

引用本文:李楚瑞,梅晓,容子昭,等.基于 Φ -OTDR与前向干涉融合传感的城市燃气管道动土施工监测[J].光通信技术,2026,50(4):54-59.

基于 Φ -OTDR与前向干涉融合传感的城市燃气管道动土施工监测

李楚瑞¹,梅晓²,容子昭²,冷伟宏²,徐良文³,张大鹏³,赵栋^{1*},王超¹

(1.复旦大学 智能材料与未来能源创新学院,上海 200433;2.横琴粤澳深度合作区城市规划和建设局 横琴粤澳深度合作区,广东 珠海 519031;3.珠海港兴管道天然气有限公司,广东 珠海 519000)

摘要:针对横琴粤澳深度合作区燃气管道动土施工监测需求,提出一种基于相位敏感型光时域反射仪(Φ -OTDR)与前向干涉融合传感的城市燃气管道动土监测方案,利用2种传感机制的协同互补提升精度与抗干扰能力。搭建涵盖光路传输、信号处理及服务器平台的融合监测系统,模拟挖掘机土方开挖、挖掘机风炮破碎及人工挖掘等施工场景典型路段开展现场实验,提取并分析不同扰动振动信号特征。实验结果表明,系统具备实时性强、覆盖范围广、抗干扰能力显著等优势。研究验证了光纤融合传感技术在城市燃气管道动土施工监测中的可行性。

关键词:分布式传感;燃气管道;动土施工监测;光纤传感融合技术

中图分类号:TN29;TU996.7 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2026)04-0054-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.04.008

Monitoring of urban gas pipeline excavation construction based on Φ -OTDR and forward interference fusion sensing

LI Churui¹, MEI Xiao², RONG Zizhao², LENG Weihong²,
XU Liangwen³, ZHANG Dapeng³, ZHAO Dong^{1*}, WANG Chao¹

(1. College of Smart Materials and Future Energy, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Urban Planning and Construction Bureau of the Guangdong-Macao In-Depth Cooperation Zone in Hengqin, Guangdong-Macao In-Depth Cooperation Zone in Hengqin, Zhuhai Guangdong 519031, China; 3. Zhuhai Gangxing Pipeline Natural Gas Co., Ltd., Zhuhai Guangdong 519000, China)

Abstract: This paper presents a monitoring scheme for excavation-induced disturbance of urban gas pipelines in the Hengqin Guangdong-Macao Deep Cooperation Zone, based on the fusion of phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ -OTDR) and forward interference sensing. The two sensing mechanisms are synergistically combined to enhance measurement precision and anti-interference capability. A complete monitoring system integrating optical transmission, signal processing, and server platforms was established. Field experiments were carried out under typical construction scenarios, including excavator earth-moving, excavator pneumatic breaker operation, and manual excavation, to extract and analyze vibration signal features from different disturbance sources. Experimental results demonstrate that the system offers strong real-time performance, wide coverage, and robust anti-interference capability. This study validates the feasibility of fiber-optic fusion sensing technology for monitoring excavation disturbances in urban gas pipeline infrastructure.

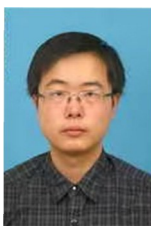
Key words: distributed optical fiber sensor, gas pipeline, excavation construction monitoring, integrated optical fiber sensing technology

收稿日期:2025-08-26。

基金项目:横琴粤澳深度合作区城市规划和建设局动土施工作业燃气管道保护监测光纤预警技术研究采购项目(HXD240307014)资助。

作者简介:李楚瑞(1985—),男,上海人,博士,工程师。主要研究方向为分布式光纤传感技术及其信号检测、采集与处理技术,嵌入式系统设计。主持国家级项目1项,发表SCI论文10余篇,授权发明专利2项,获软件著作权6项。

