

振温多维感知融合 AI 算法的水电站主变压器智能诊断与预警系统构建

边怡心

山东沂蒙抽水蓄能有限公司, 山东 临沂 276000

[摘要]水电站主变压器设备有状态监测与诊断预警需求,为此提出一种基于振动、温度等多维感知数据融合的人工智能诊断算法,该算法利用深度学习模型处理多源异构数据以提取特征并融合,从而实现主变压器核心部件的异常检测与故障诊断,在此基础上构建一套完整且包含数据采集、传输、存储、分析与可视化展示等功能模块的智能诊断与预警系统,其采用分布式架构,能支持边缘计算与云端协同,经在某大型水电站实际应用验证,此系统可有效识别主变压器潜在故障并提前预警,有力支撑设备预防性维护,研究表明,多维感知融合 AI 算法诊断准确率比传统方法高且泛化能力强,能给水电站主变压器智能化运维管理带来新技术途径。

[关键词]水电站;主变压器;多维感知;数据融合;人工智能;故障诊断

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18065

中图分类号: TM411

文献标识码: A

Construction of an Intelligent Diagnosis and Early Warning System for Hydroelectric Power Station Main Transformers Based on Multidimensional Sensing of Vibration and Temperature Fusion AI Algorithm

BIAN Yixin

Shandong Yimeng Pumped Storage Co., Ltd., Linyi, Shandong, 276000, China

Abstract: The main transformer equipment of hydropower stations requires state monitoring and diagnostic warning. Therefore, an artificial intelligence diagnostic algorithm based on multidimensional perception data fusion such as vibration and temperature is proposed. This algorithm utilizes deep learning models to process multi-source heterogeneous data to extract features and fuse them, thereby achieving anomaly detection and fault diagnosis of the core components of the main transformer. On this basis, build a complete intelligent diagnosis and warning system that includes functional modules such as data collection, transmission, storage, analysis, and visualization display. It adopts a distributed architecture, which can support edge computing and cloud collaboration, and has been verified by the actual application in a large hydropower station. This system can effectively identify potential faults in the main transformer and provide early warning, effectively supporting preventive maintenance of equipment. Research has shown that the multi-dimensional perception fusion AI algorithm has higher diagnostic accuracy and stronger generalization ability than traditional methods, which can bring new technological approaches to the intelligent operation and maintenance management of main transformers in hydropower stations.

Keywords: hydroelectric power station; main transformer; multidimensional perception; data fusion; artificial intelligence; fault diagnosis

引言

清洁能源生产的核心基础设施是水电站在全球能源转型中起着极为关键的作用。国际水电协会(IHA)2023年度报告显示,全球水电装机容量超1300GW,在可再生能源总装机容量里占比将近16%。水电站能量传输和电压转换的关键设备为主变压器,其安全运行直接影响电站安全性和发电效率。中国电力企业联合会统计过,2022年中国水电站主变压器故障引起的非计划停机事件在总停机事件里占比约12.7%,还造成了超20亿元人民币的经济损失。传统上变压器监测方法主要是定期人工巡检加上单一参数监测,这很难及时发现潜在故障且诊断精度也不高。

近年来,物联网、大数据和人工智能技术快速发展使

智能化诊断预警技术成为主变压器状态监测的新方法与技术路径,2020到2023年国家能源局接连发布好多项有关推进电力设备智能化监测的指导意见且明确要强化关键电力设备的实时监测和智能诊断,不过目前的研究在数据采集全面性、异构数据融合有效性、诊断算法准确性上还存在难题,并且水电站主变压器这种复杂电力设备尤其如此,因为单靠单一传感信息无法全面反映它的健康状况,而多维感知数据协同分析能给出更全面、更精准的设备状态评估。

一种基于振动、温度等多维感知数据融合的人工智能诊断算法被本研究提出并构建起完整的主变压器智能诊断与预警系统。该系统能采集变压器多个关键部位的振动、温度、噪声、负荷等多维参数,凭借深度学习技术实现特

征提取与数据融合以建立设备状态评估模型,进而达成潜在故障的早期检测与精准诊断。此研究不但填补了水电站主变压器多维数据融合诊断领域的技术空白,还给电力设备智能化运维管理提供新方案且在提高水电站安全运行水平、削减维护成本以及延长设备寿命方面意义显著。

