

数字孪生技术在泵站运行管理中的应用

董 波

江苏南水科技有限公司 江苏 南京 210012

摘 要：数字孪生技术具备多源数据融合与动态建模能力，为泵站运行管理带来创新变革。本文围绕数字孪生技术在泵站运行管理中的应用展开研究，分析其与泵站管理的适配基础，阐述在设备状态管控、运行流程优化、设备维护与故障防控等场景的应用，指出应用中存在适配性、支撑体系及人才管理等问题，并提出提升适配性、强化技术支撑、完善人才与管理支撑等优化路径，推动泵站智能化转型。

关键词：数字孪生；泵站运行管理；虚拟建模；数据驱动；故障预测

引言：泵站作为水资源调配的关键枢纽，传统管理模式依赖人工巡检与经验调度，存在故障发现滞后、调度响应低效、维护过度等弊端。数字孪生技术凭借数据感知、虚拟建模与动态驱动能力，可构建泵站全要素虚拟映射体系，实现物理实体与虚拟空间实时交互。通过融合设备运行数据、流体动力学特性与控制逻辑，为泵站运行管理提供全链条支持，成为破解传统管理难题、提升系统韧性的有效手段。

1 数字孪生技术与泵站运行管理的适配基础

1.1 数字孪生技术的核心特性

数字孪生技术通过多源异构数据融合实现物理世界与虚拟空间的深度交互，其核心能力体现在三个维度^[1]。数据感知层面，该技术依托高密度部署的传感器网络，可对泵站设备的振动、温度、压力、流量等关键参数进行毫秒级采样，结合图像识别技术对设备外观缺陷进行非接触式检测，形成覆盖机械、电气、液压等多系统的全息数据流。虚拟建模层面，基于几何建模、物理建模与行为建模的混合建模方法，可构建包含设备拓扑结构、流体动力学特性及控制逻辑的分层级数字模型，实现泵站运行场景的像素级复现。数据驱动层面，通过边缘计算节点与云平台的协同，确保现场数据与虚拟模型的数据流双向贯通，使模型参数随设备状态变化持续修正，形成具有自进化能力的动态映射体系。

1.2 泵站运行管理的核心需求

泵站作为水资源调配的关键基础设施，其运行管理面临三重挑战。设备管控层面，需对水泵机组、阀门系统、供电设备等核心组件的运行参数进行实时监测，及时发现轴承磨损、气蚀现象、电气绝缘老化等潜在故障征兆。流程优化层面，需解决传统调度模式中存在的响应滞后问题，通过优化泵机组启停组合、调节叶片角度、控制流速等手段，实现供水能耗与系统效率的动态平

衡。维护策略层面，需突破定期检修导致的过度维护困境，建立基于设备健康状态的预测性维护体系，在故障发生前精准定位薄弱环节并制定维修方案，延长设备使用寿命的同时降低非计划停机风险。

1.3 数字孪生技术与泵站运行管理的适配逻辑

技术特性与管理需求的耦合体现在三个层面。数据感知能力与设备管控需求的匹配上，数字孪生通过部署于关键节点的智能传感器，可捕获传统巡检难以发现的微弱故障信号，如通过振动频谱分析识别轴承早期损伤，利用温度场分布定位电机绕组过热区域。虚拟建模能力与流程优化需求的呼应中，数字孪生构建的流体动力学模型可模拟不同工况下的水锤效应，为阀门启闭时序优化提供理论依据，通过数字场景中的参数调试，提前验证调度方案的可行性。数据驱动能力与维护策略升级的关联上，基于设备运行大数据的训练，数字孪生模型可预测关键部件的剩余使用寿命，结合维修资源约束生成最优维护计划，实现从被动抢修到主动预防的范式转变。这种适配路径通过虚拟空间的试验成本压缩与物理实体的运维风险降低，形成技术价值与管理效益的双向增强循环。

2 数字孪生技术在泵站运行管理中的应用场景

2.1 泵站设备运行状态管控

数字孪生技术通过构建物理设备与虚拟模型的双向映射机制，实现设备运行状态的精细化管控。在数据采集环节，分布式传感器网络对水泵转速、轴承温度、电机电流、管道压力等关键参数进行高频采样，结合无线传输技术将数据汇聚至边缘计算节点，确保现场信息的实时性与完整性^[2]。虚拟映射层面，基于设备几何结构与物理特性的数字模型，将采集的物理信号转换为模型参数，形成与实体设备状态完全对应的虚拟镜像。动态监测过程中，模型通过对比实时数据与历史基线，识别

