

数字孪生技术在大型泵站运行管理中的研究与应用

孙 路 陆发兵 徐小龙

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250000

摘 要: 针对大型泵站传统运维模式监测滞后、故障处置被动、调度粗放、管控精细化不足等问题,本文依托数字孪生、物联网、CFD流体仿真等核心技术,构建五层一体化泵站数字孪生系统架构。通过精细化建模、多源数据融合、虚实实时同步迭代,搭建智能化运维体系。重点探究可视化监测、故障智能预警、智能调度及全生命周期运维四大应用场景,有效提升泵站运行安全性、调度经济性与管理智能化水平,为水利泵站智慧化管控提供技术参考。

关键词: 数字孪生技术;大型泵站;运行管理;应用

引言: 大型泵站是水利调水、防洪排涝的核心基础设施,其稳定高效运行是水利工程安全管控的关键。传统泵站运维多依赖人工巡检与静态监测,难以适配多工况动态变化,存在风险预判不足、调度效率低、运维成本高等短板。为破解行业痛点,本文引入数字孪生技术,结合泵站运行特征与核心支撑技术,搭建数字化仿真运维系统,探究技术落地应用路径,助力泵站运维从传统粗放模式向智能精细化模式转型升级。

1 相关理论与关键技术基础

1.1 数字孪生核心理论

(1) 数字孪生的定义与核心内涵。数字孪生是依托数据与模型实现物理实体全生命周期映射的数字化技术,核心包含物理实体、虚拟模型、数据交互、智能迭代四大要素,具备虚实映射、实时同步、动态迭代三大核心特征,可精准复刻实体运行状态并持续优化模拟效果。(2) 数字孪生五维架构体系。体系包含五大层级,实体层为真实泵站设备与场景载体;数据层负责多源运行数据的采集与整合;模型层构建高精度虚拟仿真模型;应用层提供监测、预警、调度等功能服务;交互层实现人机虚实交互操作,各层级协同支撑系统稳定运行。(3) 数字孪生技术应用优势。相较于传统静态运维技术,其可实现设备运行可视化实时监测,依托动态仿真模拟工况变化,提前预判设备故障与运行风险,完成预判预警,同时依托智能数据分析实现泵站资源智能调度,大幅提升运维精细化水平。

1.2 大型泵站运行管理理论体系

(1) 大型泵站核心设备组成。泵站核心设备包含水泵机组、驱动电机、调控阀门、监测传感器及管网系统,各设备协同完成水体输送,其运行稳定性直接决定泵站整体工作效率与安全性能。(2) 泵站运行管理核心内容。核心工作涵盖设备实时状态监测、日常常态化运维巡检、

按需水量调度、故障快速排查处置及全域安全管控,实现泵站全流程规范化运行管理。(3) 泵站运行工况特征。泵站启停、稳态运行、负荷波动、汛期应急等工况差异显著,启停阶段易出现水力冲击,稳态运行需保障参数稳定,负荷波动工况调控难度大,汛期应急工况具有突发性、高负荷特点,是泵站管理的核心难点。

1.3 核心支撑技术

(1) 物联网感知技术。通过各类水文、设备传感器及数据采集终端、智能巡检设备,实时采集泵站运行数据,依托无线传输技术实现数据实时上传,为模型构建与状态监测提供原始数据支撑。(2) 三维建模与轻量化技术。基于BIM技术完成泵站设备与场景三维复刻,通过模型轻量化处理优化模型结构,降低运行算力消耗,适配泵站复杂场景的数字化建模与实时渲染需求。(3) 大数据与云计算技术。针对泵站多源异构数据开展清洗、融合、存储与智能分析,剔除无效数据,挖掘数据价值,为数字孪生模型动态迭代、工况分析提供可靠数据支撑。(4) CFD流体仿真技术。通过流体仿真技术模拟泵站内部水流状态、水力损耗等特性,精准还原不同工况水力变化,为泵站运行状态模拟、水力优化与故障分析提供技术支撑^[1]。

2 大型泵站数字孪生系统模型构建

2.1 泵站数字孪生系统总体架构设计

(1) 架构设计原则。本次系统架构设计严格贴合大型泵站运维场景特性,遵循实用性、实时性、兼容性与可扩展性四大核心原则。实用性聚焦泵站实际运行、巡检、调度需求,摒弃冗余功能;实时性保障数据传输与状态同步的时效性;兼容性适配现有泵站监控设备与数据系统;可扩展性预留功能拓展接口,可适配设备升级、工况扩容等后续场景变化,贴合泵站长期运维发展需求。(2) 整体架构搭建。结合泵站运行特点与数字孪生技术体系,搭建

