

基于数字孪生技术的水闸工程安全运行管理研究

董 婕 王 博

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430000

摘 要：水闸工程作为水利基础设施的重要组成部分，其安全运行直接关系到防洪排涝、水资源调配及区域生态安全。随着新一代信息技术的发展，数字孪生技术通过物理实体与虚拟模型的深度融合，为工程全要素数字化重构与智能决策提供了创新手段。本文主要探讨数字孪生技术在水闸工程安全运行管理中的应用，系统阐述其技术优势与实施策略，希望推动水闸工程管理向主动预防、精准调控方向转型。

关键词：数字孪生技术；水闸工程；安全运行管理

水闸工程在防洪减灾、灌溉供水及生态平衡维护中承担关键角色，其运行环境受水文气象、地质条件及设备老化等多因素耦合影响，安全风险呈现动态化、隐蔽化特征。传统静态化管理模式难以实现复杂工况下多源风险的实时辨识与协同响应，亟需以数据驱动为核心的技术手段重构工程管理体系。数字孪生技术依托物联网感知、多尺度建模与机器学习算法，通过物理实体与虚拟空间的实时映射与迭代优化，为水闸运行状态的可视化监控、故障溯源性分析及预案仿真验证提供了技术突破口。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术是以物理实体为基础，通过多源感知、数据融合与建模仿真技术构建虚拟镜像系统，实现物理空间与数字空间的实时交互与动态优化。其核心在于依托物联网、大数据与人工智能，将水闸工程的结构特征、运行状态及环境参数映射为高保真虚拟模型，形成虚实共生的协同机制。在水闸工程中，该技术通过传感器网络实时采集闸体变形、应力分布、水力荷载等关键数据，结合多物理场仿真与机器学习算法，实现对闸门启闭、设备健康度及安全隐患的动态推演与预判^[1]。

2 数字孪生技术在水闸工程安全运行管理中的应用优势

2.1 增强多系统协同效率

数字孪生技术通过构建水闸工程与电子商务、物流企业的数据共享平台，打通供应链上下游的信息壁垒，实现资源调度与工程运维的深度协同。其虚拟模型可实时映射水闸运行状态对航道通航能力的影响，为物流企业提供水位、闸门开闭时间等关键参数的动态预测，优化船舶通行计划与货物配送路径。同时，电子商务平台可基于孪生系统的水文预警数据，提前调整仓储布局与应急物流方案，避免因水闸检修或突发洪水导致的运输

中断，提升供应链韧性。

2.2 优化资源配置与成本控制

数字孪生技术通过模拟水闸工程运行与物流网络的交互关系，支持跨领域资源的最优配置。例如，结合水闸调度计划与物流需求预测，系统可精准计算闸门启闭频次、船舶待闸时间与货物在途库存的关联性，为电商企业提供成本最优的仓储-运输协同策略。此外，孪生模型能够量化水闸安全维护（闸门润滑、结构加固）对物流时效性的潜在影响，辅助企业平衡工程运维投入与物流服务稳定性，避免资源浪费或风险失控^[2]。

2.3 提升全链条决策智能化水平

数字孪生技术通过集成水闸工程监测数据、电商订单信息及物流节点状态，构建“工程-商业-物流”一体化决策模型。其智能分析能力可实时评估水闸运行参数变化对区域物流网络的影响，例如闸室检修期导致的航道限行可能触发的配送延迟风险，并自动生成多目标优化方案（临时中转仓选址、替代运输方式调配），从而强化水闸安全管控与物流调度的联动性，为跨行业应急预案的制定提供数据驱动的决策支持，推动工程管理与商业运营的深度融合。

3 基于数字孪生技术的水闸工程安全运行管理策略

3.1 构建全域感知的孪生数据底座

随着水利工程数字化进程的加速，水闸安全运行管理的核心矛盾逐渐从单一结构安全向多维度、全要素协同管控转变。构建全域感知的孪生数据底座，需以工程实体为对象，系统整合物理空间与数字空间的动态关联数据，形成覆盖“结构-环境-设备-业务”的立体化数据资源池。该底座的建设需依托高精度传感器网络、边缘计算节点与标准化数据接口，对水闸主体结构变形、基础渗流场、闸门启闭机运行状态、上下游水文气象条件等关键参数进行全天候采集与同步传输，确保数据源的

