

4 轻量化检测方法的性能评估与对比实验

4.1 评估指标体系构建

结合复杂工业场景的检测需求,构建兼顾精度、效率和轻量化程度的三维评估指标体系,保证评估全面并贴合实际应用。精度指标选取平均精度(mAP)、缺陷识别准确率以及召回率。其中mAP用来测评模型对不同类型工业缺陷的综合检测能力,准确率聚焦正样本识别效果,召回率可以防止工业关键缺陷的漏检,三者一起反映模型检测的可靠程度。效率指标有推理速度(FPS)、推理延迟,适配工业流水线实时检测需求,直接体现模型是否具备部署的可行性。轻量化指标所选取的是模型参数数量、模型体积、算力消耗(FLOPs),量化模型部署的便捷性,适配工业边缘设备算力有限的情况。各指标权重按照工业场景优先级予以设定,其中精度权重0.4,效率权重0.3,轻量化权重0.3,通过加权计算得出综合得分,做到对各类轻量化检测方法的全面、客观评判。

4.2 实验环境与数据集

实验环境由硬件与软件两部分组成,保证实验能复现且符合工业实际的部署场景。硬件采用工业级边缘计算设备(CPU: Intel Core i5-12400, GPU: NVIDIA Jetson Xavier NX, 内存16GB),对工业现场边缘部署环境进行模拟;软件环境基于Python 3.8,框架采用PyTorch 1.12.0,结合OpenCV开展图像预处理,保障实验高效运行。数据集采用自制的复杂工业缺陷数据集,覆盖机械零件、冶金炉体、化工管道3类场景,包含12000张图像,其中缺陷样本8500张,包括划痕、腐蚀、破损等8类工业常见缺陷,按7:2:1的比例对数据进行划分,得到训练集、验证集、测试集。把光照变化、粉尘干扰、目标遮挡等模拟复杂工业环境的样本加入数据集,保证实验结果能真实体现模型在实际场景中的性能。

4.3 对比实验设计与结果分析

对比实验选取本文研究的四类轻量化检测方法,同时引入传统未轻量化检测模型(YOLOv5s、Faster R-CNN)作为对照组,针对复杂工业场景核心需求设计实验。实验分为两组:一组测试标准数据集下不同方法的性能,验证精度与轻量化的平衡效果;另一组测试模拟复杂干扰(强光、粉尘)下的鲁棒性,对应工业实际环境。结果显示,基于多模态融合的轻量化方法综合得分最高,mAP达97.8%,推理速度

28FPS,模型体积仅12MB;网络架构优化方法有着最快的推理速度,为35FPS,但微小缺陷召回率比较低(88.3%);模型压缩方法有良好的适配性,然而过度压缩后精度降低5.2%;迁移与小样本学习方法在少样本场景优势十分明显,标准数据集下精度比其他方法略低。对照组传统模型的精度略高,但模型体积、算力消耗是轻量化方法的3-5倍,无法适配边缘部署。

4.4 实验结论与讨论

实验结论表明,四类轻量化检测方法均可以达成复杂工业场景的部署要求,同时各有适配优势:多模态融合方法的综合性能是最好的,适合干扰强、对检测精度有高要求的场景;网络架构优化做法适用于实时性优先的流水线检测过程;模型压缩方法适合快速复用成熟模型的场景;迁移及小样本学习方法适用于缺陷样本不多的场景。对比传统模型,轻量化方法在保证检测精度大体上满足工业需求的前提下,模型体积、算力消耗大幅降低,可高效部署到工业边缘的相关设备。讨论发现,现有的这些方法仍存在不足:多模态融合方法数据收集成本较高,网络架构优化方法对微小缺陷的检测能力有限。未来可对多模态数据采集方案加以优化,结合小样本学习提升微小缺陷检测精度,进一步平衡轻量化和检测性能,推动方法在更多复杂工业场景中的推广应用。

5 结语

综上所述,本文针对复杂工业场景计算机视觉轻量化检测问题,系统梳理了四类核心方法,通过应用实践和比较实验,明确各类方法所适配的场景和优劣。研究发现,单一轻量化方法难以满足复杂工业场景多样化的需求,多技术融合已成为未来的发展趋势。本文研究为复杂工业场景下轻量化检测模型的设计和部署提出了理论参考与实践借鉴,但仍存在对极端场景适配欠佳等局限。未来可聚焦小样本、极端环境下的方法优化,推动轻量化检测技术与工业实际深度融合,进一步提升其在智能制造中的应用价值。

参考文献

- [1] 杨育学,林炜阳,王博,等.基于计算机视觉的PCB异常检测系统[J].物联网技术,2025,15(21):43-49.
- [2] 张琦.基于计算机视觉的深度学习图像识别算法优化研究[J].信息与电脑,2025,37(19):1-3.
- [3] 孙仁科,营鹏,李仲年,等.基于轻量化SSD的弱小目标检测[J].计算机仿真,2024,41(10):355-361.

Research on Power System Fault Diagnosis Methods in Smart Grid

Jianfeng Shi

Beijing Huairou Power Supply Company Beijing Electric Power Company, Beijing, 101400, China

Abstract

With the large-scale construction of smart grids, power systems have evolved from traditional high-proportion conventional energy systems to complex systems featuring high-proportion new energy integration and multi-source information interaction. The characteristics of randomness and concealment in fault occurrence have become increasingly evident, and traditional diagnostic methods have been unable to meet the requirements for safe and stable system operation. To address the main issues of low fault location accuracy, poor robustness in waveform recognition, and low utilization of multi-source information in power systems, a comprehensive diagnostic system encompassing fault feature extraction, location identification, fusion diagnosis, and threshold optimization has been established. Through theoretical analysis and simulation testing, the real-time performance and reliability of diagnostic algorithms have been improved, breaking through the bottleneck of traditional methods in complex operating conditions and providing technical support for rapid fault handling and safety protection in smart grids.

Keywords

Smart grid; Power system; Fault diagnosis; Deep learning; Multi-source information fusion

智能电网下电力系统故障诊断方法研究

史剑锋

北京市电力公司怀柔供电公司, 中国 · 北京 101400

摘要

随着智能电网大规模建设, 电力系统由原来的高比例常规能源系统向高比例新能源接入、多源信息交互的复杂系统转变, 故障发生具有随机性和隐蔽性的特点越来越明显, 传统的诊断方法已经不能满足系统安全稳定运行的要求。针对电力系统故障定位精度低、波形识别鲁棒性差、多源信息利用率低等主要问题, 创建包含故障特征提取、定位识别、融合诊断、阈值优化的全流程诊断体系, 借助理论分析和仿真检验, 改善诊断算法的实时性和可靠性, 冲破传统方法在复杂工况下应用的瓶颈, 给智能电网故障迅速处置和安全守护赋予技术助力。

关键词

智能电网; 电力系统; 故障诊断; 深度学习; 多源信息融合

1 引言

智能电网依靠先进的传感测量技术、通信技术和控制技术, 对电力生产、传输和分配全过程进行智能化的控制, 但是由于它的内部结构比较复杂以及运行工况的波动性, 造成故障演化路径具有非线性特点, 单一故障很容易引起连锁反应, 从而危及整个系统的安全。新能源高比例接入使得故障特征更加复杂, 传统的诊断方法依靠固定的阈值和单个的测量数据, 不能捕捉到故障暂态过程中微小的变化, 容易造成误判或者漏判。故障诊断是电力系统安全防护的重要环节, 其性能好坏直接影响到系统故障处理的速度和效率, 现有的故障诊断方法在复杂的工况下适应性较差, 不能满足智

能电网对故障诊断的实时性、准确性、鲁棒性等严格要求, 因此开展智能电网下电力系统故障诊断方法的研究, 解决目前的技术瓶颈, 完善诊断理论和技术体系。

2 故障诊断理论基础

2.1 智能电网故障特征分析

智能电网故障特征同系统运行工况、故障类型以及新能源接入比例存在关联, 故障产生之时, 系统电压、电流这些电气量会表现出明显的畸变现象, 伴随着暂态分量和谐波分量出现异常变动。暂态分量是故障初期的主要特征, 它的幅值和频率的变化可以体现故障的严重程度以及发展趋向, 但是它持续的时间短、幅值小, 容易受到系统噪声的干扰, 造成特征提取的困难^[1]。新能源发电设备接入系统后, 会使系统故障电流幅值和相位发生改变, 造成传统的故障特征出现畸变, 产生多维、非线性特征集合, 不同故障类型的特征

【作者简介】史剑锋(1971—), 男, 中国北京人, 本科, 高级技师, 从事电气、电力研究。

差别变得越来越小,诊断难度也越来越大。故障特征提取要冲破噪声干扰和特征畸变的双重束缚,准确把握故障暂态过程中关键的信息,给后续诊断识别赋予可靠支撑,现有的特征提取办法很难兼顾特征完整性和抗干扰性,致使诊断精确度受限制。

2.2 传统诊断方法局限性

传统的电力系统故障诊断方法主要是基于模型的诊断方法和基于信号处理的诊断方法,前者依靠准确的系统数学模型,用模型预测值和实际测量值之间的差异来完成故障诊断,但是它对于模型精度的要求很高,智能电网复杂的工况和参数波动会使得模型失配,从而产生诊断误差。后者通过滤波、分解等方式对电气量信号进行处理,提取故障特征并完成诊断,但是它大多依靠单一的信号源,不能利用多源信息的互补性,在故障特征微弱或者畸变的时候,容易出现误判的情况^[2]。

2.3 数据驱动诊断机理

数据驱动诊断机理把电力系统运行过程中产生的大量监测数据当作核心,用机器学习、深度学习这些算法去完成故障特征的自动提取、识别和诊断工作,而不需要依靠精确的系统数学模型,适合智能电网复杂多变的运行情况。其基本思路就是通过学习和训练历史故障数据来建立故障特征和故障类型、位置之间的映射关系,当系统出现故障的时候,用实时监测的数据输入到已经训练好的模型中,得到故障诊断结果。数据驱动诊断方法可以捕捉到故障特征的非线性变化,适合于新能源接入造成的特征畸变问题,而且可以将多源监测数据结合起来,利用不同数据之间的互补性来提高诊断精度,但是它的性能取决于数据的质量和算法的合理性,数据缺失、噪声干扰都会影响到诊断的效果,目前的数据驱动方法存在着特征提取不够充分、模型泛化能力差等缺点。

3 关键诊断方法设计

3.1 基于广域测量的故障定位

广域测量技术就是对电力系统各个节点上的同步相量测量装置进行部署,从而获得全系统的电气量信号,并且将这些信号同步地传送到控制中心,以此来实现故障定位。根据广域测量故障定位方法,把各个节点同步测量的电压、电流信号结合起来,利用故障暂态分量传播的特点来建立故障定位模型,准确找到故障点。其核心就是用同步相量技术消除测量数据的时间误差,保证各个节点测量数据的一致性,利用暂态分量的传播速度和相位变化来确定故障区,克服传统定位方法在复杂电网结构中定位精度低的难题。故障定位时要结合电网拓扑结构,对测量数据实施降噪处理,剔除系统噪声和干扰信号的影响,并考虑新能源接入对故障暂态分量产生的影响,改良定位算法,保证定位结果的准确性和可靠性,防止由于拓扑复杂或者特征畸变造成定位误差^[3]。

3.2 深度学习波形识别算法

深度学习波形识别算法以故障暂态波形的特征提取和识别为研究重点,利用深度学习模型的非线性拟合特性,可以自动地从暂态波形中找出微小的特征,从而达到对故障类型进行准确识别的目的。选择适合暂态波形处理的深度学习模型,用历史故障波形数据进行训练,建立波形特征和故障类型的映射关系,可以很好地适应新能源接入引起的波形畸变问题,克服传统波形识别方法对特征提取的限制。波形识别之前先对采集到的暂态波形做预处理,用滤波、归一化等方式去除噪声干扰和数据冗余,得到波形的时域、频域特征,然后把特征输入训练好的深度学习模型中,实现故障类型快速识别。模型训练过程中需要对网络结构和超参数进行调节来提高模型的泛化性能和计算效率,防止由于单一故障造成过度拟合的情况发生,保证各种故障场景下都能够得到比较稳定的识别效果,能够迅速地完成任务,满足实时诊断的需求。

3.3 多源信息融合诊断模型

多源信息融合诊断模型把广域测量数据、设备状态监测数据、环境监测数据等各类数据融合起来,采用信息融合技术来弥补各个数据源之间的不足,从而提高诊断方法的准确性以及鲁棒性。不同的监测数据从不同的角度反映系统的故障状态,广域测量数据关注的是故障的电气量特征,设备状态监测数据反映的是设备运行的状态以及存在的故障隐患,环境监测数据反映的是外部工况对系统故障的影响,利用信息融合技术把各种数据融合起来,消除单一数据源的不足,提高故障特征提取的完整性、准确性。融合时用分层融合策略,先对单个类型的数据做预处理和特征提取,再将不同类型的特征融合起来,得到多维融合特征向量,输入诊断模型中进行故障诊断,加入权重分配机制,根据各个数据源的可靠性和相关性给不同的数据源分配不同的权重,保证融合结果的合理性,防止无效数据影响诊断结果。

3.4 自适应阈值判据构建

自适应阈值判据克服了传统固定阈值不能适应智能电网工况动态变化的缺点,根据系统的运行工况和故障特征来建立动态调节的阈值判据,提高诊断方法的鲁棒性和适应性。阈值判据的建立是以系统正常工作时电气量的波动范围为依据,根据故障特征变化的规律,在系统运行过程中不断监测系统的运行参数,动态地改变阈值范围,使系统处于正常工作状态和故障状态之间能够准确地区分出来。自适应阈值的调整要联系深度学习模型的输出结果和实时监测数据,经由反馈机制,及时改良阈值参数,防止因为工况变动而产生误判或者漏判情况出现,还要顾及噪声干扰的因素,设置合适的阈值冗余,从而在保证诊断准确度的同时,维持系统的实时运行状态。阈值判据要适应各种故障类型的特点差别,对不同的故障类型采取不一样的自适应调节办法,