

光纤布拉格光栅传感系统在海洋平台 监测中的应用研究

黄国君 殷昀 戴锋
(中国科学院力学所)

摘 要

本文首先阐述了光纤布拉格光栅 (FBG) 传感系统的传感原理和基本组成。然后介绍了我们研制的 FBG 温度和应变传感器的特性以及关于它们应用于平台监测中的可靠性问题的研究结果, 包括疲劳损伤、防水密封和机械防护。最后讨论了 FBG 传感系统在海洋工程中的其它潜在用途。

关键词: 光纤布拉格光栅, 光纤传感器, 海洋平台, 海洋工程

(一) 前 言

海洋平台是海上油气开发的一个关键性基础设施, 长年处于风、浪、流等恶劣海洋环境中, 同时还会受到冰和地震以及生产操作的作用, 结构安全是平台设计和运行管理的首要目标。对实际运行中的平台进行周边环境、载荷和平台结构响应的在线同步监测是一项重要的科学考察活动, 它可以获得大量的有关环境-载荷-响应相关关系的现场第一手资料, 是实验室研究不可替代的重要研究工作。通过平台监测可反映平台的实际工作应力水平, 从而对平台设计模型和相应规范作出客观的评估, 特别是对于针对我国具体海域及地质条件下的一些重要设计参数的选取具有重要的指导意义, 因此可为平台可靠性优化设计提供有力的科学支撑。同时, 结构响应监测还可作为长期的安全监测系统, 不仅可以对突发性的灾害及时报警, 而且可以结合力学分析对结构损伤的可能部位和程度进行诊断, 作出对平台整体的安全评估, 是定期检测和维修等平台现行安全管理制度的一个重要补充, 它可以帮助制定合理的检测和维修计划, 节约平台运行成本。

光纤传感器被认为是新一代的传感器, 目前国内外的研究非常活跃, 有些光纤传感器正从实验室研究阶段走向工程应用阶段, 已有实际应用的报道。光纤传感原理可归纳为波长调制 (调频)、能量调制 (调幅)、相位调制 (干涉仪) 和偏振态调制类型, 基于这些原理开发各种用途的传感器正逐步涵盖传统的传感器范围, 包括: 光纤机械传感器 (位移、应变、加速度)、光纤热工传感器、光纤电磁传感器、光纤医用和化学传感器等。光纤传感器具有灵敏度高、频带宽、体积小、抗电磁干扰能力强等优点, 特别是由于光测不产生电火花、防水要求低 (相比电测), 它成为海洋油气环境下实施监测的理想传感器。

光纤布拉格光栅 FBG (Fibre Bragg Grating) 基于波长调制, 它是通过光刻在光纤上的光栅间距变化感知外界物理作用, 从而对反射波长 (布拉格波长) 进行调制, 实现光纤“传”与“感”的统一^[1]。由于采用波长绝对编码, 传感系统对光强损失不敏感, 可实现远程监测。同时应用波分复用技术在一路上可以实现准分布式多点测量, 测量信息多, 特别适合大型结构的监测。本文将介绍我们对 FBG 传感系统的一些实验室研究工作和结果, 包括: 传感原理和系统、FBG 温度和应变传感器的开发、传感器可靠性实验, 该项研究是我们即将在南海某平台上装备 FBG 传感系统、实施监测的一个前期准备。最后, 对光纤传感器在海洋工程中的应用前景进行展望。