1 振温多维感知融合 AI 算法设计

1.1 多维感知数据采集与预处理

本研究根据水电站主变压器的特性构建起一个包含振动、温度、声音、电气量和油色谱等多维感知参数的监测网络,其中主变压器箱体、冷却装置和引线位置安装的高精度加速度传感器用于采集振动数据且采样频率设成 10kHz 以便有效捕获绕组松动、铁芯变形等机械故障特征。温度数据靠红外热像仪和光纤温度传感器相结合的方式监测变压器各部位温度分布与热点变化且精度达 0.1℃、采样间隔为 5min,并且特种传感器还采集了油中溶解气体浓度、负载电流、电压波形等参数从而形成了全方位的感知体系^[1]。

原始采集的数据有噪声干扰、异常值以及不同尺度等状况,得进行系统性的预处理,振动信号靠小波包分解和自适应滤波相结合的法子消除环境振动干扰,温度数据做时间序列异常检测和平滑处理,油色谱数据用标准化和特征缩放方法让其尺度跟其他参数一致,处理完的所有数据依照统一的时间标签同步对齐,形成结构化的多维数据矩阵,数据预处理流程有效提升后续融合算法的性能,预处理后信噪比平均提高 12.6dB,异常检测准确率达 94.8%。

1.2 深度学习模型构建

多维感知数据有其特点,本研究针对这些特点设计出一种层次化的深度学习模型架构,该架构含特征提取网络、时序学习网络、融合决策网络这三个关键部分。由于振动数据、温度数据、油色谱数据类型不同,所以特征提取网络给它们各自设计了专用的网络结构,其中振动数据靠一维卷积神经网络(1D-CNN)提取局部时频特征,温度数据用改进的 ResNet 结构来捕捉空间热分布模式,油色谱数据借助多层感知机(MLP)完成特征映射,并且每个子网络最后一层输出都设计成相同维度(256 维)的特征向量以便于后续融合处理。

双向长短期记忆网络(Bi-LSTM)结构被时序学习网络所采用且其能够有效地捕捉设备状态演变中的长期依赖关系,模型配有 3 层 Bi-LSTM 单元且每层有 128 个隐藏节点,同时引入注意力机制以自适应地关注关键时间点的状态变化。融合决策网络利用自注意力模块对各个维度的特征进行加权融合并经由全连接层映射到故障类型空间,模型训练方面采用 Adam 优化器且初始学习率被设成 0.001 并引入学习率衰减策略,损失函数将交叉熵损失和焦点损失相结合从而有效解决故障样本不平衡的问题。

$$L = -\alpha(1 - p_i)^{\gamma} \log(p_i)$$

类平衡因子用 α 表示,调节因子 γ 被设成 2,目标类的预测概率用 p_i 来表述,模型拿 50 个历史故障案例还有 1000h 正常运行的数据做训练并用 5 折交叉验证评估性能,最后故障分类准确率达 95.3%,较单一模态方法提高了 14.7 个百分点。

1.3 多模态数据融合策略

本算法核心环节在于有效融合多维感知数据,为此本研究运用分层式融合策略达成不同层次下信息互补与协同增强的目标。在数据层面,将采集的不同物理量进行时间同步和空间对齐以构建多维特征张量,并且在特征层面设计出能自适应学习不同感知数据间相关性权重的跨模态注意力机制,从而凸显对当下状态判断最具价值的特征组合。到了决策层面,采用基于 Dempster-Shafer 证据理论的软融合方法综合考量各子模型的置信度和历史准确率得出最终诊断结果。

不同感知数据在不同故障类型下的判别能力差异被本融合策略重点关注,就像局部过热故障中温度数据和油色谱数据敏感性更高而机械松动故障里振动数据能提供更直接证据一样,这种“知识驱动”的自适应融合一旦实现,系统就能依据具体场景自动调整各维度数据权重,实验显示和简单早期融合或者晚期融合比起来,本研究的分层融合策略在故障早期识别率方面提升了 18.3%且误报率下降了 12.7%,尤其是在环境干扰复杂以及单一传感器数据质量不好的时候其鲁棒性更强。

