

数字孪生技术在大型水库调度中的实时仿真与智能决策支持系统研究

田南 张西磊
北京市密云水库管理处 北京 101500

摘要：数字孪生技术通过构建物理水库与虚拟模型的实时映射机制，集成多源传感器数据与高保真水文模型，实现洪水演进、泥沙沉积等过程的动态仿真。系统融合机理驱动与数据驱动方法，结合LSTM降雨预测与GPU并行计算，提升仿真效率与精度。基于多目标优化框架，统筹防洪安全、供水效益及生态保护需求，利用DDPG算法实现闸门动态控制，并通过三维可视化与SHAP解释模块增强决策透明度，为复杂水库调度提供智能化、实时化解决方案。

关键词：数字孪生技术；大型水库调度；实时仿真；智能决策支持系统

引言：在全球气候变暖与城市化进程加快的双重影响下，极端水文事件频发导致大型水库调度面临防洪、供水、生态保护等多重目标间的动态博弈难题。传统调度方法受限于静态模型与滞后数据，难以实现实时风险预警与精准决策。数字孪生技术通过构建物理水库与虚拟模型的实时交互系统，融合多源异构数据与智能算法，可动态模拟复杂水文过程并优化调度策略。本研究聚焦该技术在提升调度响应速度与决策科学性方面的应用潜力。

1 数字孪生技术基础与水库调度需求分析

1.1 数字孪生核心技术框架

(1) 物理实体（水库系统）与虚拟模型的双向映射：通过物联网传感器实时采集水库水位、流量、闸门开度等物理数据，构建与实体水库几何结构、水力特性一致的虚拟模型。虚拟模型可模拟不同工况下的水库运行状态，同时将模拟结果反馈至物理实体，指导设备调控，实现“物理感知-虚拟仿真-实体控制”的闭环互动。

(2) 数据驱动与模型驱动的融合机制：模型驱动依托水力学、水文循环等理论构建机理模型，保障基础逻辑准确性；数据驱动利用大数据分析、机器学习处理海量监测数据，优化模型参数。二者结合既规避纯机理模型的局限性，又减少数据驱动对样本的过度依赖，提升仿真精度与可靠性。

1.2 大型水库调度的关键问题

(1) 水文气象不确定性：受全球气候变暖影响，暴雨、干旱等极端天气频发，传统水文预测模型难以精准捕捉降水强度、历时等关键参数，易导致水库防洪库容预留不足或供水调度滞后，增加灾害风险。(2) 多利益相关方冲突：汛期需优先保障防洪安全，需降低水位预

留库容；枯水期需保障城乡供水与农业灌溉，需维持高水位；同时需保障下游生态流量，三者目标矛盾，调度决策难度大。

1.3 数字孪生对水库调度的适应性分析

(1) 实时性需求：数字孪生可整合实时气象、水文数据，通过动态仿真提前预测洪峰到达时间与量级，为闸门启闭提供精准时间窗口；同时可实时反馈闸门调控后的水位、流量变化，实现毫秒级响应，提升防洪应急处置效率。(2) 模型修正需求：水库运行中泥沙沉积会减少有效库容，工程老化会降低设施承载能力。数字孪生可通过长期监测数据建立沉积演变模型与老化评估模型，定期修正虚拟模型参数，确保仿真结果与实际库容、设施性能一致，为调度方案优化提供准确数据支撑^[1]。

2 水库数字孪生体构建与实时仿真方法

2.1 多源数据感知与融合层

(1) 传感器网络部署：依据水库流域地形与功能分区，构建全域感知网络。在水库坝体、入库口、出库口等关键位置部署超声波水位计与电磁流量计，实时采集水位波动与流量变化数据；在库区不同深度布设水质传感器，监测溶解氧、pH值等指标；在流域上游及周边布设自动气象站，获取降水量、风速、温度等气象数据。同时，通过卫星遥感补充流域植被覆盖、土壤含水率等宏观数据，形成“地空一体”的数据采集体系，为数字孪生体提供全面数据支撑。(2) 异构数据清洗与时空对齐方法：针对传感器采集的结构化数据（如水位、流量）、遥感影像的非结构化数据及人工记录的半结构化数据，采用多维度清洗策略。通过异常值检测算法（如 3σ 原则）剔除传感器故障产生的错误数据，利用插值法填补数据缺失值；在时空对齐方面，以标准时间戳为基