(二) 传感原理

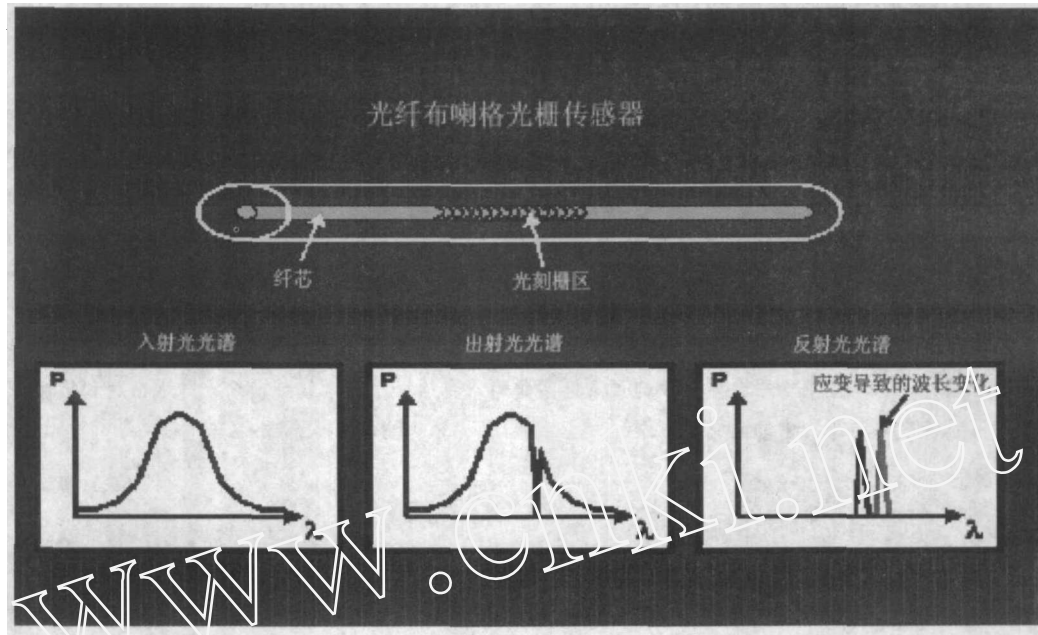


图1 FBG 传感原理

FBG 在传感技术的成功应用是基于一种选择反射的原理^[1]，如图 1 所示，一宽带光经过 FBG 时，部分光会反射回来，其波长 λ_B (Bragg 光栅波长) 满足 Bragg 定理：

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

式中： n_{eff} 为有效折射系数； Λ 为光栅间距。当 FBG 产生一个轴向应变 ε_z^0 时，会引起 Λ 以及 n_{eff} (弹光效应) 的变化，相应的 λ_B 平移量 $\Delta\lambda_B$ 为：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_z^0 = \psi_\varepsilon \varepsilon_z^0 \quad (2)$$

式中： $\psi_\varepsilon = \lambda_B (1 - p_e)$ 称为 FBG 的应变敏感系数； $p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$ 为有效弹光常数，

其中 p_{11} 和 p_{12} 为弹光张量分量 (Pockel 系数)， ν 为 Poisson 比。

另外，环境温度发生变化 ΔT 时，由于热膨胀和热光效应，也将引起 Λ 和 n_{eff} 的变化，相应的 λ_B 平移为：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T = \psi_T \Delta T \quad (3)$$

式中： $\psi_T = \lambda_B (\alpha + \xi)$ 称为 FBG 的温度敏感系数，其中 α 为热膨胀系数， $\xi = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ 为热光系

数。由 (2) 和 (3) 式可知：可通过光学装置检测出 $\Delta\lambda_B$ 后获得应变和温度变化的信息。

FBG 经封装制成应变传感器后粘贴/焊接在结构上，结构测点处的轴向应变 ε_z 通过粘贴/焊接和封装材料传递到光纤上，一般 FBG 感受到的平均应变 ε_z^0 不等于 ε_z ，可定义一个应变传递系数：

$$r_\varepsilon = \frac{\varepsilon_z^0}{\varepsilon_z} \quad (4)$$

代入 (2) 式得:

$$\Delta\lambda_B = \Psi_\varepsilon \varepsilon_z^0 = \Psi_\varepsilon r_\varepsilon \varepsilon_z = \Psi_\varepsilon \varepsilon_z \quad (5)$$

式中: $\Psi_\varepsilon = \Psi_\varepsilon r_\varepsilon$ 称为 FBG 传感器的应变敏感系数。另外, 对于温度变化, $\Delta\lambda_B$ 除了 (3) 式裸栅的贡献以外, 还有因光纤、封装材料和结构材料不同产生的非均匀膨胀导致的附加波长平移, 对于线性材料它与 ΔT 成正比, 记为 $\lambda_B \beta \Delta T$ 。因此 FBG 应变传感器的温度效应为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \beta + \xi) \Delta T = \Psi_T \Delta T = \Psi_T r_T \Delta T \quad (6)$$

式中: $\Psi_T = \lambda_B (\alpha + \beta + \xi)$ 称为 FBG 应变传感器的温度敏感系数; $r_T = 1 + \frac{\beta}{\alpha + \xi}$ 为温度增敏系数。当应变和温度变化共同存在时:

$$\Delta\lambda_B = \Psi_\varepsilon \varepsilon_z + \Psi_T \Delta T \quad (7)$$

需要采用温度补偿技术, 将应变和温度变化分离出来。

(三) 传感系统

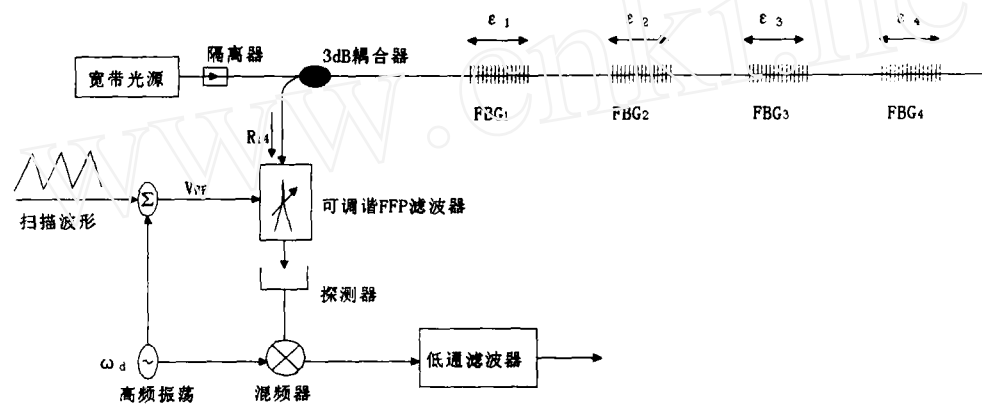


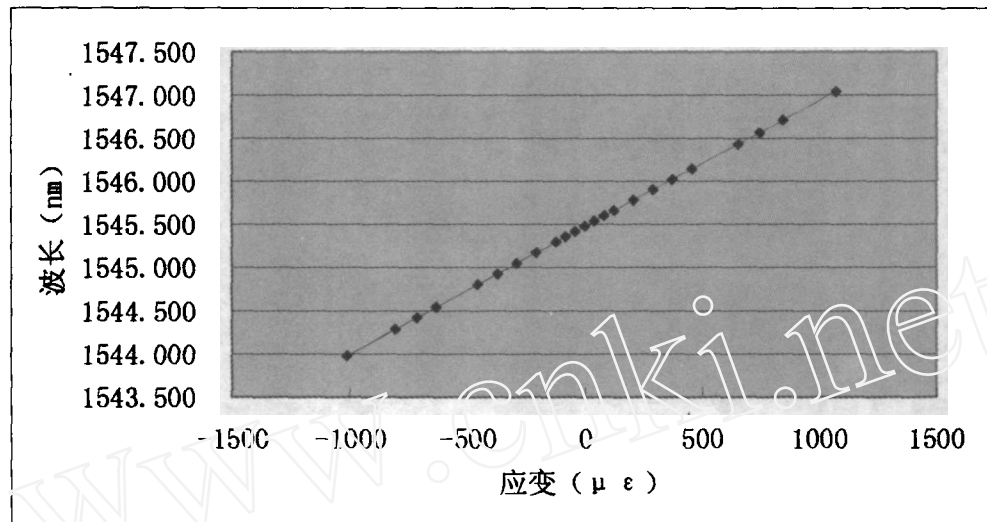
图2 FBG 传感系统

图2表示典型的FBG传感系统, 由光源、FBG传感器和波长解调系统三部分组成。不同标称 Bragg 波长的 FBG 传感器沿同一根光纤串接在一起, 其工作波段互不重叠, 且都落在宽带光源的光谱带内。此外, 可调谐光纤滤波器 FFP 的自由光谱范围须大于所有 FBG 占有的总工作波长范围。能够复用的最大 FBG 传感器数目取决于每个 FBG 传感器的工作波长范围 $\Delta\lambda_B$ 和宽带光源的光谱带。宽带光源的光射入光纤后在各个 FBG 传感器产生选择反射; 由 FBG 阵列反射回的光信号经耦合器引导至 FFP, FFP 由一个调节其腔长的控制电压进行扫描, 以不断改变 FFP 的通带波长, 由光电探测器输出可直接得到 FBG 阵列的反射光谱信号, 叠加高频振荡信号用于提高探测的分辨率。

一个用于工程结构监测的 FBG 传感系统不仅要求具有高的波长分辨率, 而且要求设备紧凑、便于携带。我们的 FBG 系统采用了美国 Micron Optics 公司的四通道解调系统 FBG-SLI, 该仪器集扫描激光光源和可调光纤滤波器于一体, 代表了本世纪初国际最新的 FBG 技术水平。其扫描激光光源可使激光能量集中在约 0.5 纳米的窄带内, 扫描波长范围为 1525~1565 nm, 从而大大提高信噪比, 可实现远程监测。此外, 可调光纤滤波器采用原子力显微镜中的压电陶瓷调节腔长, 其机械定位精度为亚原子尺度, 并且采用皮米波技术实现机械定位的动态校准, 从而使波长分辨率达到 1 pm (0.8 微应变), 精度为 ± 5 pm。该仪器的采样频率为 106 Hz, 采样点为 64 点/通道 (共 256 点), 且为便携式 (102×257×331cm)。

