

# 基于数字孪生技术的流域防洪抗旱协同调度优化研究

杨信<sup>1,2</sup> 管林杰<sup>1,2</sup>

1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北武汉 430010

2. 长江空间信息技术工程有限公司(武汉) 湖北武汉 430010

**摘要:** 流域防洪抗旱协同调度是保障水资源安全、抵御水旱灾害、维护生态平衡的核心水利管理工作,其复杂性体现在流域水文情势多变、水利工程分布广泛、供需关系动态调整等多个维度。数字孪生技术作为融合物联网、大数据、人工智能、三维建模等多领域技术的新型数字化工具,通过构建物理流域与数字流域的实时映射与动态交互,实现对流域水文过程、工程状态、灾害演化的全要素、全周期模拟与调控。本文深入探索数字孪生技术在流域防洪抗旱协同调度中的应用架构与优化策略,不仅是提升水利灾害防御能力、保障水资源可持续利用的内在需求,更是推动水利行业数字化转型、实现智慧水利建设目标的关键举措。

**关键词:** 数字孪生技术; 流域调度; 防洪抗旱; 协同调度

## 引言

近年来,全球极端天气事件频发,流域防洪抗旱风险日益加剧。传统防洪抗旱调度模式依赖静态水文模型与人工经验,难以应对复杂多变的灾害场景。传统流域调度模式以分散式数据采集、静态模型模拟与人工经验决策为主,存在数据整合能力弱、水文过程模拟精度不足、工程协同联动性差等问题,难以实现对水旱灾害的精准预判与高效应对。而数字孪生技术通过高精度建模、实时数据驱动与动态仿真,为流域水资源的协同调度提供了新思路。

## 一、数字孪生技术原理剖析

数字孪生技术的核心原理是通过多源数据融合、三维建模、实时映射与动态交互,构建物理实体在数字空间的全要素、高精度虚拟镜像,实现对物理世界的监测、模拟、预测与调控。其本质是“物理实体—数字镜像—数据链路—决策反馈”的闭环系统,核心构成包括物理实体层、数字孪生层、数据交互层与应用服务层。物理实体层是基础,涵盖流域内水文、水利工程、地理环境等所有物理对象;数字孪生层是核心,通过整合地理信息、水文模型、工程参数等数据,构建包含几何形态、物理属性、行为规则的虚拟模型,实现与物理实体的时空同步;数据交互层通过物联网、传感器网络、通信技术等,实现物理实体与数字镜像之间的实时数据传输与状态反馈;应用服务层基于数字孪生模型,提供模拟分析、预测预警、决策优化等个性化服务。数字孪生技术

的关键特性体现为实时性、可视化、可预测性与可交互性,通过动态更新数据驱动模型演化,能够精准复刻物理实体的运行状态与演化规律,为决策提供科学依据。

## 二、数字孪生技术在流域防洪抗旱协同调度中的应用架构

### 1. 数据采集与传输层

数据采集与传输层是数字孪生应用架构的基础,核心功能是实现流域多源异构数据的全面采集、标准化处理与高速传输。采集对象涵盖水文、气象、工情、灾情、水资源等多类数据:水文数据包括水位、流量、降雨量、蒸发量、土壤墒情等;气象数据涵盖短期降雨预报、中长期气候趋势、极端天气预警等;工情数据包括水库、闸坝、堤防等水利工程的运行状态、结构参数、调度能力等;灾情数据涉及历史水旱灾害影响范围、损失程度等;水资源数据包括地表水、地下水储量、用水需求等。采集方式采用“固定监测+移动监测+遥感监测”的立体化模式,通过部署水文站、雨量站、土壤墒情传感器、视频监控等固定设备,结合无人机巡查、移动监测终端等移动设备,搭配卫星遥感技术,实现全流域数据全覆盖。传输网络采用“5G+物联网+光纤通信”的混合传输模式,确保数据传输的高速率、低延迟与高可靠性,同时建立数据质量控制机制,对采集数据进行去重、纠错、补全处理,为后续数据处理与模型构建提供高质量数据支撑。

### 2. 数据处理与分析层

数据处理与分析层是连接数据采集与模型构建的核

心枢纽，主要完成对多源异构数据的整合、清洗、转换与深度分析。首先通过数据整合技术，将采集到的水文、气象、工情等不同类型、不同格式的数据统一存储至分布式数据库，打破数据孤岛，实现数据资源共享；其次进行数据预处理，通过异常值检测、缺失值填充、数据标准化等方法，提升数据质量，确保数据的准确性与一致性；然后开展特征提取与关联分析，运用统计分析、机器学习等技术，挖掘数据中隐藏的时空关联规律、水文演化特征与灾害发生趋势；最后构建数据服务接口，将处理后的结构化数据与分析结果按需推送至数字孪生模型构建层，为模型参数校准、状态更新提供数据支持，同时实现数据的可视化展示与便捷调用，满足不同应用场景的数据需求。