*通信作者:赵栋(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为光纤传感。



0 引言

城市生命线系统是维持城市正常运转的关键基础设施,涵盖了能源、供水、通信及交通等关键领域^[1]。其中,燃气管道作为能源供应的核心载体,其安全运行直接关系到公共安全与社会稳定。然而,随着城市化进程的加速,各类地下空间开发活动日益频繁,道路扩建、建筑施工及管线铺设等动土作业对邻近燃气管道构成了严峻挑战。由于城市地下空间资源有限,

各类管线分布错综复杂,施工扰动极易导致燃气管道发生机械损伤进而引发泄漏、火灾甚至爆炸等重大安全事故。因此,开展城市燃气管道上方动土施工的监测研究,对于保障城市生命线的安全稳定运行、维护社会公共安全、促进城市可持续发展具有重要现实意义^[2]。该研究不仅有助于实现施工风险的早期识别与主动预警有效遏制事故发生,还能在突发险情时提供精准定位支持从而提升应急救援效率最大限度降低事故损失。

然而,现有研究多停留于实验室环境下的性能验证,或应用于长输油气管道等非城市场景;针对城市环境下燃气管道的动土施工监测,尤其是基于多模态光纤传感融合技术的工程应用尚属空白。鉴于此,本文以横琴粤澳深度合作区城市燃气管道为研究对象,聚焦管道上方动土施工的安全监测难题,提出一种基于相位敏感光时域反射(Φ -OTDR)与前向干涉融合传感的城市燃气管道动土监测方案(下文简称融合监测系统)。通过深入探讨2种传感机制的协同互补原理构建集成监测系统,并在横琴粤澳深度合作区选取典型路段开展现场试验。

1 融合监测系统原理与架构

1.1 分布式光纤传感原理与 Φ -OTDR定位技术

分布式光纤振动传感将光缆铺设在燃气管道正上方,在传感光缆两端接入光纤传感设备,实现对光缆沿线的分布式振动监测。当外界产生振动时,埋设光缆受到应力作用导致纤芯折射率发生变化,进而引起传输光相位改变,即光弹效应,其关系^[3]可表示为

$$\Delta\varphi = \gamma\Delta L \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为传输光的相位变化, ΔL 为光纤轴向长度变化; γ 为光弹系数,由光纤性质与入射光波长决定。通过检测光相位变化,即可获取外界振动信息。

目前,分布式光纤传感主要分为背向散射型与前向干涉型2类。其中,背向散射型以 Φ -OTDR最为常

用,该技术利用光纤中背向瑞利散射光的相干特性感知沿线振动^[4-6],其光路结构如图1所示。系统采用外差相干解调技术,窄线宽激光器发出的光经耦合器1分为2束:一束进入调制器形成脉冲信号,经光放大后由环形器注入传感光缆;另一束直接进入耦合器2作为参考光。传感光缆返回的瑞利散射信号携带振动信息,经环形器进入耦合器2与参考光拍频形成干涉信号,经平衡探测器进行光/电转换和数据采集处理后,实现振动事件的定位与识别。

Φ -OTDR采用飞行时间法定位,脉冲光发射到接收散射光的时间差满足:

$$\tau = \frac{2nL}{c} \quad (2)$$

式中: τ 为光信号往返时间, n 为光纤纤芯折射率, c 为真空中光速, L 为振动事件与发射端的距离。

Φ -OTDR灵敏度极高,可检测微弱振动,且具备长距离、宽范围监测能力,单根光纤可实现数千米至数十千米分布式监测,无需大量传感器节点,降低系统成本与复杂度。但该技术对算力要求高,在城市复杂环境中易误报,且以低频探测为主,高频探测能力较弱,事件识别准确率提升困难,因此需要与前向干涉型传感技术结合使用。

1.2 前向干涉型传感原理

前向干涉型传感通常利用前向传输光进行探测,频响范围与动态范围均大于 Φ -OTDR,在实际工程中广泛应用^[7-9]。本文采用直线型Sagnac干涉结构,其光路结构如图2所示。系统采用宽光谱光源,光纤末端连接法拉第旋转镜,无需物理环路即可形成干涉。宽光谱光源经耦合器1分为2束前向光,通过耦合器2注入传感光缆,传输至末端反射后返回至耦合器1处发生干涉,最终由光电探测器接收。

