

数字孪生技术与智慧水利枢纽建设思考

王威威¹ 周 敬² 赵明伟²

1. 湖北省碾盘山水利水电枢纽工程建设管理局(筹) 湖北 武汉 430062

2. 湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司 湖北 武汉 430000

摘要: 数字孪生技术作为前沿创新体系,借助数据建模等手段为物理实体打造虚拟镜像。在总结凝练工程建设与运行管理关键技术经验基础上,本文围绕洪水防御、工程调度、电力生产、船闸通航、鱼类增殖放流及安全运行风险评价等核心业务,结合前期枢纽BIM模型,探讨智慧水利枢纽建设中数字孪生技术的应用方向与推进路径,以建设数字化、智慧化、绿色化的数字孪生碾盘山工程为目标,为水利枢纽智能化发展提供参考。

关键词: 数字孪生技术;智慧水利枢纽;模型构建;智慧调度;建设路径

引言:水利枢纽对保障区域水安全、促进水资源合理利用意义重大。传统水利枢纽管理面临信息获取不及时、决策缺乏科学依据等问题。数字孪生技术作为前沿创新技术,能打造物理实体虚拟镜像,实现双向交互。将其应用于智慧水利枢纽建设,有望破解传统管理难题,满足精准防洪调度、高效水资源利用等多元需求,推动水利枢纽管理向智能化迈进。

1 数字孪生技术的核心内涵与特性

1.1 数字孪生技术的本质定义

数字孪生技术作为一项前沿且极具创新性的技术体系,其核心在于借助数据建模、实时映射以及仿真分析等手段,为物理实体打造一个高度精准的虚拟镜像。这一技术突破了物理与虚拟空间之间的界限,实现了两者之间双向交互的独特能力^[1]。通过在物理实体上部署各类传感器,持续采集其运行过程中的关键数据,并将这些数据实时传输至虚拟空间。在虚拟空间中,基于这些数据构建的模型能够实时反映物理实体的状态变化,而虚拟模型经分析得出的结论,又可反向作用于物理实体,指导其运行与优化,形成一种动态、闭环的交互机制。

1.2 支撑技术体系构成

数据采集是数字孪生技术的基础环节,传感器分布于物理实体的关键部位,精准捕捉温度、压力、位移等各类信息。物联网技术将这些分散的传感器连接起来,实现数据的稳定、高效传输。建模渲染环节,三维建模技术能够直观呈现物理实体的外观与结构,BIM技术则为模型赋予丰富的属性信息。数据传输过程中,5G通信技术凭借其低延迟、高带宽特性,确保海量数据快速、准确地传输至处理中心。工业互联网为不同设备、系统之间的互联互通提供平台,促进数据流通与共享。仿真分析阶段,数值模拟技术通过建立数学模型,对物理实体

在不同条件下运行情况进行模拟预测。人工智能算法凭借强大的数据处理与分析能力,挖掘数据背后的潜在规律,为决策提供有力支持。

1.3 技术核心优势

数字孪生技术在多个方面展现出显著优势。实时性方面,能够实时获取物理实体的数据并更新虚拟模型,让管理者及时掌握最新动态。可视化特性将复杂的数据以直观的图形、图像形式呈现,降低理解难度。可预测性通过对历史数据与实时数据的分析,提前预判物理实体可能出现的问题与发展趋势。可控性则允许管理者在虚拟空间中对不同方案进行模拟测试,选择最优方案对物理实体进行精准调控。这些优势特别有助于应对碾盘山枢纽面临的多业务系统数据分散、预报预警预演预案能力不足等问题,为水利枢纽的智能化提供了强大支撑。

2 智慧水利枢纽建设的核心需求与目标

2.1 水利枢纽智慧化建设的核心需求

水利枢纽是保障区域水安全、促进水资源合理利用的关键设施,其智慧化建设具有迫切且多元的需求。防洪调度精准化是首要需求,面对复杂多变的洪水形势,需精准掌握洪水演进规律、水库水位变化等信息,依据实时数据迅速做出科学调度决策,以最大程度减轻洪水灾害对下游地区的影响。水资源利用高效化同样关键,要在保障生态用水前提下,合理调配水资源,满足工业、农业和生活用水需求,提高利用效率^[2]。工程运维智能化需求源于枢纽设施众多、运行环境复杂,需借助智能技术实现设备状态实时监测、故障诊断与预警。安全监测全面化需求是为及时发现结构安全隐患,通过全面监测手段对关键部位实时监测。以湖北省碾盘山水利水电枢纽为例,该工程为汉江中游大(2)型II等枢纽,

