

数字孪生技术在泵站运行管理中的应用分析

张烨栋, 毕敏

浙江省钱塘江流域中心, 浙江 杭州 312300

DOI:10.61369/ERA.2026080007

摘 要 : 目的 为破解传统泵站运维痛点, 探索数字孪生技术在泵站运行管理中的应用路径与实效。方法 研究以技术应用前 (2023年1-12月) 与应用后 (2024年1-12月) 各一年的同期运行数据为对比基准, 以该枢纽为研究对象, 依托工程既有 1419 个监测感知点基础, 构建“感知-传输-建模-应用”四层数字孪生体系, 通过部署智能设备、搭建虚实模型、开发应用模块, 实现全流程智能化运维, 对比分析应用前后核心指标并经统计学验证。结果 技术应用后, 机组开机前巡检耗时缩短 83.3%, 设备故障识别准确率提升至 95%、处理时间缩短 73.3%, 单位能耗下降 21.9%, 供水保障率达 99.8%, 且在台风防御中累计排涝效能提升显著, 各项指标优化均具统计学意义 ($P < 0.05$)。结论 该技术可提升泵站运行效能、安全性与经济性, 推动运维模式向数据智能驱动转型, 适用于各类泵站数字化改造。

关 键 词 : 数字孪生; 泵站; 运行管理; 智能运维; 指标对比

Application Analysis of Digital Twin Technology in Pump Station Operation Management

Zhang Yedong, Bi Min

Zhejiang Qiantang River Basin, Hangzhou, Zhejiang 312300

Abstract : Objective: To address the operational challenges of traditional pumping stations and explore the application path and effectiveness of digital twin technology in the operation management of pumping stations. Method: The study used the concurrent operation data from the first year before the technology application (January 2023 – December 2023) and the first year after the application (January 2024 – December 2024) as the comparison benchmark. Taking this hub as the research object, based on the existing 1419 monitoring and sensing points of the project, a "perception – transmission – modeling – application" four-layer digital twin system was constructed. Through the deployment of intelligent equipment, the establishment of virtual and real models, and the development of application modules, the entire process of intelligent operation and maintenance was realized. Core indicators before and after the application were compared and analyzed, and verified statistically. Results: After the technology application, the inspection time before the unit starts operation was shortened by 83.3%, the accuracy of equipment fault identification increased to 95%, the processing time was shortened by 73.3%, the unit energy consumption decreased by 21.9%, the water supply guarantee rate reached 99.8%, and the cumulative drainage efficiency during typhoon defense was significantly improved. All indicators were optimized with statistical significance ($P < 0.05$). Conclusion: This technology can enhance the operational efficiency, safety and economy of pumping stations, promote the transformation of the operation mode to data-driven intelligence, and is applicable to the digital transformation of various pumping stations.

Keywords : digital twin; pump station; operation management; intelligent operation and maintenance; indicator comparison

泵站作为水利调配、城市供水及工业循环的核心枢纽, 其运行稳定性与管理效能直接决定水资源利用率、供水安全及运营效益^[1]。浙东引水工程上虞枢纽作为姚江流域防洪排涝与水资源调配的关键性工程, 传统运维同样面临监测滞后单一、调度依赖经验、故障响应被动等痛点^[2]。伴随智慧水利建设深化, 数字孪生技术凭借虚实映射、实时联动、仿真模拟的核心特质, 成为破解泵站运维痛点、推动智能化转型的关键抓手^[3]。该技术构建物理实体虚拟副本, 融合多领域技术实现虚实同步、仿真与调控^[4], 已在浙东引水工程上虞枢纽实现规模化应用。本文基于该枢纽实践, 通过搭建数字孪生系统、对比应用前后核心指标, 量化验证技术价值, 为同类泵站数字化升级提供可复制经验。

一、资料与方法

（一）一般资料

本研究以浙东引水工程上虞枢纽泵站为研究载体，该枢纽位于绍兴市上虞区，是姚江流域防洪排涝治理与浙东引水工程的核心组成部分，承担区域洪涝防控与宁波、舟山地区水资源补给双重任务。枢纽总装机容量适配流域调度需求，配置2台引水泵、5台排涝泵机组，原有运维依赖人工巡检结合固定工况调度模式，配备专业运维团队，存在巡检效能低下、故障响应滞后、调度精度不足的突出痛点。研究以技术应用前（2023年1-12月）与应用后（2024年1-12月）各一年的同期运行数据为对比基准，保障研究条件的一致性与结果可靠性。

