

谈数字孪生技术在锦绣川水库流域防洪中的运用

李双,常坤

(济南市水利工程服务中心,山东 济南 250112)

【摘要】 济南锦绣川水库为高海拔山区水库,基础设施不足,防洪压力大。为确保防洪安全和公众生命财产安全,济南市水利工程服务中心锦绣川水库服务处与山东华特智慧科技有限公司以及济南大学等单位共同打造了锦绣川水库流域数字孪生平台,并初步形成了流域“四预”体系,从而有效提高了流域降雨感知能力,并实现了流域的精确调度,流域防洪安全的优化对于推动社会经济协同发展具有显著效益。

【关键词】 数字孪生;锦绣川水库;水库管理

【中图分类号】 TV697

【文献标志码】 A

【文章编号】 1009-6159(2025)-06-0029-03

Discussion on Application in Flood Control of Digital Twin Technology in Jin Xiuchuan Reservoir Basin

LI Shuang, CHANG Kun

(Hydraulic Engineering Service Center of Jinan Municipality, Jinan, Shandong 250112, China)

Abstract: Jinan Jin Xiuchuan Reservoir is a high-altitude mountain reservoir with insufficient infrastructure and great flood control pressure. To ensure flood control and the safety of public life and property, the Jin Xiuchuan Reservoir Service Office of Hydraulic Engineering Service Center of Jinan Municipality, together with scientific and institutions such as Shandong Huate Smart Technology Co., Ltd. and University of Jinan, has jointly built a digital twin platform for the Jin Xiuchuan Reservoir Basin. A preliminary "four-forecast" system for the basin has been formed, which has effectively improved the rainfall perception capability of the basin, realized precise dispatching of the basin, and optimized the flood control of the basin. This has shown significant benefits in promoting the coordinated progress of social economy.

Key words: Digital twin; Jin Xiuchuan Reservoir; Reservoir management

锦绣川水库位于高海拔地区,洪水发生风险高。为防止山洪灾害,确保大坝安全以及保护下游群众的生命和财产安全,济南市水利服务中心锦绣川水库与山东华特智慧科技有限公司及济南大学等相关单位以通信技术、信息传输技术、数据库等技术构建流域数字孪生系统,通过水文水资源学与现代信息技术分析算法模块,打造流域防洪调度控制、工程整体运行维护业务的应用系统。通过水文水资源学和遥测、通讯、信息、系统工程等多学科相结合的方法,对物理流域对象进行全生命周期流程的监视、检测、仿真、预测、决策、管理和控制,实现流域治理管理决策

的最优。

1 存在问题

1.1 数据欠缺整合

当前,锦绣川水库信息化建设面临着多源异构数据分散存储、业务系统垂直割裂等诸多挑战。各监测平台之间未能形成统一的数据中台支撑,导致水文、工情、环境等全要素的动态关联分析无法实现,与水利工程标准化要求存在一定差距。

收稿日期:2025-03-31

作者简介:李双(1983—),女,高级工程师

1.2 水库缺乏洪水预报预警分析

由于河道坡度较大,强降雨时,径流汇聚速度加快,从而导致防汛压力剧增。当前的洪水预报体系以及下游风险评估与实际运行状况之间存在一定的系统性误差,预警准确度有待提高,这为工程安全稳定运行带来了潜在风险。

1.3 防洪风险图无法满足工作需要

现有的防洪风险图是根据 20 年前的基础地形数据(比例尺为 1:25000)编制,这使得它无法满足当前精细化防洪管理的需求以及实际工作需要。伴随着社会经济的高速增长,当前下游保护区的状况已呈现出明显的变化特征。

1.4 感知设备布设不足

当前,监测站点的建设涵盖了 5 个位移监测站、3 个渗压水位监测站、1 个库区水位监测站、1 个流速流量监测站以及 1 个水质监测站。设备布设数量不足,且监测点位的布置存在不合理之处,导致无法实现流域全要素感知。

