

数字孪生技术在水闸工程安全运行管理中的运用分析

土尔孙·卡日

新疆维吾尔自治区塔里木河流域叶尔羌河水利管理中心，新疆 喀什 844700

[摘要]干旱区基层中小型水闸是区域农业灌溉、防洪输水的关键水利设施，特殊的气候与水文环境，给工程常态化安全运维带来诸多挑战。传统人工运维模式存在监测不连续、调度决策主观、台账管理混乱等短板，难以适配水利精细化、智能化的发展要求。针对基层水闸已完成标准化升级、具备站房远程启闭能力但智能管控体系不完善的行业现状，本文引入轻量化数字孪生技术，搭建适配干旱区特殊工况的一体化智能运维体系。体系涵盖可视化实时监测、仿真辅助调度、安全风险溯源、数字化台账管控、极端工况应急推演五大核心模块，形成适配基层水闸的数字化管护方案。

[关键词]干旱区水闸；数字孪生；安全运维；远程启闭；数字化管护；智慧水利

DOI: 10.64635/ja.2026.1309

中图分类号: TV66

文献标识码: A

Application Analysis of Digital Twin Technology in the Safety Operation Management of Sluice Projects

Tuersun Kari

Xinjiang Yarkand River Water Conservancy Management Center in Tarim River Basin, Kashgar, Xinjiang, 844700, China

Abstract: Small- and- medium- sized grassroots sluices in arid areas serve as critical water- conservancy facilities for regional agricultural irrigation, flood control and water conveyance. Unique climatic and hydrological conditions create multiple obstacles to regular- based safe operation and maintenance of such projects. Conventional manual operation- and- maintenance modes suffer from discontinuous monitoring, subjectively- oriented dispatching decisions and disordered account management, failing to meet the demands for refined and intelligent water- resources management. Against the industrial backdrop that grassroots sluices have finished standardization renovation and support remote gate control yet lack sound intelligent management- and- control frameworks, this paper adopts lightweight digital- twin technology to construct an integrated intelligent operation- and- maintenance system adapted to distinctive operating conditions in arid regions. The system consists of five core modules: visual real- time monitoring, simulation- aided dispatching, safety risk tracing, digital account administration and emergency deduction under extreme operating scenarios, delivering a digital- based management solution suitable for grassroots sluice facilities.

Keywords: sluice in arid regions; digital twin; safe operation and maintenance; remote opening and closing; digital management and maintenance; smart water conservancy

引言

近几年来伴随着我国水利水电工程行业的快速发展，出现智慧水利数字化转型是基层水利工程提质增效的核心发展趋势，智能化技术迭代为破解偏远干旱区水利管护难题提供全新路径。南疆流域水闸长期处于风沙多发、昼夜温差大、河道来水时空分布不均的特殊环境，机电设备锈蚀、闸体结构老化、河道积沙淤积等病害频发，直接影响工程运行稳定性与供水安全性。长期以来，基层水闸运维以人工巡检、现场操作、纸质台账记录为主要模式，监

测覆盖范围有限，无法提前预判工况风险，整体管护模式较为粗放。

近年来，基层水利标准化建设持续落地，流域管理站所辖水闸均完成硬件升级，实现站房集中控制、远程启闭操作，基础作业条件得到大幅改善。硬件设施升级的同时，配套智能管理体系存在明显短板，经验化调度、运维流程碎片化、数据无法联动等问题，始终制约水闸管护质量提升。当前国内数字孪生水利研究多聚焦大型流域枢纽工程，针对干旱区中小型基层水闸的实操性研究较少，缺少

适配风沙工况、贴合基层远程管护流程的落地成果^[1]。基于上述工程痛点与研究空白,本文结合基层水闸标准化运维体系与现有远程管控硬件基础,构建轻量化数字孪生运维框架,探索智能技术与水闸日常管护、安全调度、隐患治理的融合路径,助力区域基层水利实现精细化、数字化转型。

1 数字孪生技术基础与工程运维条件

1.1 数字孪生技术核心特征

数字孪生技术依托数字化建模手段,为水闸物理实体搭建对应的虚拟镜像场景,完整复刻闸体结构、启闭机电设备、现场控制终端等设施的实时运行状态。技术运行体系包含虚实映射、实时交互、仿真推演、动态迭代四项核心特征,功能覆盖范围远超传统单一的数字化监测手段^[2]。

传统数字化设备仅能完成基础数据采集与记录工作,数字孪生系统可结合实时水情、设备电流、启闭开度、设备温度等实测数据,动态推演设备运行趋势与河道工况变化,提前捕捉人工巡检难以发现的潜在异常,为一线运维人员开展前置化、主动化安全管控提供可靠技术支撑。

1.2 轻量化数字孪生水闸整体架构

结合基层水闸运维规模、技术投入标准与日常管护能力,本次研究采用五层轻量化数字孪生架构,整体设计贴合中小型水闸的实际应用场景,不存在功能冗余、资源浪费的问题。架构体系分为感知层、数据层、模型层、应用层与运维层,各层级分工明确且联动协同,形成完整的智能化管控闭环。

