

电力系统自动化中机电设备故障诊断与预测维护研究

娄元基 411522199807210935

摘要：本文综述了电力系统中机电设备的故障机理与特征、信号采集与预处理方法、传统与数据驱动诊断技术，以及基于预测维护的模型与体系构建，分析关键技术挑战并展望基于人工智能、物联网与数字孪生的智能化运维发展路径，为提高电力系统设备可靠性与运维效率提供参考。

关键词：故障诊断；预测维护；信号与特征提取；

一、电力系统机电设备故障机理与特征分析

（一）故障类型与成因

电力系统机电设备故障可按发生部位分为电气系统故障与机械系统故障两大类。电气系统故障主要包括绝缘老化击穿、绕组短路断路、接地故障、电弧放电等，成因涉及长期电应力作用、过电压冲击、环境湿度超标、电磁干扰等，其中绝缘老化是变压器、电缆等设备最常见的故障诱因，占电气故障总数的60%以上。机械系统故障集中于转动部件与结构件，如轴承磨损、齿轮啮合异常、轴系不对中、壳体振动超标等，主要由安装偏差、润滑失效、疲劳损耗、负载波动等因素引发，转动设备中轴承故障占比达40%-50%，且易引发连锁损坏。此外，环境因素（高温、粉尘、腐蚀性气体）、操作不当、维护缺失等外部因素，会加速设备老化进程，增加故障发生概率。

（二）故障特征表现

机电设备故障特征具有多样性与关联性，电气故障常表现为参数异常与信号畸变，如绝缘电阻下降、泄漏电流增大、局部放电信号增强、电压电流谐波含量超标等，部分故障会伴随异常温升与电磁噪声。机械故障的特征信号主要体现为振动、噪声与温度变化，如轴承磨损会产生特定频率的振动峰值，齿轮故障会导致振动信号调制现象，润滑失效会引发局部温度骤升，且振动与噪声信号的幅值、频率特征与故障严重程度呈正相关。故障特征还具有潜伏性与演化性，早期故障特征微弱，易被背景噪声掩盖，随着故障发展，特征信号逐渐显著，若未及时干预，将从局部故障演变为整体失效，造成严重停机损失。

二、电力系统自动化中机电设备故障诊断技术

（一）信号采集与预处理技术

信号采集是故障诊断的基础，需根据设备类型与故障特征选择适配的监测参数与传感器。电气参数监测采用电压传感器、电流传感器、局部放电传感器、红外测温仪等设备，实时采集

绝缘状态、放电信号、温度分布等数据；机械参数监测选用振动传感器（加速度计、速度传感器）、声发射传感器、油液分析传感器等，获取振动、噪声、油液磨粒等特征信号。信号预处理旨在消除噪声干扰、提取有效特征，常用方法包括滤波处理（低通滤波、高通滤波、小波滤波）、信号平滑、特征归一化等，其中小波滤波能够有效分离故障特征与噪声，适用于非平稳信号处理；通过时域分析（峰值、有效值、峭度）、频域分析（功率谱密度、频谱图）、时频域分析（小波变换、短时傅里叶变换）等方法，提取与故障相关的特征参数，为诊断模型提供输入数据。

（二）传统故障诊断方法

传统故障诊断方法基于信号特征与故障模式的对应关系，具有原理简单、易于实现的优势。阈值诊断法通过设定参数阈值范围，当监测数据超出阈值时判定为故障，适用于简单设备的常规监测，但难以适应复杂工况下的故障诊断，易出现误判。基于模型的诊断方法通过建立设备正常运行的数学模型，对比模型输出与实际监测数据的偏差，实现故障识别，适用于结构明确、模型易构建的设备，但对于复杂机电设备，模型构建难度大，且难以兼顾所有工况。基于规则的诊断方法依据专家经验制定故障诊断规则库，通过匹配监测特征与规则库实现故障判断，具有较强的针对性，但规则库构建依赖专家经验，对未知故障适应性差，易出现漏诊。

