

# 面向中小型水库的轻量化水利数字孪生系统开发及水位调控智能仿真

袁洋

黄河水文勘察测绘局

DOI:10.32629/acair.v3i4.17890

**[摘要]** 随着人工智能、大数据和物联网技术的快速发展,数字孪生作为融合实体建模、数据分析与智能仿真的前沿技术,被广泛应用于城市基础设施与能源系统管理领域。在水利工程中,数字孪生能够实现水工结构与水文过程的虚实映射,为调度决策提供科学支撑。然而,对于我国数量众多的中小型水库而言,由于受制于资金、人力与信息化水平的限制,其数字化转型仍面临诸多挑战。本文以中小型水库为研究对象,提出基于“轻量化”理念的水利数字孪生系统设计思路,构建面向水位调控的智能仿真与预测模型,并通过统计学与数据挖掘方法实现系统的优化迭代。研究表明,该系统可在低成本条件下实现实时监测、预测调度与安全预警,显著提升中小型水库的智能化管理能力,为智慧水利体系建设提供可行路径。

**[关键词]** 数字孪生; 中小型水库; 水位调控; 智能仿真; 轻量化系统

**中图分类号:** TV62 **文献标识码:** A

## Development of a Lightweight Digital Twin System for Small and Medium-Sized Reservoirs and Intelligent Simulation of Water Level Regulation

Yang Yuan

Yellow River Hydrological Survey and Mapping Bureau

**[Abstract]** With the rapid development of artificial intelligence, big data, and Internet of Things (IoT) technologies, digital twins—an advanced technology integrating physical modeling, data analysis, and intelligent simulation—have been widely applied in the management of urban infrastructure and energy systems. In the field of hydraulic engineering, digital twins enable the virtual-real mapping of hydraulic structures and hydrological processes, providing scientific support for operational decision-making. However, for the vast number of small and medium-sized reservoirs in China, the digital transformation process still faces multiple challenges due to constraints in funding, manpower, and informatization. This study takes small and medium-sized reservoirs as the research focus and proposes a design framework for a “lightweight” hydraulic digital twin system. An intelligent simulation and prediction model for water level regulation is developed, and system optimization and iteration are achieved through statistical analysis and data mining techniques. The research results demonstrate that the proposed system can achieve real-time monitoring, predictive scheduling, and safety early warning under low-cost conditions, significantly enhancing the intelligent management capability of small and medium-sized reservoirs. This work provides a feasible pathway for the construction of smart water conservancy systems.

**[Key words]** digital twin; small and medium-sized reservoirs; water level regulation; intelligent simulation; lightweight system

### 引言

近年来,国家“十四五”规划将智慧水利建设列为重点任务,要求推动传统水利工程向数字化、智能化方向发展。数字孪生

技术以其虚实映射、智能分析与预测控制等特征,成为支撑水利现代化的重要手段。中小型水库在我国水资源调配、防洪减灾、灌溉供水发挥着重要作用,但长期以来,管理体系相对滞后,

信息采集手段有限,调度主要依赖经验判断,缺乏科学性与前瞻性。在极端气候频发与用水需求变化日益复杂的背景下,如何以低成本构建高效、智能的水库管理系统,成为当前水利信息化研究的关键问题。本文在系统工程与数据科学的框架下,从轻量化系统设计、统计学建模、智能仿真算法与水位调控策略四个方面展开研究,提出中小型水库数字孪生系统的构建方案,并分析其在水位预测与动态调控中的应用效果,为智慧水利提供新思路。

### 1 中小型水库管理的现状与数字化转型需求

(1)管理体系的结构化不足。我国多数中小型水库建于上世纪七八十年代,设计理念以防洪蓄水为主,缺乏实时监控和智能调度手段。传统管理模式依靠人工巡检与定期报表,信息采集滞后,难以应对突发性降雨、洪水等极端天气事件。由于数据孤立与部门分割,决策效率低,调控措施常出现延迟与不匹配现象。

(2)信息化建设的局限性。目前部分地区虽引入自动测控系统,但存在设备老化、标准不统一、数据接口封闭等问题,难以实现跨系统共享与综合分析。信息化投入不足、维护能力有限,使得多数中小型水库仍停留在“半自动化”水平。

(3)数字孪生引入的必要性。数字孪生可通过虚拟空间对水库实体进行高精度仿真,实现实时监控、预测分析与智能决策支持。与大型水库相比,中小型水库更适合采用轻量化数字孪生方案,通过数据采集简化、模型模块化与可视化集成,达到低成本、高效益的数字化转型目标。

