

人工智能与物联网融合驱动风电场数智化发展的路径分析

解锡伟 戴毅 潘文彪 宋慧俏 李志勇

中节能风力发电股份有限公司，北京，100044；

摘要：风电场正处于数智化转型关键阶段，人工智能与物联网的深度融合为提升风电设备运行效率、降低运维成本和增强场站安全性提供了技术路径。物联网实现风机、变流器、气象站与电网设备的数据实时采集，人工智能依托海量数据开展预测分析、故障诊断和优化调度，构建更加精细化和自主化的管理体系。本文围绕平台架构、智能运维、能效提升和安全体系等方面进行系统研究，分析数智化发展的主要技术路径与实施策略，为风电场建设提供参考。

关键词：人工智能；物联网；风电场；数智化；智能运维；预测分析

DOI：10.69979/3041-0673.26.03.090

引言

全球能源结构转型推动了风电产业高速发展，风电场规模不断扩大，设备类型日益丰富，运行环境愈加复杂。传统依赖人工巡检和经验判断的管理方式难以满足大规模风电场的运营需求，设备故障率、运维响应速度和能量转换效率等问题对场站效益造成影响。人工智能与物联网技术的成熟为风电场数智化转型提供了条件。物联网能够在风电场构建全面的数据连接网络，使设备状态、气象数据、振动特征和电气参数实现实时采集。人工智能对高维度数据进行分析，赋予风电设备自学习、自诊断和自优化能力，有助提升风电场的自动化与智能化水平。

1 风电场数智化建设的技术基础

1.1 物联网架构在风电场中的应用

风电场物联网架构由设备层、传输层和平台层构成，三层体系构建起完整的感知与数据流通链路。设备层由风速仪、振动传感器、温度传感器、电气量采集单元和环境监测装置等构成，用于捕捉风机及其附属系统的多维运行特征。实时采集的数据在传输层进入光纤专网或安全无线网络，并由边缘节点进行初步筛选和格式化处理，以保持数据的连续性与稳定性^[1]。平台层在中心控制室或云端部署，承担数据建模、可视化分析和预测计算等任务，形成风电场数智化的基础服务框架。物联网架构使风电场具备全面感知能力，为设备监测、运行管理和智能分析提供可信数据来源，也为后续人工智能模型的应用奠定技术条件。

1.2 人工智能算法在风电中的适配性

风电设备长期在复杂环境中运行，随机性强、波动性大，人工智能算法能够适应这种特征分布，处理高维状态数据并识别潜在规律。深度学习特别适合处理振动信号、电气波形及气象时序数据，可构建健康评估模型，

识别齿轮箱、主轴轴承和发电机等部件的早期退化迹象。机器学习模型在运行状态分类、功率偏差分析和发电曲线校正领域表现突出，能够根据历史结果不断优化参数。强化学习可在调度和优化控制方面发挥作用，使风机在不同风况下形成较优运行策略。

2 人工智能驱动风电设备智能运维

2.1 风机故障预测模型构建

人工智能模型能够处理大量历史数据，捕捉特征变化规律，建立具备高精度预测能力的模型。深度学习网络适用于识别齿轮箱振动信号中的早期退化特征，机器学习算法适合预测主轴轴承和发电机位置偏差趋势。模型输出的预测结果能够为运维计划提供先期预警，使运维人员提前准备备件与计划，减少机组突发停机。故障预测体系打造后，风电场具备更强的预测性维护能力，使机组保持更长的稳定运行周期，提高整场可利用率并降低大部件损坏风险^[2]。

2.2 健康状态评估体系建立

风电设备的健康状态呈现多维度特征，人工智能模型在多参数融合与趋势识别方面具有优势，可将振动幅值、温升变化、噪声模式、电气波形等多源数据纳入统一框架。健康评估系统依据模型结果构建设备健康等级，以反映运行状态的轻度偏差、中度退化或严重故障风险。齿轮箱、变桨系统、液压系统和发电机等部件在评估体系中的表现具有指导意义，使运维团队能够掌握设备状态演变脉络。

2.3 运维资源智能调度

人工智能技术将风电场地理信息、设备状态数据、故障风险预测和运维计划纳入调度模型，为人员、备件和工具配置提供合理方案^[3]。风况信息和设备工作负载被模型用于判断最佳检修窗口，使运维团队能够在较低发电损失条件下开展计划性检修。运维资源调度模型可

为不同机组安排合适的检修路线,减少往返时间,提高现场工作效率。备件使用情况也在模型的统筹下实现动态管理,使仓储成本降低并避免备件短缺。智能调度体系使运维活动更具组织性和预见性,提升了风电场整体的精益化管理水平。

