

数字孪生大藤峡探索与实践

温 鹏, 刘 斌, 李镇江, 甘郝新, 刘 闯

(广西大藤峡水利枢纽开发有限责任公司, 530200, 南宁)

摘 要:为了推动智慧水利建设,大藤峡公司以“一台双赋三化四预”为目标,通过搭建数字孪生平台、夯实信息化基础设施、提升业务应用智能化水平、完善网络安全体系、强化内外部系统集成,开展了数字孪生大藤峡技术探索和工程实践,取得了多项技术突破,在防汛、水资源调配、工程安全等业务领域取得了良好的应用成效。

关键词:大藤峡水利枢纽;数字孪生水利工程;“四预”;可视化

Exploration and practice of the Digital Twin Datengxia Project//Wen Peng, Liu Bin, Li Zhenjiang, Gan Haoxin, Liu Chuang

Abstract: To promote the construction of smart water conservancy, Datengxia Corporation aims for the goal of “one platform, dual empowerment, three transformations, and four pres”. By building a digital twin platform, consolidating information infrastructure, enhancing the intelligent level of business applications, improving the network security system, and strengthening internal and external system integration, Datengxia Corporation has conducted technical exploration and engineering practices in the Digital Twin Datengxia Project, achieving numerous technological breakthroughs. Good application effects have been obtained in areas such as flood control, water resource allocation, and project safety.

Keywords: Datengxia Water Conservancy Hydropower Project; digital twin water project; forecast, earlywarning, rehearsal and plan; visualization

中图分类号: TP399+TV 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2023)21-0080-05

智慧水利是新阶段水利高质量发展的最显著标志和六条实施路径之一,数字孪生流域是智慧水利的核心与关键,数字孪生水利工程是数字孪生流域的重要组成部分。大藤峡水利枢纽是国务院确定的172项节水供水重大水利工程的标志性项目之一,是珠江流域关键控制性工程,被水利部列为开展数字孪生建设先行先试的11个重大水利工程之一。推进数字孪生大藤峡建设是实现工程建设运行向数字化、网络化、智能化转变,充分发挥工程综合效益的内在要求,也是筑牢珠海、澳门供水保障“第二道防线”,彰显“六个重要”工程新定位(即流域防洪安全的重要保障、实施国家水网重大工程的重要节点、粤港澳大湾区水安全的重要屏障、建设珠江黄金水道的重要中枢、区域电力安全的重要支撑、地方乡村振兴的重要水源),支撑珠江

流域“统一规划、统一治理、统一调度、统一管理”的迫切需要。广西大藤峡水利枢纽开发有限责任公司于2021年12月21日在水利行业率先启动数字孪生大藤峡相关工作,2022年5月编制完成《“十四五”数字孪生大藤峡建设方案》(《数字孪生大藤峡建设先行先试实施方案》)并通过珠江委网信办、水利部网信办的审查,并于2022年下半年及2023年开展了数字孪生大藤峡建设(一期)项目实施。

一、方案设计

1. 建设目标

数字孪生大藤峡建设的总体目标,是建设“一台双赋三化四预”,打造水利行业数字孪生工程标杆。“一台”是指建设一个数字孪生平台;“双赋”是指对工程

收稿日期:2023-10-13

作者简介:温鹏,正高级工程师,主要从事水利投资计划管理、水利信息化等工作。

建设管理与工程运营管理双向赋能；“三化”是指支撑公司标准化、专业化、精细化管理；“四预”是指开展预报、预警、预演、预案研究与应用。到2023年基本建成大藤峡数字孪生平台和相关基础设施，实现数字化场景与水利工程信息的动态交互，率先在防洪与水量调度、工程安全监测预警实现“四预”应用突破；到2025年全面建成数字孪生大藤峡，实现对大藤峡工程全要素和工程管理全过程数字化映射、智慧化模拟、多方案优选，与实体工程同步仿真运行、交互迭代，有力支撑工程调度运行精准决策。

