

面向地下管廊温度监测的分布式光纤传感技术

王洪辉^{1,2}, 刘 全², 王 翔², 吴 维²

(1. 成都理工大学 计算机与网络安全学院, 四川 成都 610059; 2. 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 为了实现对城市地下综合管廊全域温度精准、高效、低成本的在线监测, 解决分布式光纤温度传感(RDTS, raman distributed temperature sensor)面临的信噪比低、空间分辨率有限、小尺度异常不敏感、数据存储成本高及无法二维监测等技术瓶颈。本文提出一套RDTS性能提升方法: 包括采用GraphSAGE图神经网络的信号降噪方法; 结合全变差反卷积与全连接神经网络的空间分辨率提升方法; 利用注意力机制与K-Means聚类检测的小尺度异常检测方法; 通过隐式神经表示的数据压缩方法; 最终基于处理后的一维温度信号, 通过特殊布线策略的二维温度场构建方法。该套方法能有效提升RDTS在测量精度、异常检测灵敏度和覆盖维度上的性能, 为管廊全域温度监测提供了高准确度、小尺度、低成本的解决方案。

关键词: 城市地下综合管廊; 分布式光纤测温; 信号降噪; 空间分辨率; 异常检测; 数据压缩; 二维温度场

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)01-0039-05

Distributed Optical Fiber Sensing Technology for Temperature Monitoring of Underground Utility Tunnels

WANG Honghui^{1,2}, LIU Tong², WANG Xiang², WU Wei²

(1. College of Computer Science and Cyber Security, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to achieve accurate, efficient, and low-cost online monitoring of the temperature throughout the urban underground utility tunnels, and to address the technical bottlenecks faced by distributed optical fiber temperature sensing (RDTS), such as low signal-to-noise ratio, limited spatial resolution, insensitivity to small-scale anomalies, high data storage costs and inability to conduct two-dimensional monitoring, a set of methods for improving RDTS performance is proposed, including a signal denoising method using GraphSAGE graph neural network, a spatial resolution improvement method combining total variation deconvolution and fully connected neural networks, small-scale anomaly detection method utilizing attention mechanism and K-Means clustering detection, data compression method through implicit neural representation, and finally, based on the processed one-dimensional temperature signal, a two-dimensional temperature field construction method through the special wiring strategy. This set of methods can effectively improve the performance of RDTS in measurement accuracy, anomaly detection sensitivity and coverage dimension, providing a high-precision, small-scale and low-cost solution for temperature monitoring throughout utility tunnel.

Keywords: urban underground utility tunnel; distributed optic fiber temperature detection; signal denoising; spatial resolution; anomaly detection; data compression; two-dimensional temperature field

0 引 言

城市地下综合管廊作为现代化城市基础设施的重要组成部分, 集电力、通信、给水、热力等多种管线于一体, 被誉为城市的“生命线”^[1-2]。随着我国城镇化进程的加速, 地下管廊建设规模不断扩大, 其安全

运行问题日益凸显^[3-4]。在地下管廊的运营过程中, 温度变化可能导致管道材料的膨胀、收缩或其他形式的变形, 进而损害管道的可靠性并引发泄露等事故^[5]。另一方面, 温度场的分布特征也是反映管廊整体运行状态的重要参数^[6]。传统的管廊温度监测方式主要采用点式电子传感器^[7]、红外监测^[8]等技术, 这些方法凭借高精度检测在高风险区域中发挥着关键的作用。然而, 此类方法难以实现管廊全域无缝覆盖, 且在地下潮湿、强电磁干扰环境中的长期稳定性与维护成本面临挑战。分布式光纤温度传感

收稿日期: 2025-08-21

基金项目: 成都市重点研发支撑计划(2022-YF05-00138-SN)

作者简介: 王洪辉(1985—), 男, 博士, 教授, 从事人工智能、地球勘探与信息技术方面研究工作。

(RDTs)是一种基于光纤的实时监测技术,其以光纤为传感介质,通过解调背向拉曼散射光的强度比值感知温度信息,从而捕获沿线的温度变化^[9],兼具广域覆盖与抗电磁干扰优势,已在地下设施温度感知场景中得到验证^[10],可与传统监测方法互补,作为管廊温度监测的理想解决方案。

