

数字孪生驱动的智慧凌塘水库平台设计与开发

史常乐¹, 李明生¹, 陈晓¹, 胡学飞², 卞佳琪¹

¹长江水利委员会水文局长江下游水文水资源勘测局, 江苏 南京

²南京木牛数能信息技术有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2025年12月18日; 录用日期: 2026年1月7日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

本文选取凌塘水库为对象进行数字孪生工作的探索与研究。根据数字孪生凌塘水库的四个建设、四个融合、四个管理、四预功能等建设内容, 综合运用物联网、云计算、BIM、GIS等现代信息技术, 融合凌塘水库多源多维多尺度的地形、水文、气象、管理等实时在线监测数据和水动力、水文等数值模拟技术, 构建了数字孪生凌塘水库平台, 主要业务包括安全监测、立体巡检、水文预报、水位/沉降/病害/设备预警、溃坝预演、防洪调度/兴利调度/应急调度/溃坝撤离预案、应急管理、综合管理等。平台的建设可为凌塘水库的智慧化安全运行提供保障, 也可为推动新阶段水利高质量发展提供一定的参考和借鉴。

关键词

数字孪生, 凌塘水库, 智慧水利, 信息技术, 平台

Design and Development of Intelligent Lingtang Reservoir Platform Driven by Digital Twin

Changle Shi¹, Mingsheng Li¹, Xiao Chen¹, Xuefei Hu², Jiaqi Bian¹

¹Lower Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Nanjing Jiangsu

²Nanjing Automaticox Information Technology Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: December 18, 2025; accepted: January 7, 2026; published: February 26, 2026

Abstract

This paper selects Lingtang Reservoir as a pilot project of digital twin to explore and study and puts forward four constructions, four integrations, four pre-functions, four managements, and other construction contents of digital twin Lingtang reservoir. By comprehensive use of the Internet of Things, cloud computing, BIM modeling technology, GIS and other modern information technology, combined with Lingtang Reservoir

作者简介: 史常乐(1989-), 女, 河南新乡人, 工程师, 主要从事河道治理、防洪研究、水文水资源分析论证等研究, Email: carolhappyshi@163.com

文章引用: 史常乐, 李明生, 陈晓, 胡学飞, 卞佳琪. 数字孪生驱动的智慧凌塘水库平台设计与开发[J]. 水资源研究, 2026, 15(1): 75-82. DOI: 10.12677/jwrr.2026.151010

multi-source, multi-dimensional and multi-scale real-time online monitoring data such as terrain, hydrology, meteorology, management and other numerical simulation technology, we achieve the full coverage of Lingtang Reservoir data sharing and fine management. Its main business includes safety monitoring, three-dimensional inspection, hydrological forecast, water level/settlement/disease/equipment warning, dam break rehearsal, flood control dispatching/profit dispatching/emergency dispatching/dam break evacuation plan, emergency management, comprehensive management, and so on. It provides guarantee for the intelligent and safe operation of Lingtang Reservoir, and provides solid guarantee for promoting the high-quality development of water conservancy in the new stage.

Keywords

Digital Twin, Lingtang Reservoir, Intelligent Water Conservancy, Information Technology, Platform

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

智慧水利建设是新阶段水利高质量发展的六条实施路径之一，数字孪生又是智慧水利建设的重要内容。数字孪生平台的建设是实现水利工程虚实之间双向映射、动态交互、实时连接的关键途径，可将水利工程运行管理水平全面提升到新高度[1]。近年来，物联网、云计算、BIM 建模技术、GIS 等现代信息技术的发展，为实施数字孪生工程提供了有利条件，将有助于提高水库大坝的治理和管理水平[2]。

凌塘水库是一座典型的中型水库，现行管理体系中存在着数据孤岛、感知盲区、信息化和智能化建设呈点状碎片化等问题。这些问题对于同类型水库工程具有代表性，作为水利部 2022~2023 年数字孪生流域建设先行先试任务之一，数字孪生凌塘水库的设计和开发，贴合智慧水库建设的迫切需求，对全面提升凌塘水库安全管理水平、提高数字孪生工程实践和应用水平具有重要意义。