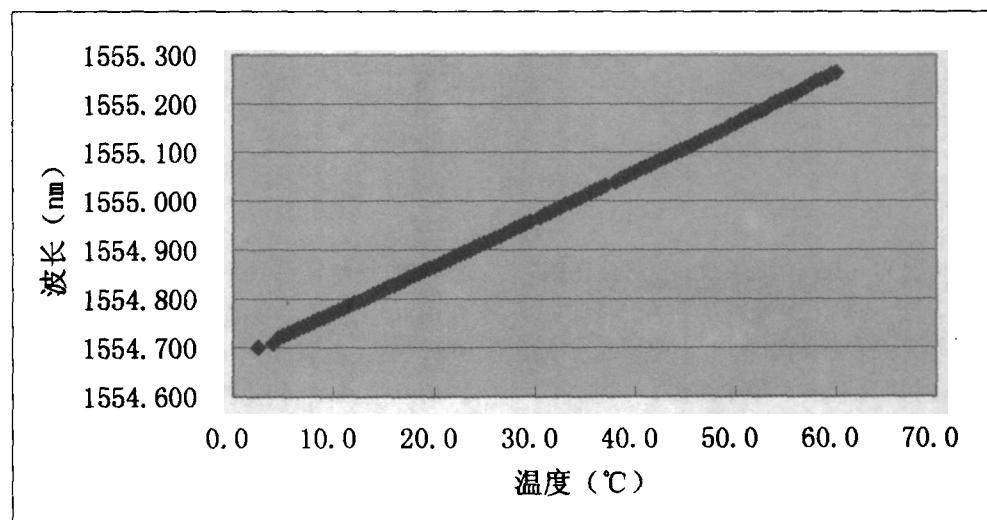
(四) 传感特性

在实验室条件下,裸光栅可直接作为传感器使用,用胶粘贴在结构上测量应变或以自由测量温度。图3为我们测得的裸光栅的应变和温度传感特性,其中,图3(a)为应用悬臂梁标定实验测得的应变-波长曲线,应变敏感系数 ψ_ϵ 为 $1.2\text{ pm}/\mu\epsilon$,与理论值^[1]一致;图3(b)为应用水浴法测得的温度-波长曲线,可看到温度敏感系数 ψ_T 为 $9.7\text{ pm}/\text{C}^\circ$,大大高于应变敏感系数 ψ_ϵ ,这主要是由于热-光效应远强于弹-光效应和变形的几何效应。



$$\lambda (\text{nm}) = 1545.47 + 1.20 \times 10^{-3} \epsilon (\mu\epsilon)$$

(a)