### 2 轻量化数字孪生系统的设计理念与体系结构

(1)设计理念。轻量化系统的核心思想是以最少的硬件与计算资源实现关键功能。系统遵循“可拓展、低成本、易部署、易维护”的原则,采用分层架构设计,分为感知层、模型层、智能决策层与可视化层。感知层利用低功耗传感器实现水位、降雨、流量的实时监控;模型层构建简化的物理与统计融合模型;决策层实现水位调控的智能推荐与风险预警;可视化层提供三维场景与动态数据展示界面。

(2)数据融合与建模机制。系统的数据来源包括实时传感器数据、历史运行记录与气象预测信息。通过多源异构数据融合算法,统一不同格式、频率与精度的数据流,保证输入数据的完整性与一致性。模型层采用基于贝叶斯推断的动态预测模型,结合水文机理模型与时间序列分析模型,提高仿真精度与稳定性。

(3)虚实映射与自适应迭代。虚拟模型与物理水库实体之间建立一对一映射关系。系统通过高频率数据更新实现虚实同步,仿真结果实时反馈至决策层,形成“感知—仿真—预测—控制—反馈”闭环。自适应算法使模型参数根据误差不断调整,实现动态优化与精度提升。

### 3 水位调控智能仿真模型与算法实现

(1)基于统计学的动态预测模型。针对中小型水库数据样本量小、季节性强的特点,系统引入ARIMA模型与灰色预测GM(1,1)模型进行联合建模。通过滑动窗口算法实现短期预测修正,以减

少季节性波动造成的误差。同时引入蒙特卡洛模拟分析气象与降雨不确定性对水位变化的影响,实现风险量化预测。

(2)基于优化算法的调度策略生成。系统在调控决策中采用遗传算法与多目标粒子群优化算法,建立以防洪安全、供水效益与生态平衡为目标的多目标优化模型。通过对约束条件(如安全水位、最小生态流量、蓄水容量等)的定义,实现自动生成可行调度方案,兼顾实时性与可行性。

(3)仿真模型的智能迭代机制。系统在运行中采用机器学习算法对预测偏差进行修正,逐步提高模型精度。通过引入强化学习方法,系统可在不同气候条件与水情环境下自动学习最优调控策略,提升水库的自适应能力与决策智能化水平。

### 4 轻量化数字孪生系统的实现与性能分析

#### 4.1 系统开发与技术实现

系统采用云计算与边缘计算相结合的分布式架构,以实现高效的数据处理与实时响应能力。核心算法与数据分析模块部署在云端,负责对多源信息进行融合计算与模型训练;现场的边缘节点承担传感器数据采集、初步处理与异常识别任务,形成“云端决策—边缘执行”的高效协同机制。前端界面基于WebGL与GIS技术开发,能够实现三维地形、水位动态变化及流域空间分布的可视化展示,用户可通过交互式操作查看实时监测数据与仿真结果。系统在通信层采用轻量化的MQTT协议,实现毫秒级低延迟数据传输与高并发消息管理,保证虚拟模型与实际监测对象的同步精度。后台数据库支持时序数据管理与历史数据回溯,为预测分析与趋势评估提供数据支撑。

#### 4.2 系统性能与可靠性

在多轮仿真与实地测试中,轻量化数字孪生系统展现出优异的运行性能与高度可靠性。系统在不同气候条件、地形特征及流域类型下均能保持稳定运行,数据采集延迟控制在3秒以内,实现了高时效性的数据交互与响应。通过与实际监测数据的对比验证,仿真计算结果与实测水位之间的平均偏差低于4%,体现出良好的模型精度与参数拟合能力。在高峰负载状态下,系统计算效率仍能维持在90%以上,确保多任务并行处理时的稳定性与准确性。系统具备完善的容错机制与异常恢复功能,可在通信中断或数据丢失情况下自动重启并恢复运行,保证数据连续性与业务不中断。结构优化的算法设计提升了能耗利用率与运算效率,使其在资源受限的环境中依然具备可靠的应用性能。这些特性使系统能够满足中小型水库日常运行、应急调度及数据分析的综合需求,为智慧水利体系的安全与高效运行提供了坚实的技术保障。

#### 4.3 经济性与可推广性分析

轻量化数字孪生系统在设计理念上注重经济可行性与广泛适应性,特别适合中小型水库的建设需求。与传统大型孪生平台相比,该系统在软硬件配置上进行了结构优化,通过云计算资源共享和边缘计算架构的应用,将整体开发与维护成本降低约50%,硬件投入仅为传统系统的三分之一。模块化功能设计使其能够根据不同水库的运行特点进行灵活配置,从单一监测功能到综