2.4 远程运维体系建设

物联网架构使监测数据能够实时传送至监控中心,形成风机运行参数的集中管理平台。人工智能在远程监控系统中承担异常识别、运行模式分析和报警筛选等任务,使大量报警信息得到筛查和分类,减少误报干扰。远程诊断模型可为运维人员提供运行偏差原因分析,并为现场处置提供建议步骤,使故障处理更精准。远程运维体系降低了现场人员的工作强度,提高运维团队的统一协调能力。

3 基于物联网的数据融合与能效提升机制

3.1 多源数据统一采集策略

风电场区域广、风况变化快,多源数据采集体系对提升数智化水平具有关键作用。物联网设备布设在风机塔筒、机舱、变电站和气象塔,用于采集风速、风向、振动、电流、电压、温度、湿度等数据,并将其汇集到统一的数据平台。该平台对不同协议、不同格式的数据进行整合,使状态量具备一致性和可比性。统一采集机制减少了传统人工抄录的数据误差,使风电场能够形成覆盖规划、建设、运维和退役阶段的全生命周期数据库。某风电公司在新建风场中部署边缘采集单元,整合了风机 SCADA 数据与气象塔测量信息,数据完整性大幅提高,为后续智能建模提供了可靠基础。

3.2 风机运行工况智能识别

风机长期暴露在复杂风况中,运行工况受风速、湍流度、温度与机械磨损等因素影响。融合后的多源数据为人工智能算法识别工况提供了支撑。算法对功率曲线、风速匹配度、振动变化和温升趋势进行分析,判断风机是否处于偏离正常区间的状态。低效运行、叶片积尘、变桨漂移等问题在模型分析后可以被快速识别。某风电场对几十台机组实施工况智能识别系统后,发现多台机组存在轻度变桨响应延迟,运维人员根据提示进行调整,使单台机组年发电量提升约 1%—2%。工况识别体系改善了发电效能,也为大规模风电场精益化管理提供依据。

3.3 风电场发电优化调度

风电场的发电效率受风速预测、机组姿态与变桨策略影响。人工智能调度模型在融合气象数据、风机运行参数与地形信息后,计算最优的运行策略,使风能转化效率达到更高水平。模型能够建议调整叶片迎风角、优化变桨曲线、设置合理的转速区间,使机组在不同风况

下保持稳定输出。某沿海风电场利用调度模型对风速预测与风力资源进行综合分析,提出机组夜间低风速段的最佳运行策略,使整体发电量增加多个百分点。调度优化使风电场在风能波动中保持较高的利用率,提升了风资源的消纳能力。

3.4 负荷与电网协调机制

风电功率波动对电网安全运行带来压力,物联网系统实时监测电网频率、电压、负荷及线路潮流,使风电场能够依据电网条件调整输出策略。人工智能模型在接收到风速变化、负荷变化以及电压偏移信号后,动态调整机组有功和无功输出,使功率曲线更平滑。某区域风电场在接入调控系统后,基于实时电网数据自动设置无功补偿策略,使母线电压偏差明显减少,提升了并网稳定性。协调机制强化了风电场与电网的互动能力,使风电场减少对电网的冲击,为区域新能源高比例接入奠定基础。

4 风电场安全体系的数智化构建

4.1 网络安全防护机制

风电场的通信结构由风机端控制器、汇集节点、边缘计算设备和监控中心组成,信息链路跨越海上、山地和长距离传输场景,网络风险较为突出。构建健全的安全体系需要从身份验证、访问控制、加密策略和安全审计等环节展开。设备接入时进行双向身份核验,使非法终端无法加入网络环境;数据流在链路中采用加密策略,使关键控制指令更难被窃取或篡改;访问权限按岗位和区域进行划分,使操作行为保持在最小必要范围内。某海上风电场尝试部署零信任架构,将边缘节点、风机主控和调度平台纳入统一安全策略管理后,异常访问事件大幅下降。稳定的网络安全体系使风电场的数字化运行环境更牢固,为后续智能化功能运行打下基础。

4.2 设备安全监测与报警

风电设备处于长周期、高强度运转状态,实时监测体系显得尤为关键。各类传感器采集振动、温度、电流、电压、油质等参数,为人工智能模型提供连续输入。模型根据时序数据判断风险趋势,如齿轮箱早期磨损、轴承温升异常、风机偏航卡滞等隐患。报警系统依据模型输出触发多级提醒,使现场运维人员能在适当时间完成维护任务。某山地风电场在机舱内部署高频振动采集装置后,AI 模型识别出一台机组的振动微弱上升趋势,早期检修避免了主轴承损伤扩大。

