

数字孪生技术在大型水库水利设施管理中的应用

郝瑞涛

三门峡黄河明珠(集团)有限公司 河南 三门峡 472000

摘要: 本文探讨了数字孪生技术在大型水库管理中的应用,以三门峡水利枢纽为例,分析了其在智慧防汛、水资源优化调度及工程安全管理等核心业务中的实践成效。通过构建数字孪生平台,实现了从经验驱动到数据驱动的管理范式转变,显著提升了水库应对复杂汛情的能力,为大型水库智能化管理提供了可借鉴的经验,并展望了未来发展方向。

关键词: 数字孪生技术; 大型水库; 水利设施管理

引言

在全球数字化转型浪潮下,水利行业正经历着前所未有的技术变革。数字孪生技术作为连接物理世界与数字世界的桥梁,正在重塑传统水利工程的管理模式。根据水利部《智慧水利建设规划纲要》要求,2025年我国将建成一批具有示范效应的数字孪生流域和数字孪生水利工程。在这一背景下,三门峡水利枢纽数字孪生平台的建设具有重要的标杆意义。

三门峡水利枢纽是新中国在黄河干流上修建的第一座大型水利枢纽工程,位于河南省三门峡市和山西省平陆县交界的黄河峡谷段。控制黄河流域面积68.84万km²,占黄河流域面积的91.5%,控制黄河水量的89%、沙量的98%。水库于1960年9月投运,至今已60年,主要功能是防洪、防凌、调水调沙、发电、灌溉、供水。水库按千年一遇洪水设计,设计总库容96.4亿m³,目前总库容近60亿m³。

作为三门峡水利枢纽管理单位,明珠集团联合多家单位,在黄河三门峡库区及水利枢纽坝区以无人机航测与倾斜摄影等数字三维地球信息测量资料为基础,集成黄河水沙测报与枢纽实时运行动态等多类要素信息,同时结合实际业务模型与工作需求,建设了数字孪生三门峡平台体系,实现了从“经验驱动”到“数据驱动”的管理范式转变。本文深入探讨该技术在三门峡水库的实际应用,分析其在智慧防汛调度、水资源优化调度、工程安全管理等环节的实践成效,以期为大型水库智能化管理提供可借鉴的经验。

1 水利行业数字孪生技术特性

水利行业数字孪生技术特性鲜明。数字孪生技术以物理实体为蓝本,综合多种技术构建数字镜像。在水利行业,其数据维度复杂,要整合水文、气象、地质等多源异构数据,这些数据在采集频率等方面差异大。在

时空尺度上,它极为广阔,既需实现全时间序列动态模拟,又要覆盖从局部到流域的空间范围,形成跨尺度数字映射。业务耦合度方面,系统要满足防洪调度等多目标协同优化,这些目标间存在复杂制约关系,需通过平台建立平衡机制。水利数字孪生的这些特性,决定了它不仅依赖先进技术,更需对水利业务本质有深刻理解。只有这样,才能构建起真正实用的智能化管理平台,更好地服务于水利行业的各项工作,提升水利管理的效率与水平。

2 三门峡水库管理需求分析

三门峡水库在传统管理模式下面临着数据孤岛、决策滞后、可视化不足三项挑战。首先,数据碎片化问题突出,20余个独立建设的业务系统形成信息孤岛,水位监测、闸门控制、发电运行等关键数据分散存储,格式标准不一,导致跨部门数据共享率不足30%;其次,决策过程存在严重滞后性,特别是在汛期调洪演算时,需要人工收集数据、手动输入模型,单次方案制定平均耗时4-6小时,难以满足应急响应需求;最后,可视化手段严重匮乏,主要依赖静态二维图纸和表格数据,既无法直观展示库区三维地形和淹没范围,也缺乏动态模拟能力,使得空间分析、方案推演等关键业务停留在经验判断层面。这些问题严重制约了水库精细化管理的水平提升,亟需通过数字化转型实现突破^[1]。

3 三门峡水库数字孪生技术

3.1 架构设计

三门峡枢纽数字孪生平台总体以B/S架构为主。主要包含7个独立层:用户终端层;SOA支撑服务层;业务模块层;应用支撑层;数据存储层;数据传输层及数据采集层。整个系统以3个相关数据层为基础,以应用支撑层与业务模块层为核心,以SOA服务层为媒介,为用户终端层提供高品质服务。用户终端层。主要任务是面向用