1.5 下泄流量理论与实际差距较大

泄流量的估算一直依赖于经验公式,但在 2018 年及随后的坝下麻池段河道测量中,闸门开启小开度时的实际流量与理论流量存在显著差异。特别是在抗击“温比亚”“利奇马”等台风和强降雨期间,对水库调度产生了较大影响。

1.6 流域下垫面已发生重大变化

上游经过 40 多年的流域建设,原有和实际地貌已有了很大的不同,现有资料无法满足防汛需要,需要进一步扩展研究。

1.7 安全预警不及时

锦绣川水库的防洪库容相对较低,仅达到 400 万 m^3 。在下游麻池段河道中,其安全泄量仅为 70 个流量。鉴于下游卧虎山水库与锦绣川水库为串联型水库,在近年来的汛期调度过程中,河道易出现安全隐患。同时锦绣川水库周边现有 8 个乡村、20 多公顷农田。由于上游坡降较大,洪水发生时,各类污染物会随洪水进入水库,导致水质污染事件,进而影响城市供水安全。

2 建设思路

紧紧围绕国家、省(市)和区域经济发展的需要,运用大数据分析、虚拟模拟等手段,明确本次信息系统开发任务如下:建立一个数字化孪生系

统框架,实现流域防洪调度控制、工程综合管理服务两个应用系统,增强流域短临降水感知;实现数据、模型、知识三者的整合与优化,初步形成流域防洪“四预”架构,达成数字孪生工程与实体工程的同步仿真,为锦绣川水库数字孪生流域建设奠定坚实基础,从而提升流域防洪安全及精确调度能力,增强流域工程管理与调度水平。

3 项目内容

3.1 信息化基础设施建设

建立监测感知体系、通信网络、运行环境以及计算和存储设备。针对现有降雨监测站、水质监测站、水文监测站、工程安全监测站以及视频监控系統流域分布特点,增设监测设备并开发相应配套软件。

3.2 业务应用系统建设

依托 BIM 与 GIS 技术,整合多元化的管理数据,构建洪水态势评估、雨水气象资讯、降雨及水利工程预警、洪水淹没图展示等模块功能。系统整体构成为 4 个紧密相连的子系统,分别是预报、预警、预演和预案。预报系统是对整个系统进行水文模型计算和结果(数据)的处理;针对超过预警阈值的模型计算结果,直接发送至预警系统,根据报警的类别以及预设的责任人制度,把预警数据迅速直观地播发出去;预演是向客户提供一系列预设的专题场景,通过调用预测系统中的相关水文模型,帮助水库管理单位以最简单、合理的方法进行洪水模拟,在防洪预案库的基础上为管理单位提供方案优选功能,实现预测调度一体化业务新模式;在知识库和人工智能模型的辅助下,预案系统为水库管理单位提供了交互式预案编制与会商分析决策支持的服务。

1)预报系统。通过整合运用二维水动力学模型,对气象水文数据及流域下垫面资料进行分析,实现降雨趋势解析、流域洪水预警以及单站作业预报等功能。利用可获得的、有质量保证的、适当分辨率的流域 DEM 对整个区域加以分割,在水平和垂直方向上把区域分割为多个小单元,各个小单元均视为一个具有物理意义的小流域,而所有小流域均有各自的特性数据,包括了 DEM 土地利用类型、土壤类型等。在独立单元流域中,对蒸散发量与产流量进行计算。在此过程

中,相邻单元的影响不予考虑,这意味着各单元流域内的蒸散发量与产流量的生成被视为相互独立。径流在各单元内产生后,通过汇流网络逐级汇聚,最终抵达出口单元。汇流划分成坡面汇流、河道汇流以及水库汇流。通过采用不同计算方式,整个模型可划分为6个相互独立的组成部分,包括流域划分、蒸散发计算与产流计算、汇流计算、参数确定以及模拟计算。借助信息化基础设施的优化,为整个体系提供水文模型解析及过程/结果计算,运用数字孪生、一体化图等技术手段实现直观可视化展示,并对分析结果进行推送预警系统,下游河道建模如图1。