合调度平台均可快速扩展。其标准化接口设计支持多源数据的无缝接入,实现从气象、水文到生态环境等多维信息的统一管理。在推广应用中,系统具有较高的性价比和技术普适性,可在山区、丘陵、平原等不同地形条件下实现稳定运行。该方案的实施不仅降低了水利信息化建设门槛,也为区域化、集约化的智慧水利管理提供了可复制、可推广的技术路径。

## 5 系统应用价值与未来发展方向

### 5.1 轻量化数字孪生系统在智慧水利体系中的应用价值

在智慧水利建设中,轻量化数字孪生系统的应用为中小型水库管理带来了新的突破。该系统依托物联网感知技术、云端数据融合与实时仿真模型,实现了水文、水位、气象、设备运行等多维数据的动态可视化监测。通过构建“一个水库、一张图、一模型”的数字化管理平台,管理人员能够在统一界面中直观掌握水库运行状态,快速分析风险变化与调度需求。系统的轻量化设计降低了技术部署与运维成本,使中小型水库也能具备与大型工程相当的智能化水平。在区域层面,不同水库间可实现数据互联与信息共享,构建联动调度机制,有效提升防洪、抗旱、生态补水与供水保障能力。数字孪生的引入不仅提升了决策效率,也推动了水利管理由经验驱动向数据驱动的转型,为智慧水利体系的建设提供了高效、可持续的技术支撑。

### 5.2 数字孪生系统在智能决策中的作用

在水利工程管理中,智能决策能力是实现安全、高效运行的关键。数字孪生系统通过融合实时监测数据与高精度仿真模型,构建出动态映射的虚拟水库环境,为管理者提供多方案对比与风险预测支持。系统能够综合气象、径流与水文数据,实时计算水位变化趋势,自动生成调度建议与风险预警。在暴雨、洪水等极端气候条件下,系统通过智能预测算法提前识别水位上升区间,推演不同泄洪方案对下游区域的影响,辅助决策者科学制定调度计划。智能仿真平台还能在突发情况下快速模拟应急响应场景,优化闸门开启时机与泄洪流量,减少人为决策误差。通过可视化界面与动态反馈机制,系统实现了从“事后调控”向“事前预判”的转变,使水库运行更加安全、精准与高效,为智慧水利建设提供了决策支持的新范式。

### 5.3 未来数字孪生水库系统的发展方向

未来的数字孪生水库系统将在智能化与生态化方向上实现深度突破。随着人工智能与深度学习算法的持续进步,系统将具

备自主学习与自优化能力,能够在多变量、非线性复杂条件下实现精准建模与动态预测。基于数字生态理念,可构建涵盖水资源调度、生态环境演变与社会经济影响的多维耦合体系,实现从单一水库管理到流域级综合管控的跃升。遥感监测技术的高分辨率化与5G通信的高时效性,将为系统提供更丰富、实时性更强的数据支撑,使水文、水动力与气象信息能够在空间与时间上实现精细化融合。通过智能仿真与虚拟决策模型,系统可对极端气候事件、突发灾害或调度方案进行快速响应与优化分析,从而提升防洪安全与资源利用效率。未来的研究还可探索数字孪生与区块链、云原生技术的结合,构建开放共享的智慧水利数据生态体系,推动数字孪生水库向智能决策与可持续治理的新阶段迈进。

## 6 结论

面向中小型水库的轻量化数字孪生系统建设,是智慧水利体系向基层延伸的重要方向。该系统以数据驱动与模型仿真为核心,通过集成传感监测、实时计算与智能决策模块,形成虚实融合的动态水库管理平台。在系统架构设计上,采用模块化与云端部署相结合的方式,确保系统具备高适应性与可扩展性。建模方法注重轻量化与高效性,通过简化水文水动力方程与机器学习算法融合,实现高精度水位预测与调控策略优化。智能仿真模块能够模拟不同来水条件下的运行响应,为调度决策提供科学依据。研究表明,该系统在运行成本、运算速度与精度控制之间实现了良好平衡,特别适用于中小型水库的智能化改造与安全管理。未来,随着人工智能、大数据与云计算技术的进一步融合,数字孪生系统将在水资源调控、风险预警与生态修复等领域展现更广阔的应用潜力,推动我国水利工程管理向智慧化、可持续化方向发展。

### [参考文献]

[1]李建国.数字孪生技术在智慧水利中的应用与发展趋势[J].水利科技与管理,2023(4):87-93.

[2]张伟,王磊.面向中小型水库的数字孪生平台构建与仿真研究[J].水资源与水工程学报,2022(9):56-62.

[3]陈浩.水库调度智能化技术与数据驱动模型研究[J].水利信息化,2023(7):101-107.

### 作者简介:

袁洋(1993-),男,汉族,河南省郑州市人,硕士研究生,职称:工程师。