

电气自动化设备故障诊断与预测方法研究

陈文明

中海油富岛(海南)化工有限公司, 海南省东方市, 572600;

摘要: 基于历史数据训练机器学习模型(如随机森林、支持向量机), 预测设备剩余寿命及故障概率, 替代定期维护计划。深度学习算法通过实时监测数据偏移预警潜在故障, 降低误报率及非计划停机风险。通过温度、压力、振动等传感器采集设备运行参数, 分析异常波动判断故障类型和位置, 例如振动分析可识别轴承磨损或失衡。故障树分析法, 图形化方式逆向追溯故障根源, 通过定性与定量分析确定故障概率及关键因素。

关键词: 电气自动化; 设备; 故障诊断; 预测方法

DOI: 10.69979/3041-0673.26.01.027

电气自动化设备的故障诊断与预测方法研究主要围绕数据驱动、智能算法与多技术融合展开, 旨在提升诊断精度与预测时效性。

1 电气自动化与普通自动化的区别

1.1 技术范畴差异

普通自动化, 覆盖广义自动控制领域, 综合机械、计算机、控制理论等多学科, 实现设备自主运行(如机械臂装配、智能家居控制)。关键技术: 传感器技术、PLC 编程、机器人控制、人工智能算法。电气自动化, 聚焦电力系统与电气设备, 专攻电能生产、传输、分配的自动化控制(如电网调度、电机调速)。关键技术: 电力电子技术(变频器/整流器)、电机与拖动、继电保护、供配电系统设计。

1.2 核心课程与能力要求

普通自动化课程重点, 自动控制原理(PID 算法)、计算机编程(Python/C++)、机器视觉、嵌入式系统开发。电气自动化课程重点, 电路原理、电力系统分析、高电压技术、电气 CAD 制图。

1.3 选择建议

选普通自动化: 适合热衷编程算法、计划深耕人工智能或机器人领域者, 需持续更新技术栈应对竞争。选电气自动化: 适合追求职业稳定性、偏好电力系统工程实践者, 建议优先考取注册电气工程师。本质关系: 电气自动化是自动化技术在电力领域的垂直应用分支, 二者呈“全集与子集”关系。

2 电气自动化设备安装与维修要点

2.1 安装技术要点

设备安装流程, 现场勘查: 测量场地尺寸, 确认电源/气源接口匹配性, 排查环境温湿度、粉尘等隐患; 设备验收: 检查外观损伤, 测试基础功能(启停、运行), 核验参数与规格书一致性; 电气装配: 按图施工照明线路、低压配电柜, 确保线缆压接牢固、接地可靠。控制系统安装, PLC 模块安装需防静电操作, I/O 端口接线遵循标识匹配原则; 变频器散热空间预留 $\geq 10\text{cm}$, 动力电缆与信号线分层敷设避免干扰。机械配合调试, 电机与传动机构(齿轮/皮带)对中误差 $\leq 0.05\text{mm}$, 运行后复测轴温与振动值。

2.2 维修与维护要点

预防性维护, 定期清洁电气柜滤网, 检测母线连接点温升(红外测温仪监测, 阈值 $\leq 65^{\circ}\text{C}$); 电容/继电器等易损件按寿命周期(通常 2-3 年)强制更换。故障诊断流程, 电气故障: 使用万用表分段测量电压/电流, 定位短路/断路点; 分析 PLC 错误代码及传感器反馈信号; 机械故障: 听辨轴承异响, 检测电机三相电流平衡度(偏差 $>10\%$ 提示绕组或负载异常)。智能诊断技术应用, 通过 PLC 历史数据回溯功能分析停机事件, 结合故障树模型快速定位根源; 应用光机电一体化实训平台模拟复杂故障场景, 提升维修人员诊断能力。

