

电气设备试验数据分析与故障预测

王镜博 任旭飞

内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 多源数据监测, 电气参数: 实时采集电压、电流谐波、绝缘电阻(需 $>20\text{M}\Omega$)及介质损耗因数等, 诊断电压波动、缺相等隐患。机械参数: 通过振动传感器检测轴承磨损(金属颗粒 $>50\text{ppm}$ 预警)、转子偏心(同心度偏差 $\leq 0.05\text{mm}$)等机械故障。温度与局部放电: 红外热成像捕捉过热点(温差 $>120^\circ\text{C}$ 提示绝缘失效), 超声波及电磁波监测局部放电。数据预处理, 清洗噪声数据, 填补缺失值, 通过特征工程提取关键指标(如振动频谱、暂态电能质量参数)。

关键词: 电气设备试验; 数据分析; 故障预测

融合实时数据与历史统计, 通过LSTM神经网络预测剩余寿命。故障概率计算: 随机森林算法分析多特征关联性(如温度+振动+电流异常组合触发高风险告警)。定期维护: 润滑轴承(高速设备用锂基脂)、更换老化电缆/电容。智能保护装置: 安装缺相保护模块(动作 $<0.1\text{s}$)、断路器健康监测系统。

1 电气设备故障的主要类型

1.1 电气系统故障。电源故障, 供电参数异常, 缺相或三相不平衡(引发电机烧毁), 电压超标(如超过额定值 $\pm 10\%$, 导致铁损激增), 频率偏差(影响精密设备同步), 交直流混接(损坏电子元件), 电源质量问题, 电压暂降/骤升(触发敏感设备停机), 谐波污染(引起变压器过热、保护误动)。电路故障。物理连接异常, 短路: 金属性短路(电流激增100倍以上)、电弧短路(引发电气火灾), 断路: 导线断裂、接头松脱(导致设备失电), 接地故障: 绝缘破损使导体接触大地(漏电流超 30mA 即触发保护)。线路劣化问题, 绝缘老化(电阻值 $<1\text{M}\Omega$ 需紧急更换), 接触点氧化(接触电阻增大引发过热)。设备与元件故障。硬件损坏, 过热烧毁: 轴承缺油致温升 $>120^\circ\text{C}$ 、电缆过载绝缘碳化, 机械性损伤: 电机转子偏心(偏差 $>0.1\text{mm}$)、开关机构卡涩, 性能退化, 电容器容值衰减(下降 $>20\%$ 需更换), 继电器触点粘连(动作次数超寿命)。环境与管理因素。环境侵蚀, 湿度腐蚀(PCB板铜绿短路), 粉尘导电(柜内积尘引爬电), 人为操作失误, 误接线(相序接反致电机反转), 维保缺失(如未定期清灰致散热失效)。

1.2 电气设备机械系统常见隐患。运动部件损耗, 轴承失效, 润滑脂干涸或污染(金属颗粒 $>50\text{ppm}$), 导致温升 $>120^\circ\text{C}$ 及异常振动(加速度 $>6\text{m/s}^2$ 需预警), 滚

道剥落、保持架断裂, 引发设备卡滞或抱死, 传动系统异常, 齿轮啮合偏差(齿隙 $>0.3\text{mm}$)或断齿, 造成扭矩波动, 皮带/链条松弛(下垂量超 10% 需张紧), 引发电机转速不稳。结构变形与连接失效, 机械形变, 转子动平衡破坏(不平衡量 $>5\text{g}\cdot\text{m/kg}$ 需校正), 加剧轴系振动, 机座刚度不足致设备共振(振幅 $>0.1\text{mm}$ 危险), 连接松动, 螺栓预紧力不足(扭矩值低于设计 30%), 引发联轴器偏移(同轴度误差 $>0.05\text{mm}$), 焊接点疲劳开裂, 导致支撑结构失稳。装配与环境缺陷, 安装不当, 防爆设备紧固螺栓缺失或松动, 破坏密封性(如隔爆面间隙 $>0.2\text{mm}$), 设备基础沉降(水平度偏差 $>1\text{mm/m}$), 加剧轴承偏心磨损。环境侵蚀, 粉尘侵入运动副(如导轨、齿轮箱), 加速磨粒磨损, 潮湿环境致金属锈蚀(铁含量检测 $>200\text{ppm}$ 需处理)。机电耦合故障, 负载失衡, 机械卡阻引发电机过流(电流超额定值 150%), 液压系统泄漏致压力不足, 触发电气保护误动作, 检测失效, 位置传感器(如接近开关)安装偏移 $>1\text{mm}$, 导致控制信号丢失, 振动探头布线松动, 误报设备停机。