五层一体化总体架构,分别为物理实体层、数据采集传输层、虚拟孪生模型层、智能分析应用层、可视化交互层。各层级自上而下层层衔接、协同联动,覆盖数据采集、模型复刻、智能分析、人机交互全流程,形成完整的泵站数字化运维体系^[2]。(3)系统功能定位。本系统以泵站智能化运维为核心目标,明确一体化功能定位。依托虚实同步建模与数据分析技术,实现设备运行实时监测、水力工况仿真模拟、设备故障提前预警、水量负荷智能调度功能,整合传统分散的运维工作,实现泵站运维管理数字化、智能化、一体化管控。

2.2 泵站物理实体精准建模

(1)设备三维精细化建模。基于BIM三维建模技术,对大型泵站核心设施进行1:1精细化建模,精准复刻水泵机组、驱动电机、控制阀门、电气设备及各类辅助设施的外形结构、装配关系与尺寸参数,完整还原实体设备结构细节,保障虚拟模型与物理实体高度一致。

(2)场景环境建模。围绕泵站整体运行场景开展全要素建模,覆盖泵站机房内部环境、进出水渠道、管网布局及周边配套环境,复刻真实场景的空间布局与环境特征,构建完整、真实的虚拟运行场景,为全域仿真模拟奠定场景基础。(3)模型轻量化优化。针对泵站模型设备繁多、场景复杂、数据体量庞大,易出现加载卡顿、运行延迟等问题,采用模型面片简化、贴图压缩、冗余数据剔除、渲染算法优化等轻量化处理手段,在保留模型核心结构与精度的前提下,降低系统算力负荷,保障模型实时加载与流畅运行^[3]。

2.3 多源数据采集与融合处理

(1)数据采集体系。构建全方位多源数据采集体系,明确各类数据采集渠道与频率,主要包含水泵转速、设备温度等设备运行参数,水位、流量、水压等水力参数,温湿度、气象等环境参数,以及日常巡检、故障记录、检修台账等运维数据,实现泵站运行全维度数据全覆盖采集。(2)数据预处理技术。原始采集数据易受设备干扰、环境影响出现噪声、缺失、异常偏差等问题。通过数据清洗剔除无效冗余数据,采用插值、拟合算法修复缺失数据,甄别并修正异常数据,完成原始数据标准化预处理,提升数据准确性与有效性。(3)多源数据融合算法。针对泵站结构化运行数据与非结构化场景数据异构性问题,采用多源数据融合算法,统一各类数据格式与标准,打破数据孤岛,实现多维度数据整合联动,为虚实精准映射、模型仿真与智能分析提供统一、可靠的数据支撑。

2.4 虚实实时映射与同步机制

(1)虚实映射规则。建立标准化虚实映射机制,针对泵站每一台物理设备、每一处场景单元,构建参数、运行状态、空间位置的一一对应映射关系,精准匹配物理实体与虚拟模型的动态特征,保障虚实模型高度契合、精准对应。(2)实时数据同步机制。搭建高速、稳定的专用数据传输通道,优化数据传输协议,缩短数据传输延迟,实现物理泵站运行状态、参数变化的实时传输与同步更新,保证虚拟模型状态与现场实际运行状态实时一致。(3)模型动态迭代更新。建立模型动态迭代优化机制,结合设备长期运行老化损耗、工况负荷波动、设备改造升级、管网调整等实际变化,实时修正孪生模型参数,动态更新模型状态,确保孪生模型始终贴合泵站真实运行工况,提升系统仿真与分析精度。

3 数字孪生技术在泵站运行管理中的应用场景

3.1 全维度可视化实时监测应用

(1)设备状态可视化监测。依托泵站数字孪生虚拟模型,对接前端物联网感知设备,实时采集并更新水泵机组振动幅值、运行温度、转轴转速、进出口压力等核心运行参数。系统将抽象数据转化为直观的三维模型状态变化与数据面板展示,能够动态呈现各设备的运行工况与细微状态波动,管理人员可直观判断设备是否处于健康运行区间,有效规避传统监测数据零散、状态不直观的问题。(2)水力工况可视化监测。基于CFD流体仿真与实时水力数据,对泵站进出水渠道、管网内部水流状态进行可视化复刻,动态展示水流速度、实时水位、输水流量、水力压差等关键水力参数。通过全域水力工况可视化呈现,可精准掌握输水系统整体运行状态,及时发现水流紊动、水位偏移、流量不均等异常工况,为工况调控提供直观的数据与场景支撑^[4]。(3)远程可视化管控。数字孪生系统打破传统泵站运维的空间地域限制,整合现场实时画面、设备状态数据与虚拟仿真场景,构建远程可视化管控平台。管理人员可通过终端设备随时查询泵站整体运行状态,实现无人值守模式下的全天候实时监控,替代重复性、高成本的人工现场巡检模式,大幅提升泵站日常监测的及时性与高效性。

