

光纤光栅感知技术在深隧智慧监测中的应用

黄启韬

上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21052

[摘要] 城镇化与环保需求下,深隧是城市排水防汛、水环境治理的重要举措,其复杂环境对监测技术要求更高。光纤光栅传感技术优势显著,应用潜力大。本文阐述其原理、分析工程优势、探究数据处理方法,为市政工程提供参考,助力深隧智能监测发展。

[关键词] 深隧; 光纤光栅; 智慧监测; 数据处理

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Applications of Fiber Bragg Grating (FBG) Sensing Technology in Intelligent Monitoring of Deep Tunnels

Qitao Huang

Shanghai Municipal Engineering Design Institute(Group)Co.,Ltd.

[Abstract] Against the background of urbanization and rising environmental requirements, Deep tunnel engineering projects have emerged as a critical approach to enhancing urban drainage systems, flood prevention capabilities and water environmental governance. Restricted by complex geological conditions and special spatial features, Deep underground tunnel projects have raised more rigorous standards for operational safety monitoring. Fiber Bragg grating sensing technology features inherent strengths like strong anti-interference capacity against electromagnetic signals, distributed real-time detection and remote signal transmission, making it highly promising for widespread engineering application. This paper expounds its basic principle, analyzes its engineering advantages through practical cases, and discusses key data processing methods, so as to provide references for municipal engineering and promote the intelligent monitoring of deep tunnels.

[Key words] Deep Tunnels; Fiber Bragg Grating (FBG); Intelligent Monitoring; Data Processing

引言

城市化加快,城市内涝、水污染问题日趋严重,制约生态与民生安全。深层排水隧道结合浅层管网,可高效调蓄输送雨污水,改善城市排水治污现状、节约土地资源^[1]。结合国内深隧建设及监测技术研究不足,隧道深埋、工况复杂,不宜人工下井作业,使得高精度结构监测迫在眉睫。传统传感器抗干扰弱、布设困难,难以适用复杂环境^[2],而光纤光栅技术优势明显,已成为深隧智能监测的优选方式。

1 光纤光栅感知技术简介

1.1 光纤光栅感知技术的基本原理

光纤布拉格光栅(FBG)是光纤光栅传感的核心无源器件,通过光纤内部周期性折射率调制实现模式耦合,形成特征反射与透射光谱^[3]。其特征波长由光栅周期与折射率共同决定,温度、应力等外界载荷会引发波长漂移。因此,精准检测波长变化,即

可反演获取温度、应变等环境物理参数。

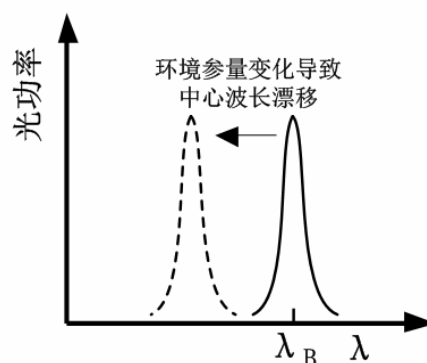


图1 光纤光栅传感特性

当光纤光栅周边的温度、应力等环境参数产生变化时,其纤芯有效折射率 n_{eff} 与栅格周期 Λ 也会随之发生改变。当环境温度

改变时, 由于热光效应, 光纤布拉格光栅的纤芯折射率 n_{eff} 会随之变化, 栅格周期 Λ 也会因为热胀冷缩现象发生改变; 当所受外部应力发生改变时, 光纤写入光栅处原折射率分布发生改变, n_{eff} 的值也随之发生变化, 栅格周期也因受力不同所发生的形变不同而随之改变。设 n_{eff} 和 Λ 发生变化的值为 Δn_{eff} 与 $\Delta \Lambda$, 则反射光的中心波长的偏移量表达式为:

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

依托以上固有特性, 光纤布拉格光栅可对应变、温度、压力、载流量等各类物理参数进行传感检测, 在相关测量领域具备广阔应用前景, 还可完成多物理量的同步监测。这是光纤光栅传感相较于其他传统传感器的突出优势。

1. 2 光纤光栅感知技术的优势

光纤光栅感知技术凭借抗腐蚀、抗电磁干扰、无源免维护、高精度、易布设、分布式多点监测等核心优势, 该技术能够适配深层隧道复杂地质工况, 满足长期服役稳定与多物理量实时监测的实际需求, 是深隧工程安全监测的优选技术手段, 可为工程长期安全平稳运行筑牢技术支撑与可靠保障。

2 光纤光栅感知技术在深隧智慧监测中的应用案例

光纤光栅传感技术已广泛应用于各类重大隧道工程。深中通道海底隧道布设光纤光栅阵列, 实现火灾精准监测与结构应变、温湿度实时检测^[4]; 武汉大东湖深隧依托该技术监测结构应力、水压与钢筋受力, 配合防护及冗余设计, 保障污水隧道长期安全运行^[5]; 厦门翔安海底隧道则通过光纤光栅监测结构形变、钢筋腐蚀并搭建火灾预警体系, 全面提升隧道运营安全性^[6]。

