

变电站设备状态监测与故障预警系统研究

廖红兵 陈晶 郝海博 李育锋

国网昌吉供电公司，新疆昌吉，831100；

摘要：本文设计了一套变电站设备状态监测与故障预警系统，运用物联网、多传感器信息融合和大数据分析技术，实时感知并深度分析关键设备如变压器、断路器的运行状态。研究聚焦于振动信号和红外热像图分析的故障预警模型，并通过模拟实验验证了模型的有效性。实验显示，该系统能够早期识别设备异常，提前预警故障，支持变电站运维模式由计划检修向状态检修的转变。

关键词：变电站；状态监测；故障预警；振动分析；红外测温；大数据分析

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.009

引言

变电站是电能传输与分配的核心枢纽，其内部设备的运行状态直接关系到整个电网的可靠性。据统计，近40%的电网故障源于变电站设备缺陷。传统的设备维护模式主要依赖于定期检修，即按照固定的时间周期对设备进行停电检查和维护。这种模式存在明显弊端：一方面，可能因检修周期过长而错过设备的最佳维修期，导致故障发生；另一方面，也可能因检修过于频繁而造成“过度维修”，增加运维成本并可能引入新的隐患^[1]。

状态检修和预测性维护是解决上述问题的有效途径。其核心在于通过对设备运行状态的实时、连续监测，利用数据分析技术评估设备健康度，并在故障发生前发出预警。本文研究的变电站设备状态监测与故障预警系统，正是实现CBM和PdM的关键技术载体。该系统通过集成多种传感器，构建覆盖关键设备的监测网络，并运用先进的数据处理与智能算法，实现对设备状态的精准画像和故障趋势的智能预测，最终达到“防患于未然”的目标。

1 系统总体架构设计

本文设计的系统采用分层分布式架构，自下而上分为感知层、网络层、平台层和应用层四个部分。

1.1 感知层

感知层是系统的“神经末梢”，负责采集各类设备的状态数据。根据变电站主要设备的特点，部署以下传感器：

变压器：安装油中溶解气体分析在线监测装置，监测 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等特征气体；安装高频电流传感器用于监测局部放电；安装振动加速度传感器，监测铁芯和绕组的机械状态；安装顶层油温、绕

组温度传感器。

断路器：安装分合闸线圈电流传感器，分析操动机构特性；安装振动传感器，监测分合闸过程中的机械振动信号；安装 SF_6 气体压力、密度和微水含量传感器^[2]。

其他设备：安装红外热像仪，对导电连接部位进行温度巡检测温；安装避雷器在线监测器，监测全电流和阻性电流。

1.2 网络层

网络层负责将感知层采集的海量、异构数据安全、可靠地传输至平台层。系统采用有线与无线相结合的方式：对于固定监测点且对实时性要求高的数据，采用工业以太网传输；对于移动巡检设备或布线困难的点位，采用5G或Wi-Fi6等无线通信技术。

1.3 平台层

平台层是系统的“大脑”，负责数据的存储、管理、计算与分析。基于云计算或边缘计算技术构建，主要包括：

数据湖/仓库：存储来自不同设备、不同类型的时间数据、图像数据等。

数据处理引擎：对原始数据进行清洗、滤波、归一化等预处理，消除噪声干扰。

数据分析核心：集成多种分析算法和模型，如：用于DGA分析的三比值法、大卫三角形法；用于振动信号分析的快速傅里叶变换、小波变换；用于红外图像识别的卷积神经网络等。

故障预警引擎：基于历史数据、专家知识和机器学习模型，设定动态阈值，实现多参数融合的故障诊断与预警。

1.4 应用层

应用层面向变电站运维人员，提供可视化的人机交互界面。功能包括：

实时状态看板：以图表、曲线、三维模型等形式直观展示各设备的实时运行参数和健康状态。

历史数据查询与分析：支持对任意时间段、任意监测量的历史数据进行回溯和对比分析。

故障预警与报警：当系统判断设备状态异常时，主动弹出报警信息，并通过短信、APP 推送等方式通知相关人员，提供故障原因初步分析和处理建议。

检修决策支持：生成设备健康报告和预测性维护建议，辅助制定科学的检修计划^[3]。

2 关键故障预警模型与实验分析

为验证系统的有效性，我们选取变电站中最关键且故障模式复杂的变压器和断路器作为研究对象，构建了针对性的预警模型，并搭建了模拟实验平台进行测试。

2.1 基于振动分析的断路器机械故障预警实验

2.1.1 预警模型原理

断路器的分合闸操作会产生特定的振动信号波形，其峰值、频率成分、持续时间等特征与操动机构的健康状态密切相关。当机构出现卡涩、松动、磨损等缺陷时，振动信号的时域和频域特征会发生改变。本模型采用以下步骤：