2. 建设范围

数字孪生大藤峡涉及的业务范围包括工程安全、防洪调度、水资源配置(补水压咸)、发电生产、船闸通航、库区运行、安全生产及工程建设等。地理范围覆盖工程管理和保护范围(含坝区、库区)及工程运行下游影响区域，以工程库区200年一遇洪水淹没范围、防护工程、消落区及回水区临时淹没范围，工程坝区重点施工区、核心生产区，工程下游影响区浔江防洪保护区等为重点。此外，模型建设内容应充分考虑流域上下游、左右岸、干支流的影响，建设边界将超出上述地理范围。

3. 建设任务

以水利部印发的《智慧水利建设顶层设计》《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》为遵循，数字孪生大藤峡主

要建设任务包括搭建数字孪生平台、夯实信息化基础设施、提升业务应用智能化水平、完善网络安全体系、强化内外部系统集成等。数字孪生大藤峡总体框架见图1。

(1) 搭建数字孪生平台

以BIM+GIS+IoT技术为支撑，构建覆盖大藤峡坝区、库区及水库运行影响区域的L2级和L3级数据底板，汇聚水雨情、工程安全监测信息、上游工程调度信息、影响区域的经济社会数据，承载工程规划、设计、建设、运行、维护等阶段产生的信息，实现工程全生命周期管理。围绕工程防洪、通航、水资源配置、发电、灌溉等综合效益发挥，深入开展模型库、知识库建设，包括水利专业模型、智能模型和可视化模型，以及工程防洪调度规则库和历史案例库等，为日常业务和管理决策提供支撑。数字孪生大藤峡预报调度模型概化图见图2。

(2) 夯实信息化基础设施

持续部署大坝安全监测设施和水雨情监测站点，构建覆盖各类设施设备的工程物联网，建设南宁、桂平、武宣三地高速互联的光纤环网，提升发电厂、枢纽、船闸等工程自动化控制水平，完善桂平云平台常规计算存储能力，建设高性能计算能力和广州异地备份中心，建设泄流预警设施，为数字孪生工程提供感知传输、计算存储和运行环境支撑。

