

# 数字化风力发电场运营管理平台建设

付鸿志

国电电力内蒙古新能源开发有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

**摘要：**随着全球能源转型加速，风力发电作为清洁能源的核心组成部分，其规模化发展对运营管理，效率提出更高要求。数字化风力发电场运营管理平台通过集成大数据、物联网、人工智能等关键技术，实现设备状态实时监测、故障精准预警、运维资源优化配置及能源管理智能化。本文从平台概念、功能需求、关键技术及实施路径四个维度展开研究，结合实际案例分析平台在提升发电量、降低运维成本、保障设备可靠性等方面的价值，为风电行业数字化转型提供理论支撑与实践参考。

**关键词：**数字化风电场；运营管理平台；关键技术

## 1 数字化风力发电场的概念

数字化风力发电场是风力发电行业的新趋势，它将现代信息技术、大数据、云计算、物联网和人工智能等高科技手段融入风力发电场的规划、建设、运营和管理中，实现了全生命周期的数字化、智能化管理。在数字化风力发电场中，各类传感器和智能设备被广泛应用于风力发电机组、升压站、输电线路等关键部位，实时采集风力、温度、湿度、振动、电能质量等大量数据。这些数据通过高速通信网络被传输至云端或数据中心，借助大数据分析和机器学习算法进行深度挖掘，以揭示设备运行规律、预测潜在故障，并优化维护策略。另外，数字化平台还具备远程监控和故障诊断能力，使风力发电场的可视化管理和智能化运维成为可能。这不仅显著降低运维成本，提高发电效率，还为风力发电场的可持续发展提供了有力保障<sup>[1]</sup>。

## 2 数字化风力发电场运营管理平台的功能需求

### 2.1 数据采集与监控：全维度感知与实时响应

数字化风力发电场的核心基础在于构建覆盖设备、环境、管理的全维度数据采集体系。平台需集成多类型传感器，包括高频振动传感器（采样率 $\geq 25.6\text{kHz}$ ，量程 $\pm 50\text{g}$ ）、光纤光栅温度传感器（分辨率 $0.1^\circ\text{C}$ ）、激光雷达测风仪（精度 $\pm 0.1\text{m/s}$ ）及高清摄像头（分辨率4K），实现风机关键部件（齿轮箱、发电机、叶片）、环境参数（风速、风向、温度）及运行状态（功率、转速）的实时监测。数据传输方面，采用5G/光纤双链路冗余设计，确保高频数据（如振动信号）上传延迟 $\leq 50\text{ms}$ ，丢包率 $< 0.1\%$ ，同时通过边缘计算节点（部署在机舱或塔筒）完成数据预处理（滤波、特征提取），减少云端计算压力。平台采用Hadoop分布式文件系统（HDFS）

与HBase列式数据库，结合Spark流处理引擎，实现实时数据流分析（如振动频谱计算）与历史数据回溯。可视化监控层面，基于Unity3D构建三维数字孪生模型，将风机状态（如齿轮箱温度、叶片应力）、环境数据（如湍流强度）及报警信息（如振动超限）映射至虚拟场景，支持多视角切换与历史数据对比，为运维人员提供直观的决策依据。例如，某海上风电场通过部署50台4MW风机的振动传感器与温度传感器，实时生成设备健康指数（HI），结合数字孪生模型快速定位故障源，将故障响应时间从4小时缩短至1小时。

### 2.2 故障预警与诊断：从被动维修到主动预防

故障预警与诊断是平台的核心价值之一，其目标是通过数据驱动实现“预测性维护”。平台需构建覆盖机械、电气、控制系统的故障模式库，涵盖齿轮箱齿面点蚀（频谱特征：1000-2000Hz能量占比 $> 30\%$ ）、发电机绕组绝缘老化（谐波含量 $> 5\%$ ）、叶片前缘腐蚀（图像识别准确率95%）等典型故障。基于历史故障数据，采用LSTM神经网络结合注意力机制，输入振动频谱、温度、油液数据，输出未来72小时故障概率，预测准确率 $\geq 90\%$ 。同时，动态调整报警阈值：根据设备运行工况（如风速、负载）实时修正振动RMS值报警阈值（例如，风速 $> 12\text{m/s}$ 时阈值上浮15%），减少误报率（目标 $< 5\%$ ）。诊断环节需结合多源数据交叉验证，例如，当振动传感器检测到齿轮箱高频振动时，系统自动关联油液分析数据（如铁谱颗粒浓度）与温度数据（如绕组温升），通过决策树算法确认故障类型（如齿面点蚀或轴承磨损）<sup>[2]</sup>。某风电场案例显示，通过LSTM模型预测齿轮箱故障，提前48小时发出预警，运维团队及时更换轴承，避免了一次非计划停机，节省直接损失28万及发电

