

基于数字孪生技术的白溪水库流域预演模型研究与应用

冯志峰

(宁波城市职业技术学院, 浙江 宁波 315000)

摘要 本研究针对白溪水库防洪—供水—生态多目标调度需求, 构建基于数字孪生的“正—反向”双核预演模型。融合 UAV、BIM、GIS 与多源实时监测数据, 实现流域与工程尺度的高精度虚实映射。正向机理模型用于推演水库运行风险态势, 反向以 NSGA-II 多目标优化算法生成调度序列, 并引入智能代理模型显著提升在线预演与寻优计算效率。实证结果表明, 该模型可有效降低洪峰水位、减少下游淹没风险, 同时提高供水保障水平与生态基流达标能力, 为复杂水情下水库智慧调度提供参考。

关键词 数字孪生; 水库调度; 多目标优化; 智能代理模型

基金项目: 2025 年浙江省教育厅一般科研项目“基于数字孪生技术的水库流域预演模型应用研究——以白溪水库为例”(项目编号: ZZT25135)。

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.040

0 引言

新时代, 水利高质量发展在宏观上已经把水安全纳入了国家安全的重要范畴。《国家水网建设规划纲要》(2023)明确提出, 需加快构建智慧水网体系, 运用数字孪生技术进行物理流域精准的数字化映射, 实施物理流域全要素数字化映射和物理流域智能模拟^[1]。白溪水库是浙江省最大的国家大(II)型水利工程和重要核心水源地, 承担着城市供水、防洪削峰和下游生态保障等多重任务。供水安全、防洪风险控制与生态基流约束之间存在显著的多目标竞争关系, 传统以人工经验或单一物理模型为主的调度方式在预见性、方案优选效率和应急响应能力方面存在不足。基于此, 本文引入具备“正向形势推演—反向策略优化”能力的数字孪生预演系统, 以提升复杂水情下的调度决策水平。

针对水库调度的数字化研究, 国内外学者已开展了大量探索。早期的研究多为水文物理过程的模拟, 这类模型参数多, 计算量大, 很难达到在线预演的实时性要求^[2]。随着物联网、人工智能等技术的快速发展, 数据驱动为核心的数字孪生的思想被应用到水利中来, 数字孪生需要物理机理模型和实时监测数据的高度耦合, 高保真地还原到三维视觉^[3]。尽管研究成果丰富,

但仍存在两大瓶颈: 一是“看重视觉, 轻视逻辑”。当前大多数孪生平台更关注三维底座的视觉展示, 缺乏调度决策的逻辑; 二是“重模仿轻搜索”。当前大多数预演模型只能通过正向的模拟出给定方案的运行结果, 很难找到某个既定的目标值对应的最优方案。因此, 团队希望能够借助智能优化算法与代理模型技术, 通过开发一套以库容率为控制目标参数的双核驱动预演方案来解决以上问题。

1 多源异构数据采集与时空关联

构建白溪水库数字孪生场景的首要任务是实现全要素的数据数字化映射。本研究采用“空—地—水”一体化的采集手段^[4], 重点解决多源异构数据在空间尺度与时间基准上的统一问题。

第一步, 利用无人机倾斜摄影技术对白溪水库流域进行全覆盖测绘, 获取高分辨率 DSM 与 DOM 数据, 结合激光雷达扫描与 BIM 建模技术, 对大坝、溢洪道、取水口及闸门等关键水工建筑物进行 L3 级精细化建模, 确实现水库流域几何形态与物理属性的真实还原^[5]。

第二步, 时空关联, 通过坐标变换实现地理空间坐标与 BIM 工程坐标的统一, 将水文站、雨量站及闸门开度等现场感知设备采集的动态数据按时序接入模型, 并结合历史径流实测资料进行时标对齐与动态挂

作者简介: 冯志峰(1992-), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 计算机人工智能。

接, 构建以空间基底和时间序列为核心的数据体系, 为预演模型“正向模拟”提供可靠的初始条件和基准状态。

2 基于神经网络的数据融合逻辑

在多源数据集成中如何将 BIM 构件与 GIS 联系起来, 实现海量监测数据的驱动是本项目拟突破的技术难点之一^[6]。为了实现 BIM 构件和 GIS 数据进行语义关联, 并做到全要素整体统一, 本文提出一种基于神经网络的数据融合逻辑, 形成语义上的整体语义拓扑网络。

