而测量出不同光栅位置的物理参量。光纤光栅温度传感可以方便地利用复用技术进行分布式温度测量。2007 年, Kulchin 等^[24]利用这种分布式特点研究了一种基于光纤布拉格光栅传感器的新型火灾报警系统, 能够及时地进行定温报警和上升速率报警, 可以根据最高温度的位置轻松确定火源, 同时对长距离内的温度分布和温度发展规律进行监测, 该系统在公路隧道火灾报警中得到广泛应用。2011 年, Xiang 等^[25]将光纤光栅用于电气设备的过热保护, 利用光纤光栅的温度与布拉格波长具有良好线性关系的特点, 采用光纤光栅作为温度传感器。他们开发的温度监测系统同时实现了多个测点的温度测量, 利用了光纤本质防爆、抗电磁干扰、耐腐蚀等优点。该系统还可用于石油、化工以及矿井等易燃易爆场所, 实现温度的在线监测。光纤光栅分布式的特点可以实现多对象、长距离、大范围的温度监控, 这为工程化的应用提供了巨大的便利。除此以外, 小尺寸、稳定性能强的特点, 使光纤光栅传感器能自由地布置在各种复杂环境。2012 年, 邓建刚等^[26]设计了嵌入式光纤光栅传感器的绕组电磁线, 其测温线性度大于 0.99, 灵敏度约 10 pm/°C, 测量准确度可达到 ± 0.5 °C, 可以精确测量变压器绕组的真实温度, 同时不受电磁场干扰, 光纤光栅尺寸小, 也十分利于变压器内的嵌入和引出。随着光纤光栅制造技术的发展, 光纤光栅温度传感器在恶劣高温环境中也得到应用。2019 年, Yang 等^[27]使用飞秒激光器通过逐点方法制造了基于波分复用蓝宝石光纤布拉格光栅的温度传感器, 在 1 200 °C 下进行热平衡, 通过了 110 h、1 000 °C 的稳定性测试, 并分别在商用燃煤和燃气锅炉中部署了 42、48 d, 在整个测试期间, 传感器的性能保持良好。该传感器的测量范围可以实现从室温到 1 200 °C 的测量, 预计最高温度限制可达 1 900 °C。光纤光栅温度传感器不仅实现了分布式、精准式以及复杂恶劣环境的测量, 还逐渐朝着网络化、智能化方向发展。最近, Peng 等^[28]设计了一种智能电气设备光纤光栅测温系统, 包括数据采集、数据监控和远程监控部分。该系统同时具有报警和显示分析功能, 分析测量不确定度为 0.072 5 °C, 系统的故障判断时间不超过 4.73 s, 具有精度高、稳定性好、实用性强等优点。光纤光栅传感器在温度监测上的应用十分成功, 在工程建设、电力系统、石油化工、冶

金矿业等领域已经取得了大量可靠的应用实绩,但随着应用领域的扩展,市场也在不断提出新的挑战。未来,大型传感器阵列、大范围温度监测以及智能化监测将是光纤光栅温度传感器的主要研究赛道。

3.2 光纤光栅在结构健康监测上的应用

早在 20 世纪末,光纤光栅就已经用于桥梁的健康监测^[29],并且得到了很好的验证。伴随着光纤光栅传感技术的发展,近年来,光纤光栅传感器在桥梁健康监测上的应用也取得了众多突破。2017 年,Yazdizadeh 等^[30]使用光纤布拉格光栅传感器完成了 3 种不同等级混凝土收缩和蠕变的测量,这种方法可以对桥梁的动态响应以及桥梁桥墩结构状态进行监测。与布置在混凝土表面的电阻应变计相比,铸造在结构内部的光纤光栅传感器更不容易损坏,监测寿命更长,但总应变相差 15%。同年,Hu 等^[31]开发了适用于悬索频率检测的高灵敏度和良好重复性的光纤光栅传感器,根据弦振动理论,将振动频率转换为索力,实现了不破坏桥梁结构下对索力的间接测量。这种监测方法已经在悬索类桥梁结构上得到验证,并成功检测出索力异常。一般的位移传感器需要固定参考点^[32],以达到测量的目的。2019 年,Bonopera 等^[33]研究了一套评估桥面承载能力的光纤光栅差分沉降传感系统,无需任何固定的地面参考点,可以测得桥梁的垂直位移。经验证,该传感器测量的位移与线位移传感器记录的相应位移平均校准差异为 0.8%,与千分表记录的相应位移平均绝对差异为 0.6 mm。同年,Zhang 等^[34]设计了一种基于“摆式等强度梁”的光纤光栅倾角传感器,通过倾角变化测量大跨度悬臂桥的挠度,挠度监测结构的范围达到 ± 100 mm,灵敏度为 10.566 pm/mm,具有测量灵敏度高、耐长期往复测量等优点,并且这种测量方法克服了大跨径悬臂桥施工期挠度监测工序繁杂、布线困难、无法实时采集数据等诸多不足。光纤光栅传感器可以在各种类型结构的桥梁上得到应用,通过对桥梁结构应力、应变、裂纹、振动、位移以及挠度等相关参数的测量来监测桥梁状态,但要满足实际工程应用,仍然存在一定差距。例如传感器耐久性问题,满足长期、大规模实时监测的高性能解调设备,以及统一的监测标准与规程都有待解决。