(1) 数据采集：在断路器基座上安装振动加速度传感器，采集分合闸过程中的振动信号。

(2) 特征提取：对振动信号进行小波包分解，提取不同频带的能量值作为特征向量。同时，提取时域特征如峰值、均方根值等^[4]。

(3) 模型训练：在断路器正常状态下，采集多组振动数据，建立正常状态的特征向量数据库。采用一类支持向量机或高斯混合模型进行训练，学习正常状态的边界。

(4) 故障预警：对待测振动信号进行同样的特征提取，输入训练好的模型计算其与正常状态的偏离度。当偏离度超过设定的动态阈值时，即发出机械故障预警。

2.1.2 实验设计与分析

实验平台搭建：选用一台 10kV 真空断路器作为实验对象，在其操作机构箱上安装一款 ICP 型振动加速度传感器。数据采集卡采样频率设为 50kHz。通过人为设置故障来模拟常见缺陷：

正常状态 (N)：断路器处于健康状态。

故障状态 1 (F1)：轻微松动，模拟机构连杆螺栓轻微松动。

故障状态 2 (F2)：严重卡涩，在导向杆上添加少许污垢以增大摩擦力。

实验结果：

对每种状态各采集 20 组合闸振动信号。下图展示了正常状态与两种故障状态下一个振动信号片段的时域波形对比。

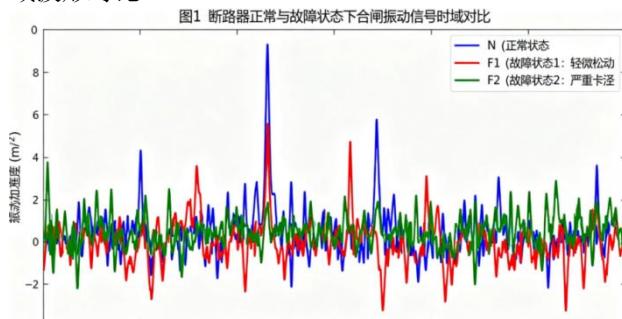


图 1 断路器正常与故障状态下合闸振动信号时域对比

从时域波形可以看出，F1 状态松动的振动峰值明显高于正常状态，且振动持续时间变长；F2 状态卡涩的波形则出现明显畸变，峰值降低但出现了异常的振荡。

进一步，我们对信号进行小波包分解，提取前 8 个频带的能量占比作为特征。将正常状态下的特征数据用于训练 One-ClassSVM 模型。然后，将所有测试样本包括正常和故障输入模型，计算其决策函数值。

实验结果显示，正常状态样本的决策函数值均大于 0 被识别为正常，而 F1 和 F2 故障样本的决策函数值均小于 0 被识别为异常，模型准确率达到 100%。这表明，基于振动分析的预警模型能够有效检测出断路器早期的机械故障。

2.2 基于红外热像图的导电回路过热故障预警实验

2.2.1 预警模型原理

变电站导电回路连接点因接触电阻增大而发热是常见故障。本模型利用红外热像仪采集设备图像，通过图像处理和温度分析实现过热预警。

(1) 图像采集与预处理：使用固定式或巡检机器人搭载的红外热像仪，定期拍摄关键连接点的热像图。进行图像去噪、校准和几何校正。

(2) 感兴趣区域提取：利用目标检测算法或图像分割算法，自动识别并定位出线夹、触头等需要监测的部件区域。

(3) 温度特征提取：计算 ROI 内的最高温度、平均温度以及与环境温度的温差。

(4) 动态阈值预警：传统的固定温度阈值法易受环境温度和负荷电流影响。本模型采用相对温差法：

$\delta = (T_{\max} - T_{\text{ref}}) / (T_{\max} - T_{\text{env}}) \times 100\%$ ，其中 T_{ref} 为参考相（正常相）对应点的温度， T_{env} 为环境温度。根据 DL/T664 等标准，设定 δ 的阈值 35% 为一般缺陷，80% 为重大缺陷，实现更精准的预警。