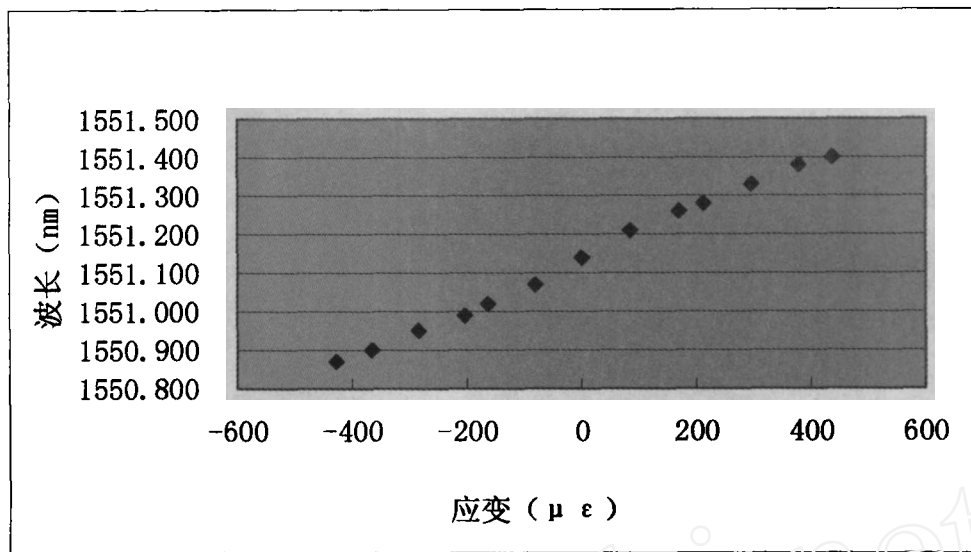


$$\lambda = 1554.672 + 9.7 \times 10^{-3} T (\text{C}^\circ)$$

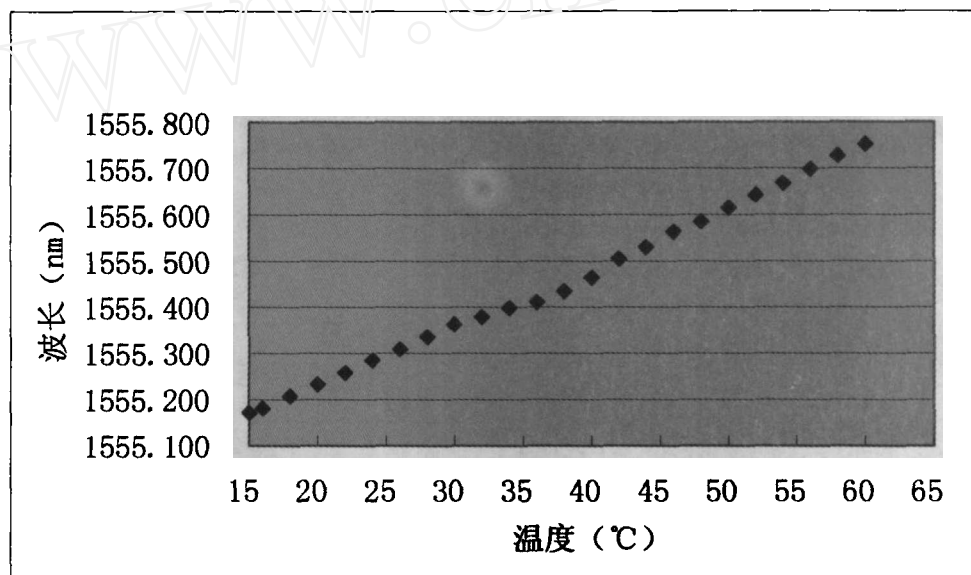
(b)

图3 裸光栅的应变和温度传感特性。(a) 应变-波长曲线 (b) 温度-波长曲线

在实际工程应用中由于裸露的光栅细小、容易脆断,直接粘贴的工艺很不可靠不宜采用。此外,在工程钢结构上刻槽埋入FBG的操作一般是不允许的,因为这将人为地使结构引入损伤,破坏其完整性。所以,对于工程钢结构的应变监测,应将FBG封装起来,制成应变传感器器件,然后将其粘贴或焊接在结构上。为此,我们分别采用聚合物、铜和不锈钢三种材料封装FBG,并安装在标准的低碳钢力学试样上标定其应变特性,同时应用水浴法测量其温度特性,以作温度补偿之用^[2]。



$$\lambda \text{ (nm)} = 1551.14 + 0.65 \times 10^{-3} \varepsilon \text{ (}\mu\text{e)} \quad (a)$$



$$\lambda \text{ (nm)} = 1555.171 + 12.8 \times 10^{-3} T \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (b)$$