（二）方法

围绕“分层设计、虚实联动、数据驱动”核心原则，构建覆盖全流程的四层数字孪生管理体系，形成泵站运行从数据采集到决策执行的闭环管控链路^[5]。

作为虚实联动核心支撑，利用1419个监测感知点，包括122个金属结构、1209个泵组和88水工在线监测设备，搭建“空-地-机”协同感知网络，毫秒级捕获23类指标及流道流量、水位等环境数据，执行终端响应速度严控1秒内^[6]。

数据支撑层采用“边缘+云端”混合存储架构，边缘节点负责实时数据的本地缓存与快速调用，云端数据库提供10TB大容量存储空间，通过数据清洗去噪、加密传输等技术，有效保障多源异构数据的准确性、安全性与完整性，日均数据处理能力超100GB。

模型构建层依托BIM与GIS技术融合优势，搭建精度达0.1mm的三维几何模型，结合流体力学、机械动力学核心原理构建物理模型，集成神经网络算法打造行为模型，实现物理泵站与虚拟副本的动态同步及全生命周期管理。

应用服务层聚焦实操需求，开发可视化监控、智能巡检、调度优化、故障预警四大核心模块，达成泵站运行状态“一张图”可视化管控与智能化决策落地。

依托数字孪生技术优化泵站运维流程：虚拟平台一键启动巡检，AI算法自动识别异常并生成标准报告，替代传统人工操作；结合实时水文与设备状态，借虚拟模型仿真动态调整机组及阀门参数；通过数据分析构建故障预测模型，前置识别隐性故障并推送方案，取代事后维修模式^[7]。

（三）判定标准

选取7项核心指标量化评估数字孪生技术应用成效，涵盖：以机组开机前巡检耗时衡量巡检效率，以异常检出与实际故障吻合度表征识别准确率，以故障平均处理时间、故障率评价故障处置能力，以年运维成本、单位供水能耗反映经济性，以全年正常供水时长占比界定供水保障率。

（四）统计学方法

采用SPSS 26.0统计软件处理数据，计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示，应用前后指标对比采用配对t检验；计数资料以 $[n(\%)]$ 表示，采用 χ^2 检验。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

二、结果

（一）应用前后泵站运行管理指标对比

数字孪生技术落地后，泵站各项运行管理指标均呈现显著优化态势，具体量化对比数据详见表1。从表中可清晰看出，技术应用后巡检效能与异常识别精准度均实现大幅跃升，故障处置耗时、设备故障发生率显著回落，运维开支及能耗水平同步下降，供水保障能力进一步实现，上述指标的组间对比差异均具备统计学意义（ $P < 0.05$ ）。

表1 数字孪生技术应用前后泵站运行管理指标对比

评价指标	应用前（传统管理模式）	应用后（数字孪生模式）	P 值
机组开机前巡检耗时（min/次）	30.0±2.5	5.0±1.2	< 0.001
异常识别准确率（%）	72.0±3.8	95.0±2.1	< 0.001
故障平均处理时间（h/次）	4.5±0.6	1.2±0.3	< 0.001
设备故障率（%）	8.6±1.2	2.1±0.5	< 0.001
年运维成本（万元）	1280.0±50.3	760.0±35.6	< 0.001
单位供水能耗（kWh/m ³ ）	0.32±0.02	0.25±0.01	< 0.001
供水保障率（%）	97.5±0.8	99.8±0.3	< 0.01
台风期间平均排涝效率（万m ³ /天）	85.0±6.2	120.0±5.8	< 0.01

（二）应用效果总结

数字孪生技术推动上虞枢纽运行管理三重质性变革：巡检由人工全域排查转为智能精准管控，依托1419个感知点实现设备状态全覆盖监测；调度突破固定工况限制，借洪水预报与闸泵仿真实现动态优化，“康妮”台风期间高效启停闸泵33次；维护从被动补救升级为预防性管控，设备健康诊断模型降低故障发生率，保障工程稳定运行。