基于“数据融合—智能关联—动态集成”的技术路线, 团队通过 GNN 自动识别出 BIM 模型, 并与 GIS 空间中的地理位号进行智能关联。系统接入 Apache Flink 数据驱动引擎来读取从实时监测流进入系统的业务数据并实时运算, 最后将倾斜摄影和 DEM 高度精准叠合、BIM 模型和地形高精度关联, 在白溪水库流域构建了一个高精度、可交互、虚实映射的三维数字孪生的基础场景, 为预演模型构建了高精度空间基底^[7]。

3 “正一反向”双核预演架构及关键技术研究

3.1 双核驱动的总体架构设计

项目团队遵循 CMMI4 级标准, 采用基于模型的系统工程 (MBSE) 方法论, 并运用面向服务的架构 (SOA) 与分层设计原则, 来构建一个分层解耦的预演代理模型。系统架构分为输入层、处理层与输出层:

1. 输入层: 集成多源监测数据、降雨径流预报、需水预报等信息。

2. 处理层: 是核心功能层, 首先依靠数字孪生平台来实现数据和模型的驱动与融合, 然后耦合水文学动力模拟引擎和 NSGA-II 智能优化算法, 分别实现水资源系统状态的“正向”推演和调度规则的“反向”寻优。

3. 输出层: 可视化输出演过程数据与优化结果。

通过以上三层架构使得预演模型具有形势研判、正向预演、反向优化于一体的综合功能。

3.2 正向模拟: 物理机理驱动的形势研判

预演系统的基础是物理机理驱动的心事研判正向模拟引擎。团队把分布式水文模型、一维、二维和三维水动力模型耦合起来, 构建出动态全流程链路, 并应用到白溪水库正向推演仿真中, 主要分为以下三个步骤:

第一步, 利用改进的产汇流算法, 根据预报降雨数据计算入库流量过程。

第二步, 利用基于水量平衡方程:

$$I(t) - Q(t) = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

式(1)中, I 为入库流量, Q 为下泄流量, V 为库容, 结合水库水位—库容曲线, 实时推算水库水位的动态变动。

第三步, 系统根据预演水位自动检测汛限水位、弘高水位, 当推演结果超阈值的时候, 预演模型立即在数字孪生场景中发出可视化预警。经过高频循环迭代之后, 正向模拟就可以实时输出白溪水库未来 24 ~ 72 小时的水位变化趋势以及危险清单, 提前给防汛抢险留出决策时间窗口。

3.3 反向优化: 基于智能算法的决策寻优

反向引擎是从给定的管理目标出发, 自动求出最优的闸门调度序列。白溪水库在供水、防洪、生态三方竞争的时候尤其重要。团队把多目标遗传算法 (NSGA-II) 当作核心的优化算子。建立一个多目标函数集:

$$F(x) = [\min(f_{risk}), \max(f_{supply}), \min(f_{eco})] \quad (2)$$

式(2)中, f_{disk} 代表库区的防洪风险, 以最高库水位与设计水位的差值最小化为目标, f_{supply} 代表水库的供水效益, 以满足下游城市用水缺额最小化为目标, f_{eco} 代表库区上下游区域的生态约束, 确保下泄基流不低于生态红线。

通过对 $F(x)$ 结果不断迭代, 可以得到某一种特定情况下所获得的最优解及相应的权重参数, 数字孪生平台根据权重匹配出相应的实施方案, 原先的“方案模拟”变成了现在的“方案优选”。

4 白溪水库实证应用分析

本研究以白溪水库 2021 年到 2024 年的实测运行脱敏数据为基础, 构建数字孪生虚拟仿真预演平台, 平台实验环境采用分布式计算机集群构建, 为了检验系统在极端天气条件下决策支持的能力, 模拟强降雨工况, 设置连续 24 小时累计降雨量为 350 mm (特大暴雨等级), 在此基础上进行正向推演和反向寻优的联动分析, 分析结果如下。

4.1 正向推演风险预警分析

在维持原有的常态化调度模式, 启动正向模拟引擎进行不间断的水库运行状态推演。经过推演发现, 当系统推演到 T+18 h 时, 预演模型就触发高风险预警信号, 提示库区水位已超出汛限水位 1.5 m, 泄洪闸门过流已经接近饱和和设计状态, 数字孪生可视化界面也显示大坝下游河道冲刷淹没状况。表 1 给出了常规调度方案下不同推演时间步长对应的水位演化与风险等级评估结果。