实时性与完整性。

在实际操作层面,需重点突破多源异构数据的融合瓶颈。针对水闸工程中普遍存在的监测设备品牌混杂、通信协议不统一问题,需建立统一的数据编码规则与通信中间件,实现不同厂商设备的即插即用。例如,将激光测距仪采集的闸室位移数据、渗压计获取的基础扬压力数据以及闸门开度传感器的机械状态数据,通过时空对齐算法转化为统一时空基准下的结构化数据流。同时,需融合历史巡检记录、设计图纸、施工验收报告等非结构化文档,利用自然语言处理技术提取关键特征,构建覆盖水闸全生命周期的数据资产目录。此外,在闸室、启闭机房等关键区域部署边缘计算网关,对高频振动、视频监控等大带宽数据进行本地预处理,提取特征值后上传至云端模型,既降低数据传输压力,又提升实时反馈效率。而云端平台则依托分布式存储架构与数据湖技术,对海量数据进行分级存储与动态更新,建立面向不同业务场景的数据服务接口。例如,防洪调度模块可实时调用上下游水位、闸门开度与流量关系模型数据,而结构安全模块则需关联应力应变历史曲线与材料性能退化规律^[3]。

3.2 建立虚实联动的风险预警机制

数字孪生技术支持下的虚实联动预警机制,以物理实体与虚拟模型的实时交互为基础,通过多维度数据融合与动态推演,构建覆盖“监测-诊断-响应”的全链条风险防控体系,推动水闸安全管理从滞后处置向前瞻预判转型。依托全域感知数据底座,将闸体变形、渗流压力、启闭机振动等实时监测数据同步映射至孪生模型,结合水动力、结构力学及设备健康度等多物理场耦合仿真算法,动态重构水闸运行状态。例如,针对闸基渗漏隐患,系统可基于实时扬压力数据与地质参数模型,在虚拟空间中推演渗流路径扩展趋势,并量化评估其对闸体稳定性的累积效应,使风险识别不再局限于单一参数超限,而是能够揭示多因素耦合作用下的潜在失效模式。在机制设计中,需将历史运行数据、专家经验库与机器学习算法相结合,构建分场景、分等级的预警规则库。针对不同工况(汛期泄洪、枯水期蓄水),系统自动匹配对应的风险评估模型,并基于实时数据流动态修正预警阈值。例如,在闸门启闭过程中,孪生模型可结合门体振动频谱特征与机械磨损历史数据,自主优化振动幅值的安全区间,避免固定阈值导致的误报或漏报问题。同时,边缘计算技术的引入使得高频数据的本地化处理成为可能,进一步缩短从数据采集到预警触发的时延。

预警机制的闭环管理层面,需打通从风险识别到处

置反馈的业务流。当孪生系统检测到异常信号时,自动触发智能诊断模块,结合知识库中的故障树与案例库,生成风险成因解析报告及处置建议。例如,针对闸门启闭卡阻预警,系统可关联液压系统压力异常、轨道变形检测数据及润滑状态记录,综合判断故障根源是机械结构变形还是液压油污染,并推送针对性的检修方案。处置结果通过现场巡检终端或物联网设备反馈至孪生系统,形成“预警-处置-验证”的闭环迭代,持续优化模型参数与预警规则。最后,还应将孪生系统的预警输出接口与调度指挥平台、应急预案管理系统对接,实现风险信息向运维人员的结构化推送与任务自动派发^[4]。例如,在接收到闸室结构应力超标预警后,系统可自动关联巡检机器人任务清单,指定对特定区域的精细化检测,同时向管理人员推送历史相似案例的处置记录。

3.3 实施分级分类的智能运维模式

在水闸工程运维资源有限性与安全需求动态性矛盾日益突出的背景下,构建分级分类的智能运维模式,应依托数字孪生系统集成多源数据,涵盖闸体应力应变实时监测值、启闭机振动频谱特征、基础渗流场演变趋势等,结合材料性能退化模型与设备寿命预测算法,对水闸各子系统进行健康度量评分。例如,闸室混凝土结构依据碳化深度、裂缝扩展速率等指标划分为不同风险等级,闸门启闭机械系统则根据齿轮磨损度、液压油污染指数等参数确定维护优先级。

针对高风险设施单元,如汛期高负荷运行的泄洪闸门或存在历史损伤的闸墩结构,采用高频次自动化监测与预测性维护策略。通过部署振动传感器、声发射仪等智能感知设备,实时捕捉设备异常信号,并触发孪生模型的故障推演功能,提前规划备件更换或结构加固方案。对于低风险区域,如日常工况稳定的挡水闸段或新近完成维护的启闭机,则采用定期人工复核与预防性保养相结合的模式,减少不必要的资源消耗。此外,分级分类的落地实施需构建标准化的运维流程闭环。从孪生系统风险预警触发,到现场处置方案生成,再到维护效果反馈,形成“监测-诊断-处置-验证”的完整业务链。例如,当系统识别到闸基扬压力异常升高时,自动关联地质参数库与历史处置案例,生成涵盖加密渗流监测、排水孔疏通或反滤层修复在内的分级应对方案。现场运维人员通过移动终端接收任务指令,执行处置后同步上传检测报告与修复数据,驱动孪生模型更新健康度评价结果。