户端,包括:PC端的Web服务、移动端(手机与iPad)APP、及其它终端,涉及登陆界面、信息内容及主要服务功能等。SOA服务层。主要涉及:安全认证、身份管理、权限管理、交互通信、服务描述、服务注册、服务发现、流程编排等。屏蔽硬件层、操作系统层及网络层,使逻辑关系与底层平台无关,提供标准信息通道,实现异构环境下的可靠传输,保障系统的可靠性、可移植性及可扩充性。业务模块层。主要遵循高内聚、低耦合原则,将每个业务模块的功能分解成适当程度的插件,以支持对服务的灵活调用与业务扩展。包括:三门峡水库全域三维仿真水体等驱动、映射及模拟;三门峡水利枢纽防汛抗旱调度指挥决策等多种业务应用。应用支撑层。提供数字孪生与业务应用的各种基础服务,如消息引擎、三维引擎、GIS引擎、图表服务、语音服务、视频服务、ADO.net.dataadapter、异常处理及日志管理等。数据存储层。支持关系型数据、对象型数据、文件型数据等物理存储,主要包含:地理信息库、专题信息库、三维模型库、水沙监测库、枢纽运行库及业务信息库等。数据传输层。主要包括:超短波、GPRS/4G/5G、光线宽带、专线/专网、互联网等。数据采集层。涉及地理空间信息、水库与枢纽核心要素信息、模型信息等。主要包括:卫星遥感、无人机航测、水沙自动测报、站点数据同步、电站运行监控、闸门运行监控、大坝安全监测及人工填报等^[2]。

3.2 关键突破

三门峡水库数字孪生平台在关键技术攻关方面取得了一系列重大突破。解决了库区数字高程与影像镶嵌融合及大范围静态场景建立;整合水位遥测、大坝监测等系统,构建全天候数据采集体系,为三维动态场景提供实时数据支撑;开发三维空间分析工具,实现库区任意点高程查询(精度 $\pm 0.1\text{m}$)、两点距离测算(自动分段计算地形起伏)及区域面积量算(支持曲面投影);融合流体仿真与动态渲染技术,将水位、机组负荷等27项参数与水三维模型实时关联,可视化展示泄流动态与淹没范围;建立“四预”联动机制,集成12个水文站数据,通过调洪演算模型(计算速度提升15倍)生成优化方案,典型2021年秋汛洪水洪峰预测误差仅3.2%。

在数据融合领域,研发了具有完全自主知识产权的时空大数据处理引擎,攻克了1954北京坐标系、1980西安坐标系与CGCS2000坐标系的无损转换难题,实现了库区2370平方公里范围内所有历史测绘数据的统一基准整合,平面定位误差控制在 $\pm 0.1\text{m}$,高程误差 $\pm 0.05\text{m}$ 。在三维建模方面,创新性地提出了“宏观+微观”的分层建模

方法,宏观层面构建了覆盖黄河小北干流、渭河下游等区域的数字高程模型(5m网格),微观层面则对枢纽27个泄水建筑物进行毫米级精细建模,其中12个深孔闸门的液压启闭机构实现了运动仿真。在仿真计算领域,突破了大规模水动力学并行计算技术,采用GPU加速的SPH算法,将库区洪水演进模拟速度提升20倍,仿真精度达到92%,能够实时展示不同调度方案下的淹没范围和演进过程。在移动应用方面,首创了水利数字孪生轻量化技术,通过动态LOD加载和云端渲染,使手机APP能够流畅展示包含20万个三角面片的三维场景,关键业务信息查询响应时间控制在1.5秒以内。

4 数字孪生技术在三门峡水库核心业务中的应用

4.1 智慧防汛系统

三门峡水利枢纽数字孪生平台构建的智慧防汛“四预”(预报、预警、预演、预案)闭环管理,实现了防汛决策从经验驱动向数据智能驱动革命性突破。在预报环节,系统融合了黄河流域12个国家级水文站的实时监测数据(包括水位、流量、含沙量等15项参数)、欧洲中期天气预报中心和中国气象局的高分辨率数值降雨预报。根据水库调洪演算,三门峡水库入库设计或预报洪水过程预报 $Q-t$ 、起调水位 Z 、水库调控模式、进出库水量平衡计算公式、调洪演算方法及计算机无限收敛迭代试算约束条件等,进行水库敞泄或控泄调洪演算,求得三门峡水库最高滞洪水位、最大出库流量及其相应时刻,提高了三门峡水库入库洪水预报精度。在预警环节,当流域关键站点降雨量、含沙量、河道(水库)水位超过警戒数值时,系统发出预警信息。如当库水位超过318m时,系统自动触发预警流程。预演功能依托数字孪生库区环境(黄河小北干流、渭河下游、潼关以下河段、回水区及大坝下游10km范围),实现各级洪水位、含沙量条件下库区实时淹没映射与模拟预演,通过三门峡库区水体数字孪生的关联与映射技术,虚实融合,模拟展示三门峡库区水三维动态淹没场景及淹没范围,耕地、房屋等情况。根据预案进行响应及时向黄河水利委员会及河南省防汛抗旱总指挥部报告,为三门峡市人民政府迁安救护预案实施提供可靠信息。