3 光纤光栅感知技术在深隧智慧监测中的应用的数据分析与处理手段

3. 1 数据去噪与预处理

在光纤光栅传感器的实际工程应用中, 受环境噪声、仪器测量精度等因素影响, 所采集的原始信号通常夹杂各类噪声与干扰分量。因此, 开展信号去噪与前置预处理工作, 是提升信号品质、确保测量精度的关键步骤。以下是几种常见的光纤光栅数据去噪与预处理方法:

3. 1. 1 连续小波变换

连续小波变换(Continue Wavelet Transform, CWT)作为信号时频特性分析的关键方法, 可将信号拆解为经小波基函数推导生成的各类小波函数叠加形式, 便于精准分析信号的瞬时时变特征, 还能自适应完成信号特征信息提取, 借助对应运算实现信号多尺度解析。在光纤光栅感知技术的实际应用中, 连续小波变换常被用于解决重叠光谱的分类与解调问题。连续小波变换表达式为:

$$WT_f(a, \tau) = \langle f(t), \psi_{a, \tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中, $WT_f(a, \tau)$ 代表小波变换系数, $f(t)$ 表示原始信号, $\psi_{a, \tau}(t)$ 为小波母函数, a 取代尺度参数, τ 为平移参数。选取 $a_1, a_2, \dots, a_m$, 共 m 组不同尺度参数, 对原始信号 $f(t)$ 实施连续小波变换处理, 可生成维度为 $m \times n$ 的小波系数矩阵 WT_f , 其中 m 代表尺度参数的总数量, n 代表信号的长度。

连续小波变换的核心本质是原始信号 $f(t)$ 与小波函数 $\psi_{a, \tau}(t)$ 两者之间的内积运算, 小波系数矩阵 WT_f 内 $WT_f(i, j)$ 的元素, 反映了不同尺度、不同时间位置条件下, 小波母函数与原始信号的匹配相似程度, 这里 i 代表尺度, j 代表信号时间域上的采样点序号。矩阵 WT_f 的每一行数据, 对应不同尺度下小波母函数与原始信号的关联程度, 且经过变换后, 原始信号峰值与小波系数峰值的位置能够完全对应重合。可将光谱寻峰转化为小波域极值求解问题。结合优化算法, 该方法能快速精准解调重叠光谱、降低误差, 适配大容量光纤光栅传感网络, 波长解调最大误差可控制在10 pm以内。

3. 1. 2 高斯拟合

在光纤光栅传感器的实际应用中, 高斯拟合法被广泛用于提高信号解调的精度, 应用于对光纤布拉格光栅反射信号寻峰, 信号可近似写作高斯函数的形式:

$$P(\lambda) = P_0 e^{[-4 \ln 2 (\frac{\lambda - \lambda_B}{d})^2]} \quad (3)$$

式中, P_0 为反射谱的幅值, λ 为信号波长值, λ_B 为信号中心波长值, d 为信号反射谱的3db带宽。由最小二乘法理论, 当偏差平方和 S 满足:

$$S = \sum_{i=1}^m [P(\lambda_i) - f(i)]^2 = \min \quad (4)$$

则说明此时拟合曲线为信号的最佳拟合函数, 从而获得函数中每个系数的值, 进而确定其中心波长大小即峰值位置。

高斯拟合法虽具备较高的峰值搜寻精度, 然而其对信号光谱谱型有着严苛的要求, 当信号波形与标准二次型偏差逐步增大时, 峰值定位的误差也会随之升高, 整体自适应寻峰能力偏弱。

3. 1. 3 深度学习

近些年, 深度学习技术逐步应用于光纤光栅信号处理领域, 借助搭建卷积神经网络(CNN)、长短时记忆网络(LSTM)模型, 可从繁杂的光谱数据中精准提取有效特征信息, 有效抑制噪声并增强信号质量, 进而显著提高波长解调的精度^[7]。这种方法在低波长分辨率和高噪声环境下仍能保持良好的解调效果。

3.2 交叉敏感处理

上述说明了光纤光栅可对应变、温度、压力等多参数同步监测, 相较传统传感器优势明显。但该技术存在交叉敏感缺陷: 温度与应变会共同改变光栅折射率与栅格周期, 二者均会导致光栅波长线性漂移。微小工况变化下, 温度-应变耦合干扰会大幅降低检测精度, 甚至造成数据失效^[8]。因此, 消除交叉敏感、抑制环境耦合干扰, 是光纤光栅工程应用的核心难点与技术瓶颈, 下文梳理常用解耦补偿方法:

3.2.1 双波长矩阵运算法

对于两个中心波长不同的光纤布拉格光栅, 在保证其对于环境温度和应变都具有敏感性的同时, 由于其本身光栅结构有所不同, 对相同环境下的两个参量两个光纤布拉格光栅中心波长的漂移又具有其独特性。因此, 凭借这个特性, 可以通过测量两个中心波长不同的光纤布拉格光栅的波长漂移来实现对温度和应变的同时测量。