2.3 安全与资质规范

操作安全: 维保前执行“断电-挂牌-上锁”程序, 高压设备验电后操作; 人员资质: 维修人员需持电工中级以上证书, 接触高压系统须具备特种作业操作证; 技术更新: 定期学习新设备技术手册(如变频器参数配置、工业网络拓扑)。实训支撑: 院校实训室配备西门子自

动化平台、电梯维修模拟装置等设备，强化故障排除实战能力。建议从业人员建立标准化作业手册（SOP），融合设备厂家技术指南与企业实践经验，实现维修过程可追溯化管理。

3 电气自动化设备故障诊断方法

3.1 电气自动化设备传感器监测故障

电气自动化设备传感器监测故障的诊断与处理需结合故障类型、检测工具及智能技术，传感器常见故障类型，精度异常，零点漂移：无信号输入时输出值波动（温度/湿度变化引起）；灵敏度下降：输入信号变化时输出幅度衰减（元件老化导致）。响应故障，响应延迟：信号变化后输出反应迟缓（如温度传感器滞后）；信号卡滞：输出值恒定不变（机械卡死或电路板损坏）。电气故障，断路/短路：线缆磨损或接头腐蚀导致信号中断；电磁干扰：动力电缆并行敷设引发信号失真（需分层布线）。环境适应性故障，高温导致密封圈变形（压力传感器渗漏）；粉尘堆积致光学传感器误判（需定期清洁）。智能诊断技术，PLC 数据分析：回溯历史故障代码（如西门子 S7-1200 的 OB 块报错）；冗余系统校验：主备传感器输出差值 $>10\%$ 时触发报警；AI 预测模型：基于振动频谱预测轴承磨损导致的位移传感器失效。预防性维护策略，环境管理，控制柜温湿度（建议 $15\sim 35^{\circ}\text{C}/\leq 85\%\text{RH}$ ），加装防尘滤网；振动区域使用铠装电缆，避免机械应力损伤。周期维护，季度校准：对比标准仪表调整零点/满量程；年度深度维护：拆解清洁内部元件，更换老化电容/继电器。冗余设计，关键工位部署双传感器，采用“二取二”逻辑表决机制。安全规范：操作前执行断电挂牌程序，高压设备验电后作业；维修人员需持电工中级以上证书。

3.2 电气自动化设备故障树分析法

核心原理与流程，逻辑结构构建，顶事件定义：明确系统最不希望发生的故障状态（如产线停机、安全联锁失效）作为分析起点；树形分解：用逻辑门（与门/或门）逐级向下展开失效原因，直至不可分割的底事件（如传感器断路、程序错误）；布尔代数建模：将故障树转化为布尔表达式，简化最小割集（导致顶事件发生的最基本事件组合）。实施步骤。系统边界定义，确定设备范围（如仅分析伺服驱动模块）及关联环境因素（温度/电磁干扰）。故障树定性分析，求解最小割集，识

别高危环节（如仅需 2 个继电器同时失效即导致断电）；识别关键路径（最小割集事件数越少，风险等级越高）。定量分析（可选），输入底事件故障率（如继电器失效率 0.001 次/小时），计算顶事件发生概率；通过重要度分析排序改进优先级（如某传感器故障贡献率达 60% ）。优势与局限。优势：图形化直观展示多重故障逻辑链；支持混合故障分析（硬件+软件+人为因素）；局限：复杂系统建树工作量大（需专业软件辅助）；依赖底事件数据的准确性（历史故障库不完善时误差大）。操作规范。数据验证：校准传感器故障率等参数，比对现场维修记录；动态更新：设备改造后需重构故障树（如新增 I/O 模块）；协同分析：设计/维修/操作三方联合评审逻辑完备性。案例：电梯失控故障树中，最小割集{制动器线圈断路+速度传感器失效}占事故总量的 82% ，针对性加装冗余传感器后故障率下降 76% 。