前向干涉型技术信号还原效果好、高频响应强,但其定位基于相关法,在低信噪比条件下定位误差较大^[10]。因此,将 Φ -OTDR与前向干涉型技术融合,可

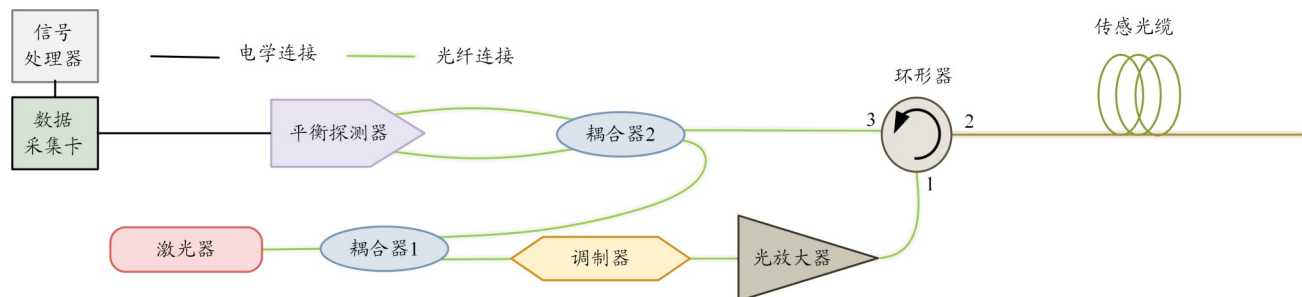


图1 Φ -OTDR光路结构图

李楚瑞,梅晓,容子昭,等: 基于 Φ -OTDR与前向干涉融合传感的城市燃气管道动土施工监测

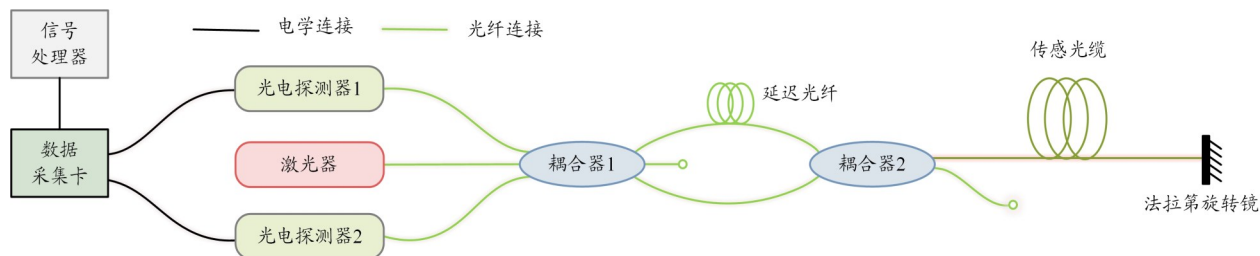


图2 直线型 Sagnac 干涉仪光路结构图

充分发挥前者定位精准、后者信号保真度高、频带宽的优势,实现二者优势互补,从而提升监测精度并降低误报率。

1.3 融合监测系统整体架构

融合监测系统的硬件部分是实现燃气管道上方动土施工有效监测的基础,由多个关键组件协同工作,确保系统能够准确感知、采集与传输各类监测信号,其整体架构如图3所示。在光路部分,直线型 Sagnac 干涉设备发射探测光,沿传感光纤传输并经尾部旋转镜返回; Φ -OTDR 设备采集光纤沿线瑞利散射信号,实现分布式振动传感。2台设备采集的光信号经光/电转换、采样分析后汇总至工控机。工控机对信号进行深度分析处理,精准判别风险事件并生成告警信息上传至服务器。服务器平台具备用户权限管控、系统运行日志、设备状态研判、时间同步等功能,可实现实时数据、历史记录与告警信息的高效存储、检索与备份,并通过用户界面(UI)界面展示结果,向用户终端推送预警信息,实现全流程监控。

