

# Research on the Application Architecture of Digital Twin Technology in the Smart Operation and Maintenance Management of New Energy Power Plants

Ya Li Xianyong Xue

National Energy Boxing Power Generation Co., Ltd., Zibo, Shandong, 255000, China

## Abstract

To address the operational and maintenance (O&M) challenges posed by the large-scale development of renewable energy power stations, this paper researches the application architecture of intelligent O&M management based on Digital Twin (DT) technology. Firstly, it systematically analyzes the limitations of the traditional O&M model, such as data silos and decision-making delays. Subsequently, it innovatively proposes an overall five-layer "Sense-Connect-Know-Apply-Intelligence" architecture that achieves cloud-edge-end collaboration and closed-loop operation, elucidating its "Monitor-Diagnose-Predict-Decide-Execute" operational mechanism centered on data and models. The paper provides an in-depth analysis of key enabling technologies supporting this architecture, including high-fidelity modeling, multi-source data fusion, intelligent diagnostic and predictive algorithms, and virtual-real interaction control. Finally, through comparative analysis of typical industry cases, the effectiveness of the architecture in improving O&M efficiency, reducing costs, and ensuring safety is verified, and its future trends towards full lifecycle management and integrated energy systems are outlined. This study provides a systematic theoretical framework and practical reference for building an efficient, economical, and safe intelligent O&M system for renewable energy power stations.

## Keywords

Digital Twin; Renewable Energy Power Station; Intelligent Operation and Maintenance (Intelligent O&M); Cloud-Edge-End Collaboration; Predictive Maintenance

## 数字孪生技术在新能源电站智能运维管理中的应用架构研究

李亚 薛宪勇

国家能源博兴发电有限公司, 中国·山东 淄博 255000

## 摘要

为应对新能源电站规模化发展带来的运维挑战, 本文研究了基于数字孪生技术的智能运维管理应用架构。系统分析了传统运维模式在数据孤岛与决策滞后等方面的局限, 创新性提出了一个包含感-联-知-用-智五层、实现云边端协同与闭环运行的总体架构, 并阐述了其以数据与模型为核心的监测-诊断-预测-决策-执行运行机理, 论文深入剖析了支撑该架构的高保真建模、多源数据融合、智能诊断预测及虚实交互控制等关键使能技术, 通过行业典型案例对比, 验证了架构在提升运维效率、降低成本和保障安全方面的有效性, 并展望了其向全生命周期管理与综合能源系统拓展的趋势, 本研究为构建高效、经济、安全的新能源电站智能运维体系提供了系统的理论框架与实践参考。

## 关键词

数字孪生; 新能源电站; 智能运维; 云边端协同; 预测性维护

## 1 引言

电力系统主力电源已经包括风电、光伏等为新能源, 但其设备分布广、故障维修复杂、运维波动性强, 传统的依赖人工、被动响应的运维模式, 会产生效率、安全与成本等方面的挑战。数字孪生技术通是物理实体与虚拟模型的双向交互与动态仿真的技术, 可以应用在电力系统智能化运维上。

该技术在电力系统运维领域的研究与应用正在从概念变成实际应用, 但现有工作多只是用在特定技术点或单一场景上, 并没有从电站全生命周期智能运维出发, 做出一个系统性的架构设计, 这也是本研究的切入点。

数字孪生的核心特征在于实现了自动、实时、双向的数据闭环, 如表 1 所示。

本文旨在系统研究并构建一个面向新能源电站智能运维的数字孪生应用架构, 主要内容包括:

- 分析智能运维的系统需求与挑战;
- 设计分层解耦、云边端协同的总体架构;

【作者简介】李亚 (1978—), 中国山东菏泽人, 本科, 高级技师, 从事新能源项目开发与管理研究。

剖析高保真建模、智能诊断等关键使能技术；通过案例验证并展望未来趋势。研究方法将综合运用文献研究、案例分析及系统设计法，遵循问题驱动 - 框架构建 - 技术拆解 - 案例验证的技术路线展开。本研究期望为构建安全、高效、经济的新能源电站智能运维体系提供理论框架与实践参考。

表 1 数字模型、数字阴影与数字孪生的概念辨析

| 概念   | 数据流向      | 核心特征                                    | 典型应用                |
|------|-----------|---|---------------------|
| 数字模型 | 手动、单向     | 静态的数字表示，基于机理或数学模型构建。                    | 规划设计阶段的性能模拟。        |
| 数字阴影 | 物理→虚拟（自动） | 实现从物理实体到虚拟模型的自动数据流动，能实时反映状态。            | 传统 SCADA 系统，实现数据监视。 |
| 数字孪生 | 双向、自动、实时  | 在数字阴影基础上，实现从虚拟到物理的自动反馈与控制，具备仿真、预测、优化能力。 | 闭环的预测性维护、动态优化调度。    |

