

集控系统电气设备巡检数据的自动化分析与故障预警方法研究

姚龙

国网湖北省电力有限公司武汉供电公司江岸供电中心, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/EPTSM.2026010027

摘 要 : 就传统集中控制系统中电气设备巡查数据处理速度慢、故障警报不及时等情况, 本文开展巡查数据自动分析和故障警报方法的研究。首先搭建多源头巡查数据整合架构, 处理数据格式不同和时空同步的问题; 接着提出基于改进的卷积神经网络的特征提取模型, 最后设计融合特征权重和时间序列趋势的警报模型, 通过阈值动态调整机制匹配不同设备的运行特点。

关 键 词 : 集中控制系统; 电气设备; 巡查数据; 自动分析; 故障警报; 卷积神经网络

Research on the Method of Automated Analysis and Fault Early Warning of Inspection Data for Electrical Equipment in Centralized Control System

Yao Long

Wuhan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Jiang'an Power Supply Center,
Wuhan, Hubei 430000

Abstract : In view of the slow data processing speed and the lack of timely fault alarms in traditional centralized control systems, this paper studies the of automated analysis and fault alarms of inspection data for electrical equipment. First, a multi-source inspection data integration architecture is constructed to deal with the problems of different data formats and temporal synchronization. Next, a feature extraction model based on improved convolutional neural network is proposed. Finally, an alarm model integrating feature weight and time series trend is designed, which the operation characteristics of different equipment through a dynamic threshold adjustment mechanism.

Keywords : centralized control system; electrical equipment; inspection data; automated analysis; fault alarm; convolutional neural network

前言

集中控制系统作为电力、化工等工业领域的核心控制平台, 其电气设备的稳定运作直接关系到工业生产的安全性和连贯性。巡查作为设备状态监控的重要方式, 在传统模式下依靠人工记录设备运行参数、外观状态等数据, 再通过人工分析判断设备是否有故障隐患。这种模式不仅效率不高, 而且受人工经验的限制, 容易出现故障特征漏判、警报延迟等问题, 难以满足现代化集中控制系统对设备维护的高精度要求。随着物联网、人工智能技术的发展, 巡查数据收集已经实现自动化升级, 通过传感器、高清摄像头等设备可以实时获取电流、电压、温度、振动以及设备外观等多源头数据^[1]。不过, 多源头数据的异构性、高维度性和动态性, 让传统数据分析方法难以有效挖掘隐藏的故障特征。所以, 研究集中控制系统电气设备巡查数据的自动分析和故障警报方法, 实现从“人工巡查”到“智能警报”的转变, 对提高设备维护水平、减少故障停机损失具有重要的现实意义。

一、集中控制系统电气设备巡查数据的特点与整合办法

(一) 巡查数据的核心特点分析

集中控制系统电气设备巡查数据包含电参数、物理参数、图

像数据三类, 具有明显的多源头异构性、时空相关性和动态波动性特点。电参数包括电流、电压、功率因数等实时监控数据, 采样频率高且变化动态, 直接体现设备的电气运行状态; 物理参数主要是温度、振动、湿度等环境与设备状态参数, 受设备运行负荷、环境因素影响较大, 呈现出较强的时间序列波动性; 图像数

据来自设备外观巡查摄像头，包括设备壳体、接线端子、绝缘部件等外观图像，属于非结构化数据，需要通过图像识别技术提取特征信息。另外，不同设备的巡查数据存在时空相关性，比如同一配电柜内的多个断路器，其温度数据受同一环境温度影响，且运行状态相互关联。这些特点决定了巡查数据处理需要打破传统单一数据处理模式，搭建多源头数据融合的分析架构^[2]。

