

面向工业物联网的电气设备预测性维护与健康管理研究

王晓伟 130131198510130012

摘要

电气设备是工业生产体系中的核心基础设施，设备故障不仅会导致生产中断，还可能引发安全事故，造成巨大的经济损失。传统的事后维修、定期维护模式存在维护过度或维护不足的缺陷，已经无法适配现代工业大规模生产的精细化需求。随着工业物联网技术的快速发展，多维度感知数据的实时采集、传输与存储成为可能，为电气设备的预测性维护与健康管理提供了技术支撑。本文首先分析了工业物联网背景下电气设备维护模式的转型需求，梳理了预测性维护与健康管理系统的整体架构，进而探讨了关键技术路径与应用实践中的挑战，最后对未来发展方向进行了展望。研究表明，基于工业物联网的预测性维护能够有效降低电气设备维护成本，延长设备使用寿命，提升工业生产的整体安全性与稳定性，具有广阔的应用前景。

关键词：工业物联网；电气设备；预测性维护；健康管理

一、引言

在现代工业生产体系中，电气设备承担着电能转换、动力输出、过程控制等核心功能，其运行状态直接决定了整个生产系统的可靠性与安全性。传统工业领域针对电气设备普遍采用两种维护模式：一是事后维修模式，即在设备发生故障停机后才进行检修，这种模式会造成非计划生产中断，对于连续型生产行业而言损失极大；二是定期预防性维护模式，即按照固定时间周期对设备进行拆机检查与部件更换，这种模式容易产生过度维护问题，不仅提升了维护成本，还可能因不必要的拆机操作引入新的故障风险。据相关行业统计，我国工业领域因电气设备非计划故障导致的生产损失每年超过千亿元，传统维护模式的局限性日益凸显。

二、工业物联网背景下电气设备 PHM 系统架构

面向工业物联网的电气设备预测性维护与健康管理系統采用分层架构设计，从下到上可分为感知层、网络传输层与应用层三个层级，各层级协同实现数据采集、传输、分析与决策支持功能。

2.1 感知层

感知层是整个系统的数据来源，核心是部署在电气设备不同位置的各类感知终端，包括电压电流传感器、温度传感器、振动传感器、局部放电传感器、绝缘电阻监测传感器等。针对不同类型的电气设备，感知终端的配置方案存在差异：例如高压开关柜重点监测局部放电、触头温度与母线电压电流，低压异步电动机重点监测定子电流、轴承振动与绕组温度，电力变压器重点监测油温和绕组温度、局部放电与油中溶解气体。感知层还包含边缘计算节点，能够对原始采集数据进行初步清洗与特征提取，减少后续传输与处理的数据量，降低系统带宽压力。

2.2 网络传输层

网络传输层负责将感知层采集处理后的设备数据传输至云端或本地平台处理中心。考虑到工业现场环境复杂，电磁干扰强，目前主流采用“有线+无线”结合的传输方案：对于固定位置的大型核心电气设备，采用工业以太网或 PROFINET 等有线传输方式，保障数据传输的稳定性与可靠性；对于分散布置、移动性较强的设备，采用 NB-IoT、LoRa、5G 等无线传输技术，降低布线成本，提升部署灵活性。同时传输层需要采用加密传输协议，保障工业数据的安全性，防止数据泄露被非法利用。

2.3 应用层

应用层面向运维管理人员提供可视化的交互接口，主要功能包括设备运行状态实时监控、健康状态可视化展示、故障预警推送、维护决策支持与运维报表生成等。当模型识别到设备存在潜在故障风险时，系统会自动向运维人员发送预警信息，并给出故障位置、故障类型与维护方案建议，辅助运维人员提前安排维护工作，避免故障发生。

三、电气设备 PHM 关键技术分析

3.1 多源数据融合技术

电气设备的故障往往会通过多个维度的参数变化体现出来，单一传感器数据很难全面反映设备的真实健康状态，例如变压器绕组故障会同时体现为温度升高、局部放电信号增强、电流谐波增大等多特征变化。多源数据融合技术将不同类型传感器采集的数据进行空间域与时间域的融合，整合多维度信息，能够有效提升故障识别与预测的准确性。目前常用的数据融合方法包括 D-S 证据理论、贝叶斯

网络、神经网络融合等，能够实现从数据层、特征层到决策层的多级融合，充分挖掘不同数据之间的关联信息，降低单一传感器故障或数据偏差对预测结果的影响。

3.2 故障特征提取与选择技术

工业物联网采集的原始数据维度高、数据量大，其中存在大量冗余信息，直接使用原始数据进行建模不仅会提升计算开销，还容易导致模型过拟合，降低预测精度。因此需要通过特征提取与选择技术，从原始数据中筛选出对健康状态变化敏感的特征。当前针对电气设备常用的特征提取方法包括：基于时域统计的特征提取（如均值、方差、峰峰值、峭度等）、基于频域分析的特征提取（如傅里叶变换、功率谱分析等）以及基于时频分析的特征提取（如小波变换、经验模态分解等）。在特征提取完成后，还可通过互信息、主成分分析、递归特征消除等方法进行特征选择，去除冗余特征，保留关键特征，提升模型的运行效率与预测精度。

四、应用挑战与发展展望

尽管基于工业物联网的电气设备预测性维护已经取得了较多研究成果，但在工业现场实际落地应用中仍然面临一系列挑战。首先是小样本与数据不平衡问题，电气设备本身可靠性较高，故障样本数量较少，大部分数据为正常运行数据，数据不平衡问题会导致模型偏向于多数类，故障识别精度降低。其次是模型可解释性问题，当前主流的深度学习模型属于黑箱模型，给出故障预警后无法清晰解释故障发生的原因与发展过程，难以获得现场运维人员的完全信任。第三是环境适应性问题，工业现场电磁环境复杂，传感器容易受到干扰，设备运行负荷也会随生产计划动态变化，导致数据分布发生偏移，降低模型的泛化能力。最后是成本问题，在现有设备上加装大量传感器与传输模块会产生较高的改造成本，对于中小制造企业而言门槛较高。

五、结论

面向工业物联网的电气设备预测性维护与健康管理的工业运维领域的重要发展方向，能够有效解决传统维护模式存在的弊端，实现电气设备运维的智能化与精细化。本文梳理了该领域的系统架构与关键技术，分析了当前应用中存在的挑战与未来发展方向。总体来看，随着工业物联网技术与人工智能技术的不断发展，基于数据驱动的电气设备预测性维护体系将不断完善，逐步在更多工业领域得到推广应用，为工业生产的安全稳定运行提供坚实保障，推动我国工业制造向

智能化方向转型。

参考文献

[1] 雷亚国, 贾旭, 孔德银. 大数据下机械装备故障预测与健康管理研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 1-13.

[2] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测与健康管理技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 1-9.

[3] 王健, 赵洪山, 米增强. 基于工业物联网的电力设备状态监测与健康管[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3810-3820.