

基于ALSTM-ResNet的输电线路典型振动事件识别方法研究

陈原¹,范硕超²,于竞哲¹,黄小龙²,卢毅¹,张旭¹,王康¹

(1. 国网冀北电力有限公司 电力科学研究院,北京 100045;2. 国网冀北电力有限公司,北京 100052)

摘要:为提高输电线路典型振动事件的识别准确率,提出一种基于引入注意力机制的长短记忆和残差网络(ALSTM-ResNet)的振动事件分类方法。该方法利用相位敏感型光时域反射仪(Φ -OTDR)技术获取沿线振动信号,通过ALSTM网络提取时间特征,再结合ResNet模型挖掘空间关联特征,构建时空融合的分类模型。实验结果表明,所提方法在4类典型振动事件(风振、舞动、脱冰跳跃、外破)上的平均分类准确率超过92.75%,较传统LSTM和ALSTM模型提升7%~9%,验证了时空特征融合在振动事件识别中的有效性与优越性。

关键词:输电线路典型振动;相位敏感型光时域反射仪;残差网络;空间关联特征;时空特征融合

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0084-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.015

Research on typical vibration event recognition method for transmission lines based on ALSTM-ResNet

CHEN Yuan¹, FAN Shuochao², YU Jingzhe¹, HUANG Xiaolong², LU Yi¹, ZHANG Xu¹, WANG Kang¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100045, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100052, China)

Abstract: To improve the recognition accuracy of typical vibration events on transmission lines, a vibration event classification method based on attention-based long short-term memory and residual network (ALSTM-ResNet) is proposed. This method employs phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ -OTDR) technology to acquire vibration signals along the line, extracts temporal features using an ALSTM network, and further leverages a ResNet model to mine spatial correlation features, thereby constructing a spatiotemporal fusion-based classification model. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves an average classification accuracy exceeding 92.75% across four typical vibration events (wind-induced vibration, galloping, ice-shedding jump, and external damage), representing a 7%~9% improvement over traditional LSTM and ALSTM models, thus validating the effectiveness and superiority of spatiotemporal feature fusion in vibration event recognition.

Key words: typical transmission line vibration, phase-sensitive optical time-domain reflectometry, residual network, spatial correlation features, spatiotemporal feature fusion

0 引言

输电线路作为电力系统电能传输的关键载体,其运行状态直接关系到电网的安全性与可靠性^[1]。近年

收稿日期:2025-01-26。

基金项目:冀北本部管理科技项目(52018K230007)资助。

作者简介:陈原(1969—),男,博士,教授级高级工程师,现任设备状态评价中心输电线路技术监督高级工程师,主要研究方向为电网防污闪技术及架空线路运行维护。曾荣获茅以升北京青年科技奖、“十一五”科技工作先进个人等荣誉称号;获得国家科技进步二等奖1项、省部级科技进步一等奖2项、二等奖7项。



来,随着电网规模的不断扩大,输电线路广泛穿越高海拔、重覆冰及气象复杂区域,频繁面临风振、覆冰舞动、脱冰跳跃及外力破坏等多种振动事件的威胁,严重影响了电网的稳定运行^[2]。传统监测手段受限于覆盖范围、供电条件与信号质量,难以实现对线路全域、多类型事件的精准感知与识别。

相位敏感型光时域反射仪(Φ -OTDR)技术基于光纤后向瑞利散射的相位变化感知振动,具有灵敏度高、监测距离长、可与通信光纤复用等优势,为输电线路状态监测提供了新的技术路径^[3]。特别是在已广泛部署光纤复合架空地线(OPGW)的线路中, Φ -OTDR