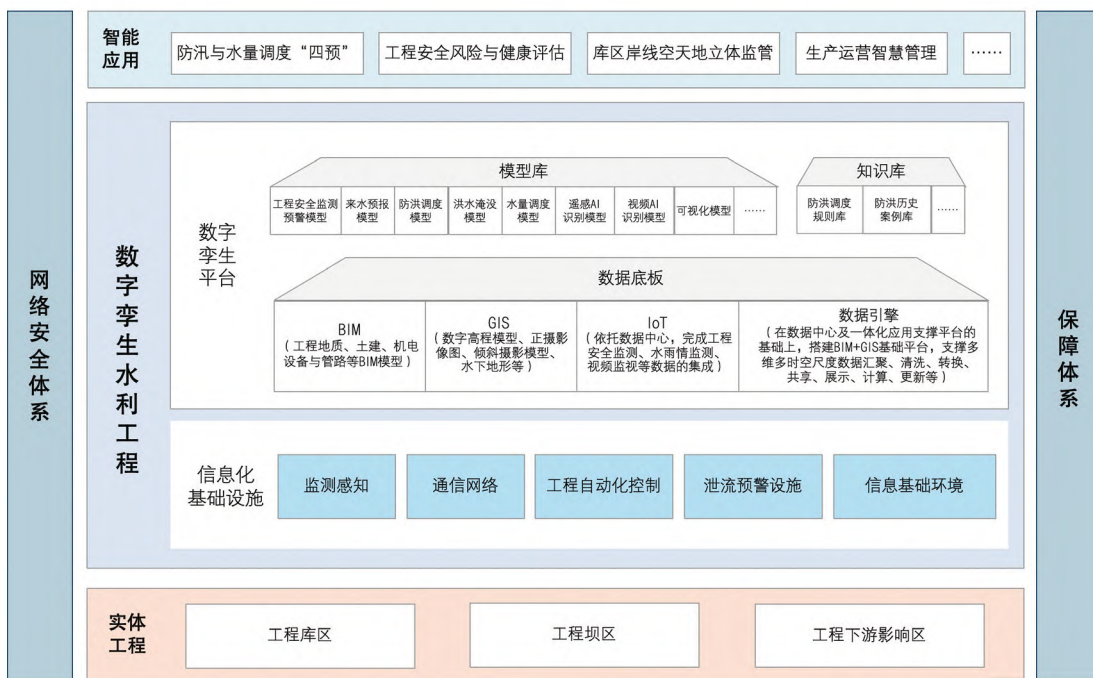


图1 数字孪生大藤峡总体框架

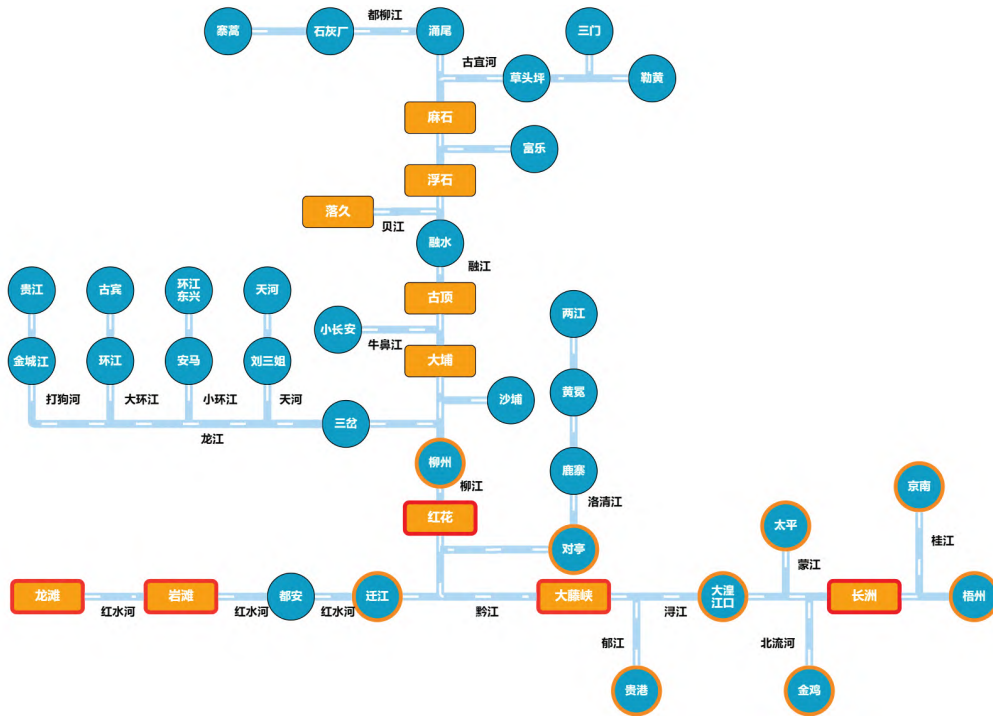


图2 数字孪生大藤峡预报调度模型概化图

系统功能;研发船舶智能过闸系统、三维仿真培训系统、智能巡检机器人,提升运行管理智能化水平。

二、技术突破

数字孪生大藤峡实施过程中,大藤峡公司始终把推动业务应用、解决痛点难题作为根本出发点和落脚点。结合方案设计、业务需求调研和初期技术探索,数字孪生大藤峡项目组梳理出以下痛点难题:防洪与水量调度“四预”方面,主要体现为河