4.3 环境与外部风险监测

风电场所处区域往往风强、地形复杂,环境风险显著。监测系统布设于风塔、海面浮标、机舱顶部和场区周界,用于采集雷电强度、风暴变化、冰冻厚度、潮位

变化和野生动物活动等外部信息。人工智能在持续接收环境数据后生成风险预测,使风机策略在恶劣条件下保持更安全的运行状态。例如某北方风电场引入覆冰识别系统后,模型根据叶片振动频率变化判断冰层附着状况,及时提醒风机切换运行模式,降低了叶片受损概率。

4.4 应急响应体系建设

风电场在数字化条件下可以构建协同式应急体系,使各类突发事件的处理更加迅速有序。智能系统在接收到风险信号后形成决策建议,包括停机控制、机组隔离、变电站切换、关键区域封锁等动作^[4]。调度平台根据威胁等级自动调用应急预案,使人员指挥更高效。某沿海风电场在遭遇强对流天气时,系统识别风速突变并迅速启动群组停机策略,避免了叶片在极端风况下产生结构损伤。数字化应急机制整合通信、监测和控制资源,使风电场应对自然灾害、网络攻击、设备突发故障等情形更从容。

5 人工智能与物联网融合发展的实施路径

5.1 构建统一数据标准体系

风电场的设备来源广泛,通信协议、数据格式、编码方式和接口规则差异较大,数据融合工作往往受到限制。标准体系的构建涵盖数据采集频率、字段结构、接口协议以及质量校验要求,使数据治理工作更具一致性。某些风电场在实施统一标准后,原本分散在各系统中的数据得以汇聚到同一平台,智能分析模型能够获得更加完整的输入,预测精度与可靠性得到提升^[5]。

5.2 完善系统架构与平台建设

风电场的数智化需要平台化支撑,使物联网采集、人工智能分析、安全监测和运维管理形成统一体系。完善系统架构需要在边缘侧、场站侧和云端之间建立明确分层,使各类计算任务合理分布。边缘侧负责实时数据处理,场站平台承担运维管理和策略执行,云端进行大规模数据计算和模型训练。统一架构形成后,各子系统之间的联动性增强,调度、巡检、设备控制等业务流程更顺畅。某数字平台建设完成后,风机运行数据、设备健康信息和环境监测结果能够在同一界面呈现,管理人员的决策效率显著提升。

5.3 推动技术与业务深度融合

人工智能与物联网的价值只有在实际业务场景中落地才能体现。风机结构、场址风况、地形条件和运维

流程差异明显,统一模型往往难以满足需求。推动深度融合需要在风机控制、故障预测、智能巡检、发电优化等环节开展场景化设计,使算法与业务逻辑形成对应关系。各类人员在技术应用中不断积累经验,也会推动模型持续完善。某风电场在优化发电策略时,将风机叶片特性、历史功率曲线和运维周期纳入模型,使策略输出更加贴近实际工况,发电量得到稳定提升。

5.4 建立持续迭代的创新机制

风电场的数智化建设具有长周期属性,硬件设备、软件平台和智能模型都需要不断更新。创新机制的建立需要包括算法迭代、系统升级、人员培训和项目评估等环节,使风电场在长期运行中保持活力。某风电场建立年度技术评估制度后,风机监测系统、安全策略和数字平台每年都会进行一次全面复审,使潜在问题被及时发现。

6 结论

人工智能与物联网的融合加速了风电场的数智化进程,使风电设备管理、运行优化与安全保障能力迈上新台阶。统一的数据体系、先进的智能模型及完善的平台架构推动风电场形成精细化、自动化和协同化的管理模式。

参考文献

- [1]张康革.基于人工智能的风电运维智能调度系统设计与实现研究[J].电气技术与经济,2025,(09):119-121.
- [2]文飞.风电场智慧运维管理探讨[J].价值工程,2025,44(28):74-76.
- [3]王广瑜.风电运维技术现状与智能化发展趋势[C]/中国农业机械工业协会风能装备分会.第十二届中国风电后市场交流合作大会论文集.嘉泽新能源股份有限公司;,2025:148-152.
- [4]张挺仑,朱建成,燕艳芬,等.基于无人机自主智能巡检的风电场数智化运维研究[C]//中国电子企业协会.发电企业数智技术创新典型案例及论文集(2025).北流望江风电有限公司;,2025:205-208.
- [5]罗潇远.基于人工智能的海上风电功率超短期预测研究[D].贵州大学,2025.

作者简介:解锡伟,(1985.2-),男,辽宁抚顺人,汉族,中级,本科,研究方向:风电场数智化改造。