

基于光纤光栅应变传感器的海洋水下钢结构冲击振动监测研究

沙吉乐¹, 孟凡然², 张力昂³

1. 中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司, 天津 300000

2. 中国海洋石油有限公司天津分公司, 天津 300000

3. 中海油研究总院有限责任公司工程研究设计院, 北京 100028

摘要: 针对海洋水下钢结构安全监测需求, 本研究设计并测试了一款基于光纤光栅的动态应变检测传感器, 模拟并分析了水下结构受冲击的响应特征, 验证了其在健康监测中的可行性。通过探究光纤光栅技术原理和关键应变监测技术, 结合冲击振动理论, 本研究揭示了海洋环境下结构冲击特性及响应模型。实验数据采集和信号分析显示, 该监测系统能有效捕捉水下钢结构冲击振动的动态响应, 证实了其在结构健康监测中的重要价值。

关键词: 光纤光栅应变传感器; 冲击振动监测; 海洋水下钢结构; 应变监测; 信号分析; 结构健康监测

Research on Impact Vibration Monitoring of Marine Underwater Steel Structures Based on Fiber Bragg Grating Strain Sensors

Sha Jile¹, Meng Fanran², Zhang Li'ang³

1. Offshore Oil Production Services Branch, CNOOC Energy Development Co., Ltd. Tianjin 300000

2. Tianjin Branch, CNOOC Limited, Tianjin 300000

3. Engineering Research and Design Institute, CNOOC Research Institute Co., Ltd. Beijing 100028

Abstract: In response to the safety monitoring requirements of marine underwater steel structures, this study designed and tested a dynamic strain detection sensor based on fiber Bragg gratings. The response characteristics of underwater structures subjected to impact were simulated and analyzed, verifying the feasibility of the sensor in health monitoring. By exploring the principles of fiber Bragg grating technology and key strain monitoring techniques, combined with impact vibration theory, this study revealed the impact characteristics and response models of structures in the marine environment. Experimental data collection and signal analysis showed that the monitoring system can effectively capture the dynamic response of underwater steel structures to impact vibrations, confirming its significant value in structural health monitoring.

Keywords: fiber Bragg grating strain sensor; impact vibration monitoring; marine underwater steel structure; strain monitoring; signal analysis; structural health monitoring

引言

随着海洋油气资源开发, 水下结构物增多, 面临安全风险, 特别是航道上的锚击问题, 对环境和财产安全构成威胁。因此, 水下钢结构健康监测需求迫切。恶劣海洋环境对监测技术提出挑战, 常规电子传感器难以满足需求。

光纤光栅传感器因其无源、高灵敏度、抗干扰等优势, 在建筑物健康监测中得到广泛应用。

其不仅能进行连续监测、抗电磁干扰能力强、无火花、耐酸碱腐蚀等优点, 而且可以进行应变、温度、转速等多参数测量, 相比其他材料敏感性更好、稳定性更好。其所采用的原材料光纤光栅的各种优良属性使得光纤光栅材料能够在复杂环境下长期工作^[1]。针对航道下钢圆筒保护需求, 本文设计了一款量程 $\pm 2000 \mu \epsilon$ 、精度 $\pm 2 \mu \epsilon$ 的动应变监测传感器, 结合 2000Hz 解调仪, 实现钢圆筒顶盖静态和动态应变的实时监测, 为评估运行状态提供数据支持, 确保结构安全和稳定性。

一、光纤光栅传感原理及传感器设计

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 是在光纤上通过紫外或飞秒激光刻写的纤芯折射率沿轴向周期变化的一种无源光纤