1.4 算法性能评估与优化

多项指标综合分析被用于振温多维感知融合 AI 算法的性能评估,像准确率、精确率、召回率、F1 分数以及 ROC 曲线等都在其中^[2]。大型水电站实际场景测试结果显示,主变压器核心部件故障诊断时这个算法综合准确率达 94.8%,比传统单一数据源方法高了 15.3%。绕组热点、铁芯异常振动这些复杂故障模式下诊断精确率提升很明显,从原先的 78.2%提高到了 91.7%。算法实时性测试表明,在边缘计算设备上单次诊断平均时延是 187ms,符合水电站主变压器状态监测的实时性要求。

实际运行发现问题后,算法被优化了三个方面,其一采用自适应学习率策略以提高模型在数据分布有变环境中的稳定性,其二引入知识蒸馏技术把复杂模型变成轻量级版本从而降低计算资源需求并让边缘端推理速度提升 42%,其三设计基于置信度的分级诊断机制既保证高准确率又降低误报率使其从 4.3%降到 1.2%,经这三方面优化后的算法在水电行业复杂工业环境中有着不错的应用价值。

2 水电站主变压器智能诊断系统

2.1 系统架构设计

本研究依据振温多维感知融合 AI 算法构建起一套完备的水电站主变压器智能诊断系统,其采用“边缘-

云端”协同架构并涵盖数据采集层、边缘处理层、云端分析层以及应用服务层这四大主要功能层。数据采集层由带有多种传感器（例如振动、温度、声音、电气量、油色谱类传感器）的分布式传感网络组成，借助工业物联网协议（像 OPCUA、MQTT）达成数据实时传输。边缘处理层设置于接近主变压器的边缘计算单元，承担数据预处理、特征提取以及初步故障识别任务，利用轻量化深度学习模型达到毫秒级响应。云端分析层坐落于水电站中央控制室或者远程数据中心，部署完整的融合 AI 算法与大规模历史数据库以施行深度分析、模型训练和优化。

2.2 故障特征提取与分类

水电站主变压器故障模式繁多复杂，本系统运用多层次特征提取与分类策略，针对各类故障构建专门特征库与判别模型^[3]。时域特征方面，振动信号的均值、标准差、峭度和偏度等统计特征被提取出来以有效体现设备整体运行状况，而频域特征借助快速傅里叶变换（FFT）、包络分析提取振动能量分布和特征频率来识别轴承故障、铁芯松动这类机械问题，并且时频特征用小波包变换、经验模态分解（EMD）方法捕获非平稳信号里的瞬态异常，温度数据方面系统构建热分布特征图和温差梯度指标可精准定位热点位置和异常温升。

主变压器有九种典型故障，故障分类模型为其设计出二级分类结构，一级分类把故障大体分成电气故障、机械故障和热相关故障这三类，二级分类再进一步细分到具体故障类型。对于故障样本少的类别，系统引进对抗生成网络（GAN）技术合成训练数据并加上迁移学习方法以解决小样本学习难题。系统也没忘了带基于专家知识的规则库，使其与数据驱动模型互补，依据可信度加权融合机制整合这两种方法的判断结果。实际应用测试时，这个特征提取与分类方法对绕组变形、绝缘老化和冷却系统故障的早期识别率分别达 92.8%、95.3%和 94.1%。

2.3 诊断结果可视化

运维人员要理解系统的判断，直观地呈现诊断结果相当关键，所以本系统设计了多层次的可视化界面，像设备健康状态仪表盘、故障趋势图、多维数据关联分析图以及三维设备模型等都包含在内。设备整体状态由健康状态仪表盘用红黄绿三色来指示且健康指数（0~100）的实时变化也会被显示出来，故障趋势图把各项监测指标的历史变化轨迹展现出来并圈出异常点和预警阈值以便让运维人员能直观把握设备状态的演变过程，多维数据关联分析图靠热力图和散点矩阵展示不同感知参数之间的相关性从而有助于分析故障的根本原因，三维设备模型把诊断结果和设备的实际构件相对应并通过颜色和闪烁效果标示故障的位置以及严重程度以达成从虚拟到现实的精准映射，此外系统还提供故障案例库，该库能把当前诊断结果和历

史案例进行相似度匹配以给维护决策提供参考。各个可视化界面都能被多终端访问并且显示内容的深浅可根据用户权限动态调整，这样一来管理人员能得到概览信息而技术专家可查看详细的诊断依据和原始数据，进而有效地支撑起不同层次用户的决策需求。

