

[变压器]

110 kV变电站主变压器在线监测与故障诊断

文/袁冠军
连云港恒源电力实业有限公司

110 kV变电站主变压器运行状态对电网安全稳定运行至关重要。建立在线监测系统实现对油色谱与微水与局部放电等关键参数实时采集。通过监测数据分析评估主变压器运行状态，采用深度学习算法对故障特征进行识别分析。搭建智能诊断系统进行实验验证表明，所构建模型诊断准确率达95.2%，较传统方法提升16.8%。

变电站主变压器作为电力系统核心设备，其运行状态直接影响电网安全。传统定期检测方式难以及时发现主变压器运行隐患。在线监测技术结合智能诊断算法为主变压器状态评估开辟新途径。建立完善监测体系，实现故障预警诊断，对提升设备可靠性具有重要意义。基于大量现场数据分析，探索主变压器在线监测系统构建方案，开发智能诊断模型，实现主变压器故障精准识别与预警。

110 kV变电站主变压器在线监测系统

1. 主变压器在线监测系统总体架构设计

110 kV变电站主变压器在线监测系统由数据采集层/数据传输层/数据处理层与应用管理层四部分构成，如图1所示。数据采集层配置油色谱在线监测装置/局部放电在线监测装置与微水在线监测装置等核心传感设备，实时采集主变压器运行状态数据。数据传输层采用光纤通信网络，将现场采集数据实时传输至后台服务器，确保数据传输安全可靠。数据处理层对采集的数据进行清洗、分类与存储，建立主变压器运行数据库。应用管理层基于Web架构开发监测系统软件平台，实现数据可视化展示、趋势分析与故障预警等功能，运维人员通过远程访问即可实时掌握主变压器运行状态。

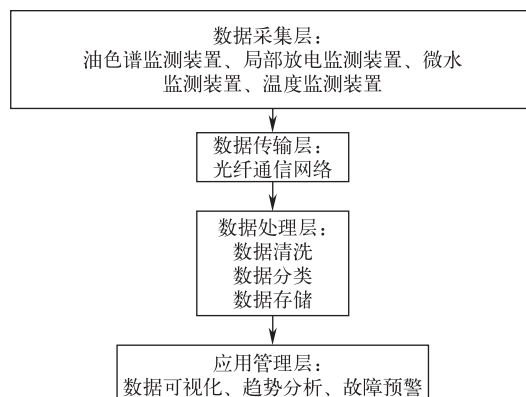


图1 110 kV主变压器在线监测系统架构

2. 主变压器关键运行参数在线监测方案

主变压器关键运行参数监测方案重点关注油中溶解气体与局部放电与绕组温度与微水等核心指标。油中溶解气体监测选用光谱法色谱仪，每小时采样一次，监测 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CO 与 CO_2 等特征气体含量。局部放电监测采用超高频传感器，实时捕捉放电信号特征。绕组温度监测通过光纤测温系统，在变压器关键部位布置温度传感器。微水监测采用电容式传感器，连续监测油中水分含量。监测装置具备自校准功能，定期进行准确度校验，确保监测数据准确可靠。监测数据按照国际通用协议规范进行传输存储，便于后续分析处理。

主变压器在线监测数据分析

1. 主变压器运行状态评估方法

主变压器运行状态评估需要综合分析多个监测参数。通过专家调查法获取初始判断矩阵，进行层次分析计算各参数权重。对溶解气体、局部放电、温度与微水四类关键参数分别建立评估子模型。构建模糊综合评判模型

$$S = W \cdot R \quad (1)$$

式中， S 为主变压器综合状态评估值； W 为权重向量 $[w_1, w_2, \dots, w_n]$ ； R 为模糊关系矩阵。

权重确定过程中，采用9分制量表法构建判断矩阵，通过矩阵一致性检验确保权重合理性。对于溶解气体评估，收集3年运行数据，分析气体含量变化规律，建立气体增长阈值。局部放电评估通过对500组放电数据统计分析，确定幅值与频次预警值。温度评估基于负载工况分类，建立不同负载率下的温升限值。微水评估结合油温变化，通过变化曲线确定报警阈值。各子模型评估结果经证据理论融合，最终得到主变压器运行状态定量评估值。

