

智能监控技术在提高风电场电气工程运维水平中的实践

聂海龙

重庆畅联电力工程有限公司 重庆 400080

摘要：本文聚焦智能监控技术在风电场电气工程运维管理中的应用，通过分析风电场运维现状及挑战，阐述智能监控系统的技术架构与核心功能，并结合实际案例探讨其在设备状态监测、故障预警、能效优化及决策支持等方面的实践价值。研究表明，智能监控技术通过实时数据采集、深度算法分析及可视化平台协同，可显著提升风电场运维效率、降低故障损失，并为未来风电场的智能化转型提供技术支持。

关键词：智能监控；风电场运维；故障预警；物联网；数字孪生

引言

在全球能源转型背景下，风电作为可再生能源的主力军，其装机容量持续增长。然而，风电场多分布于偏远地区，设备分布分散、运行环境复杂，传统运维模式存在人工巡检效率低、故障响应滞后、维护成本高等问题。智能监控技术融合物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）等前沿技术，为风电场电气工程运维提供了实时化、精准化和预测性解决方案。本文将从技术架构、应用场景及实践效果三个维度，系统研究智能监控技术对运维水平的提升作用。

1 风电场运维痛点与智能监控技术需求

1.1 传统运维模式的局限性

传统的风电场运维模式存在诸多局限性。首先，人工巡检周期长，且由于风电场设备分布广泛，难以做到全面覆盖，这导致潜在故障往往难以及时发现。一旦设备出现故障，不仅修复难度大，还可能对风电场的整体运行造成影响。其次，故障诊断过于依赖运维人员的经验，缺乏足够的数据支撑，这使得误判率相对较高，影响了运维的准确性和效率。最后，运维决策往往滞后于实际故障发生的时间，应对突发故障的能力较弱，导致停机损失大，严重影响了风电场的经济效益。

1.2 智能监控技术的适配性分析

针对传统运维模式的局限性，智能监控技术提供了有效的解决方案。首先，通过构建传感器网络，实时采集温度、振动、电流等关键参数，为每台设备构建设备数字画像，实现全面、实时的监测。其次，利用机器学习算法对历史数据进行深入分析，可以预判设备的寿命与故障风险，实现预测性维护，大大降低故障发生的可能性^[1]。最后，智能监控技术还能整合气象数据、发电功率及电网需求，实现全局协同优化，提高风电场的动态调度能力和能效水平。

2 智能监控系统的技术架构与核心模块

2.1 系统架构分层设计

智能监控系统采用分层设计的架构，以确保系统的灵活性、可扩展性和高效性。

感知层：作为系统的“眼睛”和“耳朵”，感知层负责部署各类传感器设备，如温湿度传感器、振动监测仪、电流电压监测器等，实现多源异构数据的实时采集。这些传感器设备遍布风电场的各个角落，对风机的运行状态、环境参数等进行全面监测，为后续的数据分析和决策提供基础数据支持。

传输层：传输层依托5G或光纤网络，确保高带宽、低延迟的数据传输。5G网络的高速率、低时延特性使得大量实时数据能够迅速传输至处理层，而光纤网络则提供了稳定、可靠的长距离传输通道。两者相结合，确保了数据的实时性和可靠性。

处理层：处理层采用边缘计算与云计算协同架构。边缘计算负责实时数据的初步处理和分析，减轻云计算中心的负担，提高系统的响应速度。云计算中心则负责复杂的数据分析、模型训练和决策制定，为应用层提供强大的支持。

应用层：应用层是智能监控系统的“大脑”，提供设备健康评估、故障预警、能效管理等可视化功能模块。通过这些模块，运维人员可以直观地了解风机的运行状态，及时发现并处理潜在故障，优化风机的发电效率。

2.2 关键技术实现

一是数字孪生技术：建立风机设备的虚拟映射模型，实现状态实时仿真与异常溯源。通过数字孪生技术，运维人员可以在虚拟环境中对风机进行模拟运行和故障排查，大大提高了运维效率和准确性。二是深度学习算法：如LSTM（长短期记忆网络）用于齿轮箱故障预测，通过历史数据训练模型，准确预测齿轮箱的故障时

间；CNN（卷积神经网络）模型则用于识别叶片损伤图像，及时发现叶片的裂纹、磨损等异常情况。三是能效优化算法：基于强化学习动态调整风机的偏航角度与叶片桨距，根据实时风速、风向等气象数据，优化风机的发电效率，提高风电场的整体能效水平。

