

基于数字孪生的风电场全景感知关键技术应用探讨

陈亮

辽宁大唐国际新能源有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18932

[摘要] 随着风电产业规模与复杂度提升,传统风电场感知体系面临数据碎片化、信息整合不足、预测精度有限等挑战。数字孪生技术通过构建物理实体的动态虚拟镜像,实现虚实双向映射与实时交互,为风电场全景感知提供系统性解决方案。基于此,本文首先探讨了数字孪生在风电场中的重要价值,包括支撑多维度数据整合、驱动动态场景可视化、提升运行状态预测精度等;进而分析了基于数字孪生的关键技术应用,如全要素模型构建、多源异构数据采集传输、AI融合异常识别、虚实闭环控制等。研究表明,数字孪生技术可赋能风电场精细化运维、高效能发电及全生命周期安全管控,对推动风电产业智能化升级、优化运营效率具有重要意义。

[关键词] 数字孪生; 风电场全景感知; 动态场景可视化; 技术应用

中图分类号: TM925.11 **文献标识码:** A

Discussion on the Application of Key Technologies for Panoramic Perception of Wind Farms Based on Digital Twin

Liang Chen

Liaoning Datang International New Energy Co., Ltd.

[Abstract] With the increasing scale and complexity of the wind power industry, traditional wind farm perception systems are encountering significant challenges, including data fragmentation, inadequate information integration, and limited prediction accuracy. Digital twin technology enables the creation of a dynamic virtual replica of physical entities, facilitating bidirectional mapping and real-time interaction between physical and digital domains, thereby offering a systematic solution for achieving panoramic perception in wind farms. This paper first examines the transformative potential of digital twin technology in wind farm applications, particularly in enabling multidimensional data integration, supporting dynamic scene visualization, and enhancing the precision of operational status forecasting. Subsequently, it analyzes key technological components underpinning digital twin-based systems, including comprehensive modeling, multi-source heterogeneous data acquisition and transmission, artificial intelligence-integrated anomaly detection, and virtual-physical closed-loop control. The findings indicate that digital twin technology can significantly enhance refined operation and maintenance, improve power generation efficiency, and support full-lifecycle safety management in wind farms, thus playing a pivotal role in advancing the intelligent transformation of the wind power sector and optimizing overall operational performance.

[Key words] digital twin; panoramic perception of wind farms; dynamic scene visualization; technology application

引言

随着全球能源转型进程加速,风电作为清洁能源的核心组成部分,装机容量持续攀升,风电场规模与系统复杂度显著提升。传统风电场感知体系存在数据碎片化严重、多维度信息整合能力不足、运行状态预测精度有限等问题,难以支撑精细化运维、高效能发电及全生命周期安全管控的需求。数字孪生技术

通过构建物理实体的动态虚拟镜像,实现虚实双向映射与实时交互,优势在于整合多源异构数据、动态模拟复杂运行场景、精准预测设备与系统状态,从而赋能风电场全景感知能力的系统性提升。在此背景下,深入探讨基于数字孪生的风电场全景感知关键技术应用显得尤为必要,对推动风电产业智能化升级、优化风电场运营效率而言意义重大。

1 风电场全景感知中数字孪生技术的重要价值

1.1 数字孪生对风电场多维度数据整合的支撑作用

风电场运行涉及风机状态、气象条件、电网参数等多类异构数据,其中风机状态包含振动、转速、油温、轴承温度等机械与电气参数,气象条件覆盖风速、风向、大气温度、湿度、气压等环境指标,电网参数涉及电压、电流、频率、功率因数等输电数据。传统体系下这些数据分散存储于不同系统,数据格式不兼容、更新频率不一致、跨系统调用延迟高,难以形成有效联动。数字孪生构建的虚拟镜像作为数据中枢,可将传感器采集的实时参数、历史运维记录、环境影响评估数据等各类信息聚合为统一的时空数据库^[1]。数据不再孤立存在,而是经过清洗、标准化处理后与虚拟模型的物理实体精准绑定,形成完整的数据链条,实现风电场全要素数据的共享与联动,并且将不同时间戳的多源数据匹配到同一时间维度,将不同位置的设备数据映射到三维空间坐标,为全景感知提供坚实的数据基础。

1.2 数字孪生驱动风电场动态场景可视化的实现路径

虚拟模型以1:1比例还原风电场的物理布局,不仅包含风机、升压站、输电线路等关键设施,还融入地形地貌、植被分布、周边建筑等地理信息,甚至细化到设备内部结构如叶片截面、齿轮箱组件、发电机绕组等细节。实时数据与虚拟模型动态关联,采用低延迟同步协议确保虚拟场景与物理场的延迟控制在毫秒级。设备运行状态通过颜色编码、参数叠加、动画演示等方式直观展示,例如用红色标注超温部件、用曲线叠加显示参数变化趋势、用闪烁效果提示异常状态。管理人员可通过三维场景进行缩放、旋转、分层查看,切换不同监测维度如电气参数、机械状态、环境影响等,快速定位设备位置,查看关键参数变化,理解风电场整体运行态势。