然而,目前RDTs在监测性能上仍面临诸多技术挑战,例如RDTs原始信号信噪比低,温度测量准确性不足、空间分辨率有限^[11-12],难以精准反映与定位微小尺度隐患、对小尺度异常事件不敏感,容易遗漏局部异常、全天候监测会产生海量数据,存储成本较高。另外,RDTs传感光纤通常采用线性的布设方式,只能监测一条线上的温度分布,未被覆盖的区域难以得到准确监测,从而形成监测盲区。这些瓶颈阻碍了RDTs对管廊早期、微弱、局部异常的灵敏捕捉,难以形成二维的温度场监测,限制了其在城市地下综合管廊中的应用。针对以上问题,我们提出了基于GraphSAGE的三层图神经网络(3L-GraphSAGE),应用于RDTs信号降噪^[13]、基于全变差反卷积(TVD)和全连接神经网络(FCNN)的RDTs空间分辨率提升算法^[14]、基于注意力机制和K-Means聚类标签生成算法的RDTs小尺度异常温区检测深度学习模型^[15],基于隐式神经表示的RDTs数据压缩方法,最终基于上述流程处理的高精度一维温度信号,通过特殊布线的方法形成二维温度场^[16]。构建了一套基于RDTs的高准确度、小尺度、低成本的二维温度场监测方法,旨在为城市地下综合管廊温度监测场景提供更精准、更高效的大范围温度感知能力,研究内容如图1所示。

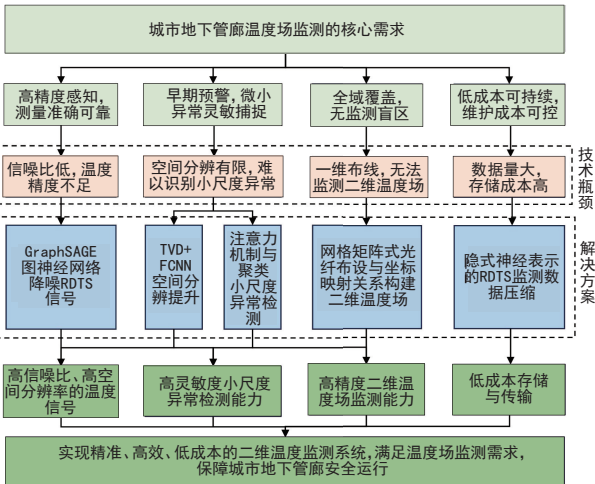


图1 研究内容

1 RDTs信号降噪方法

为抑制随机噪声对RDTs温度测量精度的影响,本研究提出了一种基于GraphSAGE的多层图神经网络的信号降噪模型(其架构见图2)。研究首先构建了可控温度环境下的光纤信号采集实验平台,获取原始传感数据。基于此,通过系统性的数据预处理流程(包括数据抽样、噪声模式替换、标签构建及边缘噪声模拟),构建了用于模型训练与验证的标注数据集。所提出的GraphSAGE降噪模型以此数据集作为输入进行训练与超参数优化。模型训练收敛后,采用独立实验采集的测试数据集评估其泛化性能,实现了输入信号的噪声抑制。验证结果表明,相较于直接解调原始RDTs数据,本方法显著提升了信号质量,有效抑制了随机噪声,降低了温度测量误差。该方法为城市地下综合管廊完整性监测提供了一种高可靠性的RDTs数据预处理解决方案。

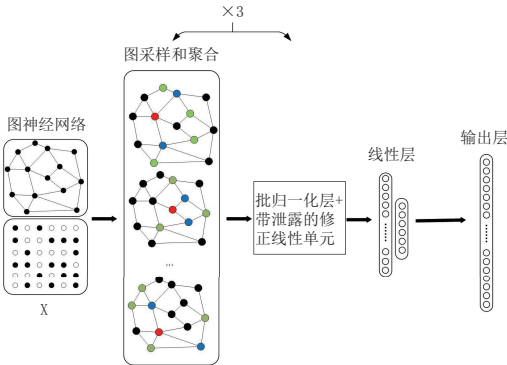


图2 3L-GraphSAGE网络结构

2 RDTs空间分辨率提升方法

现有RDTs系统的空间分辨率难以满足城市地下综合管廊温度场构建场景要求,因此,我们提出使用全连接神经网络来识别小尺度热区(SSTR)的长度,并根据识别结果自动设置TVD参数,以改善传统TVD算法在该任务下自动化能力不足的问题(流程如图3所示)。我们基于RDTs中SSTR信号的周期性变化构建了训练集(我们称之为热区响应模式,TRRM),为了验证性能,我们在包含100种TRRM和25种TRRM的训练集中获得的模型之间进行了比较实验,前者的Macro-F1值高出0.274 9,达到0.908 7,在SSTR长度识别任务中表现良好。该模型辅助的传统TVD可以在没有人工干预的情况下将RDTs的空间分辨率从1.6 m提高到0.4 m,效果如图4所示。