### 3. 数字孪生模型构建层

数字孪生模型构建层是应用架构的核心，通过整合多学科模型与技术，构建流域防洪抗旱协同调度的高精度虚拟模型。模型构建遵循“多尺度、多维度、多物理场”的原则，涵盖四大核心模型：流域地理空间模型，基于地理信息系统技术，构建包含地形地貌、水系分布、土地利用等要素的三维地理空间模型，还原流域地理环境特征；水文水动力模型，整合产汇流模型、河道水动力模型、水库调度模型等，精准模拟降雨径流形成、洪水演进、水资源转化等水文过程；水利工程模型，基于水利工程设计参数与运行规则，构建水库、闸坝、堤防等工程的虚拟模型，模拟工程运行状态与调度响应；灾害演化模型，结合历史数据与机器学习算法，构建洪水淹没、干旱影响等灾害演化模型，预测灾害发展趋势与影响范围<sup>[1]</sup>。模型采用模块化设计，支持不同模型的灵活组合与参数动态校准，通过实时接收数据处理层的更新数据，实现模型状态与物理流域的同步演化，确保模型的准确性与时效性。

### 4. 决策支持与应用层

决策支持与应用层是数字孪生技术的最终落地环节，基于数字孪生模型提供的模拟分析结果，为流域防洪抗旱协同调度提供全方位决策支持与应用服务。核心功能包括模拟预测、方案优化、决策生成、应急响应等：模拟预测功能通过模型推演不同水文情景下的流域演化过程，实现洪水、旱情的精准预报；方案优化功能基于多目标优化算法，结合防洪安全、水资源利用、生态保护等目标，生成最优调度方案；决策生成功能将模拟结果与优化方案可视化展示，为管理人员提供直观、清晰的决策依据；应急响应功能在灾害发生时，快速模拟灾害

影响，生成应急处置方案，指导人员转移、工程调度等应急行动。应用服务采用“Web端+移动端”的多终端展示模式，支持管理人员随时随地查看流域状态、调度方案与预警信息，同时具备权限管理、数据统计、报告生成等辅助功能，提升调度管理的便捷性与高效性。

## 三、基于数字孪生技术的流域防洪协同调度优化策略

### 1. 洪水精准预报与预警

洪水精准预报与预警是防洪协同调度的前提，数字孪生技术通过多源数据融合与精细化模型模拟，显著提升预报精度与预警时效性。依托数据采集与传输层获取的实时水文、气象数据，结合历史洪水数据与机器学习算法，对数字孪生模型进行动态校准，实现从短期（1—3天）到中长期（7—15天）的洪水过程精准模拟，预测洪水峰值、洪量、演进路径与淹没范围。建立“分级预警+靶向推送”的预警机制，根据洪水预报结果与流域防洪能力，划分不同预警等级，明确各级预警对应的响应措施与责任主体。通过数字孪生可视化平台，将预警信息、洪水演进模拟结果实时推送至相关部门、受影响区域与公众，同时结合地理空间模型，精准标注危险区域与转移路线，为人员提前转移、物资储备等应急准备工作提供科学指引，最大限度缩短应急响应时间，降低洪水灾害损失<sup>[2]</sup>。

### 2. 水库群联合优化调度

水库群联合优化调度是防洪协同调度的核心，数字孪生技术通过整合流域内所有水库的虚拟模型，实现调度方案的全局优化。基于数字孪生模型，模拟不同调度方案下各水库的入库流量、出库流量、水位变化等状态，结合流域防洪目标与工程约束条件，运用多目标优化算法，构建以“最大限度削减洪峰、保障工程安全、减少淹没损失”为核心的优化目标函数，生成最优联合调度方案。调度过程中，通过实时监测流域水情与水库运行状态，动态调整调度方案，实现水库群的协同联动：上游水库提前预泄腾出库容，中游水库错峰调度削减洪峰，下游水库统筹拦蓄与排泄，形成“上下联动、梯级调控”的防洪格局。

### 3. 防洪工程设施的智能管控

防洪工程设施的智能管控是防洪协同调度的重要保障，数字孪生技术通过构建工程设施的虚拟镜像，实现对水库、闸坝、堤防等工程的全生命周期智能管理。基于数字孪生模型，实时监测工程运行状态，包括结构完整性、设备运行参数、防洪能力变化等，通过数据分析