1.3 数字孪生提升风电场运行状态预测精度的核心机制

虚拟镜像不仅复制物理实体的静态结构,更模拟其动态行为与演化规律,包含流体力学模型模拟风场分布、结构力学模型模拟叶片变形、热力学模型模拟设备散热、电磁学模型模拟电气传输等多领域物理模型。整合时序数据与物理仿真算法,数字孪生能精准预测设备的性能变化与故障风险^[2]。物理模型约束数据驱动模型的输出范围,避免出现不符合物理规律的预测结果;数据驱动模型修正物理模型的参数偏差,适应设备老化、环境变化等动态因素。对风机叶片的疲劳寿命进行量化分析,结合材料特性与历史载荷数据推算剩余使用寿命;对齿轮箱的温度变化趋势进行预判,融合热传导模型与实时温度数据识别潜在故障。预测结果不再依赖单一数据来源,而是基于多维度信息的综合推演,误差范围显著缩小。

2 基于数字孪生的风电场全景感知关键技术应用

2.1 构建风电场全要素数字孪生模型

构建风电场全要素数字孪生模型需遵循分层建模、动态校准、场景映射的实施逻辑。首先进行多尺度模型构建,针对风机核心部件采用三级建模体系。微观层以CATIA完成齿轮箱齿面微米级拓扑重构,还原齿面磨损与点蚀缺陷;中观层通过Abaqus

进行非线性接触分析,模拟润滑膜厚度与微动磨损效应;宏观层结合LSTM神经网络建立剩余寿命预测模型,每秒整合12类传感器的十万级数据点。地形与风场模型则融合GIS地理信息与三维地形数据,实现风机布局与周边环境的空间化映射。

模型校准需依托边缘计算节点实时采集的数据动态修正参数,主要采用卡尔曼滤波算法,将风机振动、油温等传感器数据与虚拟模型参数进行匹配,确保虚拟镜像与物理设备状态偏差控制在5%以内^[3]。在实验室环境中开展虚实交互验证,模拟齿轮箱轴承失效场景,通过物理设备与数字孪生同步运行,验证模型预测精度达92%以上时方可投入实际应用。

场景映射环节需实现物理场动态变化的实时同步,建立低延迟数据同步机制,将风机转速、发电量等运行数据以毫秒级频率更新至虚拟模型。针对叶片变形、塔架振动等动态过程,采用动画演示与参数叠加方式,在虚拟场景中直观呈现设备状态演变。管理人员可基于三维场景缩放与分层查看,快速定位异常部件的空间位置与参数变化趋势。

2.2 部署多源异构数据实时采集与传输网络

部署多源异构数据实时采集与传输网络需从传感器布局、边缘处理、通信链路三个维度推进。首先,传感器布局需覆盖风机核心部件与环境监测点。叶片部位安装应变仪监测载荷变形,采样频率设置为100Hz;塔架与机舱部署加速度计测量振动,采样间隔10ms;风场区域设置超声波风速风向仪,每秒钟采集一次数据;升压站与输电线路安装功率传感器与电压电流监测装置,实时记录电网参数^[4]。

其次,边缘处理环节需在风场现场部署边缘计算节点。节点搭载PLC与树莓派设备,对原始数据进行滤波、降维处理。例如,对风机振动数据采用小波变换去除噪声,将1GB原始数据压缩至50MB以内,减少传输带宽消耗。边缘节点还需执行初步特征提取,识别叶片应变异常、塔架振动超限等关键信号,为后续云端分析提供预处理数据。

最后,通信链路优化需选择适配风场场景的传输协议与网络架构。风机与边缘节点之间采用OPC UA协议,确保工业级数据传输可靠性;边缘节点与云端平台通过MQTT协议实现低功耗数据上传。海上风场等偏远区域部署5G基站,结合边缘云协同架构,将数据回传延迟控制在200ms以内。陆上风场则采用光纤与无线混合网络,优先保障关键设备数据的实时传输。

2.3 应用边缘计算实现孪生场景低延迟交互

第一,硬件部署需适配风场环境特性。每台风机机舱内部署工业级边缘计算节点,选用抗振动、耐高温的网关设备,搭载4核CPU与8GB内存,支持100Hz采样频率的传感器数据处理。节点配备1TB本地存储模块,用于临时缓存实时采集的振动、温度等数据,避免网络中断导致的数据丢失。海上风场节点需额外增加抗盐雾涂层,陆上风场节点则强化防尘设计,确保设备在极端环境下稳定运行。

第二,任务调度需区分优先级。紧急任务如振动数据实时分析、异常信号本地预警,分配至边缘节点执行,执行时间控制在

20ms以内。非紧急任务如模型参数更新、全局数据统计,交由云端处理。边缘节点内置任务队列管理系统,按照任务类型自动排序,优先响应高优先级指令,确保关键操作不被延迟。