器件, 当宽带光源入射到 FBG 上时, 大部分光透射出去, 只有满足布拉格常数的特定波长的光能够沿着原光路返回, 反射波长 λ 满足式

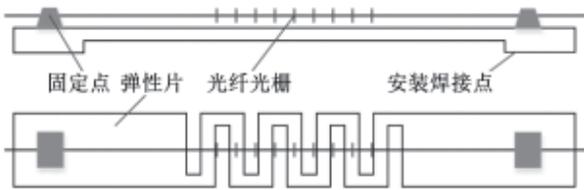
$$\lambda = 2n \Lambda, (1)$$

其中 n 为光纤光栅的有效折射率, Λ 为光纤光栅折射率变化周期。反射波长会随光纤光栅所处温度和所受外力的变化而变化。在恒温条件下, 光纤光栅波长变化 $\Delta\lambda$ 与所受向应变 ε 的关系为:

$$\Delta\lambda = (1 - P_e)\lambda \varepsilon, (2)$$

其中 P_e 为有效弹光常数。利用光纤光栅的反射波长对应变敏感的原理可以设计温度、应变、加速度等多种参数的传感器。并可根据波长的不同实现多个多种传感器的波分复用及空分复用, 实现多点多参量同时监测。

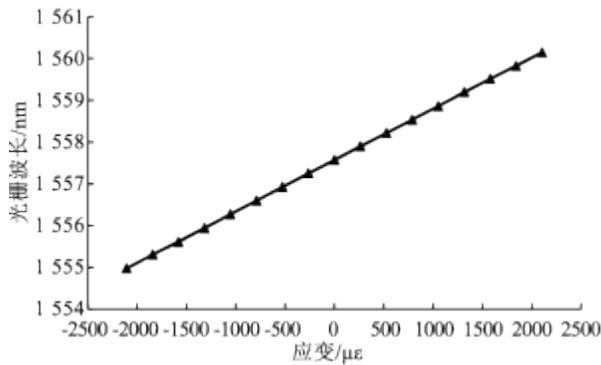
本研究在海洋平台支撑柱和连接件等关键部位布置了高密度光纤光栅传感器(如图1), 以监测其在外部冲击下的动态响应。传感器以每米一个的密度交叉叠加布置, 确保全面覆盖(如图2)。在模拟300米水深、2 m/s 流速的海洋环境中, 通过动态加载实验施加冲击力, 记录应变数据。数据采集周期为1秒, 利用小波变换和傅里叶变换分析应变信号(如图3), 识别结构健康状况。监测发现结构在冲击后应变快速衰减, 无永久变形, 为钢结构设计和安全评估提供重要依据。研究还优化了FBG传感器, 通过实验验证了其在水下环境中的可靠性, 并探讨了其在海洋结构监测中的应用潜力, 为智能监测系统的发展奠定基础^[2]。(如图4)。



> 图1 光纤光栅传感器在海洋平台结构中的应用示意图



> 图2 传感器与数据采集系统的连接方式



> 图3 传感器响应的应变数据图表



> 图4 光纤光栅传感器图

二、光纤光栅技术概述

(一) 光纤光栅原理及分类

光纤光栅(FBG)是一种利用布拉格衍射原理, 在光纤内部通过周期性调制折射率来反射特定波长光的传感器。其反射波长由光纤折射率和光栅周期决定, 适用于应变和温度传感。FBG分为常规、长周期和高反射等类型, 各自适用于不同的监测需求。常规FBG主要用于应变和温度监测, 而长周期FBG和高反射FBG分别适用于光谱分析、生物传感和高精度传感应用^[3]。

FBG的传感原理基于外部应力或温度变化引起的折射率变化, 导致反射波长的移位。其应变灵敏度和温度灵敏度分别为 $1.2 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ 和 $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 通过光谱分析可进行高精度测量。FBG传感器在土木工程、航空航天、石油勘探等领域有广泛应用, 特别是在海洋水下钢结构监测中, 能够实时提供应变变化数据, 支持结构健康监测^[4]。

由于水下环境的特殊性, FBG传感器需具备良好的抗干扰能力和环境适应性。近年来, 研究者们发展了多点传感技术, 通过分布式传感系统实现对大范围区域的监测, 提升了监测的灵活性和有效性。面向未来, 集成化、多功能的FBG传感器在智能材料、可穿戴设备等前沿领域展现出巨大的应用潜力。