在黄河汛前调水调沙期间,通过快速水文预报和制定水库调度方案,为精准控制水库下泄流量和库水位,实现与万家寨下泄水流的精准对接,以及为增强小浪底调水调沙后续动力、增强调水调沙整体效果发挥了重要作用。在防汛“四预”特别是“预演”中,能够快速准确进行不同频率调洪计算、库区不同水位淹没范围演示、库区不同区域高程定位和面积计算、防洪抢险现场

和指挥部实时视频传输、对外信息化成果形象展示等都发挥了关键作用。在典型2021年秋汛洪水防御中三门峡水库与小浪底、故县、陆浑、河口村水库联合防洪调度运用,精准控制水库水位和下泄流量,为确保黄河防洪安全、实现水库冲刷等综合效益最大化发挥了重要作用^[3]。

4.2 水资源优化调度

三门峡水库是一座综合性水库,在保障防洪、防凌、调水调沙等安全的同时,兼顾水资源综合利用。三门峡数字孪生建设为三门峡水库各阶段模拟调度预测演算分析、水沙调控、实时优化调度方案选择及防汛调度决策等一系列工作提供技术支撑,能够显著提升水库调度精细化水平,为水库前瞻性趋势预报与实时优化调度有机结合提供了重要支撑。在三门峡水库阶段性水位与出库流量控制与实现过程,可按照入库流量过程与库水位控制要求,快速演算和预测相应出库流量控制指标;可随时按照入库流量与出库流量控制指标,快速演算和预测相应库水位指标,使水库动态优化调度的快速性、灵活性、对比性、选择性均得到显著增强,使三门峡水库优化调度由较优目标向最优目标发展和进步。

在黄河凌汛初期和桃汛期,该系统全天候监控运行,提高了三门峡水库未来5-10天趋势预报的精度,为水库优化预报调度提供科学依据和技术支撑。在黄河内蒙古河段流凌封河期,为水库优化预报调度和安排机组检修提供科学依据;在开河桃汛期,结合开河预报,适时预降水位,控制最低水位在316m左右,维持水库高水位运行。安全地实现了水电站7台机组持续满负荷运行的最佳稳定状态,确保了豫西电力系统良好运行环境;同时,提高水能利用率和避免弃水,在三门峡国际黄河旅游节和库区供水期间,在预报周期长、来水波动大、水库控制要求高的情况下,通过最大化超前预报和精细化调度,平稳实现节会预期水库调度目标,为创造良好的节日氛围和优美的环境、为节会的顺利开展发挥了重要作用。

4.3 工程安全管理

三门峡数字孪生平台创新构建的“监测-评估-预警-处置”全链条安全管理,实现了工程安全管理的智能化转型。在监测环节,平台整合了分布在坝体、闸门、厂房等关键部位的高精度传感器,包括光纤应变计(精度 $\pm 1\mu\epsilon$)、渗压计(精度0.1%FS)、振动监测仪(采样频率100Hz)等18类监测设备,构建了分钟级(关键部位达10秒/次)的全天候监测网络,年采集数据量超过4TB。评估系统采用多尺度有限元模型(FEM),建立了包含78万个单元的坝体结构健康诊断体系,通过融合深度学习算法,能够自动识别0.1mm级的结构变形异常。预警机制创新实施“蓝-黄-红”三级动态预警,当监测数据超过阈值时,系统在20秒内完成风险等级判定并触发响应流程。处置环节集成23类标准应急预案库,可根据预警等级自动匹配处置方案,并通过移动终端实时推送至相关责任人,为枢纽安全运行提供了智能化保障。

结语

数字孪生技术在三门峡水库智慧防汛调度、水资源优化调度、工程安全管理运用中成效显著,提升了应对复杂工情险情汛期能力,提供可复制的“三门峡模式”。其核心价值在于突破时空限制,实现风险预警、决策制定与处置执行优化。未来,随着AI、物联网技术发展,数字孪生将向自主决策、跨流域协同演进,建议加强流域级体系建设,推动联合调度与数据互通,进一步探索技术与管理的深度融合。

参考文献

- [1]徐瑞,叶芳毅.基于数字孪生技术的三维可视化水利安全监测系统[J].水利水电快报,2022,43(01):87-91.
- [2]卢建华,刘晓琳,张玉炳,等.基于数字孪生的水库大坝安全管理云服务平台研发与应用[J].水利水电快报,2022,43(01):81-86.
- [3]张绿原,胡露露,沈启航,等.水利工程数字孪生技术研究与探索[J].中国农村水利水电,2021(11):58-62.