第三,协同机制需优化数据传输效率。边缘节点仅上传异常数据与关键特征,数据压缩率达90%,减少带宽消耗。云端接收数据后,同步更新孪生模型的状态参数,确保虚拟场景与物理场的延迟控制在200ms以内^[5]。建立边缘缓存机制,缓存风机核心部件的孪生模型片段与常用监测维度的可视化模板,减少模型加载与数据传输时间。

2.4 融合AI算法优化风电场异常状态识别

第一,针对风场典型异常类型场景化建模。以齿轮箱螺栓松动为例,构建振动特征库,包含20Hz至50Hz的频率变化区间、3-5℃的温度升高范围等关键指标。针对叶片结冰异常,整合气象数据与叶片振动数据,建立结冰厚度与振动频率的关联模型。每个异常类型对应独立的特征提取规则,确保模型能精准捕捉不同故障的信号特征。

第二,结合物理与数据模型优势分层推理。边缘节点部署轻量级CNN模型,实时提取振动数据特征,快速识别潜在异常。云端运行多物理场耦合模型,验证边缘节点输出结果的合理性。两者结果交叉验证,异常识别置信度达95%。边缘模型聚焦实时性,云端模型聚焦准确性,形成互补的推理体系。

第三,动态迭代保持模型适应性。每月收集边缘节点的新异常数据,在云端进行模型微调,加入风速、温度等环境变量的权重调整。微调后的模型通过OTA方式下发至边缘节点,确保识别精度持续优化。建立模型版本管理系统,记录每次更新的参数变化与效果评估,为后续迭代提供参考依据。

2.5 建立孪生系统与物理场闭环控制流程

感知层数据实时同步是闭环控制的基础。对风机叶片驱动电机安装扭矩传感器,采集角度调整数据,通过5G专网传输至孪生系统模型驱动模块。虚拟风机叶片角度同步更新,误差控制在0.5°以内。升压站开关柜部署电流电压监测装置,每10ms采集一次数据,实时反馈至虚拟模型的电气参数模块。风场环境监测点的超声波风速仪数据,每秒传输至孪生系统的气象仿真单元。

虚拟模型动态驱动需结合多物理场仿真。根据实时风速数据,模型仿真不同叶片角度下的发电效率。以风速12m/s为例,模型计算叶片角度从15°调整至20°时的功率变化,生成最优角度建议。升压站虚拟模型根据电网需求,仿真功率分配方案,

模拟不同开关柜组合下的输电损耗。仿真过程调用流体力学、电磁学等模型,确保结果符合物理规律。

仿真决策输出采用标准化接口。孪生系统生成的叶片调整指令,依托OPC UA协议下发至风机控制器。升压站优化方案通过Modbus协议传输至开关柜执行单元。指令包含执行时间、参数范围等约束条件,确保设备安全运行。运维人员可通过三维场景查看指令执行进度,确认关键参数变化。

物理场执行反馈完成闭环验证。叶片调整后,应变仪采集变形数据,回传孪生系统对比仿真结果。若实际发电效率与仿真偏差超过5%,模型自动修正参数。升压站执行指令后,功率传感器采集输电数据,验证损耗是否降低。反馈数据存储至历史数据库,用于模型迭代优化。

3 结束语

数字孪生技术为风电场全景感知带来了革命性的变革,打破了传统感知体系的局限,实现了从数据碎片化到全要素整合、从静态监测到动态可视化、从经验判断到精准预测的跨越。通过构建全要素模型、优化数据采集传输、融合AI算法、建立虚实闭环控制等关键技术应用,风电场的运维效率与发电效能得到显著提升,为清洁能源的可持续发展注入新动力。在技术的迭代与创新的当下,数字孪生将进一步深化与风电场各环节的融合,拓展至更复杂的场景,如极端天气应对、跨区域风场协同等,持续推动风电产业向更高质量、更智能的方向迈进。

[参考文献]

- [1]李亚州,王昊天,任建强,等.数字孪生技术在智慧风电场中的应用[J].电子技术,2024,53(08):124-126.
- [2]罗纯坤,陈超,陈李,等.数字化技术在深远海风电机组运维中的应用与展望[J].太阳能学报,1-18.
- [3]孙华高,王洪峰,高志光,等.风电场全景数据感知与数据标准化技术研究[J].中国高科技,2025,(19):68-70.
- [4]徐松.数字孪生技术在海上风电场运维中的应用研究[J].产品可靠性报告,2025,(08):110-111.
- [5]渠叶君.数字化转型背景下智能风电场建设路径研究[J].信息与电脑(理论版),2024,36(10):28-30+34.

作者简介:

陈亮(1983-),男,汉族,四川资阳人,本科,高级工程师,研究方向:新能源。