2. 整体框架设计与关键技术

2.1. 整体框架设计

数字孪生凌塘水库由数据底板构建、数字孪生平台开发、业务应用层设计等组成。首先收集地形数据、监测数据、水资源管理、设施管理等数据，进而通过 BIM 建模、实时在线监测、倾斜摄影、遥感、三维激光扫描以及三维渲染等技术手段[3]-[7]，集成融合凌塘水库多源多维多尺度的地形、水文、水质、工程、管理监测数据，对凌塘水库进行三维高度仿真实景建模，实现凌塘水库的数字化场景构建。充分利用底层感知设备、运行管理数据，基于水文预报模型及水流动力学模型[8]-[11]，实现凌塘水库在数字孪生体虚拟空间中的映射，助力其智慧化治理与管理能力提升，整体框架如图 1 所示。

2.2. 关键技术

1) 数据收集与共享技术：数据来源主要为基础地理数据和实时监测数据，基本资料清单见表 1。数据共享通过构建基础数据、监测数据、业务管理数据、跨行业共享数据、地理空间数据等在内的数据资源池，建设支撑行业内外共享的水利数据服务，为整个数字孪生可视化提供建模所需的数据支撑，并在可视化界面设定各类指标。通过对外提供数据接口、指定业务库数据推送和数据文件下载等功能实现对外的数据共享。

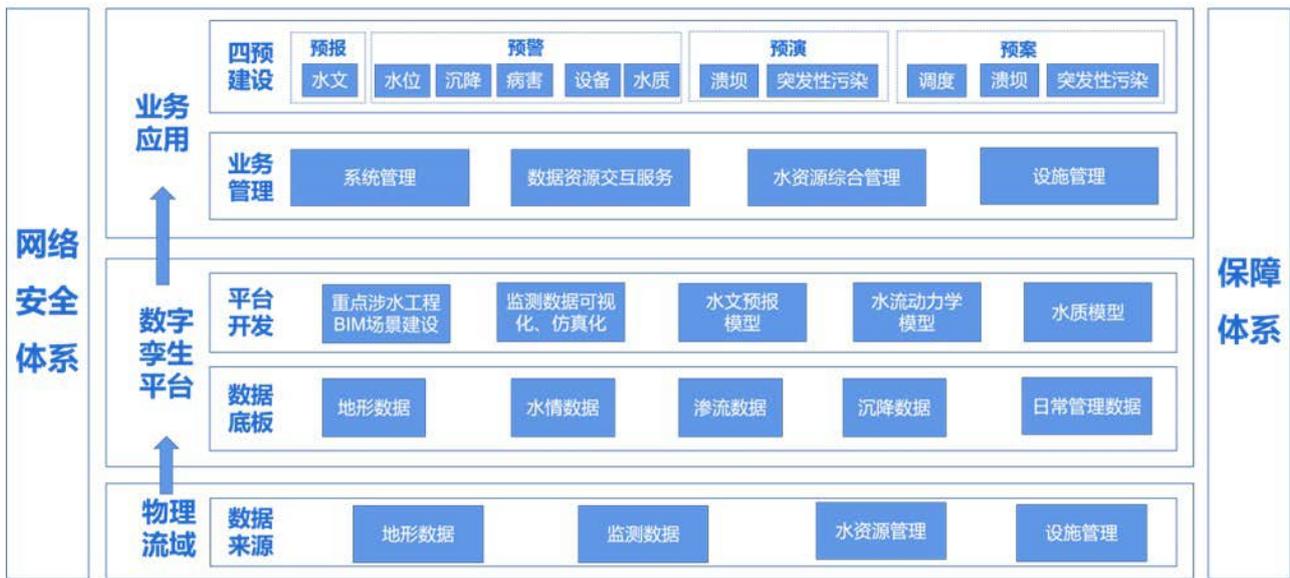


图 1. 数字孪生凌塘水库总体框架

表 1. 数字孪生凌塘水库基本资料清单

一级类	二级类	内容
基础地理数据	二维数据	各年度影像数据
		电子地图数据
		POI 兴趣点
		地名地址
		DEM
	三维数据	倾斜摄影
		三维白模
		三维精模
		BIM 数据
实时监测数据	监控视频数据	获取视频监控的监控数据
	设备数据	如流量计量器、闸门压力电表等传感设备的实时信息
	生态检测数据	水、大气等实时的监测数据

2) 二三维一体化技术: BIM 建模作为 BIM 应用的基础, 将传统的 2D 图纸转换为 3D 模型, 呈立体化效果。将三维地理空间模型数据与二维地理空间数据叠加套合, 实现地理数据多维度地理空间直观表达、属性查图、空间查询、专题图制作等, 具有数据存储管理一体化、显示一体化、分析一体化、服务一体化的特点。