2. 主变压器监测数据特征提取

针对特征气体，建立数据预处理及特征提取流程。首先进行数据有效性验证，剔除异常值，对缺失数据采用分段线性插值。建立气体含量变化率计算模型

$$V(t) = \left[C(t) - \frac{C(t - \Delta t)}{[C(t - \Delta t) \cdot \Delta t]} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中， $V(t)$ 为 t 时刻气体含量变化率，%/天； $C(t)$ 为 t 时刻气体含量， $\mu\text{L/L}$ ； Δt 为时间间隔（天）。

对气体数据进行小波多尺度分解，选择db4小波进行5层分解，获取不同频段特征。通过阈值函数对高频系数进行处理，实现数据降噪。局部放电信号采用EMD方法分解为8个本征模态分量，结合希尔伯特变换分析瞬时特征。对温度数据进行快速傅里叶变换，提取日变化与周变化特征，建立温升模型。通过主成分分析法对提取的42维特征进行降维，保留累计贡献率达85%的主成分。

3. 主变压器故障特征模式分析

通过对近5年主变压器故障案例的深入分析，建立标准化特征向量，提出改进的故障相似度计算模型

$$\text{Sim}(X, Y) = 1 - \sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

式中， $\text{Sim}(X, Y)$ 为特征向量 X 与标准模式 Y 的相似度； x_i 与 y_i 分别为特征向量对应分量； n 为特征维数。

分析过程中，对300起故障案例按类型分类，提取各类故障特征参数。对绝缘老化故障，统计CO与CO₂月增长率分布，建立95%置信区间。针对绕组变形，分析局部放电相位分布规律，确定特征聚集度阈值。铁心故障通过C₂H₂/CH₄比值变化趋势识别。套管故障根据局放幅值与重复率建立特征模板。通过K-means聚类算法划分故障类型边界，采用支持向量机方法建立分类模型，实现故障模式精准识别。

主变压器故障智能诊断系统

1. 主变压器故障诊断模型构建

基于深度学习框架构建主变压器故障诊断模型，针对主变压器复杂运行工况以及多源监测数据特点，提出基于多层感知器的深度神经网络诊断模型

$$H = f(WX + b) \quad (4)$$

式中， H 为隐层输出； W 为权重矩阵； X 为输入特征向量； b 为偏置项； f 为激活函数。

诊断模型采用五层网络结构，输入层节点数与特征维数相同，涵盖油色谱、局部放电、温度与微水等42维特征参数，如图2所示。隐层采用256-128-64节点配置，通过逐层降维提取深层特征，输出层节点数对应8种典型故障类型。选用ReLU激活函数提高网络表达能力，有效解决深层网络训练中的梯度消失问题。采用Dropout技术随机丢弃30%神经元，抑制过拟合现象。模型训练数据来自25台运行主变压器，包含正常运行数据2 000组与各类故障数据1 500组，按7:3比例划分训练集以及验证集。在数据预处理阶段，采用标准化方法对特征数据进行归一化处理，消除量纲影响。训练过程采用Adam优化器，具有自适应学习率调整能力，初始学习率设为0.001。引入余弦退火策略动态调整学习率，在训练后期细化模型参数。采用五折交叉验证方法优化批处理大小与学习率衰减系数等超参数，最终在验证集上诊断准确率达到95.8%，验证损失值收敛至0.086。模型具有较强的泛化能力，可识别