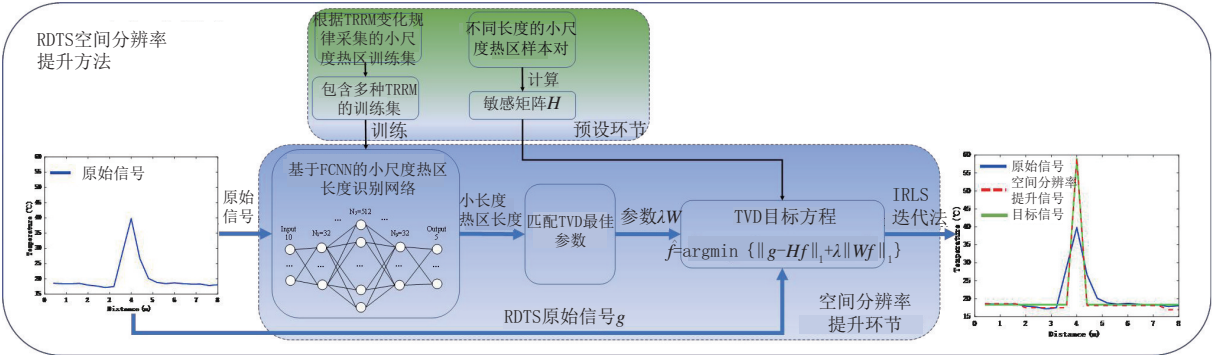


图 3 空间分辨率提升流程图

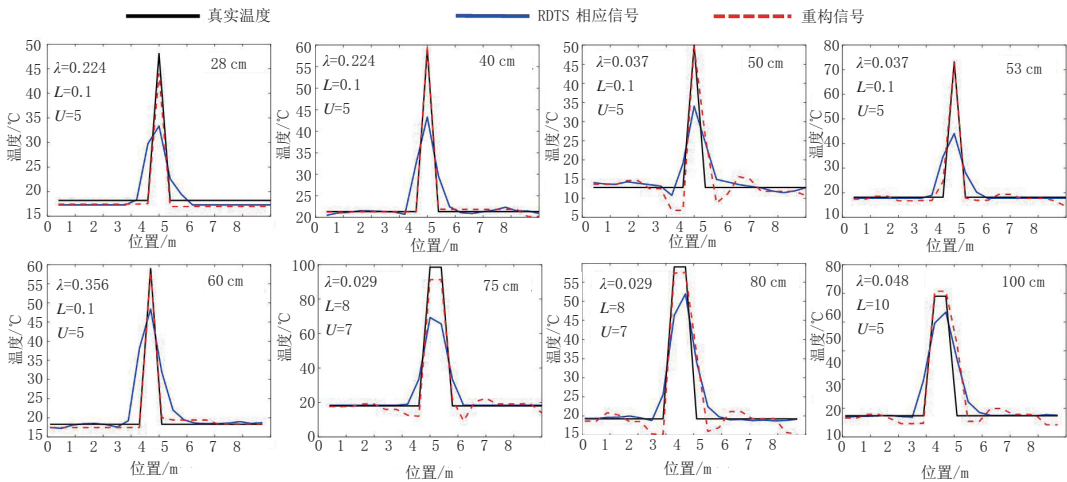


图 4 空间分辨率提升效果示意图

3 RDTs 小尺度异常检测方法

及时准确地检测出 RDTs 数据中的长度短、温度值低的小尺度异常温区对于城市地下管道泄漏监测与火灾监测等场景的早期预警意义重大。因此,我们提出了一种 RDTs 异常检测模型,该模型由全局与局部特征提取模块、多头交叉注意力融合模块、自注意力模块以及 AR 模块构成;其次,提出了一种基于 K-Means 聚类的标签生成方法(流程见图 5),可以自适应地通过异常分数生成标签。同时,我们采集了