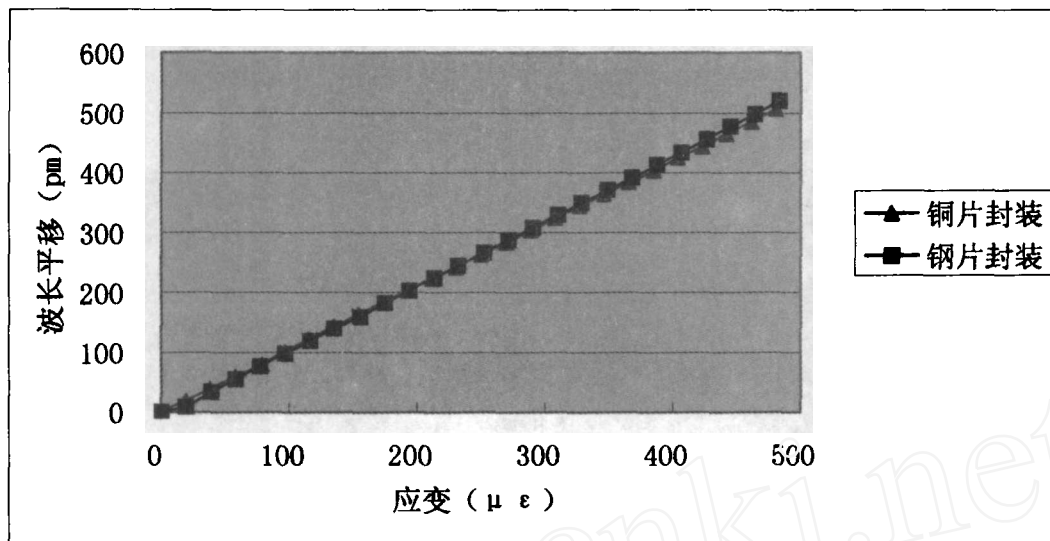
图4 聚合物封装 FBG 应变传感器的应变和温度特性。

(a) 应变-波长曲线 (b) 温度-波长曲线

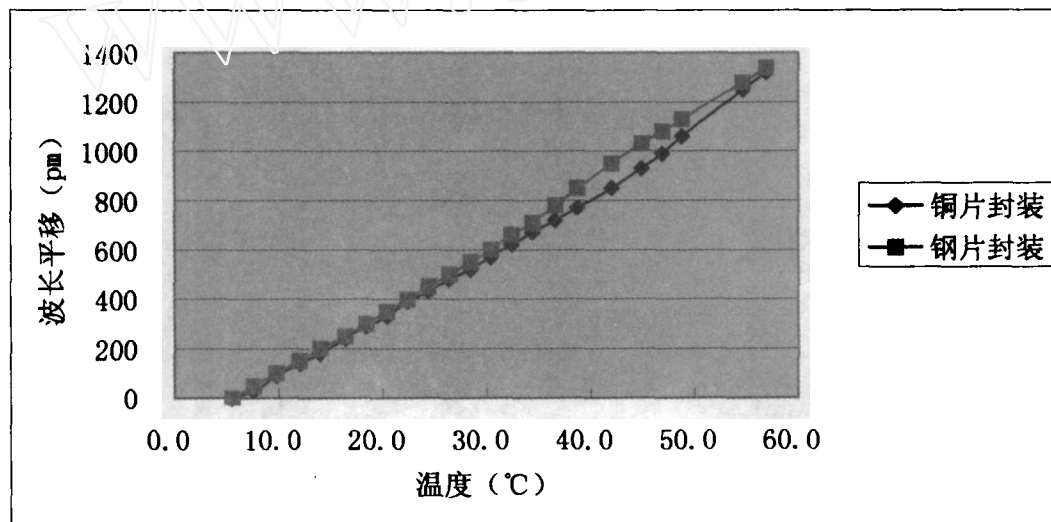
图4(a)和(b)分别表示聚合物封装 FBG 应变传感器的应变-波长曲线和温度-波长曲线, 传感器是用胶粘贴在试样上。可看到两者与裸光栅一样皆具有良好的线性度, 但应变敏感系数 Ψ_ε 下降较多, 只有 $0.65 \text{ pm}/\mu\text{e}$, 这是由于聚合物弹性模量较低, 应变衰减显著的缘故。它表明这种传感器适用于结构应变较大的情况, 因为光纤的断裂应变一般为 1%。同时可看到温度敏感系数 Ψ_T 较裸光栅稍高, 这是由于钢试样和聚合物封装材料线胀系数较光栅大, 引起光栅的附加变形。

图5表示铜和不锈钢2种 FBG 应变传感器焊接在钢试样上的应变和温度特性, 其应变敏感系数 Ψ_ε 分别为: $1.076 \text{ pm}/\mu\text{e}$ (铜)、 $1.069 \text{ pm}/\mu\text{e}$ (不锈钢) 非常接近, 可见金属封装材料和焊接应

变传递系数 r_e 较高(皆达 0.891),同时具有良好的线性度。它们的温度敏感系数 Ψ_T 分别为: 24.34pm/°C (铜)、26.07pm/°C (不锈钢), 较裸光栅高 1.5 倍, 表明金属封装材料的温度增敏效果非常显著。



(a)



(b)

图 5: 金属封装 FBG 应变传感器的应变温度特性响应。

(a) 应变与波长平移曲线 (b) 温度与波长平移曲线

(五) 传感器和光纤网络的可靠性

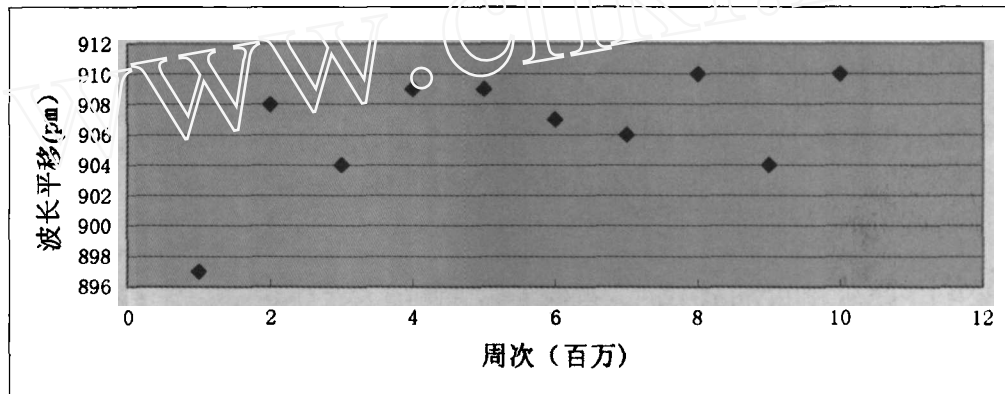
对于平台监测来说, 监测传感器的安装往往是与平台的建造和安装同时进行的, 并且在结构服役过程中, 结构许多部位传感器的更换非常困难, 如海洋平台导管架水下部分的传感器。因此, FBG 传感系统(传感器和光纤网络)在平台厂安装在平台上以后, 必须保证在其后的运输和海上安装的过程中, 不产生机械损坏, 同时, 在平台运行过程中, 能承受海洋恶劣环境的作用, 对于结构健康监测用 FBG 应变传感器还要求能长期可靠地工作。