感知层对接现场各类监测设备,涵盖水位计、流量计、设备传感器、开度采集装置,负责全方位采集现场运行数据。数据层对多类型异构数据进行清洗、整合与稳定传输,统一设备运行数据与河道水情数据的输出标准,规避数据杂乱、无法联动的问题。模型层按照水闸真实尺寸、设备布局、站房位置搭建精准三维虚拟模型,保证虚拟场景与物理实体的运行状态实时同步。应用层对接基层日常管控业务,覆盖实时监测、远程调度、异常预警、台账管理等核心工作。运维层严格贴合水利标准化管理规定,规范系统日常巡检、数据留存、设备养护的全流程工作标准。

1.3 水闸现有运维基础条件

经过标准化升级改造,基层水闸目前已形成完善的规范化运维体系,巡检、设备养护、隐患排查处置等各项工作均有固定流程与执行标准。站房集中管控模式全面落地,运维人员可通过中控终端、远程管理平台,直接完成水闸启闭、闸门开度调节、机电设备启停等操作,彻底告别了全程现场手动作业的传统模式。

日常运维工作严格遵循标准化管理制度推进,定期设备巡检、隐患登记整改、值班台账记录、月度设备养护等工作常态化落地。完善的硬件设备、成熟的管控模式与规范的管理制度,为数字孪生技术的落地应用筑牢基础,能够快速实现智能技术与基层水利日常运维工作的深度融合。

2 数字孪生技术在水闸运维中的核心应用体系构建

2.1 全要素虚实可视化监测体系搭建

依托现场传感设备与数据采集终端,搭建覆盖水闸全运行要素的虚实可视化监测体系,打破传统人工巡检的局限性。系统不间断采集闸体结构形变数据、机电设备电流电压参数、启闭设备运行时长、河道实时水位与流量等核心指标,全方位掌握水闸运行状态。所有实测数据实时同步更新至虚拟模型界面,虚拟场景动态展示闸室结构状态、机电设备运行工况、河道水情变化情况^[3]。运维人员依托可视化终端即可全面掌握全站运行状态,无需频繁往返现场开展巡查作业。这种监测模式弥补了人工巡检点位有限、巡查间隔固定、无法全天候连续监测的短板,让水闸工况监测更加全面、连续、直观。

2.2 远程启闭智能仿真调度体系搭建

结合数字孪生仿真推演的核心能力,优化传统远程操控模式,搭建适配基层水闸的智能仿真调度体系。以往水闸远程启闭作业,仅依靠运维人员结合实时水位的工作经验下发操作指令,系统无法预判操作行为带来的工况变化,也无法评估设备承载状态,操作主观性较强。

全新调度体系可提前模拟不同闸门开度、不同上下游水位差条件下的河道水流流速、设备荷载数值与整体运行稳定性,通过多场景仿真对比,输出合理的闸门启闭区间与最优操作时长。运维人员结合仿真结果开展远程操控,大幅降低经验操作带来的偏差。系统自动留存所有启闭操作记录、开度数据、对应水情数据,为后续水情分析、工作复盘与调度资料追溯提供完整的数据支撑。

2.3 安全风险智能预警与溯源体系搭建

结合南疆流域水闸长期受风沙侵蚀、昼夜温差大、水位骤涨骤落、设备多处于低负荷待机状态的运行特征,建立适配本地工况的风险分级判定标准,搭建智能预警与隐患溯源体系。系统依托实时采集的运行数据,自动识别机电设备过载、闸门启闭卡顿、水位异常波动、闸体微小形变等各类安全隐患^[4]。技术可精准定位异常设备位置与隐患影响范围,结合历史运行数据比对分析,精准判定隐患成因。运维人员能够快速区分设备故障、自然工况波动、

人为操作偏差等不同问题类型,针对性落实处置措施。这套体系让安全管控从被动处置转为主动预判,有效提升基层水闸安全管理的精准性与时效性。

2.4 标准化运维数字化管理体系搭建

将现有水闸标准化运维管理制度嵌入数字孪生运行平台,解决传统纸质台账管理的诸多弊端,推动运维管理全流程数字化转型。基层传统运维工作中,巡检登记、设备养护记录、隐患整改台账、值班日志均以纸质手写记录为主,资料存放分散,查阅调取不便,容易出现漏记、补记、资料丢失等管理问题。

数字化体系可将每日巡检、季度专项养护、隐患闭环整改、值班报备等常规工作全部线上落地。系统根据标准化管理要求自动生成工作清单,提醒运维人员按期完成对应工作,工作人员按流程填报归档,所有工作全程留痕、可查可溯。数字化流程严格固化标准化作业规范,规避人为操作疏漏、流程落实不到位等问题,让标准化管理真正落地见效。

2.5 极端工况应急仿真调度体系搭建

南疆流域水文气象条件差异显著,春夏汛期河道集中来水,秋冬枯水期河道水位偏低,突发风沙天气极易造成河道积沙、水位骤变,固定的常规调度方案无法适配各类突发极端场景。针对区域典型工况特征,搭建专属应急仿真模型,模拟汛期行洪、风沙淤积、枯水期控水等特殊场景下的设备运行状态与河道水流变化规律^[5]。