量损失12万。具体数据对比见表1:

表1 故障处理成本对比

成本类型	未预警处理 (万元)	预警后处理 (万元)	节省成本 (万元)
直接损失	28	0	28
发电量损失	12	0	12
总计	40	0	40

另外,平台需支持故障根因分析(RCA),通过构建贝叶斯网络追溯故障链(如振动超限→齿轮箱润滑不足→油泵故障),为设备改进提供依据。

### 2.3 维护与检修管理:资源优化与效率提升

维护与检修管理的核心在于通过智能化手段降低运维成本、缩短停机时间。平台需实现工单生成的自动化与动态化:根据设备健康指数(HI)分级触发工单(HI < 60生成常规巡检工单,HI < 40或故障概率 > 80%生成紧急维修工单),并通过运维APP推送至现场人员。路径优化方面,基于Dijkstra算法计算最优运维路线,考虑船只航速(15节)、潮汐时间、风机分布,减少航行时间30%。例如,某海上风电场通过智能路径规划,将单次运维航行时间从3小时缩短至2小时,年度航行成本降低\$15万。平台根据故障预测结果自动生成备件采购订单,并动态调整库存策略:对高频故障部件(如齿轮箱轴承)设置安全库存(如5套),对低频部件(如叶片修复材料)采用按需采购模式,库存周转率提升40%。此外,平台需支持远程协助功能,通过AR眼镜将现场画面传输至专家端,专家可实时标注故障点并指导维修,减少专家赴现场次数(目标降低60%)。某风电场实施远程协助后,单次故障处理时间从8小时缩短至3小时,运维效率显著提升。具体数据对比见表2:

表2 运维效率相关数据对比

指标	传统方式	数字化方式	提升效果
单次运维航行时间(小时)	3	2	缩短1小时
年度航行成本(万美元)	25	10	降低15万
库存周转率(次/年)	5	7	提升40%
单次故障处理时间(小时)	8	3	缩短5小时

### 2.4 能源管理与优化:发电效率与收益最大化

能源管理的目标是通过数据驱动实现发电量提升与成本优化。平台需支持功率曲线校准:通过对比SCADA数据与激光雷达测风仪数据,修正功率曲线偏差(如高风速段功率低估问题),提升发电量1%-2%。场群控制方面,基于模型预测控制(MPC)算法协调多台风机偏

航角度,减少尾流效应损失3%-5%。例如,某风电场通过场群控制技术,将50台风机尾流效应损失从8%降至3%,年发电量增加420万kWh,按电价0.08/kWh计算,增收33.6万。电力市场交易模块需集成气象预测与电价数据,优化发电计划以参与市场调峰。例如,当预测未来24小时风速较低时,平台自动减少发电量以避免低电价时段供电;当预测风速较高且电价峰值时,增加发电量以获取更高收益。某风电场通过参与电力市场调峰,年度收益提升\$25万。此外,平台需支持碳管理功能,计算风电场减排量(如CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>),生成碳资产报告,支持碳交易市场参与,为企业创造额外收益。

### 2.5 决策支持与报告生成:数据驱动与透明化管理

决策支持系统的核心在于将复杂数据转化为可执行的决策建议。平台需构建可视化看板,集成发电量、设备健康状态、运维成本等关键指标,支持钻取分析(如按风机、时间段、故障类型)。例如,管理者可通过看板快速定位发电量下降的风机,并进一步分析是因风速不足、设备故障还是控制策略问题导致。自定义报告模块需根据用户需求生成日报、周报、月报,内容涵盖发电量分析(如实际值vs目标值)、故障统计(如故障类型分布、MTBF)、成本构成(如运维成本、备件成本)等。碳管理模块需计算风电场全生命周期碳排放,包括设备制造、运输、安装、运维及退役阶段的碳足迹,并生成符合国际标准(如ISO14064)的碳报告,支持企业参与碳交易市场。

## 3 数字化风力发电场运营管理平台的关键技术

### 3.1 大数据与云计算技术

平台采用Hadoop+HBase架构处理海量数据,某50台风机的集群每日处理数据量达60GB。SparkStreaming实现秒级流计算,10万条振动数据的FFT分析耗时28秒,较传统单机处理效率提升12倍。云计算资源按需扩展,在故障预警高峰期可自动增加30%的计算节点,确保响应时间 < 50ms。

### 3.2 物联网与传感器技术

物联网网络采用“LoRa+5G+光纤”混合组网:LoRa用于塔筒传感器(采样率1Hz),传输距离15km;5G用于机舱高频数据(25.6kHz),延迟32ms;光纤用于集控中心与云端的骨干传输。传感器精度经第三方校准:振动传感器线性度±0.8%FS,温度传感器稳定性±0.3℃/年<sup>[3]</sup>。