3.2.2 双参量矩阵运算法

该方法又可称作长周期和布拉格光栅混合法, 其核心思想是利用光纤光栅对温度和应变的双重敏感特性, 通过引入两个或多个敏感元件(如光纤布拉格光栅FBG和长周期光栅LPG), 使得每个元件对温度和应变的响应应具有不同的灵敏度系数, 如图2所示。通过测量这些元件的波长变化, 并结合灵敏度矩阵, 可以求解出独立的温度和应变值。

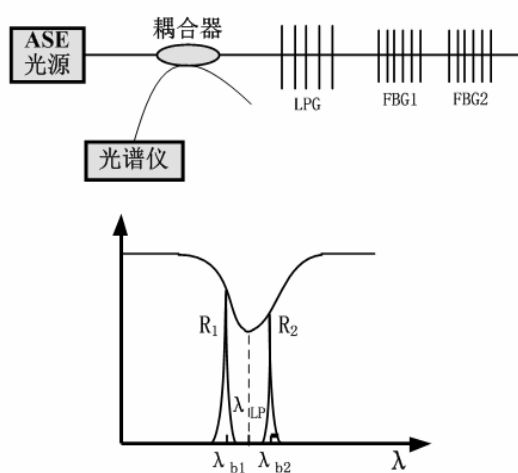


图2 LPG/FBG混合法示意图

3.2.3 应变(温度)补偿法

该方法主要通过对比光纤布拉格光栅的结构开展特殊化设计, 令其对应变、温度其中某一类参量失去敏感特性, 以此实现温度或应变的单一参量测量。举例而言, 把中心波长相近的光栅分别刻写进包层直径存在差异的两类光纤内, 其结构如图3所示。这两类光栅对温度的敏感程度基本保持一致, 但对应变的敏感程度却存在显著差异。依托这一独特性能, 通过检测两个光纤布拉

格光栅中心波长的相对偏移数值, 即可推算出应变的变化量, 再结合波长绝对偏移量, 进一步求解出温度的变化值。

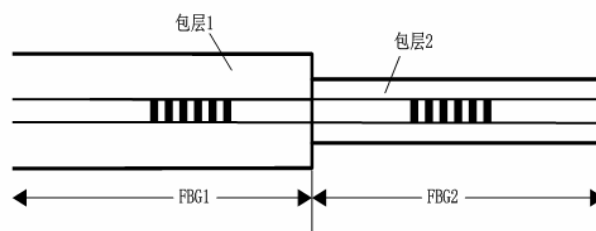


图3 两不同包层直径光纤布拉格光栅对接示意图

3.3 机器学习与智能预测

机器学习算法可高效处理光纤光栅传感信号, 显著提升测量精度与智能分析能力。PSO-SVM模型能够适配监测数据波动特征, 完成信号解调、数据补全与参数预测, 经粒子群算法优化参数后, 预测效果更佳, 适用于各类结构监测场景; BP神经网络凭借强非线性拟合能力, 有效解决温度与应变交叉敏感问题, 实现环境干扰解耦与温度补偿, 大幅提升光纤光栅传感的稳定性与检测准确度。

4 结语

城市化推进下, 深隧已成为城市防洪排涝与水资源调控的关键设施, 光纤光栅技术凭借优良特性, 可为深隧智慧监测提供可靠保障。

本文结合光纤光栅基本原理与工程应用案例, 梳理其数据处理方法, 证实该技术可精准采集隧道运行参数, 并依托智能分析为运维决策提供支撑。然而面对海量数据与复杂工况, 光纤光栅监测仍存在短板。后续需优化布设方案、升级智能数据处理算法, 结合物联网、大数据及人工智能技术, 进一步拓宽其工程应用价值, 保障城市地下基础设施安全长效运行。

【参考文献】

- [1]刘家宏, 夏霖, 梅超, 等. 深隧排水系统在城市内涝防治中的作用分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(02): 252-263.
- [2]李旭辉, 黄奕辉. 分布式光纤监测技术在土木结构健康监测中的应用[J]. 科技视界, 2018, (06): 208-209+246.
- [3]吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(04): 519-531.
- [4]何巍伟, 王梦华, 武今巾. 我国深隧排水系统典型案例分析[J]. 净水技术, 2023, 42(06): 142-151.
- [5]李尔, 曾祥英, 邹惠君, 等. 武汉大东湖污水深隧工程平面竖向及传输方式研究[J]. 给水排水, 2021, 57(01): 139-143.
- [6]吕青松, 方祖磊, 金晓旂. 海底隧道排水系统的腐蚀与防护[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(02): 53-57.
- [7]王书涛, 程子扬, 尹嘉豪, 等. 基于深度学习的光纤光栅锅炉状态监测研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(16): 185-191.

[8]邵伯成,黄勇林.少模光纤光栅温度和应变双参量传感研究[J].光通信研究,2024,(04):61-65.

黄启韬(1994--),男,江西上饶人,硕士,中级工程师,所长助理,研究方向:光纤感知技术。

作者简介: