

大数据驱动下的电力工程故障诊断研究

李京雷

内蒙古电投新能源生态建设有限责任公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060009

摘 要 : 大数据技术为电力工程故障诊断提供了全新的解决思路与分析能力。该研究构建了融合多源电力数据的技术框架, 设计了基于特征提取与智能诊断模型的分析方法, 实现了覆盖数据采集、处理到应用服务的诊断系统。研究表明, 大数据技术能够显著提升电力故障识别的准确性与时效性, 为电力系统安全稳定运行提供了有效技术支撑。大数据驱动的诊断模式代表了电力工程智能化运维的重要发展方向。

关 键 词 : 大数据; 电力工程; 故障诊断; 特征提取; 智能模型; 系统实现

Research on Power Engineering Fault Diagnosis Driven by Big Data

Li Jinglei

INNER MONGOLIA DIAN TOU NEW ENERGY ECOLOGICAL CONSTRUCTION CO, LTD., Tongliao,
Inner Mongolia 028000

Abstract : Big data technology provides innovative solutions and analytical capabilities for fault diagnosis in power engineering. This study establishes a technical framework integrating multi-source power data, designs an analysis method combining feature extraction with intelligent diagnostic models, and implements a comprehensive diagnostic system covering data collection, processing, and application services. Research findings demonstrate that big data technology significantly enhances the accuracy and timeliness of power fault identification, offering effective technical support for ensuring the safe and stable operation of power systems. The big data-driven diagnostic model represents a crucial development direction for intelligent operation and maintenance in power engineering.

Keywords : big data; power engineering; fault diagnosis; feature extraction; intelligent model; system implementation

引言

电力系统安全稳定运行对国家经济发展与社会民生保障具有重大意义。电力系统结构日益复杂, 运行环境多变, 故障发生风险持续存在, 快速精准的故障诊断是保障供电可靠性的核心环节^[1]。传统诊断方法在处理海量、高速、多样化的电力运行数据时面临效率与准确性的瓶颈。大数据技术的兴起为解决这一挑战开辟了新途径。该技术体系具备强大的数据存储、计算分析与知识挖掘能力, 能够深入揭示电力故障的复杂特征与演变规律。

一、大数据技术在电力工程故障诊断中的应用框架

(一) 电力系统故障数据的特征分析

电力系统故障数据呈现显著的大数据特征。故障过程中产生的数据量极其庞大, 来源于广域部署的各类传感器、保护装置、录波设备及监控系统。^[2]这些数据具有持续高速产生的特性, 对实时处理能力提出了严峻挑战。故障数据类型呈现高度多样性, 既包含反映电压、电流、功率等电气量变化的数值型数据, 也包含开关状态、保护动作信号等离散状态量信息, 还涉及设备温度、振动等非电气量监测数据以及地理气象环境等辅助信息。电力系

统故障数据蕴含的价值密度通常较低, 关键故障征兆信息往往淹没在大量正常运行数据或噪声干扰之中。

(二) 大数据技术体系构建

支撑电力故障诊断的大大数据技术体系是一个融合多种关键技术综合平台^[3]。分布式文件系统与 NoSQL 数据库构成了海量多源异构电力数据存储与管理的基础设施, 能够有效应对数据存储扩展性与访问效率的需求。分布式计算框架提供核心的数据处理能力, 将庞大的计算任务分解并分配到多台计算节点上并行执行, 显著提升数据批处理与流式处理的效率。^[4]专门的数据预处理组件负责完成数据的清洗、转换与集成工作, 解决数据质量问题

并为后续分析奠定基础。机器学习库与深度学习框架集成于该体系之中，为构建智能故障诊断模型提供算法支持。

二、基于大数据的电力故障诊断模型设计

（一）故障特征提取算法

1. 时频域特征提取方法

时频域特征提取方法致力于从不同维度揭示电力故障信号的本质特性。短时傅里叶变换（STFT）（如下图1所示）是一种基础且广泛应用的时频分析工具，该方法将长信号分割为多个短时间段，并在每个时间段内进行傅里叶变换，从而获得信号频率成分随时间变化的近似描述，适用于分析变化相对缓慢的故障特征。小波变换克服了STFT固定时频分辨率的局限，能够通过伸缩和平移小波基函数对信号进行多尺度细化分析，特别擅长捕捉故障信号中突变的奇异点或局部特征，例如暂态行波波头或短时脉冲干扰。^[9] 希尔伯特-黄变换（HHT）由经验模态分解（EMD）和希尔伯特谱分析组成，EMD方法能够自适应地将复杂信号分解为一系列具有物理意义的本征模态函数（IMF）。

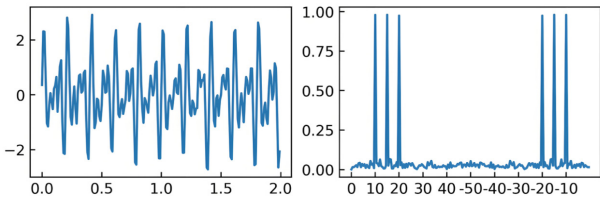


图1 短时傅里叶变换（STFT）

2. 深度学习特征自动提取

深度学习特征自动提取技术避免了传统方法依赖人工设计特征的局限性^[6]。卷积神经网络（CNN）擅长处理具有网格拓扑结构的数据，例如二维时间序列信号（通过变换）或设备状态图像，其卷积层通过滑动滤波器自动学习信号中的局部模式，池化层实现特征降维与平移不变性，深层网络结构能够逐步组合低级特征形成高级抽象表示。循环神经网络（RNN）及其改进型如长短期记忆网络（LSTM）和门控循环单元（GRU）专门设计用于处理序列数据，它们能够记忆历史信息并捕捉时间序列中的长期依赖关系，非常适用于分析电力故障录波数据这类具有强烈时序关联性的信号。^[7]

（二）智能诊断模型构建

1. 基于机器学习的分类模型

基于机器学习的分类模型在电力故障诊断中扮演着重要角色。支持向量机（SVM）通过寻找一个最优超平面来最大化不同类别故障样本之间的间隔，该模型在小样本情况下表现出色且具有坚实的理论基础，核函数技巧使其能够有效处理非线性分类问题^[8]。随机森林（RandomForest）是一种集成学习方法，该模型构建多棵决策树并将它们的预测结果进行投票集成，有效降低了单棵决策树过拟合的风险，同时具有较好的抗噪声能力和特征重要性评估功能。梯度提升决策树（如XGBoost, LightGBM）则是另一种强大的集成技术，该模型以串行方式迭代训练决策树，

每一棵树都致力于纠正前一棵树的预测残差，最终形成强预测模型，在处理结构化数据和特征交互方面表现优异。^[9]

2. 神经网络诊断模型

神经网络诊断模型凭借其强大的表示学习能力在复杂故障诊断任务中展现出巨大潜力。卷积神经网络（CNN）模型能够自动学习电力信号（如波形、频谱图）或设备图像（如红外热像图、可见光图像）中的空间或局部时频特征，通过多层卷积和池化操作提取出对故障类型判别至关重要的抽象模式。循环神经网络（RNN），特别是长短期记忆网络（LSTM）或门控循环单元（GRU）模型，专门设计用于处理具有时间依赖性的序列数据，该类模型能够有效捕捉电力故障录波数据中蕴含的动态时序演变规律和长期依赖关系。图神经网络（GNN）为处理电力系统这一具有天然图结构（节点代表母线、发电机、负荷等，边代表线路、变压器等连接）的对象提供了新范式。

3. 混合智能诊断模型优化

混合智能诊断模型优化旨在融合不同模型的优势以克服单一模型的局限并提升整体诊断性能。一种常见的策略是结合传统机器学习模型与深度学习模型，例如利用深度自编码器或CNN进行无监督或有监督的特征学习，然后将学习到的深度特征输入到SVM或随机森林等强分类器中进行最终故障分类，这种组合既利用了深度学习强大的特征提取能力，又结合了传统分类器在小样本或高维特征空间中的优势。集成学习框架是另一种有效的优化途径，该框架可以集成多个同质（如多个不同结构的CNN）或异质（如同时包含CNN、LSTM和SVM）的基础模型，通过Bagging、Boosting或Stacking等集成策略将基础模型的预测结果进行组合，集成模型通常比单一模型具有更高的泛化能力和鲁棒性。

三、电力工程故障诊断系统实现

（一）系统架构设计

1. 数据采集层实现

数据采集层构成了整个故障诊断系统的基础与数据来源。该层部署了广泛分布的传感器网络，传感器类型包括电气量传感器（如电压互感器、电流互感器）、非电气量传感器（如温度传感器、振动传感器、油色谱传感器）以及环境监测传感器（如气象站）。智能电子设备（如保护继电器、故障录波器、PMU）实时采集电网运行的详细状态信息。数据采集网关或边缘计算节点负责接收来自传感器和智能电子设备的原始数据流，网关设备执行初步的数据缓存、格式转换、简单过滤和协议适配功能。该层采用高可靠性的通信网络（如光纤专网、电力线载波、5G/4G无线通信）确保数据能够高效、稳定地传输至数据中心或云平台。

2. 分析处理层构建

分析处理层是系统进行核心计算与智能分析的中枢。该层构建于分布式大数据处理平台之上，分布式存储系统提供海量电力数据的持久化存储能力。分布式计算引擎负责执行大规模数据的批处理任务（如历史故障数据分析、模型离线训练）和流处理任

务（如实时故障检测）。数据预处理模块对原始数据进行清洗（处理缺失值、异常值）、转换（格式标准化、数值归一化）和集成（关联不同来源的数据）。特征工程模块应用时频分析、深度学习等方法从原始数据中提取或学习有价值的故障特征。模型计算模块部署并运行训练好的故障诊断模型（如机器学习分类器、深度神经网络），对输入的特征数据或原始数据进行实时分析或批量预测。