(二) 应变监测关键技术

应变监测技术在海洋水下钢结构中的应用极为关键, 尤其是在动态载荷环境下。光纤光栅传感器(FBG)因其高灵敏度和抗电磁干扰能力, 成为该领域的重要技术。FBG能精确测量微小应变, 其波长灵敏度高达 $0.01 \text{ nm}/\mu\varepsilon$, 适用于复杂海洋环境。监测系统由多个FBG传感器组成, 通过光纤网络连接, 传感器间隔可调整, 实时数据传输速率在 10 Hz 至 100 Hz , 确保及时响应动态现象。监测精度可达 $\pm 10 \mu\varepsilon$, 且在深海4000米环境下性能稳定。温度补偿技术结合FBG与热电偶, 提高精度约30%, 减少温度对应变数据的影响。数据分析算法如小波变换和时频分析, 有助于提取结构在复杂载荷下的频率响应特性。未来研究将聚焦于增加传感器分布密度和监测范围, 结合新型复合材料、结构优化和机器学习算法, 实现更高效的智能监测和预测。

三、冲击振动理论分析

(一) 海洋环境下冲击特性

海洋环境中的冲击特性研究关注水深、波浪、流速等因素对海洋结构物的影响, 特别是钢结构平台和海底管道在冲击载荷下的动态响应。冲击载荷分为瞬时和持续性, 分别影响结构的瞬态和频率响应。水下冲击源包括海洋生物、底质运动和人为活动, 这些载荷在传播中受海水衰减与扩散效应影响^[5]。设计时需考虑加速度衰减系数, 取值通常在0.1至0.5之间。监测方面, 光纤光栅应变传感器(FBG)技术能够实时捕捉结构的应变和冲击响应, 其采样频率为 100 Hz , 时延响应在毫秒级。

动态分析结合时域和频域方法, 关键参数包括冲击载荷的频率、幅度和作用时间。海洋结构物的承载能力与材料属性、结构

形状和应变分布紧密相关, 钢材的屈服强度和疲劳极限等在分析中至关重要。结构的动刚度、质量和阻尼比也是评估承载能力的重要因素^[6]。通过数值模拟冲击实验, 建立冲击响应模型, 为设计提供理论依据。安全系数模型用于评估不同冲击载荷下的结构承载力和使用寿命, 安全系数通常在1.2至3.0之间^[7]。

(二) 钢结构冲击响应模型

本研究利用有限元分析法(FEM)建立了钢结构在冲击荷载下的动态响应模型, 使用ANSYS软件进行数值模拟, 考虑了材料非线性和几何非线性。模型以Q345钢为材质, 分析水下爆炸或重物落下等典型冲击荷载, 采用指数衰减模型, 峰值荷载200 kN, 作用时间0.05 s^[8]。模态分析显示结构前15阶固有频率, 第一、二阶分别为5.2 Hz和12.6 Hz, 揭示了结构的动态荷载敏感性。为验证模型准确性, 采用FBG传感器监测实际冲击试验, 传感器精度 $\pm 0.1 \mu\epsilon$, 测量范围 $\pm 2000 \mu\epsilon$, 结果显示最大应变 $850 \mu\epsilon$ 。时域和频域分析相结合, 取样频率1 kHz, 时长2 s, 傅里叶变换提取频谱特征, 与模态分析结果一致, 证实了模型的有效性。比较不同冲击参数下的响应, 发现冲击高度增加10%时, 最大应变约增加15%, 自然频率略有下降, 表明冲击强度与结构响应呈线性关系^[9]。该模型适用于复杂环境下的安全评估, 有助于优化海洋工程结构设计和安全性分析。

四、实验与数据处理

(一) 实验设计及装置布置

本研究利用光纤光栅应变传感器监测海洋水下钢结构在冲击振动下的响应。实验在50米深的水域进行, 采用3 m × 3 m × 0.5 m的高强度钢模型, 通过浮动平台固定, 模拟波浪、潮汐和人为干扰下的受力情况, 预计冲击载荷为80 N至150 N。传感器阵列由8个反射型光纤光栅传感器组成, 灵敏度为1.2 pm/ $\mu\epsilon$, 以40 cm间距矩阵布置, 实时监测应变。数据采集系统每秒读取1000次数据, 通过LabView软件和傅里叶变换分析, 提取主频信息, 分析应变与频率关系。实验控制水温为25℃、水流速度为0.5 m/s, 预设应变阈值为4000 $\mu\epsilon$, 超出则触发报警, 保障结构