图1 下游河道建模

2)预警系统。构建了阈值指标,针对超出阈值的模型运算结果,在相应分系统中,将依据预警类型及预设的责任人体系,运用屏幕闪烁、声音警报、手机短信等多种手段,将实时监测与预报信息在线动态预警。该平台同时通过地图汇总、信息查询、流域地图、雨情监视图等图表手段,查询区域内降水分布、预警地区信息、危险区位置以及历史山洪灾害发生点的数据,清晰掌握当前区域工情、水情、气象等数据,并可依据气象预报进行监测,分析降雨落区是在重点防治区还是在一般防治区。当站点降雨量达到或接近预警阈值时,系统将发出提醒,并及时发布通知,为调度会商决策的启动、调度操作措施的实施以及调度执行效果的评估提供信息支持服务。

3)预演系统。为用户提供一系列预设的专题情景,通过调用预报系统中的相应水文模型,辅助用户以最简洁、科学的方式启动洪水预演。预演成果包括风险区划统计、防汛责任人以及防汛专报。风险区域划分统计展示了库区和下游河道附近商铺和房屋在不同风险等级下的数量分布,

并提供风险项目清单。针对范围内各商铺和房屋,列出相应的防汛责任人及其联系方式,以便于确保防汛职责得以贯彻至基层工作人员。下游河道泄洪方案的实施背景、河道水位风险要素、风险分区清单以及洪水风险分布图等信息,通过防汛专报进行全面整合与展示。针对锦绣川水库特有的泄洪策略,可以进行预演仿真分析。此外,系统还支持在使用时进行自定义输入逐小时的泄洪量,从而提交预演计算任务。在预演中计算的与完成的各项仿真任务都将自动存储至仿真预演列表,同时提供取消计算、删除及查看功能,为后续预案优化提供数据支持。

4)预案系统。在知识库与人工智能模型的辅助下,为水库服务处管理人员提供了人机交互式的预案编制与会商分析决策支持,并推出预案优选服务,从而实现预报调度一体化业务的新模式,流域洪水预演图见图2。

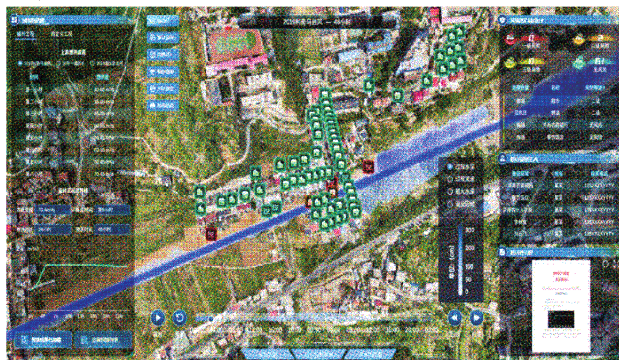


图2 流域洪水预演

4 项目效益

锦绣川水库数字孪生平台项目从2022年1月起进行开发,至2023年11月一期工程竣工并投入使用,在2024年汛期中应用,增强流域短临降水感知,形成了流域尺度、局部流域尺度、水工程尺度的数字化场景;建立防洪、供水调度等水工程模型,整合仿真引擎、可视化系统,实现锦绣川水库流域数字孪生模型层构建,开展了锦绣川水库流域实时降雨工情数据的模拟和镜像化描述;为防汛决策提供了信息支撑,实现了数字孪生项目和实体工程的同步模拟运行,初步形成了区域防洪“四预”体系,有效提高了区域内防洪安全和精确调度,对北方山区水库的防洪调度,提供了有力的参考依据。

(责任编辑 赵其芬)