3.3 电气自动化设备专家系统诊断法

核心原理与技术框架，知识库构建，规则型知识：存储专家经验形成的条件-结论逻辑链（如“若电机电流突降且温度 $>120^{\circ}\text{C}$ →判定轴承卡死”）；案例库集成：积累历史故障数据（如 PLC 通信中断的 100 种场景特征），支持相似度匹配诊断。推理机制，正向推理：从传感器实时数据出发，匹配知识库规则链推导故障类型（如电压波动触发过载保护失效判定）；反向推理：假设故障类型，反向验证数据支持度（如假设变频器 IGBT 损坏→查验驱动波形畸变率）。自适应学习，结合机器学习动态更新知识库（如神经网络分析新故障模式后生成诊断规则）。优势与改进方向。优势：解决隐性故障（如绝缘老化早期识别）远超传统阈值报警；减少对资深工程师的依赖，诊断响应速度提升 $3\sim 5$ 倍。局限：知识库维护成本高（需持续注入新案例）；极端工况适应性不足（如强电磁干扰下的误判率 $>15\%$ ）。

4 电气自动化设备模式识别法

4.1 核心原理

特征提取，稳态特征：电流谐波幅值、有功功率、V-I 轨迹（电压-电流关系图）；暂态特征：设备启停瞬间的电流突变信号（需高频采样）；混合特征：融合 V-I 轨迹颜色编码与高次谐波二进制数据生成混合彩色图像，提升相似设备的区分度。分类决策，通过距离函数（如加权欧氏距离）量化待检模式与参考模式的相似性，

判定设备状态类别；卷积神经网络（CNN）自适应学习特征，减少人工干预，识别准确率可达 96%以上。

4.2 典型工业应用

故障诊断，电缆局部放电识别：通过放电量、脉冲间隔图谱区分绝缘气隙、半导体层爬电等缺陷；非侵入式负荷监测：实时识别用户设备类型与能耗，预警电气火灾风险。质量控制，机器视觉系统识别产品表面划痕、装配缺陷（如零件缺失/错位）；字符/条码高速辨识（OCR 技术），应用于自动化分拣线。设备预测维护，分析电机电流谐波突变与温度关联，早期预警轴承卡死故障；振动频谱模式匹配，识别机械共振导致的伺服定位漂移。

5 电气自动化设备预测性维护

5.1 大数据机器学习电气自动化设备预测

核心预测技术架构，数据感知层，部署 IoT 传感器实时采集电流、振动、温度等多维数据，构建设备全生命周期数据库；高频采样（>10kHz）捕捉设备启停瞬态特征，提升故障早期识别能力。智能分析引擎，时序预测模型：LSTM 网络学习历史运行规律，预测关键参数（如轴承温度）未来变化趋势；异常检测算法：孤立森林识别电流谐波异常模式，预警绝缘老化等隐性故障；故障分类模型：CNN 处理 V-I 轨迹图像特征，区分电机堵转/电源模块失效等故障类型。典型工业应用场景，电机健康预测，分析电流谐波与振动频谱关联性，预测轴承剩余寿命（误差±5%）；某汽车厂应用后维修成本下降 180 万元/年。电力设备维护，局部放电脉冲模式识别，预警电缆绝缘缺陷（准确率 96%）；电网故障停机时间减少 30%。产线能效优化，实时聚类分析产线设备能耗，动态调整待机策略；某制造企业年节电达 240 万度。实施关键点，数据质量：需过滤电磁干扰噪声（如采用 Kalman 滤波）；持续迭代：每季度注入新故障案例更新模型（防止预测漂移）。工业实践表明，融合大数据与机器学习的预测维护可将设备综合效率（OEE）提升 8%-15%。

5.2 电气自动化设备如何优化维护周期

动态维护周期优化框架，实时状态监控，部署 IoT 传感器实时采集电流谐波、振动频谱、温度梯度等设备运行参数，构建设备健康画像；高频采样（>10kHz）捕捉瞬态异常信号（如电机启停电流突变），实现早期故障预警。关键技术实施步骤，数据驱动基线制定，分析