3) 空间大数据技术: 空间大数据核心技术包括空间大数据存储技术、空间大数据计算技术、流计算技术及空间大数据可视化等技术。同时基于 IT 大数据技术重构传统 GIS, 支持海量空间数据的分布式存储、处理与分析, 实现数量级的性能提升[12]-[15]。

4) 微服务治理技术: 微服务架构是采用一组服务来构建应用的方式, 围绕业务能力构建服务, 每个微服务运行在独立进程中, 通过轻量级的交互机制通讯。目的是利用微服务有效地拆分应用, 使应用模块化、服务化, 实现敏捷开发与部署。其核心价值在于规范的管理框架、方法论和最佳实践、平台级的服务集成能力、服务的

管控和治理能力。

5) 水文预报技术: 水文情报预报指对江河、湖泊、渠道、水库和其他水体的水文要素实时情况的报告和未来情况的预报。考虑到凌塘水库未设置控制性入库水文站, 缺乏实测入库洪水资料, 故采用降雨径流相关图法基于降雨预报间接推算入库洪水。技术实现流程为: 获取气象部门降雨预报→匹配历史降雨过程→降雨-径流模型构建→预报入库径流过程→判断暴雨停止(停止则结束流程, 未停止则径流预报滚动修正, 重复流程)。

3. 主要建设内容

3.1. 四个建设

1) BIM 建模: 通过三维 BIM 建模, 构造水库重要建筑与设备的孪生模型, 针对大型重要设备实现部件级建模, 实时接入物联网平台监测数据, 并接入故障分析平台, 实现虚拟设备故障响应显示, 为凌塘水库的安全监控提供辅助决策。

2) 实景三维建模: 进行凌塘水库的倾斜摄影实景三维建模, 倾斜摄影实景三维是一个利用连续二维影像生成三维模型的系统, 包括前期数据采集、数据处理、数据后处理及数据后应用等多个环节。技术流程为: 原始影像获取→特征点匹配→空中三角测量→多基线多视觉匹配→三角网(TIN)构建→自动纹理映射→三维建模。

3) 感知体系建设: 依托现有监测感知设备和网络体系, 在现有的监测平台(包括水位、雨量、流量、渗流、闸启闭、监控等)基础上, 通过网络体系进行数据库交换方式实时传输, 增加建设坝体变形的在线实时监测, 建设多源多维多尺度的感知体系。

4) 标准规范建设: 以《数字孪生流域建设技术大纲》《数字孪生工程建设技术导则》《水利业务“四预”功能基本技术要求》等技术文件和《数字孪生流域共建共享管理办法》为指导框架, 结合《“十四五”智慧水利建设规划》的建设目标, 建立并不断完善凌塘水库数字孪生工程的标准体系, 制定《凌塘水库数字孪生工程数据标准》《凌塘水库数字孪生工程数据共享标准》等规范, 为数字孪生凌塘水库工程建设提供支持与服务, 为实现众多系统的互联互通、信息共享、业务协同、信息安全打好基础。

3.2. 四个融合

1) GIS 与实景三维、BIM 融合: 通过地理信息系统技术、虚拟现实技术、三维建模技术将凌塘水库周边地形和影像以及各类工程、地物信息以虚拟三维的形式在计算机中真实、直观、形象地表现出来, 实现 GIS 与实景三维融合。通过无人机倾斜摄影制作实景三维模型, 针对重点建筑物使用 PBR 技术制作建筑的 BIM 模型, 使实景三维模型与 BIM 模型叠加, 既可以准确表现真实场景内容, 又可以精确展示重点建筑结构和纹理材质, 从而实现实景三维与 BIM 融合。

2) 数据底板与物理过程模型融合: 在数字孪生凌塘水库数据底板上, 构建水文预报模型及溃坝模型, 实现信息化技术与专业技术的深度融合。

3) 数字场景与视频融合: 结合可视化边缘网关、三维虚拟场景、实时视频等技术, 极大地还原水库实时视频情况, 为决策者及管理者及时掌握系统当前实时状态提供可视化表现手段, 为远程遥控现场设备提供视觉参考。