(3)提升业务应用智能化水平

聚焦工程综合效益发挥,结合大藤峡工程建设与生产运行并行期现状和未来全面投产后生产运行管理需求,构建工程防洪、补水压咸等业务数字化模拟预演场景,开展防汛与水量调度“四预”系统、工程安全风险与健康评估系统、安全生产管理系统、库区岸线空天地立体监管系统等建设,辅助生成决策建议方案,提升业务应用智能化水平。

(4)完善网络安全体系

严格划定网络安全分区和物理隔离,构建大藤峡集中安全管理控制平台。建立制度、规范、流程等构成的大藤峡网络安全管理制度标准体系,建设上下协同、内外联动的威胁感知预警系统,提升网络安全预警和处置能力,建设适应企业业务发展进程的网络安全体系。重点对管理信息大区安全防护体系进行完善。

(5)强化内外部系统集成

依托数字孪生平台强化业务应用内部集成,打造多尺度分级优化、支持业务应用横向扩展的大藤峡数字孪生体。围绕数字孪生大藤峡推进已建、在建信息化项目集成,通过大藤峡数据中心,实现各类基础数据、监测数据和业务管理数据的全域、全时、全量汇集与管理;通过一体化门户,搭建“智慧工地”“智慧运营”“智慧企业”“智慧园区”四大业务板块,充分整合现有业务

道型水库预报调度受上游水库影响且预见期不足,已率定模型参数面向未来新场景预报精度不理想,复杂调度场景下库区蓄水情况模拟难度高等;工程安全监测预警方面,主要体现为传统监测预警模型易收敛为局部最优,安全监测预警指标体系覆盖面不足且统一特征性不强,安全监测要素表征不够直观等;库区管理方面,主要体现为传统巡查监管手段耗时耗力,遥感无人机等技术门槛高且难以深度应用等;数字孪生工程可视化方面,主要体现为传统GIS平台三维效果差,办公终端配置较低,难以满足高保真可视化需求,不同业务场景可视化功能分散建设,集成难度大等。

针对以上痛点难题,组织经验丰富、业务能力强的项目负责人、技术专家、业务骨干,组建工作专班,通过联络会议制度和现地集中开发模式,确保数字孪生建设与一线生产业务深度融合。对外开展多轮技术交流调研,邀请院士及行业内外权威专家提供全过程咨询,确保项目建设科学、实用、安全。目前已取得多项技术突破。

1.防汛与水量调度“四预”方面

以扩展预报内容、提高预报精度、延长预见期为目标,在构建降雨—产流—汇流—演进等全链条预报调度模型基础上,探索多源雨量融合的气象水文耦合关键技术,强化预报误差实时自动校正技术和预报精度

评价机制,提升实时预报精度。基于对西江水库群动静库耦合模型、大藤峡单库动库容调洪模型、大藤峡单库静库容调洪模型等的动态耦合组网,建立大藤峡分散型入库一维非恒定流数学模型,将上游控制站迁江、柳州与对亭至坝址的无控区间划分为17个子区间,铺设库区129个计算断面,进行水库动库调洪计算和入库洪水推演。在调度模型内部实现11种调度模式动态组装,实现复杂调度指令实时计算。

在调度模型参数率定方面,系统基于最新的河道下垫面状态与动态水文预报成果,从水动力学模型糙率参数库中初步选择与未来洪水量级相适应的糙率参数,并利用与未来洪水量级相同的最新监测水文资料,对初选糙率参数进行率定与验证,实现模型参数的动态优化更新,使其更加符合当前河道特征与水情特点。

2. 工程安全风险与健康评估方面

针对水利工程常态运行场景及极端工况下的超前应对场景,以根据水位变化趋势对工程变形、渗流、应力应变等安全态势作出预测预报为目标,建立了基于有限元模型和随机森林算法的工程安全风险与健康评估技术体系。采用随机森林算法,建立输入变量(渗流监测数据、坝基扬压力、应力应变、温度和预应力锚索锚固力)与目标值(大坝安全预警指标阈值)之间的关系,以现场安全监测数据及数值模拟结果为样本库,综合考虑温度、雨量、水位等特征分量影响,模型训练后可准确表征大坝安全趋势。