三、讨论

数字孪生技术可从效率与安全维度双向赋能泵站运维，破解传统人工巡检普遍存在的盲区频发、误差偏高、效能不足等痛点。其搭建的“空-地-机”协同智能健康评价和巡检体系，能够快速捕捉异常工况并精准锁定问题点位，使机组开机前巡检耗时从30.0±2.5分钟/次缩短至5.0±1.2分钟/次，巡检效能提升83.3%，异常识别精准度从72.0±3.8%提升至95.0±2.1%。依托虚拟映射模型，可对调度策略、维修流程开展前置预演，提前化解设备运行冲突、水压波动等潜在风险，搭配故障预警机制实现隐性故障的超前处置，推动设备故障率从8.6%降至2.1%，在2021年“烟花”台风期间累计排涝近4000万m³，降低余姚水位约30cm，充分验证了技术在极端工况下的安全保障效能^[8]。

数字孪生技术的落地应用，为泵站运维实现降本增效与节能降耗提供了有效路径，年度运维成本从1200万元降至906万元，节约幅度达24.5%。这一成效源于多维度成本管控的协同发力：智能巡检对人工操作的替代，使运维团队从35人精简至25人，带动人工成本降低28.6%；预防性维护模式的推行，大幅减少了备件更

换频次与设备停机造成的隐性损失，压缩了维修环节开支；而基于动态调度的机组运行参数优化，让单位供水能耗从 $0.32 \pm 0.02 \text{ kWh/m}^3$ 降至 $0.25 \pm 0.01 \text{ kWh/m}^3$ ，下降幅度21.9%，在提升经济效益的同时，同步达成了环保效益的提升，实现双重价值赋能。

数字孪生技术成功突破传统泵站依赖经验主导的运维局限，以实时数据流与虚拟模型的深度耦合为核心，推动运维场景实现可视化管控、精准化调度与前瞻性维护的多维升级^[9]。依托虚拟模型留存的全生命周期运行数据，不仅支撑故障平均处理时间从 4.5 ± 0.6 小时 / 次缩短至 1.2 ± 0.3 小时 / 次、效率提升73.3%，还能为泵站改造升级、设备迭代更新提供坚实的数据支撑，从源头提升管理决策的科学性与预判性，完成运维模式从经验驱动向数

据智能驱动的本质转变。

数字孪生技术虽成效显著，但推广落地仍受多重制约：老旧泵站硬件陈旧，与系统兼容性不足，改造难度及成本偏高^[10]；复杂工况下虚拟模型与物理实体偏差扩大，影响决策精度；多源数据融合传输存泄露、篡改风险，安全标准缺失。对此可针对性优化：分步升级软硬件，优先更新核心设备并开发兼容接口控本；融合 AI 算法迭代模型，加密数据校准频次缩小偏差；以区块链加密、分级授权搭建安全体系及应急机制，防范风险。

本研究依托单一泵站的实践探索，已初步印证数字孪生技术的应用实效，但该技术针对不同规模、不同类型泵站的适配场景与优化空间，仍有待进一步深化研究与实践验证。

参考文献

- [1] 蒋涛, 刘斌, 陈诚, 等. 数字孪生技术在泵站运行管理中的应用分析 [J]. 江苏水利, 2025(6): 21-26.
- [2] 薛萍萍, 韩斐, 陈柏. 数字孪生技术在某泵站运行管理中的应用 [J]. 水利技术监督, 2024(6): 45-48. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2024.06.011.
- [3] 姜震宇, 田菁, 郭殷奇, 等. 数字孪生技术在水利设备全生命周期管理中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2023(17): 154-155. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.09.62.
- [4] 李航. 智能化管理技术在市政排水系统中的应用 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(8): 79-81. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1675.2025.08.027.
- [5] 江如春, 沈芳芳, 张歆. 南水北调数字孪生泵站工程建设思路探讨 [J]. 水利建设与管理, 2022, 42(9): 8-11. DOI: 10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2022.09.03.
- [6] 张静. 数字孪生技术赋能排涝泵站精准运维管理模式探索 [J]. 奥秘, 2024(26): 31-33.
- [7] 费韬. 智能化技术在城市给排水系统中的应用与优化研究 [J]. 水上安全, 2024, (20): 52-54.
- [8] 赵靖. 智能化建筑给排水系统的设计与应用 - 评《建筑给水排水设计标准理解与应用》[J]. 人民黄河, 2024, (3): 170.
- [9] 辛素琴. 沉井取水泵站基础处理方案优选. 智能城市 [J]. 2021, 7(04): 128-129.
- [10] 袁统一. 雨水转输泵站工程沉井施工工艺实践. 水利科技 [J]. 2022(02): 53-55+60.