4) 数字场景与 AI 融合: 结合 AI 技术, 实现水库病害 AI 识别、非法人员闯入、非法垂钓、水位自动识别等 AI 能力, 并与孪生场景深度融合。

3.3. 四个管理

1) 立体巡检管理

以凌塘水库巡查检查、隐患处理为业务方向, 数字孪生平台提供 APP、无人机及桌面端巡查工具, 从发现

问题到解决问题，实现凌塘水库隐患的多流程闭环管理，包括移动巡检位置实时漫游、移动巡检轨迹跟踪、移动巡检路径规划和重现、移动巡检指挥、巡检问题在线跟踪与闭环管理等功能。

2) 水库安全管理

通过对大坝、高边坡、库区堤防及闸泵站等建筑物建立精细模型，基于建筑物 BIM 模型、重要监测设施精细模型，并结合大坝结构和库岸系统的变形、应力应变、渗流、管涌、渗漏等参数的自动监测，构建工程智能诊断模型，实现 BIM 模型与数学模型的深度融合，对监测数据、巡视检查结果、隐患记录、风险记录进行融合分析，实时诊断工程安全状况，评估工程健康度，及时发现异常情况，为水库的安全管理与运行调度提供及时准确的信息。

3) 应急管理

安全事故再现：结合三维虚拟现实技术，实现历史事故三维情景再现。

应急物资可视化管理：实现应急资源存贮位置、台帐、最佳配送路径等可视化管理。

应急演练与救援路径规划：实现应急演练与事故救援路径可视化展示。

4) 数据共享服务建设管理

数据底板为智慧水利提供“算据”支撑，建设基础数据统一、监测数据汇集、二三维一体化、三级贯通的数据底板，并提供三维展示、数据融合、分析计算、动态场景等功能。构建基础数据、监测数据、业务管理数据、跨行业共享数据、地理空间数据等在内的数据资源池，建设支撑水利数据行业内外共享的水利数据服务。

建设凌塘水库的三级数据底板，包括水库工程 BIM (建筑信息模型)数据、水库工程周边航空倾斜摄影、水库工程区域的水下地形等数据，覆盖水库工程的三级数据底板主要是通过综合应用 BIM + GIS (地理信息系统)、物联网、视频监控、VR/AR (虚拟现实/增强现实)等技术，进行数字孪生实体场景建模。三级数据底板为水库工程管理单位提供精准的信息支撑，满足水库工程安全监测评估、精准调度控制等需要。

3.4. 四预功能

1) 预报：基于水库周边气象站或雨量站的历史监测数据和实时监测数据、凌塘水库的运行数据，对凌塘水库的入库径流进行预报和滚动修正。

2) 预警：在水库孪生场景中，结合预报信息，构建水库水位预警、沉降预警、病害预警和设备预警功能。基于对实时水情、雨情的监测和历史变化过程的分析，实现凌塘水库的库水位预警功能；基于对坝体的变形监测，实现水库的沉降预警功能；基于对大坝的渗流监测、蚁害防治巡检，实现水库的病害预警功能；基于对设备的巡检和评级，实现水库的设备预警功能。

3) 预演：溃坝事件预演。构建凌塘水库溃坝洪水数学模型，就极端条件下大坝溃决洪水进行数值模拟，并将模拟结果接入数字孪生凌塘水库工程，进行溃坝洪水演进过程及大坝下游淹没区域仿真展示和洪水影响分析，实现溃坝洪水预演，为溃坝应急预案编制、管理与突发事件分析决策提供科学、直观的数据支撑。

4) 预案：水库险情调度预案及溃坝撤离预案。

水库险情调度预案：基于入库径流预报、水库运用参数及主要指标、水库运行数据及水位预警情况，依据不同调度期的水库调度目标和任务，结合《丹徒区凌塘水库调度规程》，构建气象预报→水位预警→水库调度模型，在不同调度期编制防洪调度预案、兴利调度预案、应急调度预案。

溃坝撤离预案：根据模型计算和专家研判预案，自动编制库区、水库下游转移与安置方案。

4. 平台业务

在现场调研、资料收集以及安装感知设备的基础上进行数据架构设计等，通过四个建设、四个融合、四预功能、四个管理的建设，实现数据交互服务及业务场景应用，凌塘数字孪生可视化平台成果展示如图 2 所示。



图 2. 凌塘数字孪生可视化平台成果展示

凌塘水库工程承担着防洪减灾、水资源供给等重要任务。水库日常工作主要包括调度运用、工程检查、设备评级、安全监测、养护维修、白蚁及其他动物危害防治、安全生产、制度建设、档案资料、水政管理以及库区管理等。针对水库的日常管理工作，梳理了相关业务流程如图 3 所示。