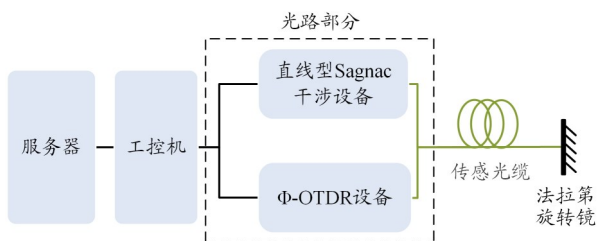


图3 融合监测系统整体架构图

2 横琴粤澳深度合作区实验

2.1 实验现场与工况设置

横琴粤澳深度合作区地处粤港澳大湾区核心区域,城市建设密集。燃气管道覆盖居民区、商业区、工业区等多类场景,管道上方动土施工频繁,安全监测需求突出。本次实验选取合作区核心区域典型燃气管道段作为实验对象,该路段周边道路拓宽、建筑基础施工等活动密集,具备较强代表性,且管道运行状态稳定、基础资料完备,便于实验数据对比与分析。

为真实还原施工扰动对管道的影响,实验模拟3类典型施工场景,如图4所示。

1)挖掘机土方开挖:采用小型挖掘机在距管道轴线3~5 m内作业,模拟土方清运与土体扰动。

2)挖掘机风炮破碎:挖掘机装配风炮工具对混凝土块进行破碎,模拟强冲击型机械施工。

3)人工挖掘作业:施工人员使用铁锹、镐头等工具开展小规模挖掘,模拟人工施工扰动。

2.2 不同施工场景信号特征分析

实验过程中,通过融合监测系统采集无扰动及各类施工状态下的振动信号,对比分析不同工况的信号特征。

在无外界扰动状态下,振动信号瀑布图如图5所示。可以看出,光纤沿线无明显振动事件发生,信号整体呈平稳状态,仅存在微弱的环境背景噪声,为后续分析施工活动产生的振动信号提供了基准参考。

在挖掘机土方开挖工况下,采集到的振动信号如图6所示。图6(a)中,作业区域对应光纤位置出现明显且持续的信号强度变化,表明该区域存在较强的振动源;图6(b)中,相位信号时域曲线呈大幅周期性波



图4 3类典型施工场景

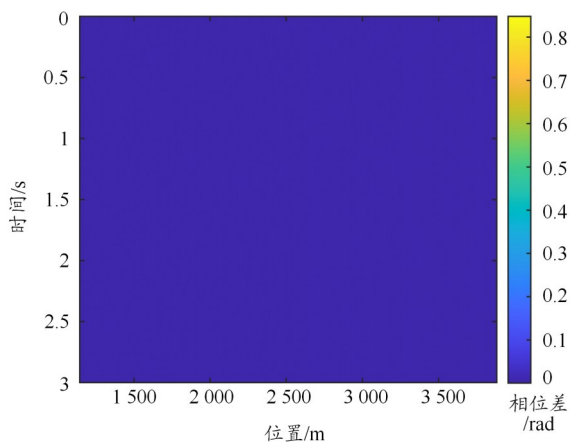
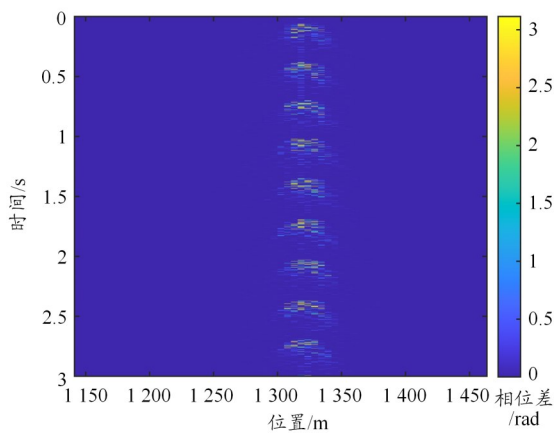
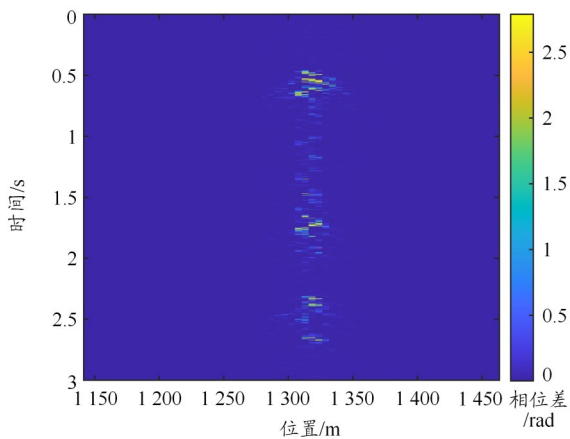