3. 应用服务层开发

应用服务层面向最终用户提供具体的故障诊断功能和服务接口。该层封装了分析处理层的核心能力，提供诸如实时故障监测告警服务、故障类型识别服务、故障定位服务、故障诊断报告生成服务等关键功能模块。可视化界面为用户提供直观的电网运行状态总览图、详细的故障信息展示（包括波形、定位点、可能原因、处理建议）、历史故障查询以及系统配置管理入口。应用程序接口（API）开放了系统核心诊断能力，允许与其他电力自动化系统（如 SCADA 系统、能量管理系统 EMS）或高级应用软件进行数据交互和功能集成。该层还负责用户管理、权限控制、日志记录等系统运维功能。

（二）关键技术实现

1. 实时故障检测算法

实时故障检测算法需要具备在数据流中快速识别异常的能力。滑动窗口技术是处理流式数据的基础，该技术将连续到达的数据流分割为固定大小或可变大小的窗口进行处理^[10]。基于统计过程控制（SPC）的方法，如 CUSUM（累积和）控制图或 EWMA（指数加权移动平均）控制图，持续监控关键电气量（如电流、电压有效值、相角差）或其衍生统计量（如均值、方差、偏度），一旦监控量超出预设的控制限或变化趋势显著偏离正常模式，算法即触发故障告警。基于实时计算的特征提取方法（如计算短时窗内的波形畸变率、高频分量能量、不对称度）也常用于快速检测异常。

2. 故障类型识别模块

故障类型识别模块的目标是对检测到的故障事件进行精确分

类。该模块的核心是加载并运行在分析处理层训练好的故障诊断分类模型（如 SVM、随机森林、CNN、LSTM 或其混合模型）。当实时故障检测算法触发警报后，相关的故障录波数据或特征向量会被送入该模块。模块首先对输入数据进行必要的预处理和特征提取（如果模型需要输入特征而非原始数据）。随后，分类模型根据学习到的故障模式知识，计算出输入数据属于各种预设故障类型（如单相接地短路、两相短路、三相短路、断线、设备内部故障等）的概率或置信度。模块根据模型的输出结果，选择概率最高的故障类型作为最终识别结果。

3. 故障定位技术实现

故障定位技术旨在确定故障发生的物理位置。^[11]行波测距法是一种高精度的定位技术，该方法利用故障瞬间产生的暂态电压/电流行波在输电线路上的传播特性，通过测量行波到达线路两端监测点的时间差来计算故障点距离。阻抗法是应用最广泛的定位方法之一，该方法利用故障后稳态的电压、电流测量值计算从测量点到故障点的线路阻抗，进而推算出故障距离，其精度受系统运行方式、过渡电阻、线路参数不对称等因素影响较大。智能定位方法结合大数据分析，利用历史故障数据、线路参数、拓扑信息以及实时量测数据训练机器学习或深度学习模型（如支持向量回归 SVR、神经网络、图神经网络 GNN），该模型能够学习复杂的故障特征与位置之间的映射关系，克服传统方法的某些局限。

四、总结

大数据技术为电力工程故障诊断领域带来了革命性的变革潜力。本研究系统地构建了涵盖数据特征分析、技术体系框架、诊断模型设计及系统实现方案的全链条研究内容。大数据驱动的故障诊断模式能够有效应对电力系统数据的复杂性、提升诊断的准确性与时效性。该模式代表了电力系统智能化运维的重要发展方向，为保障电网安全、稳定、高效运行提供了坚实的技术支撑。未来研究需持续关注模型可解释性、小样本学习、边缘智能部署及跨域数据融合等关键挑战。

参考文献

- [1] 李冰. 电力工程中电力设备故障诊断技术的研究与应用 [C]// 中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会. 2025 人工智能与工程管理学术交流会议论文集. 国网河南省电力公司鹤壁供电公司, 2025: 93-94.
- [2] 李硕, 丁佳伟, 曹浚源. 人工智能技术在电力工程配电运维中的应用与研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(S1): 188-190.
- [3] 杨小川. 电力工程输电线路故障识别方法设计与应用研究 [J]. 光源与照明, 2025, (03): 99-101.
- [4] 王安生. 基于大数据分析的电力系统故障诊断与预测方法研究 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第七届工程技术管理与数字化转型学术交流会论文集. 国网河南省电力公司, 2025: 551-552. DOI: 10.26914/
- [5] 杨珊珊. 基于深度学习的电力系统故障自动化诊断方法 [C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集（五）. 国网山东省禹城市供电公司, 2024: 262-264.
- [6] 王瑞达, 刘士凯, 黄景帅. 电力工程中电力设备故障诊断技术的研究与应用 [J]. 电气时代, 2025, (02): 102-104.
- [7] 袁春, 张雪松. 电力故障录波数据综合处理系统功能分析 [J]. 电力设备管理, 2020, (09): 64-66.
- [8] 刘文艺, 段恩强. 智能化技术在电力工程设备故障诊断与维修中的应用 [J]. 光源与照明, 2025, (01): 105-107.
- [9] 刘琼. 基于深度学习的电力负荷多因素短期预测模型设计与应用 [J]. 光源与照明, 2024, (12): 192-194.
- [10] 李陶然. 电力工程中的自动化系统故障分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(05): 280-281.
- [11] 彭裕龙. 基于深度学习的电力系统故障诊断与定位方法研究 [J]. 电工技术, 2024, (S1): 469-471.