历史维护记录与故障数据，建立初始维护周期（如电机润滑每 2000 小时）；聚类相似设备运行模式，分组制定差异化基线。动态调整机制，阈值触发：当振动值连续 3 小时超基线 30%时，自动提前维护计划；持续迭代：每季度注入新故障案例更新预测模型，防范预测漂移。闭环验证优化，数字孪生仿真维护策略有效性（如调整后故障率降幅）；对比实际停机时间与预测值，校准模型置信度。实施关键点，数据质量保障：采用小波滤波消除电磁干扰，确保特征提取准确性；人机协同决策：AIGC 生成维修方案，人工复核高风险操作（如高压设备维护）。

6 电气自动化设备预测性维护面临的挑战

6.1 数据质量与采集挑战

多源异构数据整合困难，工业现场设备接口协议不一（如 Modbus、PROFINET 等），老旧设备缺乏标准数据接口导致数据割裂；强电磁干扰环境下传感器噪声>12dB，需小波滤波提升信噪比，但实时处理算力要求高。数据实时性与完整性缺失，预测性维护需 10kHz 级高频采样捕捉瞬态故障特征，但传输带宽不足导致数据丢失率超 15%；关键故障样本稀缺（如电缆绝缘击穿仅占历史数据 0.1%），模型训练样本失衡。

6.2 技术实施瓶颈

模型泛化能力不足，同一 CNN 模型在电机轴承磨损诊断准确率达 92%，但迁移至变频器场景时因工况差异准确率骤降至 68%；故障特征库更新滞后，新故障模式（如 SiC 器件老化）缺乏有效识别能力。边缘-云端协同效率低，云端模型决策延迟>5 秒，无法满足冲压设备毫秒级急停响应需求；数字孪生仿真需百 TB 级历史数据支撑，中小企业存储成本激增 300%。

6.3 成本与效益平衡难题

初期投入高昂：单台关键设备预测性维护系统部署成本超¥80 万（含传感器+边缘计算单元+平台）；ROI 周期不明确：40%企业因故障预测准确率<85%导致投资回收期超 3 年；维护策略冲突：动态维护周期与传统计划保养体系存在排程矛盾。

7 电气自动化设备有效维护计划制定方法

7.1 维护框架设计

核心目标设定，延长设备寿命，降低故障率，减少

生产中断与维修成本，预防安全事故，分层维护结构，日常巡检：监测温度、振动、噪音等运行参数，定期维护：月度清洁：清除设备积尘，防止短路或散热不良，季度保养：更换磨损件（如接触器、电容器），年度大修：全面解体设备，更换核心部件，应急响应机制：制定停电等突发故障预案。

7.2 预防性维护实施

关键任务清单，电气系统检查：测量绝缘电阻（确保 >1 兆欧），校准电压/电流参数，机械部件维护：润滑运动部件，紧固连接件，环境控制：保持温度/湿度稳定，季度配电箱除尘，备件管理策略，

提前储备易损件（如传感器、保险模块），建立元件更换周期表（依据历史故障数据）。

7.3 数据驱动与人员协同

智能监控应用，实时采集温度、电流等参数，设置超限预警阈值，记录维修台账，分析故障规律优化维护

周期，团队能力建设，定期开展理论授课与实践操作培训，评估维护人员响应速度与维修质量。

7.3 技术升级方向

预测性维护：结合 IoT 技术实现智能预警，专家系统开发：整合历史案例库辅助故障诊断，全生命周期管理：基于设备磨损数据动态调整维护计划，执行要点：计划需匹配生产节奏，避免冲突，维护后统计故障率，验证措施有效性，重点设备（如配电柜、伺服系统）实施差异化维护策略。

总之，当前研究聚焦于算法优化与系统集成，但模型可解释性、小样本学习及跨场景迁移能力仍需突破。

参考文献

- [1] 李宇. 电气自动化设备故障诊断与预测方法. 2022.
- [2] 林慧园. 关于电气自动化设备故障诊断与预测方法探讨. 2023.