光纤光栅被认为在众多传感元件中最有可能集成在材料表面或者内部,作为监测材料结构和状态,并探测其损伤的传感器,在航空器健康监测应用中潜力巨大。2017 年,Cui 等^[35]介绍了一种基于光纤布拉格光栅测量飞机机翼形变的方法,机翼的应变通过附着在模型翼型表面上的光纤光栅获得,并且建立了有限元模型,将理论模型进行了实验验证,实验结果平均误差低于 5%,这对机翼的安全部署和有效运行具有重要意义。2019 年,Kwon 等^[36]提出了一种基于嵌

入式光纤布拉格光栅传感器的飞机机翼载荷监测系统,用于应变分布和飞行参数的飞行测量,以及机翼载荷的估计。这种将光栅嵌入结构中的测试方法,可长期监测结构内部目标参数的实时变化,同时满足高精度、分布式的监测要求,相比传统传感方式更加适用于飞机内部结构的健康监测。除此以外,光纤光栅传感器还在飞机起落架应变/应力监测上得到应用。2019 年,Iadicicco 等^[37]将多个光纤光栅组成传感网络,并集成在阻力支架的不同位置,通过液压机进行应力测试,获得的实验结果与数值结果非常吻合,展示了光纤光栅传感网络在远程和实时载荷测量方面的巨大潜力。光纤光栅具有尺寸小、灵敏度高、抗电磁干扰以及无电传输等优点,适合大面积分布式、网络化测量和长期监测,这对于航天器来说尤为重要。对航天器机体结构的温度、应变、疲劳等相关特征进行长期在线监测,可以有效预测结构损伤甚至剩余寿命。然而,目前所取得的研究成果与航天传感领域的应用需求还存在较大的差距,高密度、高精度、多参量监测的光纤光栅传感系统仍然是长期需要进行探索的研究方向。

3.3 光纤光栅在腐蚀研究上的应用

腐蚀带来的危害以及经济损失都是巨大的,除了采取必要的防腐手段,对腐蚀状态的监测以及预警手段也十分重要。光纤光栅由于耐腐蚀、灵敏度高的特点引起了研究者的广泛关注。2015 年,Zhang 等^[38]制备了一种基于铁膜光纤光栅的钢腐蚀传感器,采用磁控溅射技术在光纤光栅上形成铁膜,通过分析光纤光栅的中心波长漂移量和峰值功率的变化检测腐蚀状态。2016 年,Tan 等^[39]开发了一种非破坏性系统的监测钢筋腐蚀的方法,将光纤布拉格光栅传感器固定在钢筋上,以监测由腐蚀引起的膨胀应变,并通过观察波长变化来监测其性能。他们研究了带有聚二甲基硅氧烷涂层的光栅和裸光栅各自对腐蚀发生的监测灵敏度,结果证明,带有聚二甲基硅氧烷涂层的光栅比裸光栅具有更高的腐蚀灵敏度。另外,聚二甲基硅氧烷具有很好的耐化学性,能一定程度上保护光栅,增长光栅的使用寿命,但当聚二甲基硅氧烷大量吸收化学物质后,也可能会降低其检测腐蚀信号的有效性。2018 年,Tang 等^[40]采用铁碳涂层长周期光纤光栅传感器监测了钢筋在腐蚀过程中引起的质量损失,观察到钢筋在 3.5% NaCl 溶液中的波长变化灵敏度为 0.124 mg/nm,在砂浆中的波长变化灵敏度为 0.405 mg/nm,铁碳涂层长周期光纤光栅传感器显示出对钢腐蚀损失测量的高灵敏度,但该方法仅适合早期腐蚀监测。目前,光纤光栅对金属腐蚀的研究主要集中在腐蚀状态的检测和对结构耐久性的影响上,由于腐蚀过程的复杂性,腐蚀传感的很多问题还未得到解决,例如传感信号与金属腐蚀程度之间的定量关系是什