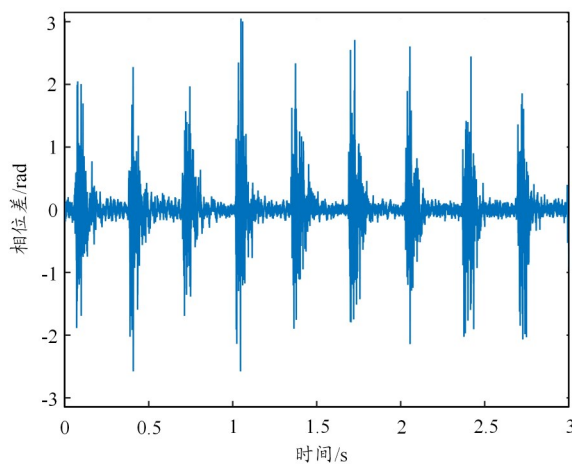
图5 无外界扰动时振动信号瀑布图



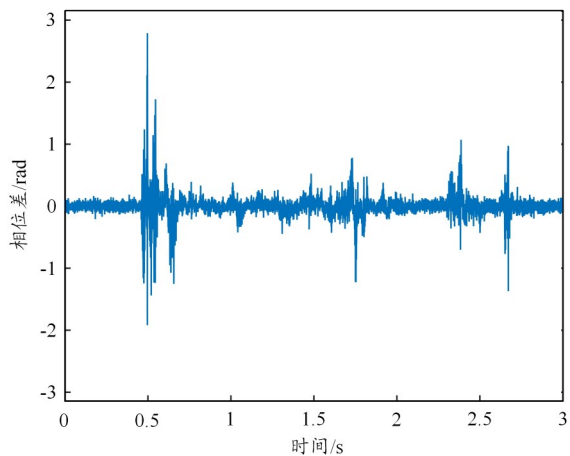
(a) 振动信号瀑布图



(a) 振动信号瀑布图



(b) 相位信号时域图



(b) 相位信号时域图

图6 挖掘机土方开挖工况下采集到的振动信号图

动,与挖掘机连续机械作业特征一致,且相位变化幅度较大,反映出机械开挖产生的振动强度较高。

在挖掘机风炮破碎工况下,产生的振动信号如图7所示。图7(a)中,相较于普通土方开挖,风炮破碎

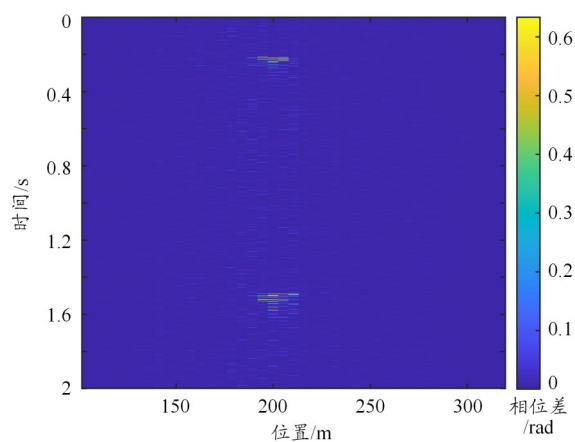
图7 挖掘机风炮破碎工况下产生的振动信号图

作业对应的振动信号在空间分布上更为集中,且信号强度峰值更高,这是由于风炮破碎过程中产生的冲击力更大、振动更剧烈;图7(b)中,相位变化呈现出高频、剧烈的波动特征,与风炮作业时高频冲击的机械特性一致,其波动频率和幅度均明显高于普通挖掘机开挖场景。