3.2 设备故障智能预警与诊断

(1)故障特征库构建。结合大型泵站长期运行经验与设备故障案例,系统梳理水泵机组异响、振动超标、管路堵塞、电机过热、阀门卡滞、流量异常等典型故障类型,归纳各类故障对应的参数波动特征、工况表现与场景特征,搭建标准化、系统化的泵站设备故障特征数据库,为智能预警诊断提供数据与模型支撑。(2)智能故障预警机制。系统依托实时采集的设备运行数据与孪

生仿真模拟数据,建立参数阈值比对与趋势分析模型,持续监测温度、振动、流量、压力等关键参数的波动变化。当运行参数出现偏离正常区间的异常趋势时,系统可提前识别潜在故障风险,自动触发预警提示,改变传统故障事后处置模式,实现故障预判与前置防控。(3)故障溯源与诊断分析。在设备出现异常工况或触发预警后,依托数字孪生模型开展多维度仿真推演,结合实时数据与历史运行数据对比分析,精准定位故障发生的具体设备、具体位置,追溯故障产生的核心成因,同时模拟故障持续发展带来的影响范围与运行风险,为运维人员开展精准检修、故障处置提供可靠的技术依据。

3.3 泵站运行智能调度与仿真优化

(1)多工况仿真模拟。数字孪生系统可复刻泵站汛期高负荷运行、枯水期低流量输水、跨区域调水等多种典型运行工况,通过仿真模拟还原不同场景下机组运行状态、水力变化规律及系统负荷分布情况。提前预判各类工况下存在的运行隐患、水力损耗及负荷失衡问题,为工况适配与调度优化提供前置参考。(2)智能调度方案优化。基于多工况仿真模拟结果,结合输水任务需求、能耗指标、设备承载状态,对泵站机组启停组合、运行负荷分配、输水流量配比等调度策略进行智能优化。通过多方案仿真对比,筛选出高效低耗的最优调度方案,有效平衡输水效率与设备能耗,提升泵站整体调度智能化水平与运行经济性^[5]。(3)应急调度仿真推演。针对暴雨洪涝、设备突发故障、渠道水位异常、输水中断等突发应急场景,开展专项应急调度仿真推演。模拟不同应急场景下的工况演变过程,检验现有应急调度方案的可行性与合理性,优化应急处置流程、设备调控顺序与人员调度方案,持续完善泵站应急管控体系,提升突发风险处置能力。

3.4 全生命周期运维管理应用

(1)日常智能巡检管理。依托数字孪生系统搭建数字化巡检管理体系,根据设备运行特性与运维标准,自动生成标准化巡检计划,明确巡检点位、巡检内容与巡

检频次。巡检人员通过终端完成巡检记录、问题上报,系统自动归档巡检数据,实现巡检工作从人工粗放管理向数字化、规范化、流程化管控转变。(2)设备寿命预测与养护。系统整合设备运行时长、实时工况负荷、历史故障记录、环境影响数据等多维度信息,构建设备老化评估与寿命预测模型,动态分析设备老化程度与性能衰减规律,精准预判设备剩余使用寿命。依据预测结果制定差异化、精准化的设备养护与检修计划,避免过度养护或养护滞后问题,延长设备使用寿命。(3)运维数据台账管理。系统全面整合泵站设备巡检、故障维修、日常养护、调度运行、工况变化等全周期运维数据,构建标准化数字化运维台账。实现所有运维数据的统一存储、分类统计与随时追溯,为泵站运维工作总结、运行规律分析、管理方案优化提供完整的数据支撑,助力泵站运维管理的精细化、长效化发展。

结束语

本文完成了大型泵站数字孪生系统的架构设计、模型构建与应用场景探究,实现了泵站虚实映射、智能监测、故障预警与优化调度一体化应用。有效解决了传统泵站运维的诸多短板,显著提升了泵站运行管控的智能化与精细化程度。后续可进一步优化算法模型,提升复杂应急工况仿真精度,拓展多泵站联动调度功能,持续完善数字孪生泵站运维体系,赋能智慧水利高质量发展。

参考文献

- [1]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,2024,3(6):45-48.
- [2]李汶谕,张航钊,刘喜珠,等.BIM技术在数字孪生泵站中的应用[J].水利发展研究,2023,23(9):66-70.
- [3]戴蓉.数字孪生技术在某泵站运行管理中的应用[J].中国水能及电气化,2023,12(10):64-69.
- [4]朱晨晟.数字孪生技术在泵站智能化管理中的应用[J].电气自动化,2023,45(4):108-111.
- [5]胡锦.数字孪生技术在泵站工程中的应用[J].江苏水利,2023,21(7):28-32.