1.3 高压电气设备常见故障类型。绝缘系统故障(占比最高), 绝缘击穿, 固体绝缘老化(如环氧树脂开裂)引发局部放电 $>10\text{pC}$, 油浸设备进水致绝缘油介损值 $>3\%$, 表面闪络, 污秽积聚(盐密 $>0.1\text{mg/cm}^2$)导致瓷套沿面放电。潮湿环境诱发套管爬电(如雨季变电站瓷瓶闪络)。机械结构故障, 操作机构失效, 断路器弹簧疲劳致分合闸速度下降 $>30\%$, 隔离开关连杆变形引发拒动/误动。运动部件磨损, 电机轴承缺油温升 $>120^\circ\text{C}$ 致转子扫膛, GIS设备齿轮箱卡滞造成分闸延迟。电气回路故障, 导体异常, 触头烧蚀致接触电阻 $>200\mu\Omega$ (标准值 $\leq 50\mu\Omega$), 母线连接螺栓松动引发局部过热 $>150^\circ\text{C}$ 。

电路故障，真空灭弧室漏气致耐压值 $< 20\text{kV}$ ，CT二次开路产生千伏级高压。环境关联故障，异物入侵，小动物爬入开关柜引发相间短路，粉尘堆积导致柜内绝缘子网络，防护失效，防爆面间隙 $> 0.2\text{mm}$ 致可燃气体侵入，潮湿腐蚀造成接地铜排锈断。

2 电气设备数据分析与预处理步骤

2.1 电气设备数据采集常用方法，根据当前工业实践与技术规范，电气设备数据采集常用方法可分为物理层采集、通信层传输和应用层管理三大类，物理层数据采集，传感器直接采集，安装温度/振动/电流传感器实时监测设备状态（如电机轴承温升 $> 120^\circ\text{C}$ 预警），通过红外热成像仪检测设备表面温度分布，识别局部过热点。I/O模块辅助采集，对无通信接口的老旧设备，加装I/O模块转换模拟量为数字信号，通过继电器模块采集开关量状态（如断路器分合闸信号），机器视觉采集，利用工业相机捕捉设备外观图像，自动识别机械变形或部件缺失，无线传输方式，工业物联网网关：通过4G/LoRa无线网络远程传输PLC数据，WiFi透传模块：嵌入式开发实现串口转WiFi，降低流量成本。系统层数据管理。自动采集机制，定时采集：按预设周期（如15分钟/次）获取电量、温度等稳态数据，事件触发采集：越限报警（如电流超额定值150%）时立即上报，边缘计算预处理，在网关端执行滤波、FFT变换，压缩振动原始数据量 $> 70\%$ ，实时计算能效指标（如设备OEE），仅上传结果至云平台。云平台集成，通过MQTT/HTTP协议对接AWS IoT、阿里云等平台，构建SCADA看板，集中监控多站点设备状态。选择采集方法需考虑设备接口兼容性（如RS485/以太网）、数据实时性要求（控制信号 $\leq 10\text{ms}$ ）及成本约束（无线方案节约布线30%）。电力系统需遵循DL/T 860等规范，确保采集数据的合规性。

2.2 电气设备数据分析中如何处理噪声和缺失值。在电气设备数据分析中，噪声和缺失值的处理直接影响诊断准确性和模型性能。噪声数据处理，工频干扰抑制，采用50/60Hz陷波滤波器消除电网基频干扰，保留局部放电脉冲特征，对开关操作产生的瞬态噪声，使用自适应滤波器动态跟踪衰减，高频噪声滤除，小波阈值去噪：选用db4或sym8小波基分解信号，硬阈值处理高频系数，分箱平滑法：对温度时序数据分箱（如1分钟窗口），取中位数替代原始值。硬件级降噪，电流传感器加装电磁屏蔽环抑制电磁耦合噪声，DC-DC电路采用 π 型LC滤波器降低纹波噪声（衰减 $> 40\text{dB}$ ）。填补方法，时序数据填补，线性插值：适用于平稳变化的温度数据，ARIMA预测：对振动信号等非平稳序列建模预测，多变量关联

填补，基于电流-温度协变关系，用回归模型估算缺失温度值，变压器DGA数据采用拉格朗日插值法补全气体浓度序列。高级处理，生成式填补：使用对抗生成网络（GAN）合成符合设备运行规律的缺失片段。多重填补法：对重要参数生成多组可能值，综合评估不确定性。变压器故障预警：DGA数据先进行卡尔曼滤波降噪，再用EM算法迭代填补 H_2 缺失值，模型误报率降低22%。关键原则：噪声处理优先保留故障特征频段（如轴承故障的1-3kHz）；缺失值填补需验证与相邻参数的物理一致性（如温度-电流相关性 > 0.8 ）。