以有限元法安全稳定系数分析为框架,结合随机森林法筛选出的监测指标体系及历史同期数据库,对坝体安全性及其影响参数进行相关性分析,模拟大坝安全监测效应量与环境量之间的复杂函数关系,实现大量相关因素的非线性学习,从而构建“点-断面-工程”分类预警指标体系。

3. 库区岸线空天地一体化监管方面

面向库区巡查监管需求,建立了以遥感影像智能识别解译技术为核心的库区岸线空天地一体化监管技术体系。通过采集库区范围国产高分卫星影像数据,针对岸线异常、滑坡、崩塌、浸没以及河湖“四乱”(乱占、乱采、乱堆、乱建)问题定制训练遥感AI智能识别模型,相比基于通用数据集的模型提升了针对大藤峡库区问题识别发现的精度和效率。结合无人机航拍技术实现了问题发现、复核、处置、归档等全流程闭环管

理。同时基于长时序影像建立了可追溯的库区数字岸线,实现了库区淹没预演分析与库区监管业务融合。

4. 可视化平台和集成框架方面

数字孪生大藤峡可视化平台承担着流域场景全景展示、工程场景高保真呈现、业务功能多视角智能仿真模拟、业务应用一体化集成等多项重点支撑性功能,在水利行业内缺少成熟的技术案例。面向以上需求构建了GIS+UE双引擎的可视化平台,以及多时空尺度多源异构BIM+GIS数据融合镶嵌技术,在宏观场景下满足数据快速加载、地理定位及空间分析需求,在局部场景下实现真三维高保真渲染,满足构件级BIM数据人机交互需求。采用云端渲染的技术路线,地理空间数据在高性能GPU服务器端渲染为三维场景,用户终端以视频流的方式展示应用,满足系统在图形计算性能较低的办公终端访问、使用需求的同时,实现了多角色用户并发控制和地理空间数据集中管理。此外通过与业务应用研发团队协同攻关,构建了可扩展的数字孪生大藤峡可视化集成框架,实现同一可视化场景下业务应用功能灵活切换和跨领域协同联动,充分体现了“数字孪生体”的概念。

三、应用成效

数字孪生大藤峡历经一年多的建设,形成了“1+N”的技术成果体系,数字孪生平台基本成型,防汛与水量调度“四预”系统、工程安全风险与健康评估系统、安全生产管理系统(图3)、库区岸线空天地立体监管系统等逐步投用,已取得较好的应用成效。

1. 2022年年初抗旱保供水

2022年年初,珠江流域发生近60年来最严重干旱,特别是2月16日,磨刀门水道马角水闸出现最高潮位,



图3 安全生产管理系统

并叠加6~7级东北风,不利于取用淡水。大藤峡防汛与水量调度“四预”系统初步成果于2022年2月及时上线,密切监视水库及下游河道水情、三角洲咸情等信息,通过短期水量调度模型预演调水过程,辅助制定工程调度方案。2月13日至18日,通过大藤峡水利枢纽工程调度,补水近2亿 m^3 ,水库最大水位降幅1.82 m,有效控制了西北江咸潮影响,下游主要取水口含氯度峰值大幅度降低,发挥了大藤峡水利枢纽作为珠海、澳门供水保障“第二道防线”的重要作用。

2.2022年西江编号洪水防御

在2022年西江第4号洪水期间,利用数字孪生大藤峡防汛与水量调度“四预”系统较为准确地预测大藤峡的入库洪峰过程,通过模型计算科学制定工程调度方案,预演工程上下游淹没情况。根据方案提前腾空库容,成功拦蓄约7亿 m^3 洪量,最大削减洪峰3500 m^3/s ,并将洪水出峰时间推后一天,成功避免了西江、北江洪水遭遇,为北江洪水宣泄创造了有利条件,以建设期有限的防洪库容实现了最大防洪效益。