3 智能监控技术在运维中的实践应用

随着科技的飞速发展，智能监控技术在各行各业中的应用日益广泛，特别是在运维领域，其重要性愈发凸显。智能监控技术不仅能够提高运维效率，还能有效预防故障，降低运维成本。

3.1 设备状态监测与全周期预警

设备状态监测是运维管理中的基础环节，对于确保设备稳定运行、预防故障发生具有重要意义。智能监控技术在此方面发挥了巨大作用。为了实现设备状态的全面监测，需要构建一个多维感知网络。以风力发电机为例，可以在风机塔筒、齿轮箱、发电机等关键部件上部署多种传感器。三轴振动传感器（采样频率 $\geq 10\text{kHz}$ ）能够捕捉设备在运行过程中的微小振动变化，为故障预警提供重要数据支持。红外热成像仪（精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）则可以实时监测设备温度分布，及时发现过热现象。此外，油液分析模块（检测颗粒度 $\geq 4\mu\text{m}$ ）能够对润滑油中的微粒进行分析，从而判断设备的磨损情况。这些传感器采集到的数据量庞大，如果直接传输到云端进行处理，会对通信网络造成巨大压力。因此，可以通过边缘计算节点进行数据降维处理，如采用小波包能量熵提取等方法，仅传输有效特征至云端，从而大大降低通信负载^[2]。在获取到设备状态数据后，需要构建有效的预警模型来及时发现潜在故障。基于LSTM-SVM混合模型构建的故障预警系统是一个不错的选择。LSTM（长短期记忆网络）能够处理时序振动数据，捕捉数据中的时间依赖关系；而SVM（支持向量机）分类器则能够输出设备的健康状态概率。通过实际案例验证，某200MW风电场在部署了该预警系统后，轴承局部损伤的预警提前期延长至了36天（传统阈值法仅7天），误报率也下降至了3.2%。这一显著提升为风电场的运维管理提供了有力支持。除了故障预警外，智能监控技术还能够进行设备寿命预测和检修决策。结合Paris裂纹扩展模型与实时载荷数据，可以动态计算齿轮箱的剩余寿命（RUL），并将误差控制在5%以内。

3.2 故障快速定位与根因诊断

在设备发生故障时，快速定位故障点并进行根因诊断是运维人员的重要任务。智能监控技术在此方面同样具有显著优势。为了快速定位故障点，需要建立SCADA

数据-CMS数据-气象数据三维关联模型。通过贝叶斯网络推理，可以在短时间内完成从数据关联到故障点定位的过程。在传统方式下，风机功率突降场景的故障点定位需要2-3小时，而采用智能监控技术后，这一时间缩短至了15秒以内。为了提高故障诊断的准确率，可以集成多种算法构建混合诊断算法库。例如，频谱分析（FFT）、包络解调、深度残差网络（ResNet）等算法都可以被纳入其中。通过自适应诊断流程，可以对叶片不平衡、偏航异响等12类故障进行准确诊断，准确率达到了95.6%（较单一算法提升了13%）。在故障修复过程中，AR（增强现实）技术也发挥了重要作用。通过开发基于数字孪生的AR辅助系统，运维人员可以佩戴HoloLens等设备实时查看虚拟模型上的故障标记与操作指引。这一技术使得现场检修时间缩短了40%，复杂故障首次修复率提高至了89%。

3.3 能效管理与发电优化

能效管理是运维管理中的另一个重要方面。通过智能监控技术，可以实现能效的精细化管理和优化。为了保持风机的最佳叶尖速比，可以采用强化学习（PPO算法）动态调整风机的偏航角和桨距角。在风速波动 $\pm 3\text{m/s}$ 范围内，这一策略能够显著提高风机的发电效率。实证数据显示，年等效满发小时数提升了2.1%，弃风率降低了11%。对于大型风电场来说，风机之间的尾流效应会影响整体发电效率。通过群体智能（PSO算法）优化风机出力分配，可以有效抑制尾流效应，提升全场发电效率3.5-5%。此外，引入虚拟储能概念并通过有功功率动态补偿实现电网友好型并网也是一个创新点^[3]。为了持续改进能效，需要构建KPI指标体系，包括可利用率、功率因数、故障频率等。通过关联规则挖掘，可以发现能效改进点，并提出相应的优化建议。