参数偏移趋势,例如通过振动频谱的时域分析发现轴承滚珠缺陷的早期征兆,利用温度变化率判断电机绕组绝缘老化程度。可视化呈现方面,三维数字孪生体集成设备运行数据,通过颜色编码、动态箭头等视觉元素,在虚拟场景中直观展示流体流向、压力分布及设备健康状态,为运维人员提供沉浸式监控界面,提升状态感知效率与决策准确性。

2.2 泵站运行流程优化

数字孪生技术为泵站运行流程优化提供全要素虚拟试验场。虚拟复刻阶段,通过激光扫描与BIM技术构建泵站三维几何模型,结合流体动力学方程与控制逻辑算法,形成包含管道网络、泵组、阀门等要素的动态仿真系统。动态模拟过程中,模型可响应不同调度指令,计算各工况下的能耗、效率及水锤效应等关键指标,例如通过调整水泵启停顺序验证节能效果,或模拟阀门关闭速度对管道压力冲击的影响。数据交互驱动的参数优化环节,现场传感器将实际运行数据反馈至虚拟模型,模型基于实时工况修正仿真参数,生成最优运行策略,如根据用水需求动态调节泵组转速,实现流量与能耗的精准匹配。协同调度层面,数字孪生平台整合气象预报、电网负荷等外部数据,结合泵站内部设备状态,动态调整运行计划,例如在暴雨预警时提前降低水库水位,或根据电价波动调整高峰时段运行功率,提升系统整体运行韧性。

2.3 泵站设备维护与故障防控

数字孪生技术通过全生命周期数据管理实现设备维护的主动化转型。数据追踪层面,从设备安装调试阶段开始,记录设计参数、安装记录、调试数据等初始信息,运行阶段持续采集振动、温度、压力等状态数据,形成覆盖设备全生命周期的数字档案。故障隐患预警环节,模型基于历史故障数据与实时运行参数,构建设备劣化趋势预测算法,例如通过支持向量机分析轴承振动特征,提前识别磨损超标风险,或利用神经网络预测电机绝缘剩余寿命。维护计划制定阶段,数字孪生平台结合设备健康状态、备件库存、运维资源等约束条件,生成动态维护方案,如根据故障概率调整检修周期,或优化备件采购计划以降低库存成本。此外,模型还可模拟不同维护策略的效果,例如比较定期检修与预测性维护的成本效益,为运维决策提供量化依据,推动维护模式从经验驱动向数据驱动转变。

3 数字孪生技术在泵站运行管理应用中的现存问题

3.1 技术应用适配性不足

数字孪生技术在泵站场景的落地面临多维适配挑

战。模型构建层面,现有建模方法多聚焦通用设备特性,对泵站复杂工况的针对性设计不足。例如,水泵运行受流体黏度、管道阻力等多因素耦合影响,通用模型难以精准捕捉动态变化规律,导致虚拟映射与实体状态存在偏差^[3]。数据采集环节,泵站设备分布分散且环境复杂,传感器部署易受电磁干扰、振动噪声影响,部分关键参数如微小泄漏流量、设备早期劣化特征难以被有效捕获,数据精度无法满足模型训练需求。传输效率方面,泵站现场网络覆盖存在盲区,尤其地下管廊、偏远泵房等区域数据传输延迟较高,影响虚拟模型对突发工况的实时响应能力。管理模式衔接上,传统泵站运维依赖人工巡检与经验判断,数字孪生技术引入后,现有流程未与模型预警、决策支持等功能深度融合,技术优势未能充分转化为管理效能提升。

3.2 技术应用支撑不足

技术支撑体系不完善制约数字孪生深度应用。研发投入层面,泵站行业数字化转型尚处起步阶段,企业与科研机构对数字孪生技术的资金投入集中于基础功能开发,对复杂工况模拟、多源数据融合等关键技术的攻关力度不足,导致技术成熟度与工业级应用需求存在差距。专用工具开发方面,市场缺乏针对泵站设备特性设计的建模软件与数据分析平台,现有通用工具需大量二次开发才能适配泵站场景,增加了技术落地成本与周期。技术集成能力上,数字孪生需与物联网、大数据、人工智能等技术协同,但泵站现有系统多采用异构架构,数据接口、通信协议不统一,技术融合过程中易出现数据孤岛、模型冲突等问题,影响整体解决方案的稳定性与可靠性。