四种不同温区分布的 RDTs 数据并开展了模型的性能评价实验。在采集的 RDTs 数据集上,我们提出的模型取得了 0.772 的最佳 F1 分数,使用基于 K-Means 聚类的标签生成方法后,其 F1 分数提高到 0.832。结果表明,本文提出的模型具有良好的 RDTs 小尺度异常温区检测性能,提出的 K-Means 聚类的数据标签生成方法能较大的增益模型检测性能。最终模型能够在温区长度为采样间隔(40 cm)及以上的 RDTs 数据上稳定执行异常检测任务(效果见图 6),可以提升 RDTs 在城市管道底下管廊温度监测中的灵敏度。

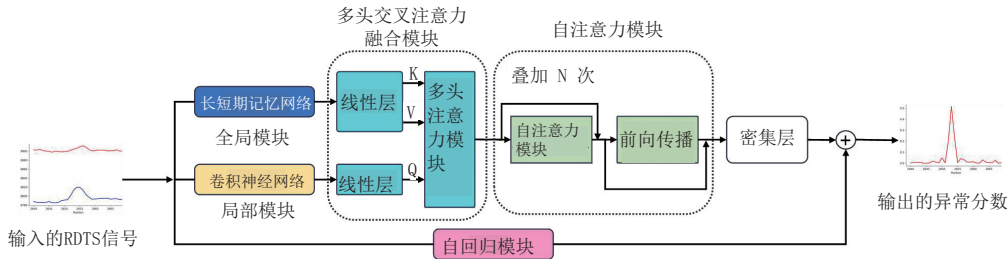


图 5 小尺度异常检测方法流程图

4 RDTs 信号压缩方法

针对 RDTs 全天候运行产生的海量数据所引发的存储与传输瓶颈,本研究提出了一种基于隐式神

经表示(INR)的数据压缩方法(网络结构见图 7)。该方法首先采集 RDTs 原始数据并进行归一化处理,得到归一化的 anti-Stokes 光强矩阵和 Stokes 光强矩阵。随后,对目标矩阵(归一化 anti-Stokes 矩阵或归