可直接利用冗余光纤实现“通感一体”监测, 无需额外改造^[4]。除此之外, 已有学者开展了以下相关探索: 杨芳等人^[5]实现了线路风振监测; 郝伟博等人^[6]通过实验模拟识别了导线舞动频率特征; WU H J等人^[7]基于大数据分析提出了风致舞动监测方法。然而, 上述研究多集中于单一类型事件的检测, 实际线路中多种振动事件并存且特征交织, 现有方法在对风振、舞动、脱冰跳跃与外破等典型事件进行有效区分与分类识别方面仍存在明显不足。

在基于 Φ -OTDR的振动事件分类模型方面, 已有研究尝试了包括卷积神经网络(CNN)^[8]、长短期记忆(LSTM)网络^[9]和反射传播(BP)神经网络^[10]在内的多种方法。HUANG Y等人^[11]通过区域分割与特征提取提升了识别准确率; TEJEDOR J等人^[12]采用模式分类组合策略实现了管道威胁识别; 刘明轩等人^[13]应用深度信念网络(DBN)、LSTM与门控循环单元(GRU)等深度学习算法实现了复合与多点扰动识别; 张耀鲁等人^[14]通过残差结构优化提升了模型收敛速度; CHEN X等人^[15]引入注意力机制的LSTM(ALSTM)算法提升了事件分类性能。尽管这些方法在时序特征提取方面表现良好, 但未充分挖掘振动信号在空间维度上的关联性。

鉴于输电线路振动事件(如风振、舞动和脱冰跳跃)会导致沿线应变分布呈现明显的时空差异, 综合利用振动信号在时间与空间上的连续性特征^[16-18], 将有助于提升事件识别的准确性与鲁棒性。为此, 本文提出一种基于ALSTM和残差网络(ResNet)的ALSTM-ResNet的输电线路典型振动事件识别方法, 旨在充分发挥分布式光纤传感技术在时空域中的连续监测优势, 实现多类型振动事件的高精度分类识别。

1 输电线路典型振动事件识别系统

基于ALSTM-ResNet的输电线路振动事件识别系统原理框图如图1所示。待识别事件包括线路风振、舞动、脱冰跳跃及外破。该识别系统由三部分组成: 传感侧、采集侧和处理侧。其中, 采集侧是一个分布式声学传感系统(DAS)。

传感侧依托输电线路OPGW中的冗余通信光纤, 获取线路典型振动事件的原始振动信号。OPGW中的光纤引出后, 接入采集侧, 与DAS完成光路连接。

采集侧的DAS向OPGW内的光纤发射脉冲光, 沿线各传感点产生的后向瑞利散射光由平衡探测器接收, 经光/电转换后, 信号被传输至数据处理终端。

处理侧将OPGW沿线各传感点的振动信号输入ALSTM-ResNet模型, 完成对典型振动事件的识别与分类, 最终结果在数据处理终端上显示。

2 ALSTM-ResNet算法流程

为了充分挖掘输电线路典型振动事件中沿线传感点振动信号在时空上的特征关联信息, 本文融合了ALSTM和ResNet模型的优势, 分别用于提取时间特征和空间深度特征。将各传感点的时序振动信号经ALSTM模型提取时间特征后, 再统一输入ResNet模型以构建空间关联关系, 从而建立了基于ALSTM-ResNet的输电线路典型振动事件识别模型如图2所示。模型算法流程如下:

1) 根据输电线路的实际档距划分光路传感区间, 并依据 Φ -OTDR系统的空间分辨率, 确定各档距内的传感点数($n_1, n_2, \dots, n_n$), 为典型振动事件的档距定位提供基础。