（二）多源巡检数据的整合框架构思

为处理多源巡检数据的格式异构及时空同步事项，构思“数据收集－预先处置－时空校准－特征规范化”四级整合架构。数据收集层运用分布式收集构造，借助智能感应装置收集电参量与物理参量，经边缘计算节点实施数据初步筛选，去除显著异常数值；借助高清摄像装置定时收集设备外观影像，同步记载收集时刻与设备方位信息。预先处置时期针对不同类别数据运用差异化处置策略：对于电参量与物理参量，运用滑动窗口办法使数据平滑，清除高频噪声；对于影像数据，通过影像去噪、尺寸统一化、灰度化等操作，提升影像质量。时空校准时期以GPS时间标记为基准，搭建“设备标识－收集时刻－方位信息”的三维索引，将同一设备在同一时刻节点的电参量、物理参量与影像数据实施关联匹配，处理多源数据的时间不同步问题。特征规范化时期运用Z-score规范化手段对数值型数据实施归一化处置，清除量纲差异；对影像数据通过卷积操作提取纹理、形状等结构化特征，将非结构化数据转化为规范化特征向量，为后续自动化剖析奠定根基^[3]。

二、巡检数据的自动化剖析技术探究

（一）基于改进CNN的故障特征提取模型

传统特征提取方式如小波剖析、傅里叶变换等，需依靠人工设计特征算子，难以适配多源数据的复杂特征提取需求。CNN模型具备强劲的自动特征提取能力，但其标准构造针对通用影像或时序数据设计，直接运用于巡检数据特征提取时，存在特征提取针对性欠缺的状况。结合电气设备运行原理，对CNN模型实施改进，搭建“多分支输入－机理约束卷积－特征融合”的特征提取模型^[4]。模型输入层设置三个分支，分别接入规范化后的电参量时序数据、物理参量时序数据及影像特征数据；机理约束卷积层针对不同数据类别设计专用卷积核，对电参量运用1D卷积核提取时序特征，对物理参量运用1D卷积与注意力机制结合，增强温度、振动等关键参量的特征权重，对影像特征运用2D卷积核提取空间特征；特征融合层通过全连接层将三个分支的特征向量实时融合，输出包含多源信息的综合故障特征向量。该模型通过机理约束减少无关特征干扰，提升故障特征的辨识度^[5]。

（二）依托类别划分与簇集组合的异常辨识算法

异常辨识作为自动化解析的核心节点，需同步达成已知故障的精确类别划分与未知故障的有效探测。运用“类别划分－簇集”二级异常辨识算法：首层级依托改良后的支持向量机（SVM）实施已知故障类别划分，借助引入核函数优化操作，增强模型针对高维特征的类别划分能力。运用历史故障数据搭建样本资源库，将整合完毕的巡检数据特征向量输入SVM模型之中，训练模型辨识短路、绝缘老化、接触欠佳等常见故障类型。第二层级依托密度簇集（DBSCAN）开展未知故障探测工作，针对SVM模型类别划分为“正常”的样本，通过DBSCAN算法剖析样本的

特征密度分布状况，将偏离正常密度簇的样本判定为潜在未知故障。为处理传统DBSCAN算法参数敏感难题，采用自适应参数调节策略，依据样本特征的密度分布情形自动优化邻域半径与最小样本数量，提升未知故障探测的精准程度。两级算法协同发挥作用，达成对故障的全面辨识，规避漏判与误判现象^[6]。

三、故障预警模型的搭建与优化

（一）基于特征权重及时序走向的预警模型规划

故障预警需融合故障特征的严重程度与发展趋向，规避“一概而论”式的预警机制。搭建融合特征权重与时间序列走向的预警模型，模型核心涵盖特征权重计算及走向预测两个模块。特征权重计算模块依托层次分析法（AHP）与信息熵结合的手段，AHP依据设备运行机理确定各特征的主观权重数值，走向预测模块采用长短期记忆网络（LSTM）对关键特征的时序数据实施预测，LSTM模型能够有效捕捉时序数据的长期依赖关联，通过历史数据训练之后，预测未来一段时期内特征参数的变化走向。融合特征权重及走向预测结果，计算故障风险数值，当风险数值超越设定阈值之时触发预警^[7]。