三、电力系统机电设备预测维护模型与策略

（一）预测维护核心模型

预测维护以故障诊断结果为基础，通过预测设备剩余寿命（RUL），制定针对性维护策略，核心模型包括基于物理失效的模型与数据驱动模型。基于物理失效的模型通过分析设备老化机理与失效规律，建立寿命预测方程，如基于疲劳损伤累积理论的模型，适用于能够明确失效机制的设备，但模型参数获取难度大，对复杂设备适应性有限。数据驱动模型基于监测数据与寿命数据的统计关系，构建预测模型，无需明确物理机理，适用性更广。常用数据驱动模型包括回归分析模型、时序预测模型、机器学习预测模型等：回归分析模型通过拟合监测参数与剩余寿命的关系实现预测；LSTM、GRU等时序模型能够捕捉数据的时间依赖关系，适配设备寿命演化的时序特征；融合注意力机制的深度学习模型，可聚焦关键特征，提升预测精度。

（二）预测维护体系构建

预测维护体系以“数据采集—故障诊断—寿命预测—维护决策—执行反馈”为闭环流程，实现全流程智能化运维。数据采集层通过物联网（IoT）技术构建分布式监测网络，实现设备运行数据的实时采集与传输；数据处理层采用边缘计算与云计算结合的架构，边缘节点负责数据预处理与实时诊断，云端实现大数据分析、模型训练与寿命预测；决策支持层基于预测结果，结合设备重要性、维护成本、供电可靠性等因素，制定最优维护策略，包括维护时间、维护方式、备件准备等；执行反馈层记录维护执行情况与设备运行状态变化，为模型优化与策略调整

提供数据支撑。此外，构建设备数字孪生模型，实时映射设备运行状态，模拟故障演化过程与维护效果，为预测维护决策提供可视化支持。

四、关键技术挑战与未来发展趋势

（一）关键技术挑战

当前预测维护技术面临多方面瓶颈：多源异构数据融合难度大，不同类型传感器数据格式、精度、采样频率存在差异，难以实现有效融合分析；复杂工况下模型泛化能力不足，设备运行状态随负载、环境变化而波动，导致训练好的模型在实际工况中诊断与预测精度下降；设备数字孪生模型构建复杂，需融合多物理场仿真、三维建模、实时数据映射等技术，对数据质量与计算资源要求高；维护决策的智能化水平不足，难以综合考虑多目标优化需求，实现维护策略的动态调整。

（二）未来发展趋势

随着人工智能、物联网、大数据等技术的深度融合，预测维护技术将向智能化、一体化、网络化方向发展。AI与故障诊断深度融合，基于深度学习、强化学习的智能模型将实现故障特征的自动提取、故障类型的精准识别与寿命的精准预测，提升复杂工况下的适应性；物联网与边缘计算技术的推广应用，将构建更密集的监测网络，实现数据采集与实时诊断的本地化处理，降低传输延迟与带宽消耗；数字孪生技术与预测维护深度结合，将实现设备全生命周期的虚拟映射与动态仿真，为维护决策提供更精准的支持；区块链技术的应用将保障运维数据的安全性及可追溯性，为模型训练与维护优化提供可信数据支撑；跨设备、跨区域的协同运维平台将逐步构建，实现资源共享与协同决策，提升电力系统整体运维效率。

五、结论

电力系统自动化中机电设备故障诊断与预测维护是保障系统安全稳定运行的关键技术，未来需依托人工智能、物联网、数字孪生等新兴技术，持续提升诊断精度、预测准确性与维护智能化水平。随着技术的不断突破与应用推广，故障诊断与预测维护将成为电力系统智能化运维的核心支撑，为构建安全、高效、绿色的现代电力系统提供有力保障。

参考文献

- [1]刘媛媛.煤矿机电设备智能化维护研究现状与发展趋势[J].工矿自动化,2021,47(07):79-84.DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17753.
- [2]张旭,魏娟,赵冬梅,等.一种用于电网故障诊断的遥信信息解析方法[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3824-3833.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.22.030.
- [3]薛光辉,吴淼.机电设备故障诊断方法研究现状与发展趋势[J].煤炭工程,2010,(05):103-105.

