

# Digital twin based wind turbine life cycle health management technology

Yuntao Sun

China Power Investment Xinjiang Energy & Chemical Group Mulei New Energy Co., Ltd., Changji, Xinjiang, 831900, China

## Abstract

As a pivotal force in clean energy development, wind power generation is accelerating progress toward the “dual carbon” goals. Wind turbines operate in complex environments where traditional maintenance models face challenges such as data silos and delayed responses in condition monitoring, fault prediction, and operational decision-making. Digital twin technology provides innovative solutions for lifecycle health management of wind turbines by enabling real-time mapping between virtual models and physical systems, achieving multi-source data integration, dynamic health assessment, and intelligent decision support. This paper examines application models and advantages of digital twin technology in wind power, establishing an integrated health management system encompassing structural modeling, condition monitoring, and predictive maintenance. Case studies demonstrate its effectiveness in improving fault detection rates, maintenance efficiency, and cost-effectiveness. The paper also outlines key technologies and future development directions.

## Keywords

digital twin; wind turbine; whole life cycle; health management; intelligent operation and maintenance; fault diagnosis

# 基于数字孪生的风力发电机组全生命周期健康管理技术

孙允陶

中电投新疆能源化工集团木垒新能源有限公司, 中国·新疆 昌吉 831900

## 摘要

风力发电作为清洁能源发展的关键力量,正加速推进“双碳”目标实现。风电机组运行环境复杂,传统运维模式在状态监测、故障预警、运维决策等方面存在数据孤岛与响应滞后等问题。数字孪生技术为风电机组全生命周期健康管理提供新路径,借助虚拟模型与物理系统的实时映射,实现多源数据集成、动态健康评估和智能决策支持。本文梳理数字孪生技术在风电领域的应用模式与优势,构建结构建模、状态监测、预测维护等为一体的健康管理体系,并通过典型案例验证其在提升故障识别率、维护效率与经济性方面的效果,展望关键技术与未来发展方向。

## 关键词

数字孪生; 风力发电机组; 全生命周期; 健康管理; 智能运维; 故障诊断

## 1 引言

随着全球可再生能源战略推进,风力发电装机容量迅速增长,成为我国清洁能源的重要支柱。然而,风电机组服役周期长、运行环境复杂,主轴、齿轮箱等关键部件易受损,传统依赖巡检与经验维护的模式难以及时发现隐患与优化策略,影响设备可靠性与运维效率。数字孪生技术为风电机组健康管理提供新路径,依托物理与虚拟系统融合,实现运行状态可视化、健康评估精准化、故障预测智能化与决策支持科学化。本文聚焦数字孪生在风电机组全生命周期健康管理中的关键技术、系统构建与实践应用,探讨其对风电行业

智能化转型的推动作用。

## 2 数字孪生技术及其在风力发电机组健康管理中的理论基础

### 2.1 数字孪生技术原理与体系架构

数字孪生是指通过高保真建模、物理仿真与数据驱动,将物理实体与虚拟模型实现全息映射与动态联动。其核心包括物理实体(风电机组)、虚拟模型、数据流通与集成、服务应用四大模块。通过感知层(传感器、物联网)、数据层(边缘计算、云平台)、模型层(力学仿真、AI建模)、应用层(健康评估、维护优化)等环节,实现物理—虚拟间的信息闭环。

风力发电机组的数字孪生体系通常包括机组结构建模、部件级健康状态映射、运行工况模拟、历史数据与实时数据的多模态融合,以及智能诊断与维护决策模块。体系可实时

【作者简介】孙允陶(1991-),男,中国河南新乡人,本科,工程师,从事电力行业 新能源研究。

反映机组全生命周期各阶段(设计、制造、运行、维护、退役)的健康状态与风险变化,支撑全周期智能管理。

## 2.2 风电机组全生命周期健康管理的内涵

风力发电机组全生命周期健康管理是在设备从设计到退役的全过程中,基于状态监测与智能评估,对机组运行工况进行动态感知与趋势分析,掌握关键部件健康状态,识别潜在风险,提前预警故障,优化检修策略,提升运行可靠性与经济性。该管理模式不仅能降低非计划停机和运维成本,还通过长期数据积累支持设计与制造优化,形成“设计—运维—改进”闭环,推动风电设备向更高水平的智能化与高效化发展。

## 2.3 数字孪生赋能风电机组健康管理的核心优势

数字孪生技术将物理模型、数据模型与 AI 算法深度融合,具备全周期、全要素、全流程健康管理能力。具体优势体现在:

**状态监测智能化:** 实时采集振动、温度、电流、应力等多源数据,动态反映设备实际运行状态。

**健康评估精准化:** 结合物理机制模型与机器学习算法,实现部件级健康指数与寿命预测。

**故障诊断与预测性维护:** 基于历史失效数据和模型推演,及时识别异常、预警故障,优化检修时机。

**运维决策科学化:** 集成多种决策模型,为巡检计划、备件管理、运维资源配置提供量化依据。

**全生命周期数据闭环:** 打通设计、制造、运维各环节,实现知识沉淀与持续优化。

## 3 基于数字孪生的风力发电机组健康状态建模与监测技术

### 3.1 多源数据融合与动态感知系统

风电机组健康监测依赖于多维传感器与边缘设备,实现结构应力、轴承振动、齿轮箱温度、电气参数等高频数据的采集。基于无线传感网络与物联网平台,实时汇集并清洗多源异构数据,为数字孪生模型输入高质量数据流。采用主成分分析(PCA)、小波变换等数据预处理方法,提升数据可靠性,降低噪声与冗余。

在多源数据融合基础上,构建机组全息感知体系,对关键部件、运行环境、外部工况进行动态监测。通过数据驱动与物理机制融合,增强健康状态的精确建模与异常感知能力。

### 3.2 虚拟—物理—一体化健康状态建模

数字孪生健康状态建模包括机理建模、数据建模与混合建模三类方法。

**机理建模:** 依据力学、电气、热工等原理,构建主轴、叶片、齿轮箱等关键部件的物理模型,反映失效机理与性能衰减规律。

**数据建模:** 基于大数据与人工智能,利用回归分析、

神经网络、深度学习等算法,从运行数据中提取健康特征与故障模式。

**混合建模:** 融合机理与数据模型,实现模型参数自适应优化和精度提升,兼顾解释性与泛化性。

健康状态建模为后续故障诊断与剩余寿命预测提供基础,实现数字孪生系统对设备全周期健康状态的动态跟踪。

### 3.3 异常检测与故障诊断智能算法

数字孪生健康管理通过集成智能算法,实现对风电设备运行状态的动态感知与故障识别。系统可利用异常值趋势变化进行早期预警,借助机器学习模型识别多类故障特征,并结合深度学习方法对关键部件的剩余寿命进行预测,从而优化检修节奏与资源配置。算法在持续运行中不断迭代学习,逐步适应不同场站环境与机组差异,提升故障识别的准确性与健康评估的稳定性,为风电设备提供更加可靠、高效的智能运维支持。

## 4 基于数字孪生的风电机组全生命周期智能运维优化

### 4.1 运维决策支持与检修策略优化

数字孪生系统通过对风电机组关键部件的运行状态实时监控与预测建模,为运维管理提供科学的决策支持。系统融合多维度评估模型,包括健康指数评估、剩余寿命预测和故障概率分析,可动态制定设备检修优先级,指导运维资源的精准调度。在此基础上,系统可对齿轮箱、主轴、发电机轴承等关键部位实施“按需维护”策略,兼顾预防性与预测性维护模式,有效避免过度检修与维修滞后,提高维修经济性与计划性。平台还集成运维成本分析、风险评估、备件库存管理等模块,帮助运维单位在风险最小化的前提下实现成本最优化配置。

### 4.2 全生命周期数据闭环与经验知识积累

数字孪生平台不仅服务于风电机组运行阶段,更通过贯穿设计、制造、调试、运维及退役全过程的数据流,实现设备全生命周期管理的闭环优化。系统持续采集运行数据、故障数据与维修记录,并通过反馈机制反哺至设计环节,推动机组结构优化与材料选择改进,提升新机型的可靠性与可维护性。平台内嵌的知识图谱与专家规则库,能对历史故障进行智能关联分析,支持相似场景预判与标准化维修建议生成,降低经验依赖。

### 4.3 平台集成与多场景协同应用

高水平数字孪生平台具备良好的开放性与扩展性,能够实现与风电场现有 SCADA 系统、智能巡检机器人、气象预测系统及资产管理系统等平台的高效集成,构建覆盖风电场全链条的智能化管理体系。平台采用“云+边”协同架构,边缘计算节点负责实时数据处理与本地决策,提高响应速度与系统韧性,云端平台则负责全局分析与资源统筹。在多场站应用场景中,平台支持多机组健康状态对比分析、区域运

维任务统一调度及大规模资产风险评估,显著提升集群化运维管理能力。此外,平台可对接能源管理系统(EMS)与市场调度系统,实现发电功率预测、负荷平衡调整及发电计划优化,增强风电场在电力市场的适应能力。未来,平台还可拓展至与储能系统、碳资产管理系统的融合应用,推动风电从单一发电走向智能能源生态协同,构建更加高效、安全、绿色的新能源运维体系。