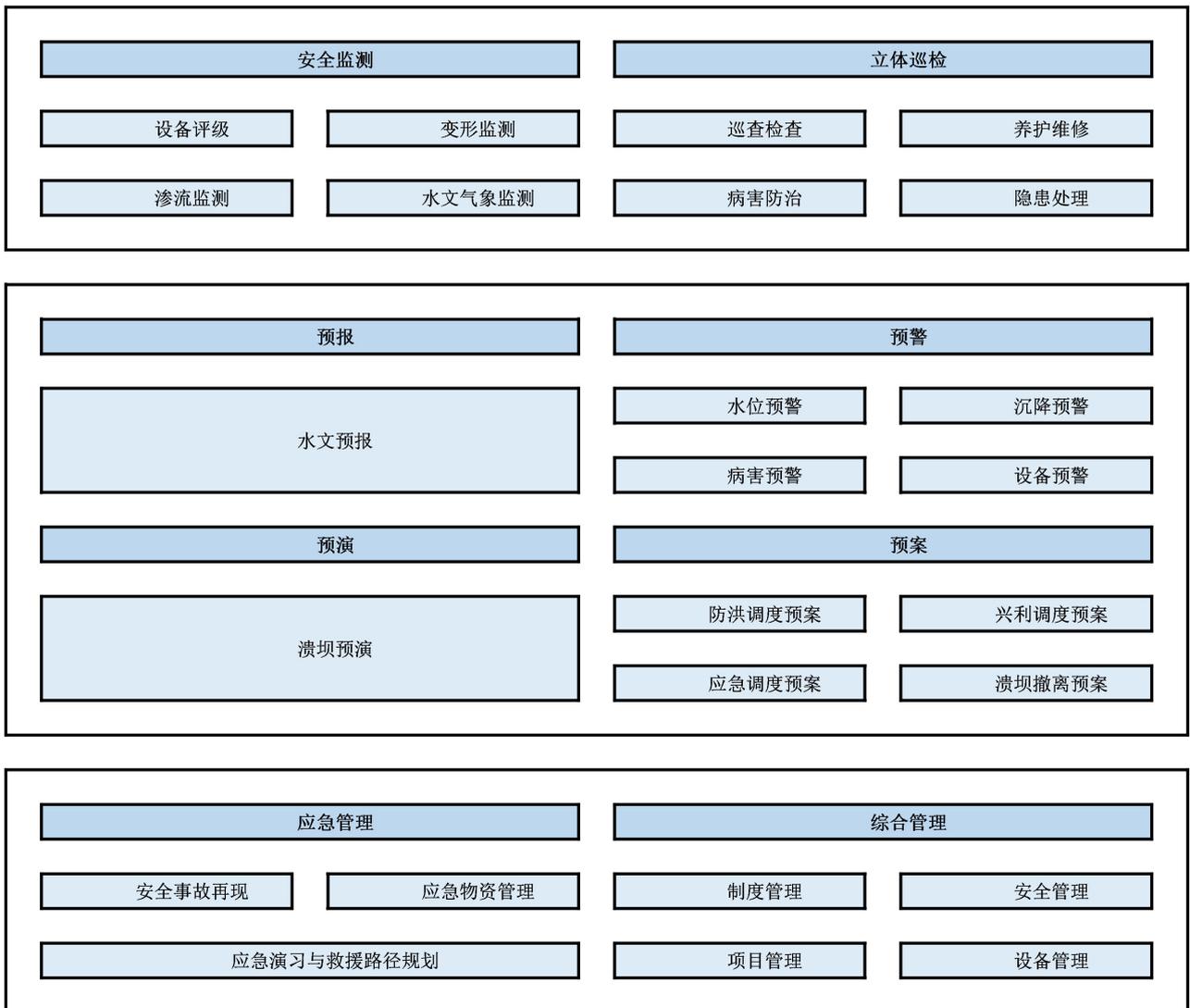


图 3. 凌塘水库数字孪生工程业务流程图

1) 安全监测

依据国家标准、水利部行业标准、《江苏省大中型水利工程安全监测方案(试行)》等,对凌塘水库开展安全监测工作,包括:设备评级(闸门、启闭机、电气设备等)、变形监测(沉降)、渗流监测(渗流压力、渗流量)、水文气象监测(库水位、降雨量、气温)等。