么, 金属腐蚀如何引起光纤光栅灵敏度变化等, 这使得光纤光栅在金属腐蚀过程在线监测方面还没有真正的工程化应用。未来有必要对光纤光栅传感器在腐蚀检测上的精准性和稳定性提出更高要求, 结合新的传感原理和敏感材料, 对腐蚀过程进行定性分析和定量监测。

3.4 光纤光栅在其他方面的应用

光纤光栅传感技术的开发利用还扩展到了水位监测、离子检测、生物医学等方面的应用。Tan 等^[41]在长周期光纤光栅表面涂上聚电解质层和金纳米颗粒层用于水中的汞离子检测, 其中聚电解质层用来增强长周期光纤光栅的灵敏度, 纳米金粒子用来检测汞离子, 吸附在纳米金颗粒层上的汞离子会引起光纤光栅外部折射率的变化, 通过监测光响应的变化检测水中汞离子。Chiavaioli 等^[42]提出了一种基于二氧化钛薄膜的长周期光纤光栅传感器, 通过检测由生物识别元件与认知元素结合引起的折射率变化的共振响应来实现抗原免疫球蛋白 G 的检测。Janczuk-Richter 等^[43]利用一种高灵敏度长周期光纤光栅传感器完成了病毒检测, 并且这种方法具有通用性, 选择合适的抗体还能检测其他病毒。由于尺寸小, 光纤光栅可以进入人体内部测量信息, 同时避免了对人体造成大量伤害。Razeghi 等^[44]利用这一特点测量了气管内导管与气管之间的接触压力, 为医学治疗提供了有价值的信息。Wang 等^[45]研制了由 5 个长周期光纤光栅串联组成的传感器, 用于测量液位和流体流速, 可在水库水位监测和农业灌溉等方面进行应用。Marques 等^[46]提出了一种基于嵌入式光纤布拉格光栅的高灵敏度液位监测传感器, 该传感器在液位升降过程中具有较高的重复性, 可用于飞机燃油的监测。光纤光栅传感器在人类社会中的应用越来越广泛, 为科学研究、国民经济的发展都起到巨大的推动作用, 但目前大多数光纤光栅传感器还停留在试验研究阶段, 要实现实用化、产业化, 还需要更多、更深入的研究。

4 结语

光纤光栅传感器在许多方面的性能都比传统的电磁、压电类传感器更稳定、更可靠、更准确, 不仅能进行单点高精度测量, 而且能适应智能化、分布式、多参量的测试要求, 满足大多数应用需求。目前, 光纤光栅产品已经商品化, 但光纤光栅传感器还是一个方兴未艾的行业。光纤光栅传感器未来的研究方向主要集中在以下几个方面:

1) 结合一些新的传感原理, 开发能同时感测多个物理参量的光纤光栅传感器。

2) 研究信号解析系统, 开发低成本、集成化、可靠性高的传感系统。

3) 研究光纤光栅传感器封装技术和宽带光源, 提高光纤光栅传感器的实用能力。

4) 研究光纤光栅传感网络, 实现大范围、高精度、快速原位实时监测。

光纤光栅传感器作为新一代的智能传感器, 相信会有越来越多的研究成果从实验研究阶段走向工程应用阶段。

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] BHATIA V, VENGSARKAR A M. Optical Fiber Long-Period Grating Sensors[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(9): 692-694.
- [3] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [4] VADDADI V S C S, PARNE S R, AFZULPURKAR S, et al. Design and Development of Pressure Sensor Based on Fiber Bragg Grating (FBG) for Ocean Applications[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2020, 90(3): 30501.
- [5] HUANG Jun, ZHOU Zu-de, WEN Xiao-yan, et al. A Diaphragm-Type Fiber Bragg Grating Pressure Sensor with Temperature Compensation[J]. *Measurement*, 2013, 46(3): 1041-1046.
- [6] LIANG Min-fu, FANG Xin-qiu, WU Gang, et al. A Fiber Bragg Grating Pressure Sensor with Temperature Compensation Based on Diaphragm-Cantilever Structure[J]. *Optik*, 2017, 145: 503-512.
- [7] VENGSARKAR A M, LEMAIRE P J, JUDKINS J B, et al. Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 58-65.
- [8] ZHANG Shuo, DENG Si-fan, GENG Tao, et al. A Miniature Ultra Long Period Fiber Grating for Simultaneous Measurement of Axial Strain and Temperature[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 126: 106121.
- [9] TANG J L, WANG Jian neng. Measurement of Chloride-Ion Concentration with Long-Period Grating Technology[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(3): 665-672.
- [10] URRUTIA A, GOICOECHEA J, RICCHIUTI A L, et al. Simultaneous Measurement of Humidity and Temperature Based on a Partially Coated Optical Fiber Long Period Grating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 227: 135-141.
- [11] WANG Yun-long, LIU Yun-qi, ZOU Fang, et al. Humidity Sensor Based on a Long-Period Fiber Grating Coated with Polymer Composite Film[J]. *Sensors (Basel, Swit-*

- zerland), 2019, 19(10): 2263.
- [12] MA Ke-ping, WU Chao-wei, TSAI Y T, et al. Internal Residual Strain Measurements in Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates Curing Process Using Embedded Tilted Fiber Bragg Grating Sensor[J]. *Polymers*, 2020, 12(7): 1479.
 - [13] ISLAM M R, BAGHERIFAEZ M, ALI M M, et al. Tilted Fiber Bragg Grating Sensors for Reinforcement Corrosion Measurement in Marine Concrete Structure[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(12): 3510-3516.
 - [14] CHIU Y D, WU Chao-wei, CHIANG C C. Tilted Fiber Bragg Grating Sensor with Graphene Oxide Coating for Humidity Sensing[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(9): 2129.
 - [15] LIU Ze-xu, SHEN Chang-yu, XIAO Yi-ke, et al. Liquid Surface Tension and Refractive Index Sensor Based on a Tilted Fiber Bragg Grating[J]. *Josa B*, 2018, 35(6): 1282-1287.
 - [16] PUTNAM M A, WILLIAMS G M, FRIEBELE E J. Fabrication of Tapered, Strain-Gradient Chirped Fibre Bragg Gratings[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(4): 309-310.
 - [17] OKABE Y, TSUJI R, TAKEDA N. Application of Chirped Fiber Bragg Grating Sensors for Identification of Crack Locations in Composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35(1): 59-65.
 - [18] TOSI D. Review of Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG) Fiber-Optic Sensors and Their Applications[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(7): 2147.
 - [19] WEI Peng, LANG Hao, LIU Tao-lin, et al. Detonation Velocity Measurement with Chirped Fiber Bragg Grating[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17(11): 2552.
 - [20] KORGANBAYEV S, AYUPOVA T, SYPABEKOVA M, et al. Partially Etched Chirped Fiber Bragg Grating (pECFBG) for Joint Temperature, Thermal Profile, and Refractive Index Detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18708-18720.
 - [21] AYUPOVA T, SHAIMERDENOVA M, TOSI D. Shallow-Tapered Chirped Fiber Bragg Grating Sensors for Dual Refractive Index and Temperature Sensing[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(11): 3635.
 - [22] DAKIN J P. Multiplexed and Distributed Optical Fibre Sensor Systems[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1987, 20(8): 954-967.
 - [23] FARRIES M C, ROGERS A J. Distributed sensing using stimulated Raman interaction In A monomode optical fibre[C]// 2nd Intl Conf on Optical Fiber Sensors. [s. l.]: SPIE, 1984.
 - [24] ZHOU Ci-ming, CHEN Liu-yong, JIANG De-sheng, et al. Research and Application of Highway Tunnel Fire Alarm System Based on Fiber Bragg Grating Sensor Technology[C]//Proc SPIE 6595, Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics III. [s. l.]: SPIE, 2007.
 - [25] XIANG Xiao-min, TU Ping-wen, ZHAO Jun-lei. Application of fiber Bragg grating sensor in temperature monitoring of power cable joints[C]//2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). Ningbo: IEEE, 2011.
 - [26] 邓建钢, 郭涛, 徐秋元, 等. 变压器绕组测温光纤光栅传感器设计及性能测试[J]. *高电压技术*, 2012, 38(6): 1348-1355.
DENG Jian-gang, GUO Tao, XU Qiu-yuan, et al. Design and Performance Test for Fiber Bragg Grating Sensors of Transformer Winding Temperature Measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(6): 1348-1355.
 - [27] YANG Shuo, HOMA D, HEYL H, et al. Application of Sapphire-Fiber-Bragg-Grating-Based Multi-Point Temperature Sensor in Boilers at a Commercial Power Plant[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(14): 3211.
 - [28] PENG An-hua, LIU Cheng-wen, YANG Le. RETRACTED ARTICLE: Intelligent Electrical Equipment Fiber Bragg Grating Temperature Measurement System[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2021, 2021(1): 86.
 - [29] MAASKANT R, ALAVIE T, MEASURES R M, et al. Fiber-Optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring[J]. *Cement and Concrete Composites*, 1997, 19(1): 21-33.
 - [30] YAZDIZADEH Z, MARZOUK H, HADIANFARD M A. Monitoring of Concrete Shrinkage and Creep Using Fiber Bragg Grating Sensors[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 137: 505-512.
 - [31] HU Dong-tao, GUO Yong-xing, CHEN Xian-feng, et al. Cable Force Health Monitoring of Tongwamen Bridge Based on Fiber Bragg Grating[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(4): 384.
 - [32] SKELTON S B, RICHARDSON J A. A Transducer for Measuring Tensile Strains in Concrete Bridge Girders[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(3): 325-332.
 - [33] BONOPERA M, CHANG Kuo-chun, CHEN C C, et al. Fiber Bragg Grating-Differential Settlement Measurement System for Bridge Displacement Monitoring: Case Study[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(10): 05019011.
 - [34] ZHANG Cong-rui, GE Yong-xiang, HU Zhong-chun, et al. Research on Deflection Monitoring for Long Span Cantilever Bridge Based on Optical Fiber Sensing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102035.
 - [35] CUI Peng, ZHANG Wen-tao, WANG Zhao-gang, et al. Measurement of Aircraft Wing Deformation Using Fiber Bragg Gratings[C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Wuzhen: IEEE, 2017.
 - [36] KWON H, PARK Y, KIM J H, et al. Embedded Fiber Bragg Grating Sensor-Based Wing Load Monitoring System for Composite Aircraft[J]. *Structural Health Monitoring*