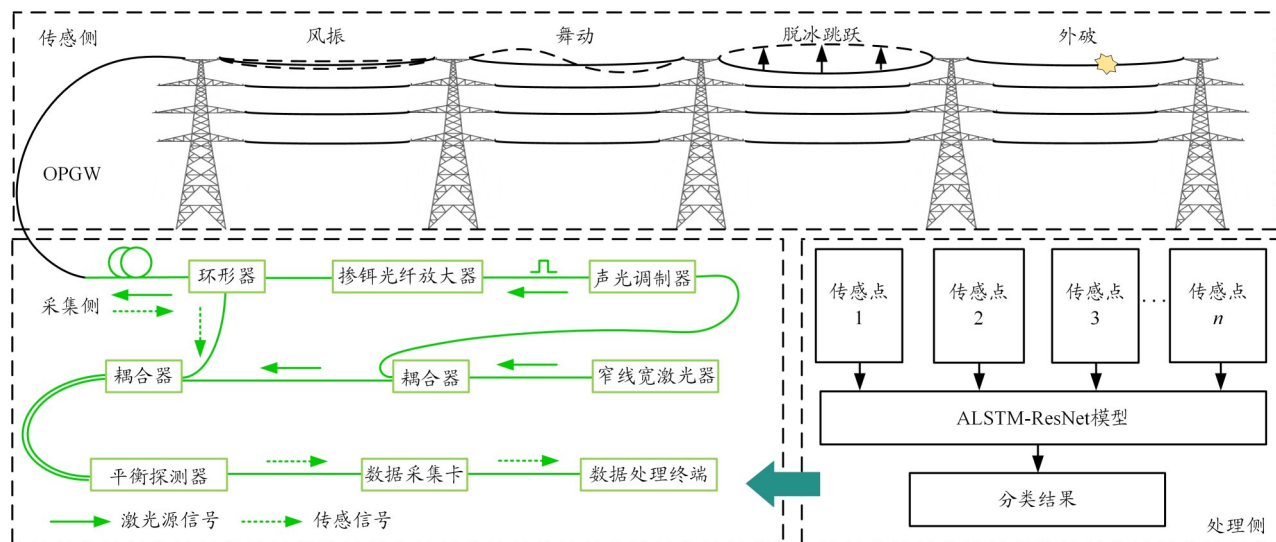


图1 基于ALSTM-ResNet的输电线路典型振动事件识别系统

陈原,范硕超,于竞哲,等:基于ALSTM-ResNet的输电线路典型振动事件识别方法研究

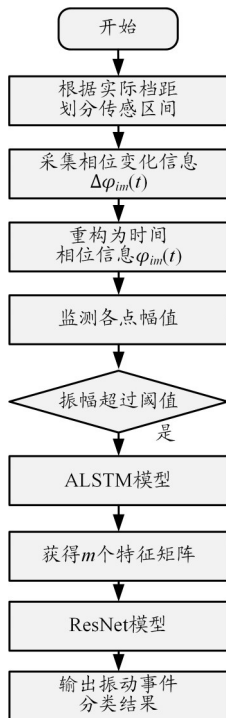


图2 基于ALSTM-ResNet的输电线路典型振动事件识别模型结构

2)采集线路沿线传感点返回的后向瑞利散射光相位变化信息,第*i*个档距内共*m*个点的相位变化信息表示为 $(\Delta\varphi_{i1}(t), \Delta\varphi_{i2}(t), \dots, \Delta\varphi_{im}(t))$ 。

3)将沿线各传感点的相位变化信息进行累加处理,得到各点的时间相位信息,记作时序振动信号。通过对比无典型振动事件发生时的原始振动信号,当某一档距内沿线各传感点的振动信号振幅超过设定阈值时,判定该档距内发生了典型振动事件。

4)将发生典型振动事件的档距内各点振动信号分别输入ALSTM模型,提取其隐藏层输出 Y 作为特征矩阵,共获得*m*个特征矩阵 $[Y_1, Y_2, \dots, Y_m]$ 。

5)将ALSTM提取的特征矩阵输入ResNet模型,通过卷积层进一步挖掘该档距内沿线传感点振动信号的空间关联特征;将卷积层的特征输出经平均池化层降维后,输入全连接层进行计算,最终输出线路典型振动事件的分类结果。

3 试验数据验证

3.1 数据获取

本文搭建了孤立档距输电线路模拟试验平台,档距长度约为30 m,架设的OPGW为48芯金属光缆。将OPGW中的光纤接入DAS以完成光路连接,所用DAS的采样率为2 kHz,空间分辨率为5 m。在模拟试验平台上对OPGW开展了风振、舞动、脱冰跳跃和外破4类典型振动事件的模拟试验。每次试验采集的数据记为一个样本,每种工况收集300个样本,共计1 200个样本。

在舞动和脱冰跳跃试验中,为更真实地模拟野外输电线路的实际工况,通过在架空线路上分散悬挂不同重量的重物,模拟了不同严重程度的覆冰舞动和脱冰跳跃现象,并将其划分为3个等级。将全部1 200个样本按2:1的比例划分为训练集和测试集。部分试验数据如图3所示。可以看出,当发生典型振动事件时,线路沿线各传感点检测到的振动信号幅值(相位)显

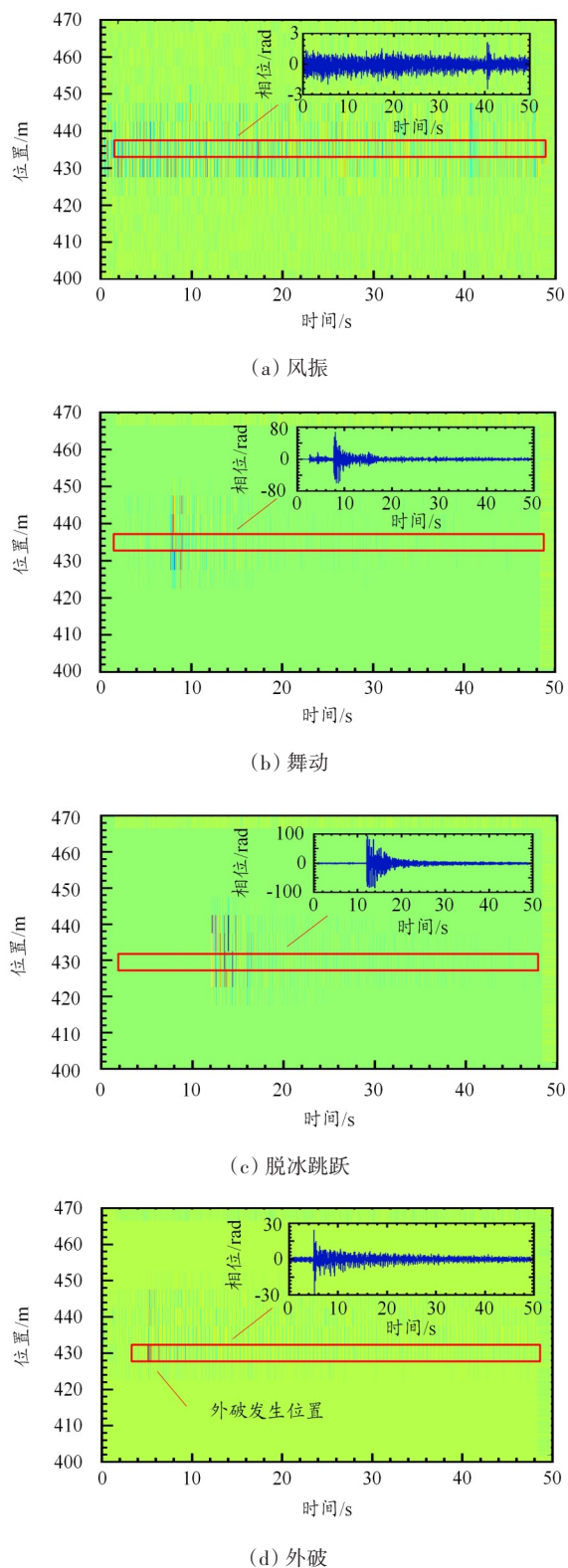


图3 线路典型振动事件试验数据

著增大,且不同事件表现出不同的振动特征。风振信号整体幅值较低,沿线各传感点振幅较为接近,呈现均匀分布特征;舞动和脱冰跳跃的振动信号幅值明显增大,各点之间存在显著差异。此外,脱冰跳跃引发

的振动信号在时间上呈现明显的衰减振荡趋势。外破事件引起的振动信号幅值与其发生位置密切相关, 外破点附近传感点采集到的振幅明显大于沿线其它位置。

3.2 传感点时空关联特征信息有效性评估

为分析输入传感点数与时间序列长度对模型测试结果的影响, 并验证所提算法在挖掘传感点时空关联特征方面的有效性, 本文对比了不同传感点数及不同时间序列长度下模型的分类准确率, 结果如图4所示。可以看出, 分类准确率随输入振动信号时间序列长度的增加而提升, 并在30 s后逐渐趋于稳定。这表明, 增加时间序列长度有助于算法更充分地提取振动信号中的时序特征, 从而提升ALSTM-ResNet模型的分类性能。

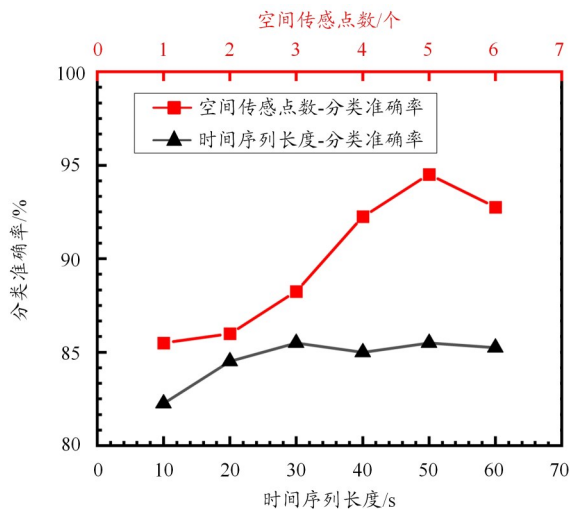


图4 分类准确率、时间序列长度与空间传感点数关系

同时, 随着输入传感点数的增加, 模型的分类准确率整体呈上升趋势(当空间传感点数为1时, 即为ALSTM模型), 这一结果验证了考虑沿线传感点空间关联特征对识别典型振动事件的有效性。然而, 当传感点数从5个增加至6个时, 分类准确率出现下降。该现象可能与 Φ -OTDR技术测量振动信号的原理有关。本文所搭建的模拟试验平台档距约为30 m, 所采用的 Φ -OTDR系统空间分辨率为5 m, 因此该档距内有效的高精度测量点可能仅为5个。当引入位于边缘位置的第6个传感点时, 由于其信号特征较弱、代表性不足, 反而对模型分类性能产生干扰, 导致准确率略有下降。

3.3 模型评估

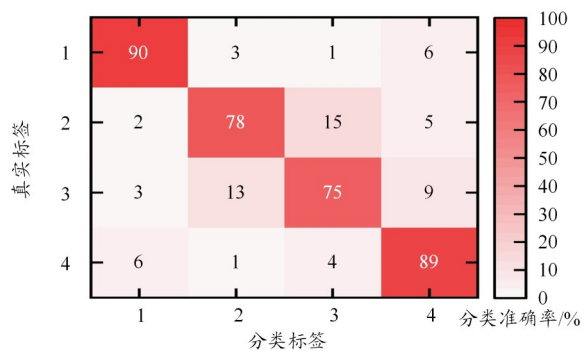
为进一步验证本文所提方法的可靠性, 使用相同

的400组测试集分别对LSTM、ALSTM、ALSTM-ResNet18及ALSTM-ResNet34模型进行了评估, 各模型的分类准确率及计算用时如表1所示。可以看出, 引入注意力机制后, ALSTM模型的分类准确率有所提升, 但提升幅度有限。将ALSTM与ResNet结合后, 尽管计算耗时有所增加, 分类准确率却显著提升了7%~9%, 这表明挖掘沿线传感点空间关联特征具有重要意义。

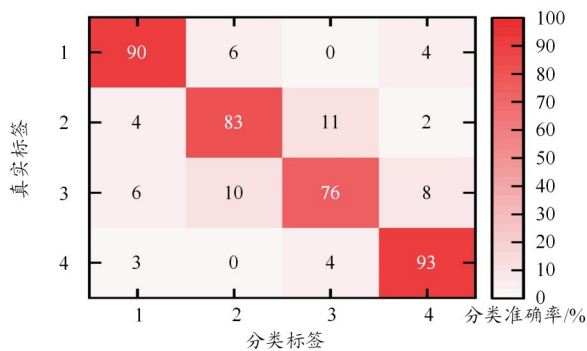
表1 各模型评价指标

模型	平均分类准确率/%	计算用时/s
LSTM	83.00	4.37
ALSTM	85.50	4.86
ALSTM-ResNet18	92.75	6.49
ALSTM-ResNet34	94.50	7.22

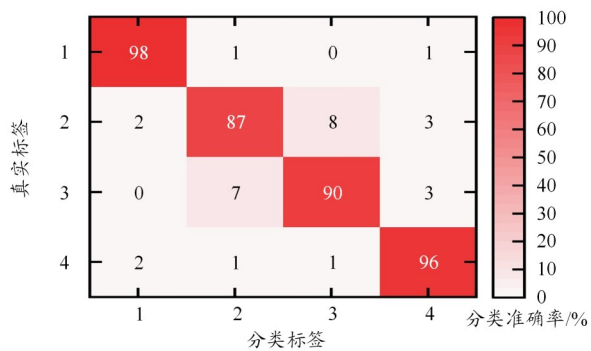
为更全面评估各模型的分类性能, 本文绘制了LSTM、ALSTM、ALSTM-ResNet18和ALSTM-ResNet34在测试集上的混淆矩阵, 如图5所示。图中标签设定如下: 风振事件为1, 舞动事件为2, 脱冰跳跃事件为3, 外破事件为4。混淆矩阵的对角线元素表示4类振动事件被正确分类的样本数。可以看出, 风振和外破事件的识别准确率始终保持在89%以上, 这可能源于其时域特征较为明显。LSTM和ALSTM模型对舞动和脱



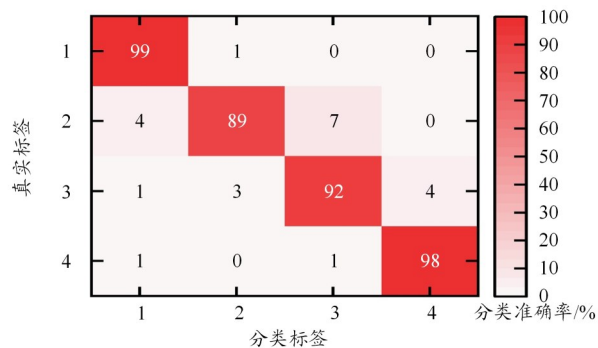
(a) LSTM



(b) ALSTM



(c) ALSTM-ResNet18



(d) ALSTM-ResNet34

图5 各模型混淆矩阵

冰跳跃事件的识别准确率均较低,说明仅依靠时域特征难以有效区分这两类事件。而引入 ResNet 模块后,舞动和脱冰跳跃事件的识别准确率显著提升,表明空间关联特征能够有效补充判别信息,与理论分析一致。此外,ALSTM-ResNet34 比 ALSTM-ResNet18 准确率更高,说明增加网络深度有助于提取更丰富的特征,但也会带来计算成本的增加,因此在实际应用中可根据具体需求选择合适的网络深度。