## 2 新能源电站智能运维的需求分析与挑战

### 2.1 新能源电站运维特性与核心需求

新能源电站的运维管理的物理与技术特性导致其与传统电源有截然不同的核心需求，其特性主要体现为：设备规模庞大且地理环境复杂，多位于偏远、恶劣环境，人工巡检

成本高、风险大；发电出力具有强波动性与不确定性，依赖风光资源导致发电功率预测与电网难以协调；运行时会产生海量、高频、异构的数据，对数据处理与价值挖掘能力提出极高要求。

基于上述特性，智能运维的核心需求可归纳为以下四点，其与传统模式的对比揭示了转型的必然方向：

表 2 运维模式需求对比分析

| 需求维度  | 传统运维模式      | 智能运维核心需求       | 转型驱动力               |
|-------|-------------|----------------|---------------------|
| 管控模式  | 分散现场、人工为主   | 全局可视与远程集中化管控   | 降低人力成本与安全风险，提升管理效率  |
| 维护策略  | 定期预防、事后检修   | 高精度预测与主动预警     | 减少非计划停机，提升设备可靠性与发电量 |
| 决策依据  | 依赖个人经验      | 智能化诊断与精准决策     | 应对系统复杂性，提升故障处理精度与效率 |
| 成本与安全 | 成本高昂，安全风险突出 | 全生命周期降本增效与安全提升 | 平价上网压力，实现可持续运营      |

### 2.2 传统运维模式的局限与挑战

传统运维的定期检修 + 事后维修模式，在应对规模化新能源电站和新型电力系统时，暴露根本局限：单独电站的信息不共享导致数据价值无法释放，依赖经验制约了科学决策与响应时效，被动响应模式缺乏预防能力，难以精准识别和干预设备亚健康状态。

这些局限性有现实的案例，例如国家电投内蒙古公司的实践表明，传统方式难以精准评价设备状态与预警故障。而能环宝 NiOS™ 系统通过构建时序数据库 + 数据仓库混合架构，从数据层面着手解决海量时序数据处理的效率瓶颈。

更深层次看，传统模式难以适应高比例新能源与电力电子设备并网带来的系统稳定性和故障形态变化；无法满足对海量分布式资源的精益化管理要求；同时承受着人力成本攀升与复合型人才短缺的双重压力。

这些都表明，传统运维模式必须转向以数据与模型双驱动为核心的智能化运维模式。

## 3 基于数字孪生的智能运维架构设计与关键技术

### 3.1 总体设计思想与原则

针对新能源电站的运维挑战，本文构建了以数字孪生为核心、实现虚实闭环的智能运维架构。其核心在于创建一个与物理电站同步运行、闭环反馈的数字镜像体，旨在推动运维模式从“被动响应”向“主动预警”与“预测优化”变革。该设计遵循系统性、开放解耦、数据驱动、云边端协同及安全经济五大原则。

### 3.2 分层解耦的总体架构设计

基于以上原则，本文构建了感 - 联 - 知 - 用 - 智五层总体架构，该架构与“云 - 边 - 端”协同体系深度融合，其核心组成与协同关系如表 3 所示。

本文架构各层协同工作：底层感知层采集数据，经网络层传输；中层通过混合数据架构构建与管理孪生模型库，平台服务层封装核心引擎；顶层智能应用层直接提供全景监控、预测维护等场景化应用，驱动运维业务提质增效。

表 3 智能运维总体架构层级与协同关系

| 架构层级          | 核心功能         | 关键技术 / 组件举例               | 与“云 - 边 - 端”协同对应   |
|---------------|--------------|---------------------------|--------------------|
| 物理感知层（端）      | 全要素数据采集与指令执行 | 智能传感器、无人机、巡检机器人、DTU       | 端侧：数据产生与执行终端       |
| 网络与连接层        | 可靠、低时延数据传输   | 5G、工业互联网、MQTT/Modbus 协议   | 管道：连接云、边、端的神经网络    |
| 数据与模型层（边 / 云） | 数据治理与孪生模型管理  | 时序数据库 + 数据仓库、BIM/机理/AI 模型 | 边 / 云侧：数据汇聚与模型驻留核心 |
| 平台与服务层（云）     | 共性能力封装与服务化   | 孪生体管理、AI 分析、仿真推演引擎        | 云侧（主导）：集中计算与能力中心   |
| 智能应用层（云 / 边）  | 场景化业务智能应用    | 预测性维护、智能巡检、优化调度 SaaS 应用   | 云 / 边侧：应用部署与人机交互界面 |