3.大藤峡工程61 m蓄水验收

提前上线工程安全风险与健康评估系统,基于数字大坝“一张图”,实现工程重点部位位移变形、应力应变、渗流渗压等安全监测信息的可视化展示与分析;基于有限元模型和随机森林算法,构建“点-断面-工程”分类预警指标体系,快速模拟指标与安全监测量之间的函数关系,分析工程安全性态及其演化趋势。在大藤峡水库蓄水至61 m正常蓄水位过程中,通过系统全程监视分析大坝安全状态,保障工程安全运行。

4.大藤峡公司智慧生产运营

船舶智能过闸系统大大提高了大藤峡船闸通航效率,降低了人为操作风险,保障了船闸24小时不间断安全运行;三维仿真智慧生产系统在高保真映射的虚拟环境中开展设备巡检、操作、检修、故障处理等工作,满足了生产一线对高效培训的迫切需求;智能巡检机器人大大降低了高压电缆廊道、高压出线场巡回检查的工作强度,提高了设备监测的连续性与实时性,有效提升了运行管理的自动化与智能化水平。

四、总结与展望

数字孪生大藤峡工程是一项融合流域、区域、工程等多个层级,服务于防洪、航运、发电、水资源配置、灌溉等多领域综合效益发挥的复杂系统工程,具有显著的综合性和探索性、创新性、迭代性,实施过程中应当

始终将支撑业务发展、促进业务深度融合作为根本出发点和落脚点,充分整合已有信息化资源,集中优势力量开展技术探索和研发。下一步将聚焦工程高质量运行和综合效益发挥,在已建系统迭代优化、进一步深化业务融合的基础上,扩展“2+N”业务应用,强化跨领域业务协同联动和多目标模型研发,打造数字孪生大藤峡“2.0版本”,为保障珠江流域和粤港澳大湾区水安全、推动珠江水利高质量发展提供强有力支撑。

参考文献:

- [1] 李国英.深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展[N].中国水利报,2023-01-17.
- [2] 李国英.推动新阶段水利高质量发展 为全面建设社会主义现代化国家提供水安全保障[J].中国水利,2021(16).
- [3] 赵建平,马晓媛,黄为一.水利部部署数字孪生流域建设工作[N].中国水利报,2021-12-24.
- [4] 《中国水利》杂志编辑部.水利高质量发展主题下数字孪生流域建设[J].中国水利,2022(9).
- [5] 蔡阳.数字孪生水利建设中应把握的重点和难点[J].水利信息化,2023(3).
- [6] 温鹏,甘郝新,刘斌.数字孪生大藤峡建设与探索[J].中国水利,2022(20).
- [7] 蔡阳,成建国,曾焱,等.加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J].中国水利,2021(20).
- [8] 中华人民共和国水利部.数字孪生流域建设总体方案[R].2022.
- [9] 中华人民共和国水利部.智慧水利建设顶层设计[R].2020.
- [10] 中华人民共和国水利部.数字孪生流域建设技术大纲(试行)[R].2022.
- [11] 中华人民共和国水利部.数字孪生水利工程建设技术导则(试行)[R].2022.
- [12] 詹全忠,陈真玄,张潮,等.《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》解析[J].水利信息化,2022(4).
- [13] 黄鹏嘉,王广铭,王之龙.“智慧大藤峡”顶层设计[J].中国水利,2020(4).
- [14] 黄光胆,黄鹭,谢燕平.浅谈大藤峡水利枢纽水库优化调度管理[J].红水河,2020(6).
- [15] 吴乐平,黄光胆,侯贵兵,等.大藤峡水利枢纽“22·6”洪水防洪调度与效果分析[J].中国水利,2022(22).

责任编辑 王 慧