4 结束语

本文提出了一种基于 ALSTM-ResNet 的输电线路典型振动事件识别方法。该方法基于 Φ -OTDR 系统获取的沿线振动信号,先通过 ALSTM 网络提取时间特征,再结合 ResNet 模型挖掘其空间关联特征,显著提高了典型振动事件的分类准确率。实验基于所采集的光纤传感信号数据,实现了对 4 类典型振动事件的分类。结果表明,与仅关注时间特征的 LSTM 和 ALSTM 模型相比,本文所提方法的分类准确率整体提高了 7%~9%,平均分类准确率达到 92.75% 以上,各类事件分类准确率均值均超过 83.0%,有效验证了所提算法的可行性与优越性。

参考文献:

- [1] 王敏学,李黎,周达明,等. 分布式光纤传感技术在输电线路在线监测中的应用研究综述[J]. 电网技术,2021,45(9):3591-3600.
- [2] 张旭苹,武剑灵,单媛媛,等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J]. 光电子技术,2017,37(4):221-229.
- [3] 黄麟景,周霄,樊昕昱,等. 多机理融合分布式光纤传感技术研究[J]. 光学学报,2024,44(1):161-172.
- [4] 王敏学. 分布式光纤传感技术在输电线路安全监测中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
- [5] 杨芳,唐小亮,尹文阔,等. 基于多参量分布式光纤传感的输电线路风振监测分析[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(11):169-177.
- [6] 郝伟博,赵衍双,李卓枢,等. 基于相位敏感光时域反射技术的导线舞动状态监测[J]. 应用科学学报,2019,37(4):437-446.
- [7] WU H J, TANG B, XIAO Y, et al. Monitoring of the transmission line galloping with a novel distributed optical fibre sensor and its statistical data analysis[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2020, 14(1):166-171.
- [8] SHI Y, DAI S, JIANG T, et al. A recognition method for multi-radial-distance event of Φ -OTDR system based on CNN[J]. IEEE Access, 2021, 9:143473-143480.
- [9] WANG Z D, LOU S Q, WANG X, et al. Multi-branch long short-time memory convolution neural network for event identification in fiber-optic distributed disturbance sensor based on ϕ -OTDR[EB/OL]. [2025-01-26]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135044952030462X?via%3Dihub>.
- [10] 梅春. 基于 Φ -OTDR+BP 神经网络分类器的海缆防损害系统模式识别[J]. 光通信技术,2023,47(2):39-43.
- [11] HUANG Y, CHENG S T, LI Y, et al. High-efficient disturbance event recognition method of Φ -OTDR utilizing region-segmentation differential phase signals[J]. Applied Optics, 2022, 61(22):6609-6616.
- [12] TEJEDOR J, MACIAS-GUARASA J, MARTINS H F, et al. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats[EB/OL]. [2025-01-26]. <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/2/355>.
- [13] 刘明轩. Φ -OTDR 分布式光纤传感系统扰动事件识别研究[D]. 北京:北京交通大学,2023.
- [14] 张耀鲁,于森,常天英,等. 基于波网络的相位敏感光时域反射系统模式识别方法研究[J]. 光子学报,2021,50(3):58-69.
- [15] CHEN X, XU C. Disturbance pattern recognition based on an ALSTM in a long-distance ϕ -OTDR sensing system[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 62(1):168-175.
- [16] CATALANO E, COSCETTA A, CERRI E, et al. Automatic traffic monitoring by Φ -OTDR data and Hough transform in a real-field environment[J]. Applied Optics, 2021, 60(13):3579-3584.
- [17] WU H J, YANG M R, YANG S Q, et al. A novel DAS signal recognition method based on spatiotemporal information extraction with IDCNNs-BiLSTM network[J]. IEEE Access, 2020, 8:119448-119457.
- [18] LI S Z, PENG R Z, LIU Z L. A surveillance system for urban buried pipeline subject to third-party threats based on fiber optic sensing and convolutional neural network[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(4):1704-1715.