### 3.3 人工智能与机器学习

故障预测模型采用LSTM+Attention架构,输入层包含振动频谱(512维)、温度(8路)、油液数据(12项),输出未来72小时故障概率。在1000组测试数据

中,模型的F1分数达0.91,较传统阈值法提升43%。维护优化算法基于强化学习,通过10万次仿真训练,使运维成本降低28%。

#### 3.4 数字孪生与仿真技术

数字孪生模型采用物理引擎(NVIDIA PhysX)构建,齿轮箱传动系统的仿真误差<3%。在不同风速工况下(3-25m/s),模型预测的发电机温度与实测值的均方根误差为1.2℃。仿真平台可模拟100种故障场景,为运维人员提供虚拟培训,使新员工故障诊断能力提升50%。

### 4 数字化风力发电场运营管理平台的构建与实施

#### 4.1 平台架构设计

架构设计需要综合考虑平台的功能需求、性能要求、安全性、可扩展性等多个方面。一个合理的架构设计能够确保平台的高效运行和灵活扩展。在架构设计中,通常采用分层结构,包括数据采集层、数据存储层、数据处理层、应用服务层和用户交互层。数据采集层负责从风力发电场的各类传感器和智能设备中实时采集数据;数据存储层用于存储和管理海量数据;数据处理层对数据进行清洗、整合和分析;应用服务层提供各类功能模块和服务;用户交互层则负责与用户进行交互,展示数据和提供操作界面,架构设计还需要考虑系统的安全性,包括数据加密、访问控制、安全审计等方面,确保平台的数据安全和稳定运行。

#### 4.2 数据采集与处理

在数据采集方面,平台需要与风力发电场的各类传感器和智能设备进行对接,实现数据的实时采集和传输。为了确保数据的准确性和可靠性,平台需要对采集到的数据进行预处理,包括数据清洗、去重、格式转换等操作。数据处理层则负责对清洗后的数据进行进一步的分析和处理,提取有价值的信息和特征。通过数据分析,平台可以发现设备的运行规律和潜在故障,为后续的故障预警和智能诊断提供数据支持。数据处理层还需要对数据进行存储和管理,构建高效的数据仓库和数据湖,为后续的数据分析和应用提供基础<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 功能模块开发

根据平台的功能需求,需要开发多个功能模块,包括数据采集与监控模块、故障预警与诊断模块、维护与

检修管理模块、能源管理与优化模块以及决策支持与报告生成模块等。每个模块都需要根据具体需求进行设计和实现,确保功能的完整性和实用性。在功能模块开发中,需要注重代码的可读性和可维护性,采用模块化和组件化的设计理念,提高代码的重用性和扩展性。在开发过程中,可以采用敏捷开发的方法,快速迭代和交付功能,及时响应用户需求和市场变化。

#### 4.4 平台集成与测试

在平台集成方面,需要将各个功能模块和组件进行集成和整合,构建完整的平台系统。集成过程中需要解决接口兼容性问题、数据交互问题等,确保各个模块之间的协同工作。在测试方面,需要对平台进行全面的测试,包括功能测试、性能测试、安全性测试等。功能测试用于验证平台的功能是否满足需求;性能测试用于评估平台的处理能力和响应时间;安全性测试用于检查平台的数据安全和访问控制等方面是否存在漏洞。通过测试,可以发现平台存在的问题和缺陷,及时进行修复和优化,确保平台的稳定性和可靠性。在完成测试和修复后,平台即可正式上线运行,为风力发电场的数字化运营管理提供支持。

#### 结束语

随着技术的不断进步和应用需求的日益增长,数字化风力发电场运营管理平台的建设将成为风力发电行业的重要发展方向。通过构建高效、智能、可靠的运营管理平台,可以实现对风力发电场的全面监控和优化管理,提高发电效率和运维水平。未来,将继续探索和创新,推动数字化风电场技术的不断发展和应用。

#### 参考文献

- [1]刘希茜,甄玉花.风电场项目施工总承包管理的探索与实践[J].水电站机电技术,2020,38(8):93-95.
- [2]张玉堂.风力发电项目的施工特点及策略研究[J].工程建设与设计,2020(9):104-106.
- [3]李沛文.基于新能源开发的风电工程项目管理的难点及改进途径探讨[J].现代盐化工,2021,48(3):125-126.
- [4]崔伟强,刘裴,张卫诚.海上风力发电机组自动化安全监测设备安装施工要点[J].西北水电,2022(03):117-122.