## 5 典型案例分析与技术应用成效

### 5.1 某沿海风电场数字孪生健康管理应用

在我国东南沿海某大型风电场,运营方为提升设备运维效率与保障发电稳定性,引入了基于数字孪生的风电机组健康管理应用。该系统面向百余台不同型号风电机组展开部署,构建集感知、建模、预测与决策于一体的智能健康管理平台。系统依托叶片应力传感器、振动监测器、温度和油液传感器等多源传感器数据,构建机组全生命周期的虚拟孪生体,实时映射物理设备运行状态。通过数字孪生模型对叶片疲劳、齿轮箱磨损、主轴轴承偏移等关键部位进行动态模拟与健康评估,并结合运行环境参数,如风速、湿度、海盐腐蚀等因素,实时修正模型参数,提升健康状态识别的准确性。系统内嵌机器学习与专家系统算法,能够实现故障根因定位、剩余寿命预测及智能维护时序优化,极大提高运维的科学性与前瞻性。同时,管理平台具备远程可视化与多维数据分析能力,为风电场调度人员提供直观的状态地图与智能预警提示,为构建智慧风电场奠定了坚实技术基础。

### 5.2 健康管理成效对比与经济效益分析

为评估数字孪生系统的实际成效,风电场对系统运行前后的关键运维数据进行了连续三年的跟踪分析与对比研究。结果显示,在数字孪生系统全面部署后,风电机组早期故障识别率提高了30%,其中齿轮箱高温、叶片裂纹等典型故障的检测准确性显著增强。维护响应时间平均缩短40%,从原来的数天缩减至不足48小时,实现运维反应的提效升级。系统通过智能排程,优化了维修时间窗口与人力配置,有效降低了重复检修与紧急停机维护的资源浪费。统计数据显示,风电场整体非计划停机事件减少近一半,机组年均可利用小时数提高约210小时,发电收益显著增加。此外,系统在长期运行中不断积累案例数据和运行知识,已形成覆盖典型故障模式与诊断流程的知识图谱,为新型机组设计提供了可靠的经验基础,也为区域运维策略优化提供数据支撑。经财务测算,项目总投资回收周期控制在2.8年内,预计五年内可带来超千万级别的直接经济收益,展现出数

字孪生在风电健康管理领域的显著投入产出比和广泛推广价值。

### 5.3 存在问题与发展趋势

尽管数字孪生技术已在风电机组健康管理中取得初步成果,但当前仍面临多项挑战,制约其在更大规模、更高层级的应用拓展。首先,不同厂商和不同年代风电机组在接口协议、数据结构与设备性能上的异构性,增加了模型适配与系统集成的复杂度。其次,大量敏感运行数据需通过公网传输至云平台,存在潜在的信息安全与隐私泄露风险,需加强边缘计算与加密传输等安全技术布设。再次,当前孪生模型多数依赖专家经验设定参数与规则,自动建模与自我进化能力不足,难以应对复杂多变的运行场景与极端天气工况。为破解以上瓶颈,未来应重点推进模型自学习、自适应和知识推理等人工智能技术在系统中的深度融合,提升孪生体的智能演化能力。同时,建议推动数字孪生平台向能源互联网、智慧储能、碳排放管理等系统开放接口,实现设备状态、能耗数据与碳资产的联动管理,助力实现风电全生命周期绿色管理与生态协同发展。展望未来,数字孪生将在推动风电行业从“感知驱动”迈向“智能决策”的升级进程中发挥不可替代的核心作用。

## 6 结语

基于数字孪生的风力发电机组全生命周期健康管理技术,是智能运维和高质量发展的重要驱动力。本文从理论基础、关键技术、体系构建、案例实践等层面系统分析了数字孪生在风电机组健康管理中的应用价值。实践表明,数字孪生可有效提升机组健康监测、故障诊断与预测维护水平,实现运维决策的智能化、精细化和经济性提升。未来,需持续深化数据融合、智能算法、平台集成等创新研究,推动数字孪生健康管理技术在风电行业的广泛应用,为清洁能源高效利用和可持续发展提供有力支撑。

### 参考文献

- [1] 荆怀谦.基于数字孪生的风力发电机故障诊断研究[D].长春工业大学,2025.
- [2] 包胜辉,孙文磊,刘涵,等.数字孪生驱动的风力发电机远程监控系统研究[J].太阳能学报,2025,46(01):78-87.
- [3] 王树清,张磊,陈树桥,等.基于数字孪生的双馈风力发电机功率波动平抑系统[J].电子设计工程,2024,32(20):140-143+148.
- [4] 苏东鹏.风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究[D].长安大学,2023.
- [5] 杨嘉龙,王国庆,苏东鹏,等.风力发电机组运维数字孪生系统设计[J].工程机械,2024,55(05):1-4+255.