坝轴线总长1200米，最大坝高25.8米，水库总库容8.77亿立方米，然而，其信息化系统尚未覆盖下游河床冲刷等关键区域，且各业务系统独立运行，数据共享程度低，难以有效支撑发电、航运、灌溉、供水等多目标协同调度。这些需求既包含管理方式转变诉求，也涵盖先进技术应用期待。

2.2 数字孪生驱动的建设目标

借助数字孪生技术，致力于构建“感知全面、建模精准、仿真可靠、调控智能”的智慧水利枢纽体系。全面感知通过部署各类传感器，实现对水利枢纽全方位、全要素的数据采集。精准建模能够依据采集的数据，构建与物理实体高度契合的虚拟模型，准确反映其运行状态。可靠仿真可在虚拟空间中对不同工况进行模拟分析，为决策提供科学依据。智能调控则根据仿真结果进行自动化调控，最终实现风险提前预警、资源优化配置和运维降本增效。具体到碾盘山枢纽，其目标应聚焦于以BIM模型为基础，整合现有分散系统数据，构建统一数据共享池，覆盖泄水闸、电站厂房、船闸、鱼道等1200米坝轴线全要素的数字孪生体，并嵌入专业数学模型，实现从预报到预警、预演、预案的完整功能链，支撑装机180兆瓦的电站优化发电、保障年供水量1亿立方米的供水安全，并改善58公里航道通航条件与46.29万亩灌溉面积的水资源高效调配，最终达成“一机在手，数据全有，无人值班，少人值守”的智慧运管目标。

3 数字孪生技术在智慧水利枢纽建设中的核心应用方向

3.1 全要素数字孪生模型构建

物理实体精准映射是构建全要素数字孪生模型的基础。需充分结合前期BIM模型，运用三维建模技术，细致刻画几何形态与物理属性，融入材料特性、力学参数等。同时，实时采集设施运行状态数据，如闸门开度、发电机组转速等，使虚拟模型与物理实体全面数字化对应，为后续分析决策提供精确基础。例如，在碾盘山枢纽数字孪生模型中，需精确集成泄水闸、电站厂房、船闸、鱼道及左右岸连接坝等主要建筑物的几何与物理属性，并实时关联闸门启闭状态、6台机组发电工况等运行数据。环境与水文数据融合进一步拓展了模型维度。将流域水文、气象、水质等环境数据整合，构建含自然要素的综合数字孪生场景^[1]。在此场景中，可直观看到降雨对水位的影响、水质变化与生态环境的关联等。特别需要补充对下游河床冲刷等关键动态信息的建模与融合，形成更全面的决策支持基础。模型动态更新机制确保了模型时效性。建立基于实时监测数据的迭代更新机制，

随物理实体变化，虚拟镜像及时调整，始终保持与物理实体动态一致。

3.2 智慧调度与决策支持

防洪调度仿真推演借助数字孪生模型，模拟不同洪水场景下的水位、流量变化。通过设定洪峰流量、洪水历时等参数，观察枢纽运行状态，并记录各关键节点数据变化，为制定防洪调度方案提供可靠仿真支撑，提升调度科学性与精准性，确保在真实洪水时做出最优决策。水资源优化配置模拟结合用水需求与水文条件，通过模型仿真优化供水、发电等分配方案。根据不同季节、区域用水特点及水库实时蓄水情况，模拟多种分配方案并评估效果，从而提高水资源利用效率，实现合理调配与高效利用。针对碾盘山枢纽，数字孪生技术可支撑其在汉江流域的精准防洪调度，并优化发电（年均发电量6.16亿千瓦时）、供水（年供水量1亿立方米）、灌溉（改善46.29万亩）及航运（改善58公里航道）的多目标协同。应急场景预演与处置构建闸门故障、坝体渗漏等突发险情虚拟场景，预演处置流程，规划应对措施，通过优化响应策略提升突发事件应对能力，减少灾害损失，保障枢纽安全运行。