1. 疲劳可靠性

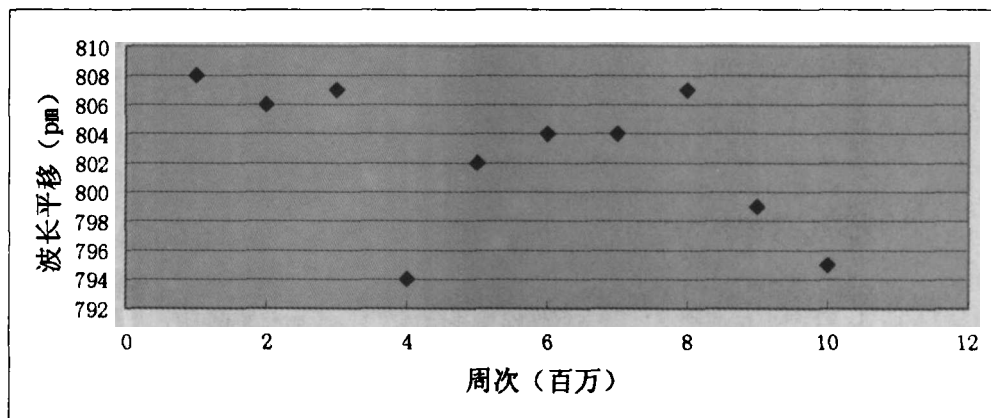
FBG 能维持 20 年以上不消褪, 理论上 FBG 是结构长期监测的理想传感元件。但对于交变载荷环

境下的结构, FBG 应变传感器中光栅与封装材料的界面以及封装材料与结构界面上的粘合剂或焊料会产生疲劳损伤, 轻者会妨碍应变的传递, 使得 r_e 和 r_T 降低, 初始标定值 Ψ_e 和 Ψ_T 变化, 应变测量失真; 重者则将使界面完全脱粘, 传感器失效。因此, 必须研究 FBG 应变传感器的疲劳可靠性。

为了考察我们研制的 FBG 应变传感器和安装工艺的抗疲劳特性, 采用了一种加速疲劳的方法对焊接安装的金属封装传感器进行了实验研究。针对南海海洋平台的设计应力值和使用环境和以往应变片监测的结果^[3], 交变载荷主要为波浪载荷, 正常情况下结构的动应变为几十微应变, 只有在夏季大风暴的情况下, 动应变才达到 200~300 微应变。因此设定疲劳实验的平均(静)应变为 $500 \mu\epsilon$, 采用等幅值为 $200 \mu\epsilon$, 实验在高速疲劳实验机上进行, 实验频率为 170Hz, 共进行 1000 万周。考虑到平台固有频率的基频只有 1Hz 左右, 可认为这种加速疲劳实验可考察 FBG 应变传感器应用于海洋平台长期监测的稳定性和可靠性。实验中每 100 万次停机, 卸载至 25kN, 记录下 FBG 波长平移, 同时记录环境温度, 进行温度补偿。如果定载下波长有显著的漂移, 则表示有疲劳损伤累积, 由此可考查传感器的疲劳可靠性。整个疲劳实验持续了数天, 记录时环境温度的差异有 3°C , 大约带来 70~80pm 的波长变化, 消除温度的影响后, 可得到定载下波长的漂移情况如图 6 所示。可以看到: 直到 1000 万次的应力循环, 波长平移比较稳定, 变化量漂移量都在 15 pm 内(约为 15 个微应变左右), 略高于解调设备的精度范围 (10 pm), 说明粘合和焊接界面都没有出现明显的疲劳损伤。



(a)



(b)

图 6: 金属封装 FBG 应变传感器的疲劳实验结果 (光栅波长: 1549nm)。

(a) 铜封装 (b) 不锈钢封装

2. 防水密封

光纤是二氧化硅材料, 虽然我们的实验表明光栅可直接暴露于水中其传感特性不变, 但为了避免光栅长期浸泡在海水中导致其寿命下降, 着眼于海洋平台的长期安全监测, 对传感器的防海水密封技

术进行了研究。采用了机械和化学多层防护技术,即传感器的制备采用全封装,安装在结构上以后再用密封橡胶涂敷。为了考察密封橡胶的密封效果,利用盛有海水的压力罐在 1.5Mpa 的压力下进行了环境考核实验,实验已持续了 7 个月,尚无渗漏现象。

3. 机械防护

为防止光纤传感网络受到冲击、鲨鱼咬嚼等机械破坏,进一步采取了机械防护措施,即光纤网络中,非传感主线段直接采用海底光缆(具有防水和机械保护的功能),传感支线段用金属半管或槽钢保护。