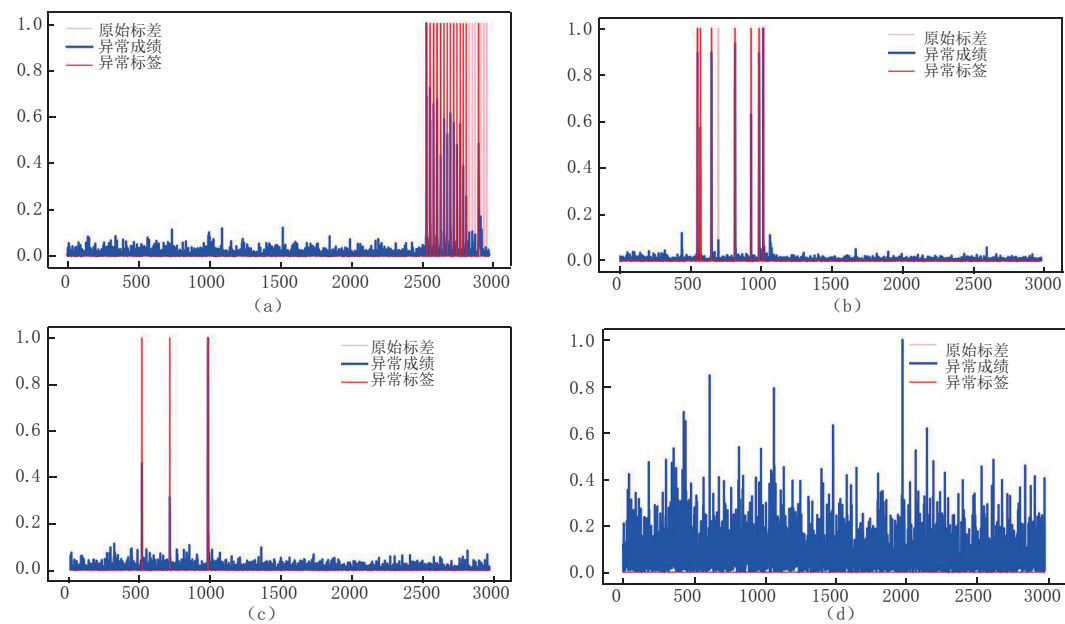


图6 小尺度异常检测效果示意图

一化 Stokes 矩阵)中每个数据点的空间位置坐标进行随机傅里叶特征映射(RFFN),生成对应的特征映射值并构成映射矩阵。以这些映射值作为输入,以其对应位置坐标在归一化 anti-Stokes 矩阵和归一化 Stokes 矩阵中的元素值作为输出目标,训练一个隐式神经表示模型。训练完成后,该预训练模型本身即可作为高度压缩的数据表示存储或传输。在需要原始数据时,通过该模型加载坐标映射值进行解压缩即可重建数据。实验表明该方法具有高压缩效率以及优异的重建质量,有效降低了城市地下综合管廊完整性监测中海量数据的存储与传输开销。

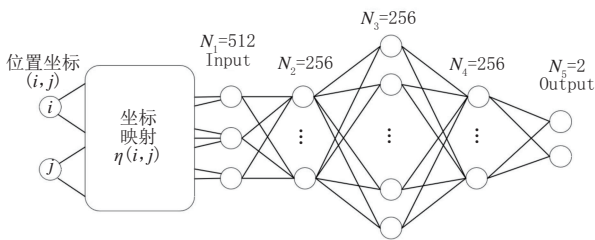


图7 隐式神经网络的结构图

5 RDTs 二维温度场构建方法

针对 RDTs 系统响应的一维信号无法满足三维温度场成像的问题,本文先使用矩阵网格铺设的形式将一维信号通过坐标换算提升至二维空间,对于综合管廊温度场的构建,本文应用一种利用传感光纤的网格矩阵式布设方法对矩形区域二维温度场构建,布设方式如图 8 所示,结合我们提出的 RDTs 降噪算法以及空间分辨率提升算法,能够更准确的反映温度场中事件的温度(效果见图 9),为地下管廊提

供高精度温度场监测方案。

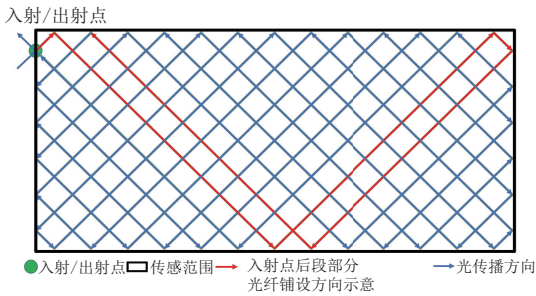


图8 光纤铺设方式

6 结 语

本文 针对 RDTs 技术在实际应用中面临的信噪比低、空间分辨率有限、小尺度异常敏感度不足及空间覆盖不足等技术瓶颈,提出并实现了一系列创新方法。这些方法显著提升了 RDTs 对城市地下管廊环境温度场的感知能力。实现了更高精度的温度测量,更能有效捕捉以往易被忽略的更小尺度异常事件,通过数据压缩方法降低存储成本,并通过特殊铺设方式将 RDTs 的监测模式从传统的一维线性覆盖拓展至二维空间覆盖,减少了监测盲区。所构建的这套 RDTs 监测方法,能够与传统点式监测手段形成有效互补,共同为城市地下管廊运营方提供覆盖更广、感知更细、响应更快的温度安全预警能力,为预防管道泄漏、保障城市“生命线”的安全稳定运行提供了更可靠的技术支撑。

参考文献:

[1] 崔国静,周庆国,宋战平.城市地下综合管廊建设与发展探析[J].西

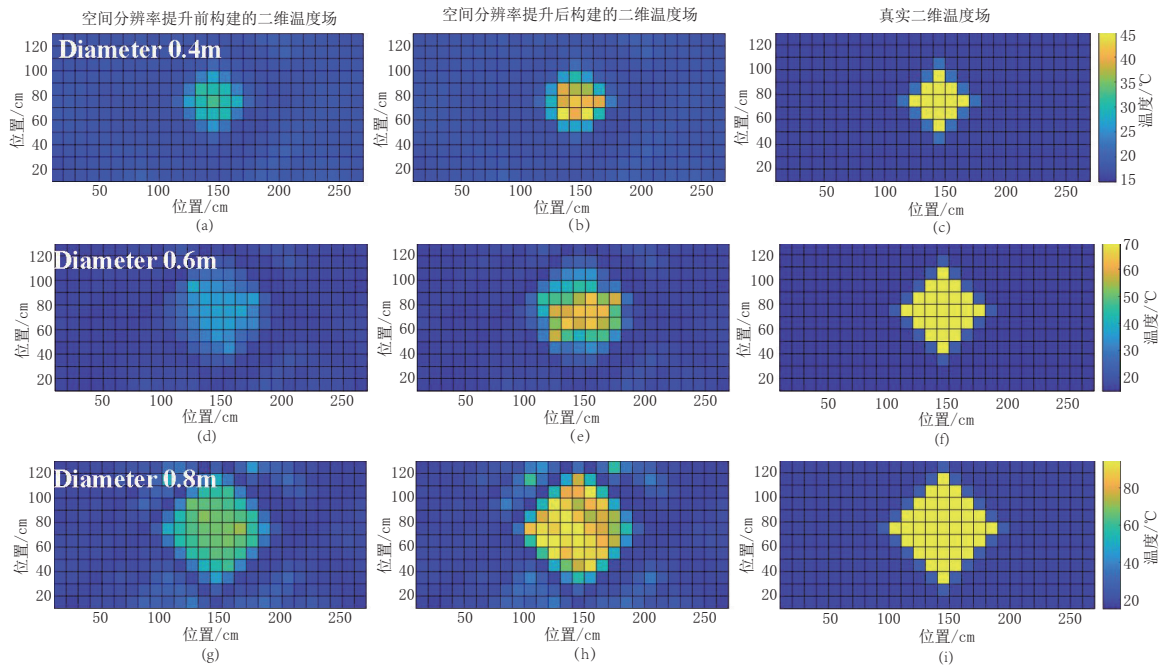


图9 二维温度场构建效果示意图

安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(5):660-666.

[2] 地下综合管廊——城市地下“生命线”[J]. 工程建设标准化,2016,(5):75-76.

[3] 陈志龙,张智峰,王海丰.我国城市地下综合管廊建设现状与发展趋势[J].隧道建设(中英文),2025,45(9):1615-1626.

[4] 梁宁慧,兰菲,庄场,等.城市地下综合管廊建设现状与存在问题[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1622-1635.

[5] 游才文.地下管廊智能化系统检测技术应用[J].电子元器件与信息技术,2023,7(10):103-106.

[6] 崔飞龙,杨俊超,王进尚,等.环境温度对地下管廊温度场与力学特性的影响[J].岩土工程学报,2024,46(增刊2):87-91.

[7] 郑慧君,彭勇,梁月华,等.基于NB-IoT的地下管廊环境监测系统设计[J].科学技术创新,2024(5):82-85.

[8] SHAM J F C, LAI W W L, CHAN W, *et al.* Imaging and condition diagnosis of underground sewer liners via active and passive infrared thermography: a case study in Singapore[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 440-450.

[9] 介瑞敏,肖春,刘旭,等.拉曼分布式光纤温度传感:技术发展与与应用综述[J].光学学报,2024,44(1):222-247.

[10] Brüne M, Furian W, Hill W, *et al.* Temperature sensing in underground facilities by Raman optical frequency domain

reflectometry using fiber-optic communication cables[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2018, 7(1): 85-90.

[11] Li J, Zhang M. Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 128.

[12] 曹康怡,李健,张明江.拉曼分布式光纤传感测温精度提升研究进展[J].激光与光电子学进展,2024,61(17):58-76.

[13] WANG S, WANG H, WANG Y, *et al.* A novel deep-learning model for RDTS signal denoising based on graph neural networks[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 74: 103127.

[14] WANG H, LIU T, WANG X, *et al.* Spatial resolution improvement method of RDTS assisted by small-scale thermal region length recognition model[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 88: 103967.

[15] WANG H, YANG X, LIU T, *et al.* A novel deep-learning model for detecting small-scale anomaly temperature zones in RDTS based on attention mechanism and K-Means clustering[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 88: 103969.

[16] LIU T, WANG H, WANG X, *et al.* Experimental research on temperature field construction of nuclear waste barrel based on RDTS with improved spatial resolution[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 75: 103177.