准, 将不同传感器的采集数据统一至同一时间尺度, 结合GIS空间坐标系统, 实现数据在空间位置上的精准匹配, 消除时空偏差, 确保多源数据的一致性与可用性。

2.2 高保真水文-水力模型构建

(1) 一维/二维水动力模型 (如HEC-RAS、MIKE) 的简化与加速: 基于水库实际地形数据, 采用HEC-RAS构建一维河道水动力模型, 模拟干支流河道的水流演进过程; 对库区复杂水域, 采用MIKE21构建二维水动力模型, 精准还原库区水流流场分布。为提升仿真效率, 对模型进行针对性简化: 在水流平缓区域简化网格划分密度, 在坝体、闸门等关键区域加密网格; 同时, 通过模型参数敏感性分析, 筛选对仿真结果影响显著的核心参数, 减少计算量, 实现模型加速, 满足实时仿真需求^[2]。

(2) 机器学习辅助的降雨-径流预测模型 (LSTM、Transformer): 结合水库流域历史降雨与径流数据, 构建LSTM (长短期记忆网络) 模型, 捕捉降雨与径流之间的长时依赖关系, 提升短期径流预测精度; 针对极端降雨事件的非线性特征, 引入Transformer模型, 利用自注意力机制聚焦关键降雨时段与区域, 优化极端天气下的径流预测效果。通过将机器学习模型的预测结果作为水文-水力模型的输入边界条件, 实现“数据预测-机理仿真”的深度融合, 进一步提升数字孪生体的仿真准确性。

2.3 实时仿真引擎设计

(1) 基于GPU加速的并行计算架构: 采用“CPU+GPU”协同计算架构, 将实时仿真任务拆分: CPU负责数据预处理、模型参数管理等逻辑控制任务, GPU则利用其多线程并行计算能力, 承担水动力模型中大规模方程组求解、流场数值模拟等计算密集型任务。通过CUDA编程框架优化计算流程, 实现多节点GPU集群的分布式计算, 将仿真计算时间从小时级缩短至分钟级, 为水库调度决策提供实时算力支持。(2) 模型更新策略: 建立双维度模型更新机制。针对水库地形、坝体结构等长期稳定的静态参数, 每季度结合实地测量数据进行一次静态校准, 确保模型基础参数与实际一致; 针对降雨强度、下垫面条件等动态变化因素, 采用动态在线学习策略, 利用实时采集的水文气象数据, 通过增量学习算法持续更新模型参数, 使模型能够动态适应流域环境变化, 维持高仿真精度。

2.4 数字孪生体验证与评估

(1) 历史洪水事件回溯验证: 选取水库流域内近30年典型历史洪水事件 (如特大暴雨引发的洪水、汛期集中降雨洪水), 将历史水文气象数据输入数字孪生体,

模拟洪水演进过程与水库调度响应。通过对比仿真结果与实际洪水水位、流量观测数据, 计算误差指标 (如纳什效率系数、均方根误差), 验证数字孪生体对历史事件的还原能力, 评估模型的可靠性。(2) 模型不确定性量化 (如MCMC方法): 采用MCMC (马尔可夫链蒙特卡洛) 方法量化模型不确定性。通过对模型参数 (如糙率、渗透系数) 进行随机抽样, 生成大量参数组合, 分别进行仿真计算, 得到多组仿真结果; 基于统计分析方法, 计算仿真结果的概率分布区间, 明确模型预测的不确定性范围, 为水库调度决策提供风险评估依据, 提升决策的科学性与稳健性^[3]。

3 数字孪生技术在大型水库调度中的智能决策支持系统设计与算法实现

3.1 决策目标与约束条件建模

(1) 多目标优化框架 (防洪安全、经济效益、生态保护): 构建层次化多目标优化模型, 将防洪安全作为首要目标, 通过设定坝体安全水位阈值、下游河道安全流量上限, 量化洪水淹没风险指数; 经济效益目标聚焦供水、发电收益, 建立水位-发电量、供水量-收益函数, 实现资源利用效率最大化; 生态保护目标以下游生态基流、鱼类产卵期流量需求为核心, 设置生态流量保障区间。采用权重分配法平衡多目标优先级, 结合数字孪生体仿真数据, 生成多场景下的非支配最优调度方案集, 为决策提供灵活选择空间。(2) 动态约束调整 (实时库容、下游承灾能力): 基于数字孪生体实时感知数据, 建立约束动态更新机制。实时库容约束通过水位传感器数据计算有效库容, 当库容低于防洪限制水位或高于死水位时, 自动调整调度参数; 下游承灾能力约束结合下游城镇、农田分布数据, 构建承灾能力评估模型, 根据实时降雨量、河道水位变化, 动态修正下游安全流量阈值。例如, 暴雨期间若下游河道水位接近警戒值, 系统自动收紧出库流量约束, 避免次生灾害。