(六) FBG 在海洋工程中的其它应用

(1) **流固耦合实验** 实验研究结构在流场中的动态响应时,可将裸光栅直接粘贴在结构上测量其动态应变^[4],由于光纤细小、质量轻,结构的固有频率和阻尼的变化以及对流场的影响将非常小,从而克服安装其他大质量或大体积传感器的缺点。虽然,应变片的质量也可以较小,但在流体中需要密封,对于小结构仍然存在上述问题。激光测振仪采用非接触方式,是一种研究流固耦合问题的有效手段,但对于多柱涡激振动问题,由于光路的遮挡,一束光只能测量一根柱子的振动;而采用串联的 FBG,则可同时测量多柱的振动,结合流场的测量,研究它们的动态耦合效应。

(2) **油井监测** 利用 FBG 或其它光纤温度和压力传感器可以监测油井下面高达 250℃ 的温度和 140MP 的压力,同时可利用光纤声学传感器监测油气的流量并利用光纤地震仪测井,这些信息对于业主控制油气产量、确定剩余油藏及其分布非常重要。光纤传感器在这种油气环境下工作不会产生电火花,是安全可靠的传感器,并且可方便地配置、回收、重新标定和升级,这对于水平井尤为适用^[5]。

(3) **深海平台** 深海浮式生产平台现在大量采用高分子材料缆索,将 FBG 串与缆索一起编织,可以对缆索的疲劳损伤进行监测;同时将 FBG 串安装在立管上,可监测立管的动态力学响应,对其安全状况进行评估^[6]。

(4) **水下生产系统** 利用 FBG 温度、电流和加速度传感器可以对水下生产系统中或井下的电机和 ESP 泵(Electric Submersible Pump)进行诊断和在线闭环控制,以保证它们工作在最佳状态。在这种环境下光纤传感器是理想的选择,还可减少信号线路^[7]。

(5) **海底管线和 underwater 浮桥** 利用光时域反射技术可对几十公里长的海底管线实现分布式监测,以迅速确定管线破坏的地点,其空间分辨率可达若干米。对重点部位还可安装 FBG,以得到更为详细的应变和温度信息,指导维修计划的制定。这些技术也可应用于水下浮桥(阿基米德桥)的安全监测中。

参 考 文 献

- [1] Othono A. Fiber Bragg gratings, Rev. Sci. Instrum. 1997, 68 (12): 4309~4321
- [2] 黄国君、殷昀毓、戴锋、阚常珍, 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研究. 激光杂志, 2003 (印刷中)
- [3] 申仲翰、赵强, 漕11-4平台应变和加速度监测数据处理与结构分析. 中国科学院力学研究所研究报告, IMCAS STR-96030, 1996
- [4] Zhou Y. So R.M.C. Jin W. Xu H. G. and Chan P.K.C. Dynamic strain measurement of a circular cylinder in a cross flow using a fibre Bragg grating sensor. Experiments in Fluids, 1999, 27: 359~367
- [5] Kluth E.L.E., Varnham M.P. and Clowes J.R. Upgradable sensing systems for the oil and gas industry. Part of the SPIE Conference on Fibre Optic Sensor Technology and Applications, Boston, Massachusetts, September 1999. SPIE 3860: 262~272
- [6] Rebel G., Chaplin C.R., Groves-Kirkby C. and Ridge I.N.L. Condition monitoring techniques for fibre mooring rope. Insight 2000, 42(6): 384~390
- [7] High G.B. Fibre optic based sensor network for condition monitoring of subsea production machinery. 1998 Offshore

Technology Conference, Houston, Texas, May 4-7, 1998. OTC 8884:681-689

Application of the Fiber Bragg Gratings Sensing System to Monitoring Offshore Platforms

HUANG Guo-jun YIN Yun-guo DAI Feng
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Sensing mechanism of Fiber Bragg gratings (FBGs) and its sensing system are presented. Then ,the performance of the FBG strain and temperature sensors we designed is described. Some results related to the reliability of the FBG sensor in the application to monitoring offshore platforms is also given, which involves fatigue damage, waterproof packing and mechanical protection. Finally, other potential applications of FBGs in offshore engineering are discussed.

Key Words: fiber Bragg gratings, optic fiber sensor, offshore platform, offshore engineering

作者简介

黄国君 男, 1962年9月生, 副研究员, 中国科学院力学研究所工程科学部。主要研究方向: 固体与结构力学; 海洋工程力学。

殷均骥 男, 1976年2月生, 硕士研究生, 中国科学院力学研究所工程科学部。主要研究方向: 海洋工程力学。

戴峰 男, 1978年11月生, 硕士研究生, 中国科学院力学研究所工程科学部。主要研究方向: 海洋工程力学。