通过推演不同闸门开度、不同调度时序的实施效果,对比筛选安全性与可行性最优的处置方案,持续优化完善应急调度预案。常态化的仿真推演,能够帮助运维人员熟悉极端工况处置流程,有效提升水闸应对突发水情、恶劣天气的应急处置能力,筑牢工程运行安全防线。

3 数字孪生赋能水闸运维的应用成效与管理革新

3.1 运维管控模式的智能化转型

数字孪生技术彻底打破了基层水闸依赖人工值守、经验判断的传统运维模式,推动整体管控体系完成智能化转型。系统整合可视化实时监测、工况仿真预演、操作数据追溯等多项核心功能,实现闸体结构、设备参数、河道水情的全方位动态管控。运维人员可提前预判水情变化规律与设备老化趋势,主动排查潜在隐患,摆脱了以往被动应对故障、处置问题的管护模式。

基层水闸运维工作逐步形成全新的管护体系,摒弃了传统高频现场巡查、人工手动操作的单一模式,依托远程可视化监控、智能预判分析、精准数字化管控的全新方式,大幅提升运维工作的科学性与高效性。

3.2 远程调度作业精度与安全性提升

传统远程启闭作业缺乏智能技术辅助,操作质量完全取决于运维人员的从业经验,主观差异性较大。相同水位工况下,不同操作人员的闸门开度、操作节奏存在偏差,容易出现输水不均衡、行洪不规范等问题,间接影响水资源调配效果与工程运行安全。

仿真预演技术的应用,可提前验证各类远程操作方案的合理性,规避盲目启闭引发的水位剧烈波动、设备过载运行等风险。智能技术辅助下的远程调度作业,能够精准匹配农田灌溉输水、汛期安全行洪的差异化管控需求,调度工作的科学性与适配性显著改善,区域水资源利用效率也得到稳步提升。

3.3 标准化运维管理落地质量提升

以往水闸标准化管理多以制度文件为依托,实际作业过程中,容易出现巡检频次不足、设备养护滞后、台账记录不规范、隐患整改闭环不彻底等落地问题,标准化管控效果难以保障。数字化体系的搭建,有效破解了这类管理难题。

系统将巡检标准、养护流程、隐患处置规范全部固化为线上作业流程,自动推送工作任务,全程监督工作落实进度。所有运维数据自动留存归档,形成完整的工作台账,杜绝人为疏漏、资料缺失、流程敷衍等问题。标准化管理不再停留在纸面制度层面,真正融入日常运维全流程,实现常态化、规范化落地。

3.4 工程安全长效保障体系持续完善

数字孪生技术实现水闸全生命周期动态管控,全方位强化工程安全长效保障能力。系统 24 小时不间断监测闸体结构形变、机电设备运行参数、启闭作业频次、设备负荷变化等关键指标,精准捕捉人工巡检难以发现的微小异常与隐性隐患。

各类潜在设备故障、工况风险均可提前排查处置,减少设备带病运行、突发停机等故障问题的发生频次,降低工程安全隐患。长期稳定的智能化管控,让水闸始终保持良好运行状态,持续稳定发挥区域灌溉输水、防洪排水的核心服务功能,筑牢基层水利工程安全运行防线。

4 结论

本文立足南疆流域特殊的水利运行工况,针对基层中小型水闸传统运维模式粗放、智能支撑不足的问题,搭建轻量化、高适配的数字孪生智能运维体系,完成多维度数字化功能模块的搭建与落地应用。整套体系依托现有标准化管理机制与远程启闭硬件设备搭建而成,无需大规模硬件改造,落地成本低、适配性强,能够精准适配干旱区风

沙侵蚀、水位波动剧烈的复杂运行场景。技术应用可有效弥补人工运维的短板,规范基层水闸巡检、养护、调度、隐患处置全流程,显著提升远程启闭作业的科学性与精准度,筑牢工程安全运行防线。相较传统管护模式,数字孪生赋能下的运维体系彻底摆脱经验化管理局限,实现水闸运维的数字化、精细化管控。后续可依托大数据、人工智能技术持续优化系统自主研判能力,推动单闸独立管控模式对接流域一体化调度体系,进一步完善干旱区基层水闸全生命周期智慧运维体系。

[参考文献]

[1]张诗媛,邓鹏.基于数字孪生的水闸工程安全运行管理

系统设计与实现[J].水电能源科学,2024,42(3):123-127.

[2]付希义,田亮,张庆萍,等.数字孪生技术在水利工程运行维护管理中的应用[J].水利水电快报,2024,45(S2):104-107.

[3]陈翠,安觅,董家贤,等.基于 BIM 的水闸数字孪生平台设计与应用研究[J].水利技术监督,2022(3):43-46.

[4]孙伟.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].山西水利,2023(5):51-53+61.

[5]方卫华,杨浩东,郑福寿.水工程数字孪生体系架构研究[J].江苏水利,2023,(12):34-38+43.

作者简介:土尔孙·卡日(1992.10—),男,维吾尔族,新疆伽师县,大学本科学历,工程师,研究方向:水闸运行管理。