（二）预警阈值的动态调节机制

不同电气设备的运行特性、负荷水准及环境条件存在差异，固定阈值容易造成预警精度降低。设计基于设备运行状态的动态阈值调节机制，将设备负荷等级、运行时长、环境温度作为阈值调节的关键影响因素。通过构建影响因素与阈值的映射关系模型，运用历史数据训练获取映射函数。当设备负荷提升之时，适当调低预警阈值，由于高负荷运行状态下设备更易出现故障；当设备运行时长增加之际，针对易老化部件（如绝缘材料）的预警阈值也相应调低；当环境温度超出正常范围之时，调节温度相关参数的预警阈值。同时，架构阈值反馈体制，依照故障预警之后的现实设备状况，对阈值实施修正优化，保障阈值始终契合设备的实际运行形态，增进预警的精准性与可信度^[8]。

（三）预警信息的层次化构造与精准传递规划

预警信息的展现需考量全面性跟执行可能性，防止信息过量或者关键内容缺失状况出现。搭建“设备载体－子系统构造－具体参数指标”三级预警信息表述系统：第一层级明确故障设备的空间定位以及整体风险级别状况（像高风险等级的红色预警、中风险程度的黄色预警形式）；第二层级标注故障所属的子系统构成（例如绝缘保护系统、冷却循环系统），并且附带简要的成因分析内容；第三层级提供具体的异常参数数据值、偏离正常范围的程度情况以及短期的变化曲线图形。同时，依据岗位责任的不同差别设计定向的推送策略方案：运维技术人员接收涵盖具体参数内容与处置建议的完整报告文本；在管理决策层面获取多设备的风险对比信息与趋势概况内容；巡检工作人员在移动终端设备接收定位化、条目化的简明报警列表信息。全部预警信息都通过统一的平台进行结构化的存储操作，具备支持历史追溯查询与模式挖掘分析的功能^[9]。

（四）预警系统的闭环式优化与知识沉淀机制

预警系统的持续效能增强依靠有效的闭环反馈与知识积累体系。设立“预警触发－处置执行－评估反馈”全流程的跟踪记录机制：每次预警情况触发以后，系统自动生成跟踪工单文件，记

录现场排查的结果内容、处置实施的措施以及设备恢复的状态情形。基于处置的结果对预警事件展开回溯评价工作，标记“真阳性”“假阳性”“漏报情况”等类型标识，并且依据此动态调整模型的参数设置与阈值映射的关系架构。除此之外，构建可扩展的故障案例知识库，将历次预警事件中的特征序列、处置解决方案、根本原因分析等进行结构化存储，形成设备故障的特征图谱资料。该知识库不仅能够为后续的预警工作提供相似性匹配的参考依据，还可以通过定期地挖掘关联规则，发现潜在的新型故障模式，反向补充到预警模型的特征识别仓库当中，实现系统预警能力的螺旋式提升进程。最终形成“监测感知－预警发布－处置执行－学习提升”的完整智能闭环体系，推动预警系统从被动响应模式向主动进化模式的转变进程^[10]。

（五）系统落地过程中的多源数据融合与工程适配举措

在实际的部署工作当中，预警模型的可靠性高度依赖高质量的多源数据输入内容。需要整合实时监测的数据信息（SCADA系统、在线监测装置数据）、设备台账的详细信息（型号规格、投运日期记录、检修历史档案）、环境状态的数据（温湿度数值、污秽等级情况）以及电网运行的数据资料（负荷曲线图表、短路电流参数）。通过数据清洗处理、对齐校准与时空关联操作，构建设备的全景信息画像资料。针对不同的电压等级标准、设备类型种类以及厂站结构特点，采用模块化的设计方案允许关键参数内容（例如 LSTM 时间窗口设置、权重融合系数调整）的工程化微调操作，确保模型在变电站设施、输电线路架构、配电终端设备等不同应用场景当中都能够保持合适的敏感度与稳定性状态，实现从理论模型架构到工程实用化形态的平稳过渡进程。