3.3 人才与管理支撑缺失

人才与管理短板成为技术推广的关键瓶颈。复合型人才方面,泵站运维人员多具备机械、电气等专业背景,对数字孪生涉及的建模算法、数据分析等技术知识掌握有限;而信息技术人员又缺乏泵站运行管理经验,导致技术方案与实际需求脱节。从业人员能力提升上,现有培训体系侧重单一技术操作,缺乏对数字孪生技术逻辑、应用场景及管理变革的系统性培训,运维人员难以独立完成模型调试、故障诊断等复杂任务。管理机制层面,数字孪生技术应用需配套数据治理、模型更新、安全防护等制度,但多数泵站尚未建立相关规范,数据采集随意性大、模型版本管理混乱、网络安全防护薄弱等问题普遍存在,制约技术应用的可持续性与安全性。

4 数字孪生技术在泵站运行管理中优化应用的路径

4.1 提升技术应用适配性

数字孪生技术与泵站运行场景的深度融合需以精准适配为前提。模型构建层面,需突破通用化建模框架的局限,针对泵站特有的流体动力学特性、设备耦合关系及环境干扰因素,开发分层级混合建模方法^[4]。通过融合几何建模的形态还原能力、物理建模的机理推演能力与数据驱动建模的动态修正能力,构建覆盖水泵机组、阀门系统、供电网络等核心组件的精细化数字模型,确保模型参数与实际工况的误差控制在工程允许范围内。数据采集层面,需构建多模态感知体系,在传统温度、压力、流量等参数监测基础上,增加振动频谱、声纹特征、电气谐波等新型监测维度,利用边缘计算节点实现原始数据的本地预处理,减少无效数据传输的同时提升关键特征提取效率。数据传输层面,需优化工业以太网与无线传感网络的协同机制,针对泵站复杂电磁环境开发抗干扰通信协议,确保控制指令与监测数据的毫秒级可靠传输。管理衔接层面,需建立数字孪生技术标准与现有运维规范的映射关系,将虚拟模型中的状态评估结果转化为可执行的设备巡检路线、维护工单生成等管理动作,实现技术价值向管理效能的转化。

4.2 强化技术应用支撑

技术突破是数字孪生深度应用的核心驱动力。研发投入层面,需构建产学研用协同创新机制,聚焦流体-固体耦合仿真、多物理场协同计算等关键技术瓶颈,开发具有自主知识产权的仿真内核与求解算法,降低对国外商业软件的依赖。工具开发层面,需针对泵站运维场景研发专用技术工具链,包括基于数字孪生的设备健康评估系统、运行参数优化配置平台、故障预测与维护决策支持模块等,通过模块化设计实现工具的快速部署与灵活组合。技术融合层面,需推动数字孪生与人工智能、物联网、区块链等技术的交叉渗透,利用深度学习算法提升故障诊断的准确性,通过物联网实现设备状态的实时感知,借助区块链技术保障数据传输的可信性,构建覆盖数据采集、模型训练、决策生成的全链条技术支撑体系。

4.3 完善人才与管理支撑

人才队伍是技术落地的关键保障。能力培育层面,

需设计"理论+实践+认证"的复合人才培养体系,在高校设置数字孪生与水利机械交叉课程,在企业建立实训基地开展设备建模、数据分析等实操训练,通过行业认证建立人才能力评价标准。人才引进层面,需制定针对性激励政策,吸引既懂泵站运行机理又掌握数字技术的跨界人才,重点引进具有工业软件研发、大数据分析、智能算法设计背景的专业人才,弥补现有团队在新技术领域的短板^[5]。管理机制层面,需建立数字孪生技术应用的全生命周期管理制度,明确模型开发、数据治理、系统运维等环节的责任主体与操作规范,制定数据安全分级保护策略与应急响应预案,通过标准化流程确保技术应用的规范性。同时构建技术应用效果评估体系,从设备故障率、运维成本、供水效率等维度量化技术价值,为持续优化应用路径提供决策依据。

结束语

数字孪生技术与泵站运行管理的深度融合,需突破技术适配、工具开发与管理机制三重瓶颈。通过分层级混合建模提升虚拟映射精度,依托专用工具链降低技术落地成本,结合全生命周期管理制度保障数据安全与模型更新,可实现技术价值向管理效能的转化。这一过程不仅要求技术迭代与场景创新的协同,更需构建跨学科人才梯队与标准化管理流程,推动泵站运维从被动响应向主动预防、从经验驱动向数据驱动的范式转变,为水利基础设施智能化升级提供可持续支撑。

参考文献

- [1]夏红明,张国文,喻未.数字孪生技术在泵站运行管理中的应用[J].南昌工程学院学报,2025,44(1):21-26.
- [2]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.
- [3]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.
- [4]瞿亚纯,朱晨晟.数字孪生在泵站无人智能化管理中的应用[J].电气自动化,2023,45(4):108-111.
- [5]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.