2) 立体巡检

对凌塘水库开展立体巡检工作,任务主要包括:对水工建筑物、安全监测设施、金属结构及电气设备、泄洪河道、水库管理范围、大坝管理和保护范围、蚁害防治等进行巡查检查,实现凌塘水库的养护维修和隐患处理。

3) 实现四预功能:通过对凌塘水库入库径流开展水文预报工作,实现(水位/沉降/病害/设备)预警,构建凌塘水库溃坝洪水数学模型,实现溃坝预演,并编制(防洪调度/兴利调度/应急调度/溃坝撤离)预案。

4) 应急管理

对凌塘水库开展应急管理,进行安全事故再现、应急物资可视化管理和应急演练与救援路径规划可视化管理,编制大坝安全管理应急预案、水库防洪应急预案、水库事故应急处置预案等。

5) 综合管理

满足水库管理的信息化需求,实现制度管理、安全管理、项目管理、设备管理等的整合。

5. 结语

1) 数字孪生凌塘水库面向以监控和管理为主要目的的多层级安全监管需求,在充分梳理凌塘水库主要业务的基础上,设计了数字孪生凌塘水库平台的整体框架,构建水库画像,建立全域覆盖、网络通畅、数据共享、智慧共用的凌塘水库数字孪生工程,实现水库实时监测、病险分析与管理、洪水预警、淹没分析、险情调度、“四预”一体化等功能,为水库安全运行提供新的管理工具。

2) 实现数字水库和物理水库的同步仿真运行,提高水库运行的综合管理能力。从水库安全运行和溃坝抢险等多维度提供了预警,较其他单一数据源、单一模型更具全面性。工程的建成将加强凌塘水库的智慧化调度能力,进一步提高管理工作效率,提高信息资源利用率,降低管理成本,提升区域资源、环境安全管理的整体水平。

3) 将凌塘水库作为水库数字孪生试点工程,具有典型性和代表性。搭建过程中形成凌塘水库数字孪生工程的标准体系,为凌塘水库数字孪生工程建设提供支持与服务,为实现众多系统的互联互通、信息共享、业务协同、信息安全打好基础。在提升水库管理智慧化水平的同时,还可以为大量同类型水库工程的数字孪生建设提供借鉴和参考。

参考文献

- [1] 黄艳. 数字孪生长江建设关键技术与试点初探[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(2): 16-26.
- [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(1): 81-86.
- [3] 李广宏. vue.js 前端应用技术分析[J]. 中国新通信, 2019, 21(20): 115.
- [4] 裴宏祥, 于晓虹. 基于微服务架构的系统设计与开发[J]. 中国科技信息, 2019(10): 91-92.
- [5] 杜英魁, 王杨, 关屏, 等. 基于 Spring Boot 的云端数据监控管理与可视化应用系统[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(5): 123-127.
- [6] 宁爱民, 张存吉. 基于物联网的水文监测系统关键技术研究[J]. 物联网技术, 2019, 9(12): 11-14.
- [7] 郭雷勇, 李宇. 谷歌地图在物流信息系统中的研究与应用实现[J]. 信息系统工程, 2017(9): 33.
- [8] 潘佳佳, 郭新蕾. 河流冰水沙耦合模型研究 I: 原理和方法[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 700-711.
- [9] 艾萍, 王沙沙, 牟萍. 水信息学与水利信息化的协同发展模式分析[J]. 水利信息化, 2012(5): 1-3, 8.

- [10] 水利部印发水利业务需求分析报告、智慧水利指导意见和总体方案[J]. 水利信息化, 2019(4): 40.
- [11] 王慧斌, 徐立中, 谭国平, 等. 水文自动测报物联网系统及通信组网与服务[J]. 水利信息化, 2018(3): 1-6.
- [12] 刘辉. 基于倾斜实景模型的空间三维不动产测量方法研究[J]. 经纬天地, 2021(4): 69-73.
- [13] 邹颖, 丁琼. 基于三维协同技术的水工建筑物建模技术研究[J]. 四川建材, 2021, 47(9): 38-39.
- [14] 陈飞, 吴英男. 基于数字高程模型和遥感影像的三维可视化[J]. 测绘科学, 2009, 34(S2): 127-129.
- [15] 吴学毅, 刘军收, 尹恒. 基于参数化设计的三维桥梁模型构建[J]. 图学学报, 2013, 34(2): 76-82.