3.3 工程运维智能化升级

设备运行状态实时监测通过模型关联设备监测数据，实现发电机组、闸门等核心设备运行状态的可视化监控。监控界面上以图表和动态数据展示设备运行参数，一旦出现异常即发出预警，明确指出异常设备名称、位置及类型，方便运维人员迅速定位处理。结构健康诊断与评估基于模型整合坝体、边坡等结构监测数据，开展沉降、位移等指标分析。运用算法对监测数据进行深度挖掘，通过对比历史数据和正常范围值，判断结构健康状态。对存在安全隐患部位，提前预警并生成详细诊断报告。运维任务智能调度结合设备状态与运维需求，通过模型仿真优化运维计划。根据设备运行情况和维护周期，综合考虑人员技能、工作时间和工具可用性，合理安排运维资源。碾盘山枢纽在2022年至2023年完成了闸门、启闭机等金结机电设备的安装调试、下闸蓄水及机组并网发电，其长期稳定运行尤其需要数字孪生技术实现运维智能化升级。

4 智慧水利枢纽建设的推进路径与保障

4.1 技术研发与创新

智慧水利枢纽建设对技术有着极高的要求，加强大场景轻量化建模、实时仿真算法等关键技术攻关是推动建设进程的关键举措。大场景轻量化建模技术，旨在以高效的方式对水利枢纽庞大的场景进行精准呈现。水

利枢纽涵盖众多复杂的设施与区域,传统建模方式可能因计算量大、模型复杂而难以快速运行。而轻量化建模通过优化算法和模型结构,在保证模型精度满足实际需求的前提下,大幅降低计算成本,提升模型运行速度,使其能够更流畅地应用于水利枢纽的日常管理与决策分析^[4]。实时仿真算法则是智慧水利枢纽的“智慧大脑”之一。水利枢纽运行过程中,各种工况和参数时刻变化,实时仿真算法能够依据实时采集的数据,迅速模拟出水利枢纽在不同条件下的运行状态。应坚持需求牵引,围绕工程安全、防洪兴利调度、标准化管理等核心业务开展技术研发,确保技术赋能管理效能提升。

4.2 数据体系建设

数据是智慧水利枢纽建设的基石,构建统一的数据标准规范是首要任务。统一标准能够确保不同来源、类型的数据在采集、存储和使用过程中格式统一、语义一致,有效避免数据混乱与歧义,为系统互联和综合分析提供基本保障。在完善数据采集网络方面,需扩大监测覆盖范围,切实提高水文、气象、工程运行等关键数据的采集频率与精度,形成多维度、全时段的数据采集能力。数字孪生碾盘山工程建设应以BIM模型与流域信息为基础构建数字化场景底座,核心在于整合电站监控、闸门启闭、通航调度等现有独立子系统,打通信息孤岛,形成统一数据共享池。同时应建立安全可靠的数据存储与管理体系,通过数据加密、访问权限控制等技术手段,确保数据在传输与存储过程中的安全性、完整性和保密性。以碾盘山枢纽为例,其自2018年导流明渠开工,历经截流、主体工程施工、下闸蓄水,至2023年首台机组并网发电,积累了涵盖建设与初运行全过程的宝贵数据,为构建数字孪生系统提供了重要的历时与实时数据基础。

4.3 人才队伍培育

智慧水利枢纽建设需要一支高素质的人才队伍。培养兼具水利专业知识与数字孪生技术能力的复合型人才是重中之重。这类人才既熟悉水利枢纽的工程结构、运行原理等专业知识,又掌握数字孪生技术的建模、仿真、数据分析等技能,能够将两者有机结合,为智慧水利枢纽建设提供创新思路和技术支持。强化运维团队的技术应用能力也不容忽视。运维团队直接负责水利枢纽的日常运行和维护,通过定期组织技术培训和实践操作,让他们熟练掌握数字孪生技术的应用方法和操作流程,能够及时处理系统运行过程中出现的问题,保障智慧水利枢纽的稳定运行。推进数字孪生工程建设需各业务部门共同参与,在需求梳理、系统应用各环节加强复合型人才培养。

结束语

数字孪生技术在智慧水利枢纽建设中展现出巨大潜力,从全要素模型构建到智慧调度决策,再到工程运维升级,全方位提升水利枢纽管理水平。通过技术研发、数据体系完善、人才培育优化等保障措施,推动数字孪生技术在水利枢纽深度应用。未来,随着技术发展,智慧水利枢纽将为保障水安全、促进可持续发展发挥更重要作用。

参考文献

- [1]顾思斌,陆炜,钟爱成.数字孪生技术在水利枢纽工程管理中的应用[J].江苏水利,2022(S02):28-31.
- [2]宋敏,周伊文.数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径[J].水利经济,2023,41(6):73-78.
- [3]崔雷.数字孪生技术在现代化水利工程中的应用[J].科技与创新,2023(22):143-145.
- [4]高念高.数字孪生水利工程中的大数据应用初探[J].信息技术与标准化,2023,(08):87-91.