与趋势预测,提前识别工程潜在隐患,生成维修养护建议,实现预防性维护。在洪水调度过程中,根据数字孪生模型的实时推演结果,自动或半自动控制工程设备运行,如调节闸坝开度、启动泵站排水等,确保工程调度的精准性与及时性。同时,通过模拟不同洪水荷载下的工程受力状态与安全风险,优化工程调度极限值,在保障工程安全的前提下最大化发挥防洪效益。

#### 四、基于数字孪生技术的流域抗旱协同调度优化策略

##### 1. 旱情动态监测与评估

旱情动态监测与评估是抗旱协同调度的基础,数字孪生技术通过整合多源监测数据与精细化模型,实现旱情的实时监测、精准评估与趋势预测。依托立体化数据采集网络,实时获取土壤墒情、降水量、蒸发量、河流水位、水库蓄水量、地下水埋深等数据,通过数据处理与分析层进行整合分析,构建旱情评估指标体系。基于数字孪生模型,模拟旱情演化过程,分析旱情影响范围、严重程度及发展趋势,评估对农业、工业、生活用水的影响。建立旱情分级评估标准,将旱情划分为轻度、中度、重度、特重度四个等级,结合流域水资源储备状况与用水需求,预测旱情持续时间与缺水缺口,为抗旱调度决策提供精准依据。同时,通过可视化平台展示旱情动态变化,让管理人员直观掌握全流域旱情分布与发展态势,为后续水资源优化配置奠定基础<sup>[3]</sup>。

##### 2. 水资源优化配置与调度

水资源优化配置与调度是抗旱协同调度的核心,数字孪生技术通过整合流域水资源总量、用水需求、水利工程调度能力等数据,实现水资源的精细化配置与高效利用。基于数字孪生模型,构建“多水源—多用户—多目标”的水资源优化配置模型,多水源包括地表水、地下水、再生水等,多用户涵盖农业、工业、生活、生态等各类用水需求,多目标包括保障生活用水优先、满足农业关键期用水、兼顾工业生产用水与生态基流需求。运用优化算法,根据旱情等级与水资源状况,制定差异化调度方案:轻度旱情时,优先利用地表水,合理调控地下水开采;中度旱情时,启动再生水利用,优化水库供水调度,削减非必要用水;重度及以上旱情时,实施跨区域调水、限制高耗水行业用水等应急措施。调度过程中,通过实时监测水资源消耗与供水状态,动态调整调度方案,确保水资源供需平衡,最大限度减轻干旱影响<sup>[4]</sup>。

##### 3. 抗旱应急响应与保障

抗旱应急响应与保障是抗旱协同调度的重要支撑,数字孪生技术通过模拟应急情景、优化应急方案,提升抗旱应急响应能力与保障效率。基于数字孪生模型,预设不同等级旱情的应急响应流程与处置方案,包括应急水源启用顺序、用水限制措施、应急调水路线等,当旱情达到相应等级时,自动触发应急响应,快速生成针对性处置方案。模拟应急调水过程中的水量损失、输水时间等关键参数,优化调水路线与调度方式,确保应急水源及时送达缺水区域。建立抗旱物资储备与调度模型,基于旱情评估结果,预测物资需求类型与数量,优化物资储备地点与调配路线,实现抗旱物资的精准投放与高效利用<sup>[5]</sup>。

#### 结语

数字孪生技术凭借其实时映射、动态模拟、精准预测的核心优势,为流域防洪抗旱协同调度提供了全新的技术路径,通过构建“数据—模型—决策—反馈”的闭环体系,打破了传统调度模式的局限,实现了调度决策的科学化、精细化与智能化。从多源数据采集到高精度模型构建,从洪水精准预报到水资源优化配置,数字孪生技术贯穿于防洪抗旱协同调度的全流程,显著提升了流域水旱灾害防御能力与水资源利用效率。随着技术的持续创新与应用的不断深化,数字孪生技术将在流域水利管理中发挥更大作用,为推动智慧水利建设、保障水资源安全、抵御水旱灾害提供坚实支撑,助力实现流域可持续发展目标。

#### 参考文献

- [1] 王娜,朱秀群,罗章海.水利信息化在防洪抗旱工程中的应用[J].通讯世界,2017,(16):256—257.
- [2] 杨孝翠,魏豪,单利朝.基于GIS的防洪抗旱符号库制作关键技术研究[J].测绘与空间地理信息,2017,40(06):37—39+42.
- [3] 马富强,王新华,任志凤.农田水利防洪抗旱相关问题研究[J].江西农业,2017,(09):51.
- [4] 冯海交.农田水利管理与防洪抗旱问题分析[J].绿色环保建材,2016,(12):171—172.
- [5] 孙富春.遥感数据共享系统在防洪抗旱中的应用[J].黑龙江水利科技,2013,41(05):179—181.