- toring, 2019, 18(4): 1337-1351.
- [37] IADICICCO A, NATALE D, DI PALMA P, et al. Strain Monitoring of a Composite Drag Strut in Aircraft Landing Gear by Fiber Bragg Grating Sensors[J]. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2019, 19(10): 2239.
- [38] ZHANG Ning, CHEN Wei, ZHENG Xing, et al. Optical Sensor for Steel Corrosion Monitoring Based on Etched Fiber Bragg Grating Sputtered with Iron Film[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(6): 3551-3556.
- [39] ̢TAN C H, SHEE Y G, YAP B K, et al. Fiber Bragg Grating Based Sensing System: Early Corrosion Detection for Structural Health Monitoring[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 246: 123-128.
- [40] TANG Fu-jian, CHEN Yi-zheng, LI Zhao-chao, et al. Application of Fe-C Coated LPFG Sensor for Early Stage Corrosion Monitoring of Steel Bar in RC Structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175: 14-25.
- [41] TAN S Y, LEE S C, OKAZAKI T, et al. Detection of Mercury (II) Ions in Water by Polyelectrolyte-Gold Nanoparticles Coated Long Period Fiber Grating Sensor[J]. *Optics Communications*, 2018, 419: 18-24.
- [42] CHIAVAIOLI F, BISWAS P, TRONO C, et al. Sol-Gel-Based Titania-Silica Thin Film Overlay for Long Period Fiber Grating-Based Biosensors[J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(24): 12024-12031.
- [43] JANCZUK-RICHTER M, DOMINIK M, ROŻNIECKA E, et al. Long-Period Fiber Grating Sensor for Detection of Viruses[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 250: 32-38.
- [44] KORPOSH S, LEE S W, JAMES S, et al. Biomedical Application of Optical Fibre Sensors[C]//*SPIE OPTO. Proc SPIE 10111, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIV*. California: 2017.
- [45] WANG Jian-neng, LUO C Y. Long-Period Fiber Grating Sensors for the Measurement of Liquid Level and Fluid-Flow Velocity[J]. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2012, 12(4): 4578-4593.
- [46] MARQUES C A F, PENG Gang-ding, WEBB D J. Highly Sensitive Liquid Level Monitoring System Utilizing Polymer Fiber Bragg Gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6058-6072.

责任编辑: 刘世忠