四、办法验证与应用成效剖析

（一）验证环境和数据出处

为验证所提办法的有效性，以某电力集控体系的 110kV 变电

站电气设备当作研究对象，挑选变压器、断路器、隔离开关三种核心设备作为验证样本。数据源自该变电站的智能巡检体系，采集周期为 3 个月，包含电参数（电流、电压、功率）、物理参数（温度、振动、湿度）以及设备外观图像数据，总共采集有效数据样本 12000 组，其中含有已知故障样本 1500 组（包含短路、绝缘老化、接触不良等 8 类常见故障），正常样本 10500 组。将数据按 7:3 比例分成训练集与测试集，用于模型训练和性能验证。

（二）办法性能验证成果

从自动化剖析精度与故障预警成效两个维度开展性能验证。自动化剖析精度层面，所提改进 CNN 特征提取模型联合分类－聚类异常识别算法，对已知故障的分类正确率达到 92.3%，较传统小波剖析＋SVM 办法提升 18.6%；对未知故障的检测率达到 88.7%，漏检率仅为 4.2%。故障预警成效方面，动态阈值预警模型的平均预警提前时长为 2.8 小时，较固定阈值模型提升 1.5 小时；预警正确率达到 90.1%，误警率降至 5.8%。验证成果显示，该办法可有效提升巡检数据处置的自动化水准与故障预警精度，能够及时察觉设备故障隐患。

五、结论

本文针对集控体系电气设备巡检数据处置与故障预警的核心需求，提出多源巡检数据整合架构，搭建改进 CNN 特征提取模型与分类－聚类异常识别算法，设计融合特征权重与动态阈值的故障预警模型。研究成果表明，该办法可有效解决多源巡检数据的异构性处置问题，提升故障特征识别精度与预警准确性，为设备预防性维护给予技术支撑。未来研究可从两个方面开展：一是引入联邦学习技术，解决多厂区集控体系巡检数据的隐私保护与协同训练问题，提升模型的泛化能力；二是结合数字孪生技术，构建设备虚拟仿真模型，把巡检数据与虚拟模型结合，达成故障的可视化诊断与预警，进一步提升运维智能化水准。

参考文献

[1]高宽博. 电气保护系统在火电厂热控系统中的应用研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (11): 131-133.
[2]汤孜冲. 基于电力系统电气工程自动化的智能化应用 [J]. 中国设备工程, 2025, (20): 246-248.
[3]何娇. 某水电站综合自动化改造方案的设计与实践 [J]. 水电与新能源, 2025, 39(07): 91-94.
[4]韩云龙, 翟庆超, 唐长明, 胡志峰, 李治朋, 孙红斌, 徐凯峰. 基于三层电气网络结构的移动电站集中控制柜设计 [J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(04): 96-103.
[5]张春雷. 关于加热炉系统的数字化生产运行技术分析 [J]. 中国设备工程, 2025, (S2): 387-390.
[6]黄明华. 基于电气自动化的智慧校园实验室设备智能管控系统设计与实现 [J]. 办公自动化, 2025, 30(11): 23-25.
[7]陈立, 吴虎. CR200J 型动车组拖车网络控制系统优化研究 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2025, 48(01): 74-80.
[8]李冰浪. 火电厂集控运行中电气系统节能优化研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(10): 170-172.
[9]王树国. 乙烯装置智能化电气安全管控系统应用分析 [J]. 电气应用, 2024, 43(09): 50-55.
[10]孙毅, 邵知宇, 束长宝, 徐进, 丁卫星, 房飞. 城市排涝泵站远程集控智能化改造研究 [J]. 江苏水利, 2023, (11): 60-63.