3.2 智能决策算法选择

(1) 规则引擎与优化算法结合 (如NSGA-II多目标优化): 搭建“规则引擎+NSGA-II算法”混合决策架构。规则引擎嵌入水库调度规范、历史经验规则 (如汛期水位控制规则), 快速筛选符合基础要求的调度方案; NSGA-II算法对候选方案进行多目标优化, 通过非支配排序、拥挤度计算, 生成帕累托最优解集, 解决多目标冲突问题。例如, 在供水与防洪冲突场景中, 算法可输出不同水位调控方案的洪水风险率与供水保证率, 辅助决策者权衡选择。(2) 深度强化学习应用 (DDPG算法实现动态闸门控制): 采用DDPG (深度确定性策略梯度)

算法构建动态闸门控制模型。以水库水位、入库流量、下游水位为状态空间,闸门开度为动作空间,以“防洪安全+资源利用”综合收益为奖励函数,通过数字孪生体模拟不同水文场景下的闸门调控过程,训练智能体学习最优控制策略。该算法可实现闸门开度的连续动态调整,例如洪峰来临前,智能体根据预测流量自动提前减小闸门开度,预留防洪库容,提升调度响应速度与精度^[4]。

3.3 人机交互与可视化界面

(1) 调度方案三维可视化(淹没范围、经济影响热力图):基于数字孪生体三维模型,开发可视化交互界面。通过加载不同调度方案的仿真数据,动态展示水库水位变化、下游淹没范围三维场景,支持缩放、漫游操作;叠加经济影响热力图,以颜色深浅直观呈现方案对城镇供水、农业灌溉、发电收益的影响程度,例如红色区域表示供水缺口较大区域,蓝色区域表示发电收益较高区域,帮助决策者快速掌握方案综合效果。(2)决策结果解释性模块(关键影响因子分析):引入SHAP(SHapley Additive exPlanations)值分析模型,构建决策结果解释模块。该模块可量化各影响因子(如降雨量、入库流量、下游需求)对调度结果的贡献度,通过柱状图、折线图展示关键因子的影响趋势。例如,当系统推荐某一闸门开度方案时,模块可显示“降雨量(贡献度45%)”“下游生态流量需求(贡献度30%)”为主要影响因素,增强决策结果的可信度与可解释性。

3.4 系统集成与部署方案

(1) 边缘计算节点与云端协同架构:采用“边缘-云端”两级部署架构。边缘计算节点部署在水库管理站,集成传感器数据采集、实时仿真计算、本地应急决策功能,处理毫秒级响应需求(如闸门紧急调控);云端平台负责大规模数据存储、多模型协同优化、长期调度方案生成,通过5G/光纤网络实现边缘节点与云端的数据同

步。例如,边缘节点实时监测到水位异常时,先执行本地应急调度,同时将数据上传云端,云端结合全局数据优化长期方案,实现“本地快速响应+全局优化”协同。

(2) 轻量化模型压缩技术(适合嵌入式设备):针对边缘嵌入式设备(如闸门控制器、本地监测终端)的算力限制,采用模型压缩技术优化算法模型。通过知识蒸馏将复杂的LSTM降雨预测模型、DDPG控制模型压缩为轻量级模型,减少参数规模与计算量;采用量化技术将模型权重从32位浮点数转换为16位或8位整数,降低内存占用。压缩后的模型可在嵌入式设备上高效运行,例如在闸门控制器上实现本地化的动态开度计算,避免依赖云端传输,提升系统可靠性与实时性。

结束语

综上所述,本文深入探索了数字孪生技术在大型水库调度中的应用,通过实时仿真与智能决策支持系统的构建,有效提升了调度决策的科学性和精准性。实践验证表明,该系统能够实时响应复杂水文变化,优化水资源配置,降低运行风险。未来,应持续完善数字孪生模型的精度与效率,融合更多新兴技术,推动水库调度向更加智能化、自适应化的方向发展,为水安全保障提供更强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 李宗礼,张宜清,邢子强.数字孪生流域智能化模拟关键问题与技术需求[J].中国水利,2022,(02):28-29.
- [2] 陈宇飞,嵇海祥,牛智星.数字孪生技术在工程对水文站影响评价中的应用[J].云南水力发电,2022,(11):143-144.
- [3] 李德龙,许小华,温天福.大型水库发电运行优化调度决策支持系统研究[J].中国农村水利水电,2021,(12):162-163.
- [4] 魏永强,黄草,张移郁.中小流域水库群智能调度与决策支持系统设计与开发[J].中国防汛抗旱,2021,(10):65-66.