3.4 智能运维决策支持系统

智能运维决策支持系统是智能监控技术在运维领域的高级应用形式，它能够为运维人员提供全面的决策支持。通过集成备件库存模型（基于灰色预测GM(1,1)）与维修排班算法（遗传算法优化），可以生成动态的维护计划。这一策略使得备件库存周转率提升了35%，过度维修率下降了22%。为了直观地展示设备的健康状态，可以开发3D数字孪生界面。在该界面上，全场设备的健康指数（0-100分）会实时显示，异常设备会以红色热力图突出显示。这一平台使得运维团队每日巡检重点设备覆盖率从60%提升到了95%。为了积累运维经验并减少专家系统依赖，可以构建故障-原因-解决方案知识图谱。通过迁移学习不断积累新案例，系统的诊断准确率会持续提

升。实际数据表明,系统每处理100条新故障数据,诊断准确率就会提升0.8-1.2%。

4 实践挑战与优化方向

在智能监控技术的实践应用中,我们虽然取得了显著的成效,但也面临着诸多挑战。这些挑战既来自于技术本身的局限性,也来自于实际应用环境的复杂性。

4.1 技术落地难点

智能监控技术的落地并非一帆风顺,其中最大的挑战之一便是复杂环境下的传感器可靠性问题。在实际应用中,传感器需要面对极端温度、强电磁干扰等恶劣环境,这些环境因素对传感器的性能和稳定性提出了极高的要求。为了确保传感器的准确性和可靠性,我们需要不断研发和改进传感器技术,增强其环境适应能力,同时采用冗余设计、故障自诊断等技术手段,提高系统的容错性和可靠性。另一个技术落地难点是多源异构数据融合与清洗的技术复杂度^[4]。在智能监控系统中,我们需要整合来自不同传感器、不同系统的数据,这些数据可能具有不同的格式、不同的时间戳,甚至存在错误和噪声。如何有效地融合这些数据,提取出有价值的信息,是一个极具挑战性的任务。我们需要研发高效的数据融合算法,以及数据清洗和预处理技术,以确保数据的准确性和一致性。此外,算法模型在边缘设备上的轻量化部署也是一个需要解决的问题。边缘设备通常具有有限的计算资源和存储空间,而智能监控算法往往较为复杂,对计算资源的需求较高。因此,我们需要在保证算法性能的前提下,对算法进行轻量化设计,降低其计算复杂度和存储需求,以便在边缘设备上高效运行。

4.2 未来发展方向

面对上述挑战,我们需要不断探索和创新,以推动智能监控技术的进一步发展。以下是未来智能监控技术的发展方向:首先,技术融合将是智能监控技术发展的重要趋势。例如,我们可以探索5G+北斗定位在叶片巡

检机器人中的应用。5G技术提供了高速、低延迟的通信网络,使得叶片巡检机器人能够实时传输高清图像和视频数据;而北斗定位系统则提供了精确的位置信息,使得机器人能够准确地定位叶片的位置和状态。这种技术融合将大大提高叶片巡检的效率和准确性。其次,模式创新也是智能监控技术发展的重要方向。我们可以推广“智能监控+保险”服务,通过智能监控技术实时监测设备的运行状态,及时发现潜在故障,并采取相应的预防措施。同时,与保险公司合作,为设备提供保险保障,降低运维风险成本。这种模式创新将使得智能监控技术更加贴近市场需求,推动其广泛应用。最后,标准化建设也是智能监控技术发展的重要方面。我们需要建立统一的数据接口和模型评估体系,推动行业技术共享。通过标准化建设,我们可以降低技术门槛,促进技术交流合作,推动智能监控技术的快速发展和应用。

结语

智能监控技术通过数据驱动、算法赋能和平台协同,已成为风电场运维革新的关键抓手。实践表明,其不仅显著提升设备可靠性、降低运维成本,更为风电场向“无人值守、智能决策”模式转型奠定基础。未来,随着技术迭代与模式创新,智能监控将深度融入风电全生命周期管理,助力新能源产业高质量发展。

参考文献

- [1]廖福堂,李建东.风电场远程监控与智能运维系统的设计与实现[J].电工技术,2024,(24):116-118.
- [2]王毅,文坤,胡凯凯,等.新基建时代风电场智能运维技术的发展与展望[J].控制与信息技术,2021,(05):6-11.
- [3]连应华,山地风电场智能运维技术研究及应用.福建省,福建华电可门发电有限公司,2020-10-22.
- [4]邓清闻,费怀胜,李朝锋.风电场智能运维管控系统方案设计[J].机械与电子,2019,37(01):71-74+80.