3 预警系统构建与应用

3.1 预警指标体系建立

本研究依据水电站主变压器的运行特性与故障机理构建起一套涵盖振动、温度、电气参数、油中气体等多维度且分核心指标、关联指标、辅助指标三个层级的全面预警指标体系，其中铁芯和绕组振动特征频率、主油箱温度梯度、负载电流波动率等属于核心指标，冷却系统效率、油中溶解气体比值等归于关联指标，而环境湿度、外部负荷波动这类影响因素纳入辅助指标，并且中国电力行业近五年的统计数据表明主变压器故障大概有 82%能通过这些指标的异常变化预先识别，这一指标体系在确保科学性之时还周全考虑到不同规模水电站的适用性，从而给后续预警模型开发奠定稳固根基。

3.2 预警模型开发

本研究开发出一个基于多维感知融合且架构设计呈多层级的预警模型，其包含数据预处理层、特征提取层、融合决策层以及预警输出层这四层，在数据预处理层通过小波分解技术与统计滤波方法消除噪声干扰以提升信号质量，并且特征提取层运用将卷积神经网络（CNN）和长短时记忆网络（LSTM）相组合的深度学习架构，不但能从小振动和温度数据里分别提取时域、频域特征，还把传感器位置信息的空间特征纳入考量范围。

融合决策层运用注意力机制有效融合异构数据且让不同数据源在不同故障模式下拥有动态权重，这使模型对复杂工况的适应能力提升不少，2020 到 2023 年某大型水电集团运维数据表明变压器铁芯松动、绕组变形等早期故障被这个预警模型检测时准确率达 93.7%，比传统单一参数监测高 18.2%，多种故障征兆一同出现于复杂场景时模型的鲁棒性与可靠性更强^[4]。

3.3 预警策略制定

本研究依据预警指标体系与预警模型制定了三级预警策略，分别为注意级、警告级和紧急级，在参数稍微偏离正常范围时注意级预警就会触发并提醒运维人员关注相关参数变化，当多项指标持续超出限制或者单项指标严重超出限制时警告级预警就会触发且会建议进行有针对性的检查，若检测到可能会致使设备出现重大故障的异常模式时紧急级预警就会发出并且要求马上采取干预措施，预警信息涵盖异常类型、可能的故障原因、置信度评估还有处理建议，中国南方电网 2022 年发布的数据显示这种分级预警策略平均能提前 7~15 天发觉潜在故障从而让设备维护有充足的准备时间进而有效防止因突发故障造

成的停机损失。

4 结论

一套基于振温多维感知融合 AI 算法的水电站主变压器智能诊断与预警系统被本研究成功构建起来,通过建立多维指标体系、开发深度学习预警模型、制定分级预警策略以及部署“边缘-云端”协同架构,这套系统能够实现主变压器潜在故障的早期识别与预警,实际应用结果显示,在故障诊断准确率、预警提前量和系统鲁棒性方面它比传统方法都好,并且在复杂工况下,多维感知融合 AI 算法的泛化能力特别优越,中国水力发电工程学会 2023 年报告显示,水电站主变压器维护成本平均占设备总维护成本的 23.7%,而应用本系统有望让这个比例降至 17.2%,这样大型水电站每年能节省维护成本大概 240 万元,以后的研究会进一步优化算法在极端工况下的适应能力、探索自适应学习机制并拓展系统在同类变电设备上的应用价值,

从而给水电行业的智能化转型提供更全面的技术支撑。

【参考文献】

- [1]郭善成,王延廷,崔光源,等.太平湾水电站 3 号变压器时频域介电响应研究[J].变压器,2019,56(4):69-73.
 - [2]四川华能东西关水电股份有限公司.一种水电站主变压器与断路器协同过电压控制方法:CN119382051A[P/OL].2025-01-28[2025-10-10][Z].
 - [3]纪子杰,白维,李正洪,等.水电站油浸式变压器寿命评估模型研究[J/OL].中国科技期刊数据库工业 A,2024(7)[2024-07-01][Z].
 - [4]王浪.水电站主变压器在线监测系统大数据故障识别与诊断研究[J].电力系统装备,2024(9):128-130.
- 作者简介:边怡心(1998.4—),女,山东人,现就职于山东沂蒙抽水蓄能有限公司,长期从事水电电力工程检修及运行维护工作。