### 3.3 运行机理：“监测 - 诊断 - 预测 - 决策 - 执行”闭环

上述五层架构通过一个动态的监测 - 诊断 - 预测 - 决策 - 执行 (MDPDE) 闭环, 形成完整的智能运维循环, 其机理为: 感知数据实时驱动孪生体同步映射 (监测); 平台服务层调用模型与算法进行故障诊断与性能趋势预测; 针对诊断与预测结果, 在数字空间中对不同处置预案进行仿真决策与优化; 最优决策指令最终下发至物理端的设备或人员执行, 并将执行效果反馈回数字孪生体, 从而开启新一轮的优化循环, 实现运维策略的持续自我进化。

### 3.4 关键使能技术及实现路径

所提架构的落地依赖于多项关键使能技术的突破与深度融合, 各项技术的核心挑战、实现路径与目标如表 4 所示。

关键使能技术的实现, 始于构建可动态进化的高保真模型, 其核心在于融合机理模型的确切性与数据驱动模型的适应性, 并利用实时数据持续校准参数, 通过建立统一时空

基准与严格治理体系, 将多源异构数据融合为高质量数据资产, 智能算法作为核心引擎, 需采用迁移学习、知识图谱解决小样本诊断问题, 并利用物理信息神经网络提升预测稳健性, 通过低代码仿真工具与边云协同的安全内生控制, 实现决策在物理世界的安全、闭环执行。

## 4 典型案例对比分析

为验证本文所提数字孪生智能运维架构的可行性与普适性, 本章选取行业内四类具有代表性的实践进行对比分析, 这些案例源自不同的业务视角, 共同揭示了数字孪生技术落地的差异化路径与共性规律。

案例分析表明, 尽管各实践侧重点不同, 但其核心均围绕数据、模型与应用主线展开, 与本文感 - 联 - 知 - 用 - 智五层架构高度契合, 不同案例从集中管控、数据治理、无人巡检及电网协同等维度, 全面验证了该架构的普适性与实践基础, 证实了其是对行业前沿探索的系统性归纳, 具备广泛适用潜力。

表 4 关键使能技术实现路径与目标

| 关键技术领域 | 核心挑战                 | 主要实现路径   | 预期目标                                  |
|--------|----------------------|--|---------------------------------------|
| 高保真建模  | 模型静态化, 无法反映设备老化与动态特性 | 1. 多维多尺度建模: 融合 GIS、BIM 与机理模型。<br>2. 模型动态校准: 利用实时数据与优化算法对机理模型参数进行在线反演; 结合机器学习构建数据驱动行为模型。              | 实现虚拟模型对物理实体 > 95% 的状态保真度。             |
| 数据融合治理 | 数据孤岛、时空不一致、质量参差      | 1. 时空对齐: 建立统一时空基准, 采用流批一体框架处理。<br>2. 统一治理: 构建混合数据底座, 实施元数据管理与全链路数据血缘追踪。                              | 形成高质量、可追溯、即取即用的统一数据资产。                |
| 智能诊断预测 | 故障样本少、预测精度与物理可解释性要求高 | 1. 智能诊断: 采用迁移学习、知识图谱应对小样本故障; 融合多模态数据提升精度。<br>2. 精准预测: 应用注意力机制模型与物理信息神经网络进行功率预测; 利用生存分析模型与联邦学习进行寿命评估。 | 实现主要故障提前 24-72 小时预警, 超短期功率预测误差 < 10%。 |
| 虚实交互控制 | 控制实时性、安全性及仿真易用性      | 1. 低代码决策推演: 提供图形化仿真场景编排工具。<br>2. 安全闭环控制: 通过模型蒸馏实现边云协同推理; 在虚拟空间预执行校验, 结合确定性网络实现“安全内生”控制。              | 实现分钟级闭环控制响应, 并提供安全、易用的决策推演环境。         |