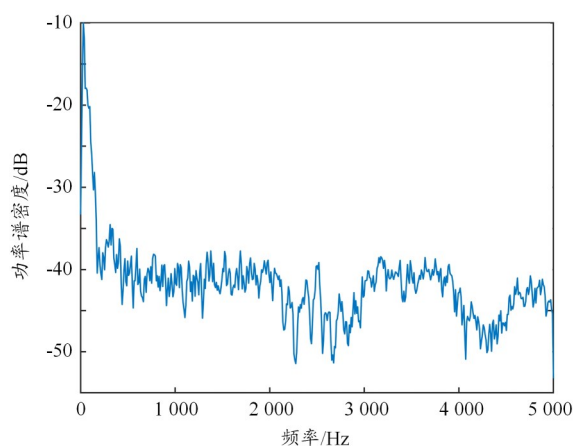
在人工挖掘工况下,产生的振动信号如图8所示。图8(a)中,振动信号的强度相对较弱,且在空间上的分布范围较窄,这与人工操作工具的作业范围有限、力量较小的特点相吻合;图8(b)中,相位波动呈现出不规则且间歇性的变化特征,这是因为人工挖掘动作并非连续稳定进行,存在操作间隔,导致振动信号出现间歇性起伏,且整体相位变化幅度较小,反映出人工施工产生的振动强度较低。

对比结果表明,不同施工活动在信号强度、频率成分、时空分布及连续性上具有显著差异,为施工事

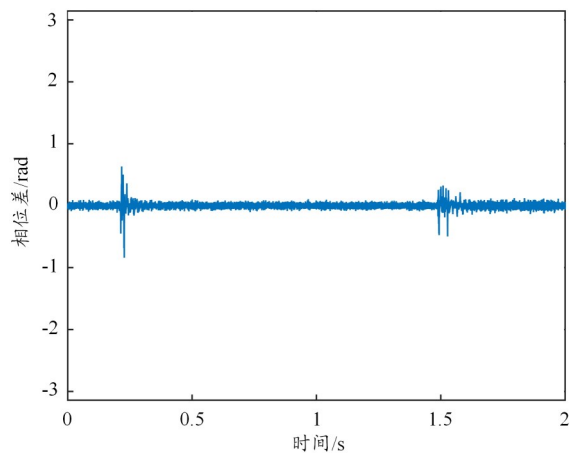
李楚瑞,梅晓,容子昭,等: 基于 Φ -OTDR与前向干涉融合传感的城市燃气管道动土施工监测