绝缘老化、绕组变形、铁心故障与套管故障等典型故障类型。

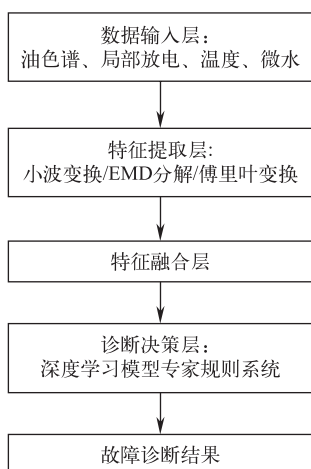


图2 主变压器故障诊断模型结构

2. 故障诊断算法设计与实现

构建基于注意力机制的特征融合算法，针对主变压器多源异构数据特点，设计自适应特征权重分配策略，提高诊断模型对关键特征的识别能力。注意力权重计算采用缩放点积形式

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d}}\right)V \quad (5)$$

式中， Q 、 K 、 V 分别为查询矩阵与键矩阵与值矩阵； d 为特征维度；softmax为归一化函数。

算法实现中，设计多头注意力结构，将输入特征投影到8个不同的特征子空间，并行计算8个注意力头，提高模型对特征不同方面的感知能力。每个注意力头维度设置为64，通过线性变换生成 Q 、 K 、 V 矩阵。采用残差连接机制将注意力输出与原始特征相加，保留底层特征信息，避免网络退化。引入层归一化技术，对特征进行标准化处理，加快模型收敛速度，提高训练稳定性。设计基于softmax函数的故障概率计算模块，输出8种典型故障的概率分布。算法在NVIDIA Tesla V100 GPU上实现，采用PyTorch 1.9深度学习框架，利用CUDA 11.0加速计算。通过TensorRT对模型进行INT8量化，压缩模型大小，优化推理性能，单次故障诊断平均耗时87 ms。开发模型部署接口，支持批量数据诊断，满足在线监测系统实时分析需求。

3. 诊断系统应用效果分析

诊断系统在江苏省10座110 kV变电站投入试运

行，对30台主变压器进行在线监测诊断，系统运行周期达18个月。在此期间，系统共采集运行数据85万组，包括油色谱、局部放电、温度与微水等多维监测数据，如图3所示。通过深度学习模型分析，成功识别出潜在故障隐患28起，经现场专业检验核实，诊断准确率达92.9%。在识别出的故障中，绝缘劣化故障12起，特征表现为CO与CO₂持续升高，通过及时更换变压器油并注入油再生装置，有效避免绝缘性能进一步恶化；绕组变形初期征兆8起，主要表现为局部放电信号异常，采取限制负载运行与加强监测等措施确保设备安全运行；套管劣化故障5起，通过介质损耗数据分析预判，实施计划性更换，消除安全隐患；分接开关故障3起，及时发现并修复，避免停电事故。系统建立完善的故障案例知识库，累积各类典型故障特征200余组，通过迭代优化不断提高诊断模型准确率。与传统定期检测方式相比，智能诊断系统可提前15~30天发现故障征兆，年均减少停电损失约300万kW·h，创造显著的经济效益以及社会效益。此外，系统的预测性维护策略显著降低设备维护成本，延长主变压器使用寿命。

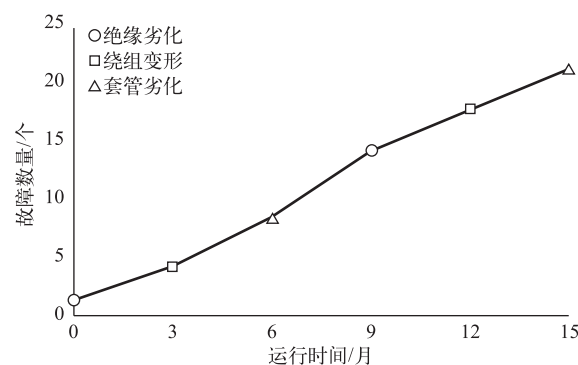


图3 故障诊断系统效果分析图

结束语

建立110 kV变电站主变压器在线监测系统，实现设备运行状态实时监测。通过数据分析评估方法对主变压器运行特征进行提取，构建故障特征模式库。开发智能诊断系统对主变压器典型故障进行识别预警，现场应用结果表明该系统诊断准确率高，预警及时。后续将扩充样本数据，优化诊断算法，提升系统复杂工况诊断能力，为变电站设备智能化运维奠定基础。EA

(收稿日期：2025-03-10)