2.2.2 实验设计与分析

实验平台搭建：在实验室搭建一个模拟导电回路，通过一个可调电阻来模拟接触电阻增大的故障。使用 FLIR A315 红外热像仪进行拍摄。设置三种工况：

工况 A（正常）：接触良好，通过额定电流。

工况 B（一般缺陷）：增大接触电阻，使连接点温升达到 30K。

工况 C（严重缺陷）：进一步增大接触电阻，使温升达到 55K。

通过图像处理算法自动提取连接点区域的温度数据，并计算相对温差 δ 。假设工况 A 为参考相，其连接点温度为 65°C，环境温度为 25°C，则温差为 40K。工况 B 的连接点温度为 85°C， $\delta = (85-65) / (85-25) \times 100\% = 33.3\%$ ，属于“注意”状态。工况 C 的连接点温度为 110°C， $\delta = (110-65) / (110-25) \times 100\% = 52.9\%$ ，超过 35% 的阈值，系统应发出“一般缺陷”报警。若 δ 超过 80%，则判定为“危急缺陷”，需立即处理。

实验证明，基于红外图像分析和相对温差法的预警模型，能够有效排除环境和工作电流的干扰，准确识别出导电回路的过热故障及其严重等级。

3 系统集成与现场应用展望

将预警模型集成到系统平台层后，显著提升了系统的故障预警能力，使其在变电站的实际应用中展现出显著价值。系统通过综合性诊断，能够在变压器 DGA 数据出现乙炔超标时，自动调取同一时段的局部放电和振动数据进行分析，从而综合判断故障原因是内部放电还是机械故障，极大地提高了诊断的准确性。此外，系统利用时序分析技术，如 ARIMA 模型或 LSTM 神经网络，对设备的历史状态数据进行深入分析，能够预测设备性能的退化趋势，实现预测性维护，例如，有效预测变压器油中氢气含量未来一周内是否可能超过注意值，从而提前采取相应措施。这些功能转变了传统的运维模式，从被动抢修转向主动运维，不仅大幅减少了非计划停运的时间，而且优化了检修资源的分配，显著降低了运维成本，提升了整个变电站运营的管理水平和经济效益。

4 结论

本文研究并设计了一套完整的变电站设备状态监

测与故障预警系统。该系统通过分层架构整合了多种监测手段，并重点研究了基于振动分析和红外热像分析的智能预警模型。模拟实验结果表明，所提出的模型能够有效、准确地识别出断路器的机械故障和导电回路的过热故障，验证了系统的可行性和有效性。

未来研究工作将集中在以下几个方面：

(1) 模型优化：引入更先进的深度学习算法（如深度信念网络、Transformer），利用海量现场数据进一步提升预警模型的准确性和泛化能力。

(2) 多源信息深度融合：研究如何更有效地融合电气量、物理量、化学量等多源异构数据，构建更全面的设备数字孪生模型，实现更深层次的故障机理关联分析。

(3) 边缘智能协同：将部分轻量化的分析模型下沉至边缘计算节点，实现数据的本地实时处理与快速响应，减轻云端压力，并保证在网络中断时仍具备基础预警能力。

综上所述，本文所研究的系统为变电站的智能化运维提供了切实可行的解决方案，对提升电网的安全可靠运行水平具有重要的理论和实践意义。

参考文献

- [1] 王少华, 唐炬, 李剑. 基于多信息融合的电力变压器故障诊断技术研究综述 [J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1037-1049.
- [2] 李卫国, 贾志东, 程养春, 等. 基于振动信号分析的高压断路器机械故障诊断 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 154-162.
- [3] 国家能源局. DL/T664-2016 带电设备红外诊断应用规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [4] KhanSA, EqubalMD, IslamT. A comprehensive comparative study of DGA based transformer fault diagnosis using fuzzy logic and ANFIS models [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 590-596.
- [5] 张重远, 刘云鹏, 王娟, 等. 基于 One-Class SVM 的高压断路器振动信号故障诊断 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 86-91.

作者简介：廖红兵，出生年月：1975 年 10 月，性别：男，籍贯：四川省蓬溪县，民族：汉族，学历：大学专科，职称：工程师，研究方向：变电运维。