

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0132-05

基于传感特征融合的公路治超非现场执法动态称重方法

郭华^{1,2}, 王骏涛^{1,2}, 张孟^{1,2}, 王雪丽^{1,2}

(1. 云南云岭高速公路交通科技有限公司, 云南昆明 650011; 2. 云南省交通科学研究院有限公司, 云南昆明 650011)

摘要:针对超载带来的道路损坏和安全隐患,提出了基于传感特征融合的公路治超非现场执法动态称重方法。采用聚偏氟乙烯(Polyvinylidene fluoride, PVDF)压电薄膜轴传感器作为称重传感器,配置四个PVDF传感器,根据汽车的振动频率实施传感器间隔设置。通过数据采集卡将PVDF输出的模拟信号转化为数字信号,利用数据通信线实时传输至上位机。拟单目标势概率假设密度滤波器(quasi-single-target cardinalized probability hypothesis density filter, QSTCPHD)滤波算法经改进,适用于多传感器场景,有效融合多个测量值。设计Elman反馈型神经网络模型,实现公路治超非现场执法动态称重。测试结果表明,设计方法对多种车型在不同速度下的动态称重置信度均超过0.95,表现出很高的鲁棒性,提高了交通管理效率。

关键词:传感特征融合;PVDF压电薄膜轴传感器;公路治超;非现场执法;动态称重

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-7241(2026)01-0132-05

Dynamic weighing method for highway overloading control off site law enforcement based on sensor feature fusion

GUO Hua^{1,2}, WANG Juntao^{1,2}, ZHANG Meng^{1,2}, WANG Xueli^{1,2}

(1. Yunnan Yunling Highway Science and Technology Co., Ltd., Kunming 650011, Yunnan, China;

2. Yunnan Science Research Institute of Communication Co., Ltd., Kunming 650011, Yunnan, China)

Abstract: Aiming at the road damage and safety hazards caused by overloading, a dynamic weighing method based on sensor feature fusion for non site law enforcement of highway overload control is proposed. Using polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric thin film axis sensors as weighing sensors, four PVDF sensors are configured, and sensor spacing is set according to the vibration frequency of the car. It converts the analog signal output by PVDF into a digital signal through a data acquisition card, and transmit it in real-time to the upper computer using a data communication cable. The quasi-single-target cardinalized probability hypothesis density filter (QSTCPHD) filtering algorithm is improved and is suitable for multi-sensor scenarios, effectively fusing multiple measurement values. It designs an Elman feedback neural network model to achieve dynamic weighing of non site law enforcement for highway overload control. The test results show that the design method has a confidence level of over 0.95 for dynamic weighing of various vehicle models at different speeds, demonstrating high robustness and improving traffic management efficiency.

Keywords: sensor feature fusion; PVDF piezoelectric thin film axis sensor; highway overload control; off site law enforcement; dynamic weighing

超限超载不仅严重破坏公路设施,降低公路使用寿命,还增加交通事故的风险,对人民生命财产安全构成威胁。传统的治超方式主要依赖于现场执法,需要投入大量的人力物力,且效果并不理想^[1]。随着技术的进步和信息化水平的提高,非现场执法成为一种新的选择^[2]。非现场执法通过采用先进的称重技术和信息化手段,实现对超限超载车辆的自动识别、抓拍取证和处罚,具有效率高、成本低、执法公正等优点^[3]。

公路治超非现场执法动态称重技术在国外的研究起

步较早,尤其在发达国家,早在20世纪中期就已开始研究,并形成了较为成熟的技术体系。而在国内,虽然起步较晚,但近年来随着科技的不断进步,相关研究也取得了显著进展,动态称重技术现已广泛应用于公路治超非现场执法中,提升了治超效率和执法准确性。文献[4]融合门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)神经网络与互补集合经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)技术,通过信号分解提取纯净轴重信号,再由GRU输出准确轴重。但CEEMD在滤除干扰

收稿日期:2024-05-17;录用日期:2024-07-01

基金项目:云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交科教便[2023]159号)

作者简介:郭华(1973—),男,本科,高级工程师,研究方向:应用电子技术和交通信息化。

通信作者:张孟(1992—),女,硕士,高级工程师,研究方向:交通信息工程及控制。

引用本文:郭华,王骏涛,张孟,等.基于传感特征融合的公路治超非现场执法动态称重方法[J].自动化技术与应用,2026,45(1):132-136.(GUO Hua, WANG Juntao, ZHANG Meng, et al. Dynamic weighing method for highway overloading control off site enforcement based on sensor feature fusion [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(1):132-136.)

时可能误删有用信息,影响残余分量准确性,进而影响轴重预测效果。文献[5]利用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)应对多车工况下的桥梁动态称重,但深层网络易过度拟合,影响泛化能力。文献[6]提出基于迭代重加权最小二乘法(iteratively reweighted least squares, IRLS)的桥梁动态称重算法,但权重确定受多种因素影响,可能影响轴重识别准确性。文献[7]设计基于进阶精简指令集机器(advanced risc machine, ARM) PXA255的汽车称重系统,但处理器性能不足可能影响称重精度。文献[8]利用计算机视觉分析轮胎变形,计算垂向挠度。胎压监测系统准确性关键,但易受误差、故障及轮胎状态变化影响,导致称重结果不准确。文献[9]提出一种基于自适应矩估计(adaptive moment estimation, ADAM)法优化器的多层反向传播(backpropagation, BP)神经网络,准确估计了动态称量结果。然而该方法高速动态检重秤的最高运行速度为2 m/s,其泛化能力较差,无法确保场景下速度变化后称重的准确性。文献[10]对动态称重信号进行预处理,得到有效信号,并提取有效信号的各个时域特征。然后,利用经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)对有效信号进行分解,并将趋势分量的平均值作为EWT的预测值,从而计算出预测权值与实际权值之间的误差。接下来,使用四个时域特征作为输入,使用误差值作为输出来构建数据集,并使用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)来获得用于训练的支持向量回归(support vector regression, SVR)模型的最优参数。最后,将从模型输出的误差预测值与EWT的预测值相加,作为最终的权重预测值,实现动态称重。然而该方法在实际应用中涉及多个步骤,难以满足车辆动态称重的实时性要求。因此设计一种基于传感特征融合的公路治超非现场执法动态称重方法。其中,动态称重是指物体在运动状态下进行的称重,如车辆在运动过程中进行称重。它涉及到在车辆行驶过程中,通过特定的称重设备和技术,实时获取车辆的重量信息。而静态称重是在物体静止状态下进行的称重,即将物体放置在称重器上进行测量。静态称重仅需要考虑物体重力的大小,测量相对简单,而动态称重则需要考虑物体的惯性,因此测量更为复杂。因此,为有效实现公路治超非现场执法动态称重,所提方法考虑动态称重场景需求,选用PVDF压电薄膜轴传感器作为称重传感器,这种传感器具有响应快、灵敏度高、测压范围宽等特点,且配置四个PVDF传感器,根据汽车的振动频率实施传感器间隔设置,确保能够全面、准确地捕捉车辆运动过程中的重量变化。并为了获取稳定的称重数值结果,采

用QSTCPHD滤波算法,对多个传感器的测量值进行融合,减少误差,提高测量的准确性。然后利用Elman反馈型神经网络模型,对融合后的数据进行进一步处理,最终得到稳定、准确的重量值结果,实现公路治超非现场执法动态称重。

1 动态称重方法设计

1.1 传感器布设

鉴于单个压电薄膜轴传感器在测量时易受到车辆振动的影响,采取了使用多个传感器对动态轮胎力实施重复采样的策略,从而有效估计静态轴重,减少车辆振动对动态称重精度的潜在干扰。另外,弯板式、压电陶瓷式和压电石英式传感器不仅施工困难,还会对路面寿命造成显著影响。同时,考虑到光纤传感器技术尚待成熟,选择PVDF压电薄膜轴传感器作为称重传感器,具有施工简便、成本低廉的优势,且支持临时安装^[11]。

为了保护传感器并确保其稳固,避免粉尘、轮胎碾压和温度变化等外部因素的干扰和损害,首先将传感器封装在保护层内,再利用环氧树脂将封装后的保护层紧密固定在路面上。为了方便观察和监控,选用透明的硅胶垫作为封装材料。图1展示了封装结构的剖面图,传感器被三层硅胶垫环绕的缝隙所保护,并在其周围填充了环氧树脂^[12]。这种设计不仅保护了传感器的铜制外壳,还通过减少轮胎碾压时的横向冲击力,进一步降低了测量误差。

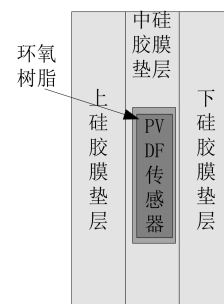


图1 封装结构剖面图

Fig. 1 Cross-section of the encapsulation structure

在传感器布局策略上,选择配置四个PVDF传感器,并根据汽车的振动频率实施传感器间隔设置。高精度PVDF称重传感器固然准确,但成本也相对较高;而低精度PVDF传感器则具备成本优势^[13]。为了在满足精度要求的同时降低整体成本,创造性地采用两种不同精度的传感器组合方案,并对这四个传感器的数据实施特征融合处理。其中一类传感器的不确定度是7%,而二类传感器的不确定度是20%。具体的精度排布情况参见表1。

表1 PVDF传感器精度排布

Tab. 1 Accuracy grading of PVDF sensors

项目	传感器1	传感器2	传感器3	传感器4
传感器类型	一类PVDF传感器	二类PVDF传感器	一类PVDF传感器	二类PVDF传感器
通道号数	通道0	通道1	通道2	通道3

为确保测量的精准性,传感器保护垫与路面需要紧密贴合,以降低因传感器振动和轮胎牵引力产生的误差。此外,这种紧密贴合还能确保轮胎与传感器作用时间的精准计量。

关于 PVDF 传感器的安装,具体步骤如下。

1) 传感器定位。为确保车辆同一轴上的两个轮胎能够同时与传感器接触,传感器的粘贴方向需与车辆行驶方向保持垂直。

2) 清洁工作。使用高压气泵彻底清理预定的粘贴位置,以确保无尘埃和杂质影响粘贴效果。

3) 环氧树脂准备。按照 1:1 的比例将环氧树脂与固化剂混合,为接下来的粘贴工作做好准备^[14]。

4) 传感器粘贴。将压电薄膜传感器粘贴在准备好的位置上,并等待环氧树脂完全凝固(大约 3 小时)后方可使用。

通过数据采集卡将 PVDF 传感器输出的模拟信号直接转化为数字信号,随后利用数据通信线实时传输至上位机。选用的数据采集卡型号为 NI USB-6210。

1.2 传感特征融合

对于布设的多个 PVDF 传感器,使用 QSTCPHD 滤波算法的改进方法实施多个测量值的融合处理。具体来说,QSTCPHD 滤波算法的改进就是将其进一步推广至多个传感器的情形,因此改进滤波算法的流程不变,同样是从预测到重采样这六个步骤,只需对预测步、更新步实施改进,并实施峰值提取步内目标数目估计计算公式的改进。

其中预测步需要加上对于目标数目分布的递推,改进后的计算公式为

$$H_l^{i,j} = \chi_{l,s}(\bar{\alpha}_l^i) \frac{\langle \delta_l^1[\bar{r}_{n,l-1}^i, \frac{S_l}{s_l}], \varepsilon_{n,l-1} \rangle}{\langle \delta_l^0[\bar{r}_{n,l-1}^i, S_l], \varepsilon_{n,l-1} \rangle} \quad (1)$$

式中, $\chi_{l,s}(\bar{\alpha}_l^i)$ 指的是传感器 j 在状态 $\bar{\alpha}_l^i$ 下的检测概率; $\bar{r}_{n,l-1}^i$ 指的是粒子 i 预测步权值; S_l 指的是在时刻 l 观测到的所有测量值的集合; s_l 指的是在时刻 l 传感器 j 的测量值; δ_l^1 指的是更新后的强度函数; $\varepsilon_{n,l-1}$ 指的是预测步的目标数目估计; δ_l^0 指的是预测步骤得到的强度函数^[15]。

更新步也需要加上对于目标数目分布的递推,改进后的计算公式为

$$H_l^{i,j} = (1 - Q_d(\bar{\alpha}_l^i)) \frac{\langle \delta_l^1[\bar{r}_{n,l-1}^i, \frac{S_l}{s_l}], \varepsilon_{n,l-1} \rangle}{\langle \delta_l^0[\bar{r}_{n,l-1}^i, S_l], \varepsilon_{n,l-1} \rangle} \quad (2)$$

通过下式估计峰值提取步内目标数目 \hat{K}_l

$$\hat{K}_l = \underset{m}{\operatorname{argmax}} \varepsilon_{n,l}(m) \quad (3)$$

式中, m 指的是粒子总数; $\varepsilon_{n,l}(m)$ 指的是目标数目的分布^[16]。

利用改进滤波算法实现多个测量值的融合处理。

1.3 非现场执法动态称重

设计一种 Elman 反馈型神经网络模型,实现公路治超非现场执法动态称重,该网络的输入为融合后的测量值,输出为汽车轴重。

应用具有单个隐藏层的神经网络时,鉴于动态称重的输入为融合后的测量数据,其目标是输出汽车轴重。为此,选择 sigmoid 型作为激活函数,而在输出层则采用了线性传递函数。在利用实际测量数据作为训练集时,保持除了传递函数之外的所有参数恒定。通过模拟实验,发现 tansig 函数在精度上超越了 logsig 函数,因此,在后续的训练过程中,决定将隐藏层的传递函数替换为 tansig 函数,而输出层则继续采用 purelin 函数。

为优化网络性能,采用一种逐步扩展网络结构的方法。初始时,设置相对较少的节点数量,然后对网络实施训练并评估学习误差。接着,逐渐增加节点数量,直至学习误差的降低不再显著。经过多次迭代训练后,确定了 11 个隐藏层节点和 1 个输出层节点,总计 12 个神经元^[17]。

在构建 Elman 网络模型时,借助了 Matlab 中的神经网络工具箱。首先预定义网络的层数、各层神经元的数量以及相应的传输函数。随后,通过调用 newelm 函数成功生成 Elman 网络,通过该函数自动完成网络各层权值和阈值的初始化工作。

在训练过程中,选用 MSE(均方误差)作为评估指标,定义为

$$\text{MSE} = \frac{1}{nq} \sum_{q=1}^q \sum_{i=1}^n (\hat{\varphi}_{qi} - \varphi_{qi}) \quad (4)$$

式中, n 是指输出节点的个数; φ_{qi} 是指网络实际输出值; q 是指训练样本数目; $\hat{\varphi}_{qi}$ 是指网络期望输出值。

为了显著提升网络模型的构建质量,确保训练结果的高满意度和测试效果的精准性,引入了一种全新的策略,即循环学习与测试机制。具体来说,首先将随机组合的数据样本划分为两个独立的部分。一部分专门用于网络的训练过程,另一部分则专注于网络的性能测试。在训练阶段,随机地从总数为 N 的训练样本集中抽取 M 个样本,并基于这些样本对 Elman 网络实施训练。一旦网络训练达到了预设的精度标准,随即转入测试阶段。然而,如果网络的训练精度未能满足要求,将继续对其实施训练,直至达到期望的精度。进入测试阶段后,将使用之前未参与训练的样本对网络实施测试。如果网络在测试过程中达到了预设的测试精度,将结束测试,并将此次的测试结果视为有效且可靠的。

2 实验测试

2.1 实验现场与实验过程

利用设计的公路治超非现场执法动态称重方法实施两辆汽车的动态称重。针对这两辆不同类型的车辆分别实施数据采集工作。首先,对于三轴刚性车辆,当其处于空载状

态时,重量为12吨,随后增加了15吨的砝码以模拟满载状态。在这两种不同车重下,分别实施了五种不同速度的数据采集,具体速度包括20 km/h、30 km/h、40 km/h、50 km/h和60 km/h。另一方面,对于普通卡车,当其处于空载状态时,重量为5吨,同样增加了15吨的砝码以模拟满载状态。针对这辆卡车,同样在五种车速下实施数据采集。

在数据采集中,在实验路段铺设传感器,其中实验路段的概况如下。

- 路型,沥青路;
- 路长,500 m;
- 路宽,10 m;
- 竣工日期,2015年;
- 路面等级,二级。

根据实验汽车的振动频率,将传感器间隔设置为1.5 m,传感器布设现场如图2所示。

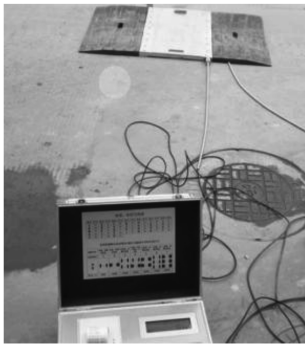


图2 传感器布设现场

Fig. 2 Site layout of sensors

其中传感器1采集的部分数据如表2所示。

表2 传感器1采集的部分数据

Tab. 2 Partial data collected by sensor 1

序号	车辆类型	载重(吨)	速度(km/h)	压电信号值
1	三轴刚性车辆	12	10	1 234
2	三轴刚性车辆	12	15	1 356
3	三轴刚性车辆	12	20	1 478

对于铺设的PVDF传感器,使用QSTCPHD滤波算法的改进方法实施多个测量值的融合处理。

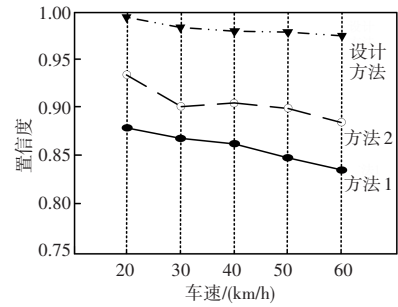
利用设计的Elman反馈型神经网络模型,实现公路治超非现场执法动态称重。其中参数设置情况如下。学习率为0.01;迭代性能目标,MSE小于0.01。

测试设计方法动态称重的置信度,以衡量该方法的性能。置信度越高,表明该方法的动态称重相对误差区间越小,称重结果越准确。

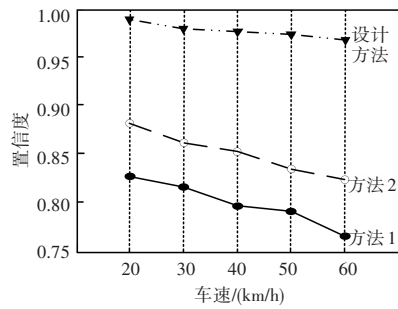
2.2 测试结果

在测试中,将CEEMD-GRU模型动态称重算法与基于卷积神经网络的多车桥梁动态称重算法作为对比测试方法,以获取详细的对比测试结果,并分别用方法1、方法2来表示。

三轴刚性车辆动态称重的置信度测试结果如图3所示。



(a) 空载状态



(b) 满载状态

图3 置信度测试结果

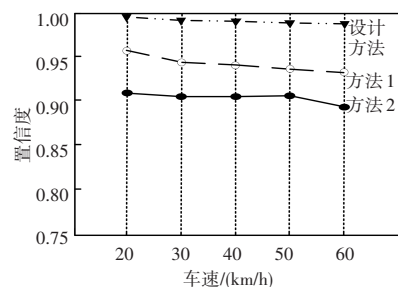
Fig. 3 Confidence test results

空载状态。在五种速度下,设计方法应该能够提供稳定的称重结果,且置信度随着速度的增加而变化不大,即设计方法的鲁棒性较强。

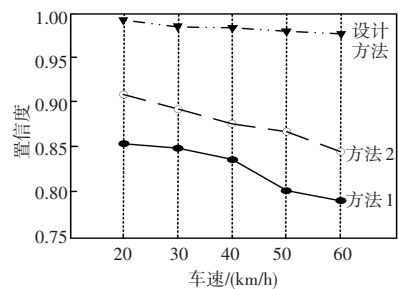
满载状态。在增加负载后,车辆的动力学特性可能会发生变化,尤其是在高速行驶时。因此,在满载状态下,不同速度下的置信度差异较大。但设计方法的置信度仍较高且其鲁棒性仍较强。

而两种对比方法的置信度整体较低,且随着车速的增加,其置信度降幅较大。

普通卡车动态称重的置信度测试结果如图4所示。



(a) 空载状态



(b) 满载状态

图4 置信度测试结果

Fig. 4 Confidence test results

空载状态。在五种速度下,三种方法的鲁棒性均较强,但设计方法的置信度更高,这是由于普通卡车空载状态下的重量较低。

满载状态。在增加负载后,设计方法的置信度仍较高且其鲁棒性仍较强,方法1、方法2的性能表现则大幅下降,但由于普通卡车重量较低,仍优于三轴刚性车辆下的测试结果。

3 结论

在公路治超非现场执法动态称重的研究中,基于传感特征融合设计了一种动态称重方法,以其高效、精准和智能化的特点,为治理超限超载现象提供了新的思路和技术手段。这种方法通过传感器阵列实现对车辆行驶过程中压电信号值的实时监测和采集。通过对采集参数实施综合处理,借助Elman反馈型神经网络模型,能够准确判断车辆的载重情况,从而实现超限超载车辆的自动识别和执法。

展望未来,基于传感特征融合的公路治超非现场执法动态称重方法将继续发挥其在治理超限超载方面的重要作用。随着技术的不断进步和创新,有理由相信,这一方法将在提高公路运输安全、保护公路设施、降低交通事故风险等方面发挥更加重要的作用。同时,也期待更多的研究者和工程师加入到这一领域中来,共同推动技术的发展和应用,为公路运输行业的可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 耿令新,王恒一,张利娟,等. 皮带机动态称重信号处理方法研究[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2023, 44(3):15-23.
- [2] 耿令新,王恒一,李洋,等. 蒜头高精度动态称重信号获取与分级方法研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5):274-282.
- [3] 赵慧兵,马娟,张杰,等. 肉牛自动化无应激动态称重系统的设计与试验[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(7):1795-1801.
- [4] 杨帮,赖任创,杨晓翔. CEEMD-GRU模型动态称重算法研究[J]. 中国测试, 2023, 49(9):108-114.
- [5] 邓露,罗鑫,凌天洋,等. 基于卷积神经网络的多车桥梁动态称重算法[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2022, 49(1):33-41.
- [6] 张龙威,尹诗定,陈宁,等. 基于迭代加权最小二乘的桥梁动态称重理论与试验研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12):187-193.
- [7] YING L, WEN-JU L I, YONG-GUI C, et al. Vehicle weighing system based on ARM [J]. Instrument Technique and Sensor, 2008, 37(3):28-30.
- [8] 蔡娜,刘磊. 轮式机器人双环轨迹物联网安全传感控制技术[J]. 电子设计工程, 2023, 31(18):51-54.
- [9] 唐思豪,滕召胜,孙彪,等. ADAM改进BP神经网络与动态称重应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4):9.
- [10] HE Z, LI Q, CHU M, et al. Dynamic weighing algorithm for dairy cows based on time domain features and error compensation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023(212):108077.
- [11] 张丽珍,李旗明,吴迪,等. 基于改进强跟踪无迹卡尔曼滤波的饲料动态称重算法[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5):967-977.
- [12] 陈建,于殿泓,惠鑫鑫,等. 基于二维激光雷达多车道车辆检测与分车算法的研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(11):1513-1520.
- [13] 王超,周卓升,贺伟诚,等. 基于正交异性桥面板应力监测数据的车辆荷载识别[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16):6695-6701.
- [14] 索小灿,孔华,严和仲,等. 大跨径不对称斜拉桥二次转体称重试验研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(S1):110-116.
- [15] 边泽英,赵鸿铎,彭科迪,等. 基于分布式振动传感的车辆轴载感知方法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2023, 51(8):1157-1167.
- [16] 年贺. 基于STM32的设施农业果蔬运输车称重系统设计[J]. 河北农业大学学报, 2022, 45(1):121-126.
- [17] 王敬启. 改进YOLOv7-Tiny的电力现场作业安全装备实时检测算法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(9):89-94.
- [2] LIU H, LI Z, WANG H, et al. CRMF: A fault localization approach based on class reduction and method call frequency [J]. Software: Practice and experience, 2023, 69(11):98-99.
- [3] YAN Y, JIANG S, WANG R, et al. A fault localization approach based on birnn and multi-dimensional features [J]. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2022, 32(8):1179-1201.
- [4] 李君,何敏,黄守道,等. 基于相态功率方向的有源配电网接地故障区段定位算法[J]. 高电压技术, 2023, 49(8):3205-3215.
- [5] 朱昊宇,贾振堂,孙影影. 基于Karenbauer变换与LSTM的配电网故障区段定位方法[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(4):30-35.
- [6] 陶维青,李雪婷,华玉婷,等. 基于曼哈顿平均距离和余弦相似度的配网单相接地故障定位[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2):130-138.
- [7] 梁睿,彭楠,张政一,等. 暂态特征模量时频分析的电缆型配电网单相接地故障区段定位[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23):9098-9114.
- [8] 刘富州,萨仁娜,朱永利,等. 基于FDM孪生网络的风电场集电线单相接地故障区段定位[J]. 可再生能源, 2023, 41(3):401-410.
- [9] 吴若冰,路辉,朱昱坤,等. 基于多时间尺度深度学习的窃电用户检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12):178-184.
- [10] 陈新岗,刘新宇,马志鹏,等. 基于近似熵的小电流接地系统故障区段定位[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1):112-117, 409.
- [11] 刘红文,曾祥君,柴晨超,等. 配电网柔性接地装置注入非工频小信号的接地故障检测与区段定位方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6):44-53.
- [12] 杜政奇,王敬华,张新慧,等. 基于多特征融合与优化支持向量机的小电流接地故障区段定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(9):103-111.
- [13] YAN Y, JIANG S, ZHANG Y, et al. A fault localization approach based on fault propagation context [J]. Information and Software Technology, 2023, 160(8):1-11.
- [14] 董晓峰,朱叶叶,王启华. 基于遗传算法的配电网区段故障定位及容错能力分析[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(6):607-612.
- [15] 陈晓龙,孙丽蓉,李永丽,等. 基于图注意力网络和一致性风险控制的配电网故障区段定位方法[J]. 电网技术, 2023, 47(12):4866-4877.

(上接第105页)