表 5 数字孪生智能运维典型实践对比分析

| 对比维度     | 发电集团视角 (如大唐华银)                      | 平台服务商视角 (如环宝 NiOS™)                 | 解决方案商视角 (如 CET 中电技术)                       | 电网公司视角 (如国电南瑞)                   |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| 核心架构     | “云 - 边 - 端”协同的集团级集控                 | 云平台 + 物联网与数据双引擎驱动                   | 数字孪生平台整合无人机、机器人等无人化装备                      | 电网调度导向的数字孪生电网                    |
| 数据管理     | 强调集团内多系统 (生产、经营) 数据横向贯通             | 采用“时序数据库 + 数据仓库”混合架构处理海量实时数据        | 侧重 SCADA 数据、巡检影像等多源数据在三维场景中的融合             | 全方位采集电网实时数据, 实现宏观系统级数字化映射        |
| 智能应用     | 故障预警、设备健康评估、跨场站对标、预防性维修             | 智能告警、辐照评估与发电预测、清洗机器人调度              | 无人机自动巡检与缺陷识别、机器人精细检查、智能安防联动                | 新能源发电 / 负荷预测、电网运行方式仿真推演、源网荷储协同   |
| 突出特点     | 强调整体解决方案与标准化集控管理模式输出                | 突出底层数据架构的稳健性及终端协同生态                 | 聚焦“少人 / 无人值守”场景下的硬核自动化技术集成                 | 宏观系统视角, 服务于高比例新能源接入下电网的安全稳定      |
| 对本文架构的验证 | 验证了“云 - 边 - 端”协同体系与智能应用层在集约化管理中的有效性 | 验证了“数据与模型层” (特别是统一数据底座) 作为基础支撑的关键作用 | 验证了“物理感知层”与数字孪生模型深度集成, 实现“感 - 知 - 用”闭环的可行性 | 验证了数字孪生从“站级”向“网级”延伸的趋势及仿真推演的核心价值 |

## 5 结语

部署数字孪生智能运维系统能带来管理、经济与安全的综合效益，通过集中监控与智能预警提升运维效率，借助预测性维护与优化调度降低运营成本 10%-25%，并显著增强设备可靠性与操作安全。

推广仍面临挑战：初始投资成本高、数据质量与模型精度有待提升、跨领域复合型人才短缺、以及行业标准缺失可能形成新的孪生孤岛。

未来将呈现三大趋势：一是与 AIGC、大模型深度融合，实现智能交互与决策，二是应用场景向电站全生命周期及源网荷储综合能源体拓展，三是通过构建开放平台与制定标准，推动产业生态健康发展。

## 参考文献

- [1] HASHMI R, LIU H, YAVARI A. Digital twins for enhancing efficiency and assuring safety in renewable energy systems: a systematic literature review[J/OL]. *Energies*, 2024, 17(11): 2456 [2026-01-22]. DOI:10.3390/en17112456.
- [2] 国家电投集团中央研究院. 中央研究院2项技术成果入选首届能源电力行业数据共享赋能与创新创效典型案例[EB/OL]. (2025-03-18)[2026-01-22].
- [3] 何伟. “AI+”智能运维：重塑运维范式[J]. *中兴通讯技术*, 2025(2): 9-15.
- [4] KOLAH M, ESMAILIFAR S M, MORADI SIZKOUHI A M, 等. Digital-PV: A digital twin-based platform for autonomous aerial monitoring of large-scale photovoltaic power plants[J/OL]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 118963[2026-01-22]. DOI:10.1016/j.enconman.2024.118963.
- [5] 李振海, 欧芳. 大唐华银电力案例入选《2025年智慧电厂产业洞察白皮书》[N/OL]. 人民网—湖南频道, 2025-05-13[2026-01-22].
- [6] C114通信网. “AI+数字孪生”智能运维体系：让传输网络自己会“看病”[EB/OL]. (2025-12-19)[2026-01-22]. <https://www.c114.com.cn/news/91/a1302561.html>.
- [7] 中能智新科技产业发展有限公司. 2025双碳科技创新典型案例 | 源网荷储（多能互补）一体化智慧调控关键技术研究与应用[EB/OL]. 中国能源网, (2025-09-30)[2026-01-22].
- [8] YUAN J, MA J, TIAN Z, 等. Digital twin integration with data fusion for enhanced photovoltaic system management: a systematic literature review[J/OL]. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2024[2026-01-22]. DOI:10.1109/ojpe1.2024.3422021.
- [9] 大唐华银电力股份有限公司. 智慧新能源场站整体建设方案[C]//《2025年智慧电厂产业洞察白皮书》优秀案例集. 北京: 中国电力企业联合会, 2025: 45-52.