3.4 打造多层级协同决策平台

多层级协同决策平台以数字孪生技术为中枢,贯通

水利、应急、交通、生态等部门的业务系统，通过数据共享与模型交互，形成纵向分级管控、横向多域联动的决策支持体系，推动水闸安全运行从单一主体管理向多方协同治理转型。平台建设层面，应依托统一的数据交换协议，整合水文监测站的实时流量数据、交通部门的船舶通航计划、生态环境系统的水质监测指标以及水闸本体的结构健康数据，构建跨领域、多维度数据资源池。例如，在防洪调度场景中，平台将气象预测的暴雨强度、上游水库泄洪计划与水闸泄流能力模型进行动态耦合，生成兼顾防洪安全与航运需求的闸门联调方案，打破传统分头决策导致的效率损耗，为复杂工况下的多目标优化提供基础支撑。

基于数字孪生模型构建多物理场耦合仿真引擎，支持不同层级管理主体在虚拟空间中开展预案验证与效果评估。例如，针对突发性强降雨事件，平台可模拟不同闸门开启组合对下游城市防洪压力的影响，同时关联交通系统的船舶滞航风险与生态系统的水体污染扩散模型，生成兼顾安全、经济与生态效益的综合性决策建议。此外，还应按照风险等级与影响范围划分决策权限，建立从现场操作层到流域管理层的分级响应规则。例如，常规工况下的闸门调度由水闸管理单位自主执行，而涉及跨区域防洪或生态敏感水域的调度指令，则需触发平台的多部门联合决策模块，通过模型推演与风险评估形成共识性方案。所有决策过程与执行结果均通过区块链技术进行存证，确保责任链条可追溯、处置过程可复盘，为事后效能评估与制度优化提供数据依据。

3.5 构建动态迭代的知识管理体系

知识管理的基础在于建立标准化、可扩展的数据归集机制。依托数字孪生系统的实时监测与业务处置流程，自动捕获闸体结构响应、设备运行日志、维护操作记录等全维度数据流，并按照“时间-空间-事件”三维框架进行结构化存储。例如，将历年汛期闸门调度记录与同期水文气象数据、结构应力监测值进行时空关联，构建可追溯、可分析的决策知识单元。针对非结构化数据（巡检报告、专家会商纪要），采用自然语言处理技术提取关键语义特征，转化为机器可读的知识节点，形成覆盖设计、施工、运维全链条的知识图谱^[5]。

同时，在数字孪生系统中应部署知识挖掘引擎，持续分析历史风险事件与处置效果的关联规律。例如，通过聚类算法识别闸基渗漏事件中地质构造、扬压力变化与处置方案的有效性关系，提炼形成渗流控制最佳实践规则库。同时，建立模型参数自动优化机制，将每次风险预警的处置反馈数据（加固措施效果、设备维修后性能恢复度）反向输入孪生模型，驱动物理学仿真参数、设备寿命预测算法的精准度提升。在知识应用层面，基于知识图谱构建语义检索与推理引擎，实现管理问题的精准匹配与解决方案推送。例如，当系统检测到闸门启闭异响时，自动关联知识库中相似案例的故障特征、诊断过程与维修记录，生成涵盖振动频谱比对分析、关键部件检测清单的处置建议。对于新型风险或复杂工况，系统可调用知识库中的专家经验模块，结合强化学习算法生成多方案比选报告，辅助管理人员在不确定性中寻找最优解。

结束语

数字孪生技术为水闸工程安全运行管理注入了新动能，推动传统管理模式向数据驱动、虚实共治的智能化方向转型。通过全域感知、动态预警、分级运维、协同决策及知识迭代的闭环体系，实现了工程状态的可视化、风险预判的精准化与管控策略的系统化。未来，随着孪生模型自学习能力的深化与行业标准的完善，数字孪生技术将进一步释放其在工程全生命周期管理中的潜力，为水利基础设施高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]戴金龙.数字孪生技术在水闸工程安全运行管理中的运用分析[J].水上安全,2025,(01):189-191.
- [2]彭荣平.水利工程施工中水闸安全运行措施研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(08):214-216.
- [3]林森.水利工程施工中水闸安全运行措施分析[J].水上安全,2025,(03):173-175.
- [4]王梓丞.谈水利工程施工中水闸安全运行与检查养护[J].新农村,2024,(28):46-48.
- [5]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(03):123-127.