3 电气设备故障诊断与预测模型构建

3.1 电气设备故障诊断与预测模型构建流程。是电气设备故障诊断与预测模型的系统性构建流程，综合工业实践与前沿研究整理：数据准备阶段，多源数据采集，部署电压/电流传感器（采样率 $\geq 10\text{kHz}$ ）捕获电气瞬态特征，振动传感器监测机械故障频段（1-3kHz），红外热像仪采集温度场分布（空间分辨率 0.1°C ）。数据预处理，噪声抑制：工频干扰用50/60Hz陷波滤波器，高频噪声采用小波阈值去噪（db4小波基），缺失值填补：时序数据用ARIMA预测，多变量数据采用随机森林回归插补。模型构建阶段。诊断模型，瞬态故障识别：1D-CNN处理局部放电脉冲序列（卷积核尺寸 = 16），多分类任务：LightGBM融合气体比值+温度梯度特征，F1-score达0.92。预测模型，剩余寿命预测：Wiener过程建模绝缘老化轨迹，置信区间 $\pm 10\%$ 。故障预警：LSTM-Attention预测温度趋势，提前30分钟预警过热风险。验证与优化。样本平衡，SMOTE生成稀有故障样本（如匝间短路），代价敏感学习设置漏检惩罚权重（1:5），模型验证，折交叉验证确保泛化性，SHAP值分析特征贡献（如 H_2 浓度权重 > 0.3 ）。嵌入式部署，模型量化压缩至5MB内，边缘设备推理延迟 $< 50\text{ms}$ 。实施策略，场景优先级：从高价值设备（如主变压器）切入，ROI提升40%，人机协同：专家知识库辅助模型决策（如过载规则库），闭环优化：现场故障反馈修正预测偏差，此流程已成功应用于电网变压器故障预警（误报率降低32%）及汽车产线电机预测维护（备件成本下降28%）。

3.2 电气设备数据分析中如何调整和优化模型。在电气设备数据分析中，模型调整与优化需结合数据特性与工程约束，核心策略如下：参数优化关键方向，超参数调优方法，贝叶斯优化：自适应搜索LSTM层数/dropout率，效率较网格搜索提升40%。动态学习率：变压器温度预测中，Adam初始 $\text{lr} = 0.001$ 配合余弦退火策略，误差降至3%内。梯度裁剪：LSTM处理长序列振动信号时，

设置全局梯度范数阈值 = 3.0, 收敛速度提升25%。损失函数设计, 代价敏感学习: 漏报绝缘击穿故障的惩罚权重设为正常样本5倍, 召回率提升18%, 多目标优化: 联合优化故障分类准确率与误报率, Pareto前沿平衡点F1-score达0.89。模型压缩与部署, 轻量化改造, 模型剪枝: 1D-CNN参数量压缩70%, 推理延迟降至50ms (满足嵌入式设备要求), 知识蒸馏: 教师模型 (ResNet34) 指导学生模型 (MobileNetV2), 精度损失 < 2%, 硬件协同优化, TPU部署混合精度训练, 内存占用减少60%。

4 电气设备试验数据分析与故障预测

4.1 核心数据采集与处理。多源数据监测, 电气参数: 实时采集电压、电流谐波、绝缘电阻 (需 > 20MΩ) 及介质损耗因数等, 诊断电压波动、缺相等隐患。机械参数: 通过振动传感器检测轴承磨损 (金属颗粒 > 50ppm 预警)、转子偏心 (同心度偏差 ≤ 0.05mm) 等机械故障。温度与局部放电: 红外热成像捕捉过热点 (温差 > 120°C提示绝缘失效), 超声波及电磁波监测局部放电。数据预处理, 清洗噪声数据, 填补缺失值, 通过特征工程提取关键指标 (如振动频谱、暂态电能质量参数)。

4.2 智能故障诊断技术。人工智能模型应用, 故障分类: 决策树、支持向量机识别短路、轴承损坏等故障类型。深度学习方法: 卷积神经网络 (CNN) 分析设备红外图像与振动波形, 实现裂纹、磨损的视觉检测。实时诊断系统: 基于GOOSE协议的分布式故障录波技术, 实现μs级异常捕捉与毫秒级定位。多维度验证, 横向对比

同类设备数据, 纵向分析历史试验结果 (如绝缘电阻趋势下降 > 30%需预警)。

4.3 故障预测与预防策略。预测性建模, 健康状态评估: 融合实时数据与历史统计, 通过LSTM神经网络预测剩余寿命。故障概率计算: 随机森林算法分析多特征关联性 (如温度+振动+电流异常组合触发高风险告警)。主动防护措施, 定期维护: 润滑轴承 (高速设备用锂基脂)、更换老化电缆/电容。

4.4 工程应用案例。电压暂降治理, 某工厂通过扰动源定位算法, 精准识别短路故障位置, 结合ITIC容限曲线优化敏感设备防护。电机过热预测, 纺织厂伺服电机因电压超标5%引铁损激增, 加装稳压器后温度下降40%。

4.5 技术演进方向。数字孪生集成: 构建设备虚拟模型, 实时映射物理状态实现仿真预警。边缘计算优化: 在设备端部署轻量化AI模型, 缩短故障响应延迟。

总之, 当前技术需突破数据孤岛问题, 跨系统整合SCADA、MES数据可提升预测精度。60%以上故障源于绝缘劣化与接触不良, 需重点关注温度、振动、电流的协同变化趋势以实现早期预警。

参考文献

- [1]刘贤,电气设备试验数据分析与故障预测探讨.2023.
- [2]赵小龙.浅谈电气设备试验数据分析与故障预测研究.2022.