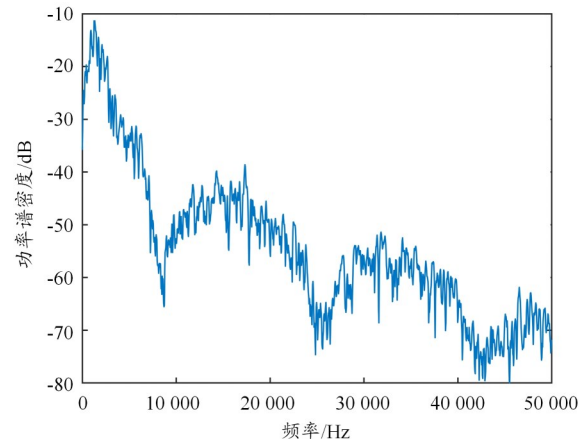
(a) 振动信号瀑布图



(a) Φ -OTDR系统频谱



(b) 相位信号时域图



(b) 前向干涉型系统频谱

图8 人工挖掘工况下产生的振动信号图

图9 同一施工信号在2种传感机制下的响应频谱对比

件精准识别与分级告警提供依据。

2.3 融合传感方案频谱互补性验证

为进一步验证 Φ -OTDR与前向干涉型融合传感系统的技术互补性,对同一施工信号在2种传感机制下的响应频谱进行对比,如图9所示。可以看出, Φ -OTDR系统频谱主要集中于1 000 Hz以下低频段,前向干涉型系统则可覆盖至40 kHz高频段(后者在40 kHz处信号幅值虽已明显衰减,但仍高于系统噪声基底,因此视为有效可识别信号)。两者频段互补,可完整捕捉基频与谐波成分,避免单一系统因频段局限造成特征丢失,从而提升系统信噪比与识别准确率。

2.4 融合监测系统性能与优势

传统燃气管道动土监测以人工巡检、单点传感器为主,存在实时性差、覆盖范围有限、易受干扰、误报率高等不足。

本文融合监测系统具备明显优势,可实现7×24 h

连续分布式监测,实时性强、预警响应快;依托单根光纤即可完成长距离全域覆盖,监测范围广、工程部署简便;能够适应城市复杂环境,具备较强抗干扰能力;在7×24 h连续监测周期内,可将低威胁事件告警次数由传统方式的约30次降至5次以下,告警准确率显著提升;同时,系统可采集完整振动信号,便于运维人员快速对事件类型进行辅助判别与确认。

3 结束语

本文针对横琴粤澳深度合作区燃气管道动土施工安全监测需求,提出 Φ -OTDR与前向干涉融合传感方案,构建了一体化融合监测系统,并开展典型施工场景现场实验,验证了该方案在城市燃气管道安全监测中的可行性与实用性。研究结果表明,2种传感机制优势互补,可有效解决单一光纤传感技术在城市复杂环境下定位不准、频带受限、误报率偏高的问题,实

现对动土施工作业的精准探测与可靠识别。所构建的融合监测系统具备实时性强、监测范围广、抗干扰能力突出、告警准确率高等优势,7×24 h连续运行时低威胁事件误告警数量显著低于传统监测方式,能够为燃气管道安全运维提供有效支撑。该融合技术具备抗电磁干扰、耐腐蚀、长期稳定运行等特点,适配城市地下管网全生命周期安全监测需求,可为城市生命线工程安全保障提供可靠技术支撑。

参考文献:

- [1] 吴刚,侯士通,张建,等. 城市生命线工程安全多层次监测体系与预警技术研究[J]. 土木工程学报,2023,56(11):1-15.
- [2] 季娟,田贵云,王平,等. 燃气管道检测技术研究进展[J]. 无损检测,2012,34(12):20-24,45.
- [3] 方祖捷,秦关根,瞿荣辉. 光纤传感器基础[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [4] Zabihi M, Chen Yusheng, Zhou Tong, et al. Continuous fading suppression method for Φ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [5] 张春熹,钟翔,李立京,等. 基于相位敏感光时域反射计的长距离入侵探测系统[J]. 红外与激光工程,2015,44(2):742-746.
- [6] Fernandez-Ruiz M R, Martins H F, Costa L, et al. Steady-sensitivity distributed acoustic sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23):5690-5696.
- [7] Pi Shaohua, Wang Bingjie, Jia Bo, et al. Intrusion localization algorithm based on linear spectrum in distributed Sagnac optical fiber sensing system[J]. Optical Engineering, 2015, 54(8):085105.
- [8] Ye Zi, Wang Jian, Wang Chao, et al. A positioning algorithm realized multilateration for distributed fiber-optic sensor[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(12):2913-2917.
- [9] 彭宽,冯诚,王森懋,等. 基于时/频域综合特征提取的分布式光纤入侵监测系统事件识别方法[J]. 光学学报,2019,39(6):0628002.
- [10] Wang Zinan, Zhang Li, Wang Song, et al. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. Optics Express, 2016, 24(2):853-858.
- [11] Wu Yingjie, Wang Zile, Ma Bo, et al. Two-dimensional timestamp-based sliding window cross correlation localization algorithm for distributed optical fiber vibration sensing interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(19):23069-23078.