安全。监测持续72小时, 定时数据回收确保信息完整。实验结束后, 使用SPSS等统计分析工具对比应变数据, 为性能评估提供定量依据, 旨在构建考虑外部环境变化的海洋水下结构抗冲击能力评估模型。

(二) 数据采集与信号分析

在海洋水下钢结构冲击振动监测研究中, 关键在于数据采集和信号分析。实验采用JDSU公司的FBG传感器和多通道传感系统, 传感器以50 cm间隔线性排列, 确保均匀监测。数据采集使用1 kHz采样频率的光谱分析仪, 配合改进的信号滤波算法(0.01–300 Hz)消除高频噪声^[10]。小波变换法利用Daubechies小波进行信号特征提取, 多尺度分解突出冲击信号的瞬态特性。时域分析显示最大应变1200 $\mu\epsilon$, RMS值300 $\mu\epsilon$; 频域分析通过FFT发现主要振动响应在20–50 Hz频段。特征参数提取, 如谱峰频率30 Hz和强度3.2 dB, 与工程实际相符, 验证监测精度。为提高数据稳健性和实时性, 应用Kalman滤波器优化动态信号处理。Matlab图形界面实现数据可视化, 便于观察应变变化, 提升数据分析效率。监测期间记录1450组有效数据, 为后续分析奠定基础。这些数据采集与信号分析方法为海洋水下结构冲击监测提供了精确手段, 确保研究的科学性和有效性, 为后续研究提供重要参考和数据支撑。

五、结论

基于光纤光栅应变传感器的高精度监测技术在海洋水下钢结构冲击振动研究中显示出其优越性。利用布里渊散射效应, 传感器在0.5 m间隔的多点布置下, 实时捕获了静态和动态载荷下的应变变化, 峰值达2500 $\mu\epsilon$, 动态载荷下最大瞬时应变3200 $\mu\epsilon$ 。数据采集频率1000 Hz, 通过FFT和小波变换分析, 精确识别出主要频率分量, 误差范围 $\pm 2\%$, 确保了数据可靠性。这项研究不仅展示了光纤光栅传感器在监测中的应用潜力, 还为海洋结构健康监测提供了技术支持和理论基础, 有助于预警损伤, 延长使用寿命, 降低维护成本, 适合长期稳定监测水下钢结构。

参考文献

- [1] 赵杰, 江洪波, 王桂莹. 基于环形光纤光栅应变传感器的管道泄漏监测研究[J]. 自然灾害学报, 2019.
- [2] YI Liu, Z Liu, JXC Huang. Theoretical modeling and simulation of fiber Bragg grating sensor interrogator based on linear variable filter [D]. Optics Express, 2023.
- [3] 王义玮. 基于光纤传感器的船舶典型结构健康监测研究[D]. 大连理工大学, 2022. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.002724.
- [4] H Yoon, K Lee, Hanho Shin, Seongeun Jeong, Yi Jae Lee, Sungwook Yang, Soo Hyun Lee. In Situ Co-transformation of Reduced Graphene Oxide Embedded in Laser-Induced Graphene and Full-Range On-Body Strain Sensor [D]. Advanced Functional Materials, 2023.
- [5] 张永芳, 王霞, 邢志国, 等. 面向机械装备健康监测的振动传感器研究现状[J]. 材料导报, 2020.
- [6] 武俊超. 基于光纤光栅传感器的管道泄漏监测研究[D]. 中国民航大学, 2019. DOI: 10.27627/d.cnki.gzmhy.2019.000329.
- [7] Z Tian, W Qin, Y Wang, et al. Ultra-stable strain/humidity dual-functional flexible wearable sensor based on brush-like AgNPs@CNTs@TPU heterogeneous structure [D]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2023.
- [8] 谭滔. 基于光纤光栅的压气机振动监测研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2019.
- [9] 高立冬. 基于光电振荡器的应变传感技术研究[D]. 大连理工大学, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.003459.
- [10] 高亮, 周陈一, 张东风, 等. 光纤光栅在轮轨作用力监测中的应用研究[J]. 北京交通大学学报, 2019.