表1 库区水位演化与风险等级评估结果

预演时间步长	推演水位(m)	风险等级	预期影响描述
T+6 h	165.2	安全	库容充足, 运行正常
T+12 h	168.5	蓝色预警	接近汛限水位, 需加强监测
T+18 h	171.3	红色预警	超过汛限, 下游河道面临漫溢风险
T+24 h	172.5	极高风险	大坝安全系数进入临界区间

常规调度方案在没有策略优化的情况下, 不能很好地应对极端天气带来的极端来水过程, 从而造成库区管理存在明显的安全风险累积趋势。

4.2 反向寻优调度方案生成

根据正向推演时出现的风险问题来开启预演模型中的反向优化引擎。将大坝安全保障和下游淹没风险最小化作为约束条件, 用NSGA-II多目标遗传算法迭代寻优闸门开启序列。算法经过500次迭代优化得到当前约束条件下最优解。从实验对比结果看, 在优化方案中提前4小时进行小流量预泄可以有效削减洪峰叠加的影响, 使水库水位最高点下降0.7 m, 下游河道淹没面积缩小约22%。该结果证明了防洪调度场景下“正向风险识别—反向策略修正”联动机制的有效性。

4.3 多目标约束下的供水与生态调度实验

白溪水库作为区域核心水源地, 在运行调度时既要确保防洪安全, 又要实现城市供水安全保障及下游生态基流维持。为此, 团队进一步构建了连续30天无有效降雨的极端干旱工况, 对不同调度策略下预演模型的综合性能进行了对比分析。在反向寻优过程中, 团队选择将“城市供水缺口最小化”和“生态基流达标约束”两项条件同时引入NSGA-II, 将传统人工经验调度方案和本文提出的双核预演模型生成方案进行了比较, 并得到了表2所示的结果。

表2 传统调度方案与数字孪生优化方案结果对比表

指标名称	传统经验调度方案	本文优化调度方案	性能提升幅值
供水保证率(%)	92.5	98.2	+5.7%
生态基流达标天数(d)	21	29	+38%
方案计算耗时(s)	240(人工+物理模型)	1.2(预演代理模型)	+200%
决策精度(\$R^2\$)	0.88	0.97	+10.2%

由表2可知, 基于智能代理模型的优化方案在计算效率方面存在显著优势, 单次预演方案生成时间缩短至1.2 s。同时双核预演模型生成的方案在显著提升供水保障水平的同时, 有效延长了库区生态基流维持时间, 实现了社会效益与生态效益之间的帕累托最优平衡。

5 结束语

以白溪水库为案例对象, 团队构建了一个基于数字孪生技术的“正一反向”双核预演模型体系, 结合白溪水库仿真实验证明: 该方法在典型的洪灾、旱灾等场景中能降低洪峰水位、增加供水保证率、延长生态基流维持时间等效水深历时曲线时长, 有良好的应用前景, 但在运用过程中仍然存在一定的局限性: 一是当前所建立的预演体系主要是以确定性水位预报为基础进行事前预演, 并没有考虑气象预测误差及对调度的影响; 二是当前的反向优化是以人为经验主观设置好目标权重的形式进行, 调度规则难以实现自适应地更新变化。后续研究可以在引入不确定分析以及自学习优化方法的基础上, 提高模型面对复杂水情的能力, 并且可以将预演框架推广应用到多库联调、流域级协同调度等具体应用中, 最后为智慧水利的实际运行提供通用技术手段支持。

参考文献:

- [1] 李云玲, 姜大川, 赵钟楠, 等. 推进中国式现代化的水安全保障总体态势与战略研究[J]. 中国水利, 2025(23):22-27.
- [2] 朱思鹏, 刘怀远, 覃晖, 等. 基于水动力学模型和代理模型的水库动库容精细化计算[J]. 水电能源科学, 2024, 42(09):176-178, 175.
- [3] 魏振, 杨冰. 基于数字孪生技术的智慧水利流域系统体系构建[C]// 河海大学, 浙江水利水电学院, 河北工程大学, 浙江省水利学会. 2024(第三届)城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集. 黄河水利委员山东水文水资源局, 2024.
- [4] 李磊, 李家欢, 王旭, 等. 数字孪生流域水流网络建设关键技术研究[J]. 水文, 2023, 43(05):6-11.
- [5] 杨玉柱, 赵冉, 杨楠. 空天地一体化融合数字孪生赋能山东水利安澜[J]. 中国信息化, 2022(11):109-110.
- [6] 周统. 基于水信息学模型的城市原水系统智能调度理论及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [7] 孙依. 环境变化情景下新立城水库流域水文响应及演化分析[D]. 长春: 吉林大学, 2020.