

# 基于数字孪生技术的流域水资源优化配置与调度研究

龚开亮

曲靖市麒麟区水务局 云南 曲靖 655000

**摘要:** 流域水资源供需矛盾加剧、极端水文事件频发,传统调度模式难满足精准化、智能化管理需求。数字孪生技术作为虚实融合的前沿科技,为流域水资源管理带来新方案。本文系统阐述其基本原理、体系架构与应用优势,梳理水资源优化配置内涵与调度原则。重点构建基于该技术的配置模型,明确数据采集处理等关键技术与求解方法,提出调度策略。研究借助数字孪生实现闭环管理,为提升水资源利用效率、保障供水安全提供支撑,推动可持续发展。

**关键词:** 数字孪生技术;流域水资源;调度研究

## 1 数字孪生技术原理与优势

### 1.1 数字孪生技术的基本原理

数字孪生技术是通过数字化手段构建与物理实体完全映射的虚拟模型,实现物理世界与虚拟空间实时交互、数据同步及协同优化的技术体系。其核心原理体现为“数据驱动、虚实联动、闭环迭代”三大特性。数据驱动是技术基础,通过物联网、传感器等设备采集物理实体的全生命周期数据,包括状态参数、运行工况及环境信息,为虚拟模型提供精准输入;虚实联动是核心机制,虚拟模型基于实时数据动态模拟物理实体的行为特征,实现物理状态的虚拟复现,同时可通过虚拟仿真优化决策指令,反向作用于物理实体;闭环迭代是优化路径,通过虚拟模型模拟不同运行场景,对比分析模拟结果与预期目标的偏差,持续修正模型参数与控制策略,实现物理实体与虚拟模型的协同进化。该技术打破了传统技术中物理与虚拟的割裂,使虚拟模型成为物理实体的“数字镜像”与“优化工具”,为复杂系统管理提供精准化支撑。

### 1.2 数字孪生技术的体系架构

数字孪生技术的体系架构呈现分层递进的结构,通常分为物理实体层、数据采集传输层、虚拟模型层、应用服务层四个核心层级,各层级协同作用形成完整技术体系。物理实体层是基础载体,涵盖流域内的水库、灌区、水文站点、水利工程等所有水资源相关物理对象,是数据产生的源头;数据采集传输层承担“数据桥梁”作用,通过部署水位、流量、水质、降雨量等各类传感器,结合无人机航测、卫星遥感等技术获取多源数据,经5G、物联网等通信技术实现数据实时传输与汇聚;虚拟模型层是核心核心,基于地理信息系统、三维建模等技术,构建与物理实体几何结构、物理属性、运行规则完全一致的虚拟模型,集成水文水质、水资源调度等专

业模型,实现数据与模型的深度融合;应用服务层是价值输出端,针对水资源优化配置、调度决策等需求,开发可视化监控、情景模拟、智能预警等应用模块,为管理人员提供直观、高效的决策支持。各层级通过标准化接口实现数据互通,确保体系的整体性与扩展性<sup>[1]</sup>。

### 1.3 数字孪生技术在资源管理领域的优势

数字孪生技术在资源管理领域展现出显著优势,有效弥补了传统管理模式的不足,主要体现在精准化、智能化、前瞻性三个维度。精准化优势源于虚实映射的特性,通过实时采集资源动态数据,虚拟模型可精准复现资源分布、利用状态及变化趋势,避免传统管理中依赖经验判断导致的误差,为资源量化管理提供数据支撑;智能化优势体现在决策优化能力上,结合大数据分析 with 人工智能算法,技术可自动识别资源管理中的异常问题,如水资源浪费、水质污染等,快速生成优化方案,替代传统人工决策的繁琐流程,提升管理效率;前瞻性优势基于虚拟仿真功能,通过构建多情景模拟模型,可预测极端天气、用水增长等不同条件下的资源供需变化,提前制定应对策略,如干旱期供水调度方案、洪水期防洪预案等。在流域水资源管理中,这些优势可实现对水资源全要素、全流程的精细化管控,助力解决资源供需失衡、利用效率低下等问题。

## 2 流域水资源优化配置与调度理论基础

### 2.1 流域水资源优化配置的内涵

流域水资源优化配置是基于流域水资源自然禀赋与社会经济发展需求,通过科学手段实现水资源在时间、空间、用户间合理分配的过程,其核心内涵体现为“供需平衡、高效利用、生态优先”。从空间维度看,需统筹流域内上下游、左右岸的水资源分布,通过跨区域调水工程等措施,缓解水资源空间分布不均问题,保障缺水区域基本用水需求;从时间维度讲,针对降水、径流

的季节性变化,利用水库、塘坝等水利设施调蓄水资源,实现丰水期蓄水、枯水期供水,平衡水资源时间分配差异;从用户维度而言,需兼顾生活、生产、生态三类用水需求,按照“先生活、后生产、再生态”的优先级,优化用水结构,确保生活用水安全,提升生产用水效率,保障生态基流。优化配置并非简单的“平均分配”,而是通过量化分析各区域、各行业的用水效益与需求刚性,实现水资源整体利用效益最大化,同时维护流域生态系统健康。

## 2.2 流域水资源调度的原则

流域水资源调度需遵循科学合理的原则,确保调度过程有序、高效且符合可持续发展要求,核心原则包括系统性、公平性、效益性与适应性。系统性原则要求调度工作统筹流域整体,兼顾水资源开发、利用、节约、保护各环节,考虑水文情势、水利工程、用水需求等多因素相互作用,避免单一目标导向导致的局部利益损害;公平性原则体现在水资源分配中,需保障不同区域、不同用水主体的合法用水权益,特别是保障农村地区、弱势群体的基本用水,避免因资源分配失衡引发矛盾;效益性原则强调以最小的资源消耗实现最大的综合效益,综合考量经济、社会与生态效益,在保障供水安全的前提下,提升农业灌溉保证率、工业用水重复利用率,同时维护河流生态健康;适应性原则要求调度方案具备灵活调整能力,针对气候变化、用水结构变化等不确定因素,建立动态调整机制,通过实时监测数据及时优化调度策略,确保调度方案始终适应流域水资源管理的实际需求。这些原则相互关联、相互约束,共同构建流域水资源调度的科学框架<sup>[2]</sup>。

## 3 基于数字孪生技术的流域水资源优化配置模型构建

### 3.1 数据采集与处理

数据采集与处理是构建数字孪生优化配置模型的基础,直接决定模型的精准度与可靠性,需遵循“全面覆盖、精准采集、规范处理”的原则。数据采集范围涵盖流域自然水文、水利工程、社会用水及生态环境四大类核心数据:自然水文数据包括降雨量、蒸发量、河道流量、水位、水质等,通过水文站点、水质监测站及卫星遥感技术实现全域采集;水利工程数据涵盖水库库容、闸门运行状态、泵站流量等,依托工程自动化监控系统实时获取;社会用水数据包括生活、工业、农业用水量及用水效率指标,通过用水计量设施与行业统计报表整合获取;生态环境数据涉及河流生态基流、湿地面积、水生生物种群等,结合实地监测与生态调查收集。数据处理环节需开展清洗、融合与标准化工作,通过异常值

检测算法剔除传感器故障等导致的错误数据,利用数据融合技术整合多源异构数据,按照统一的数据标准规范格式与精度,最终构建标准化、高质量的流域水资源数据库,为模型构建提供可靠数据支撑。

### 3.2 数字孪生模型构建的关键技术

数字孪生模型构建需融合多学科技术,核心关键技术包括三维地理信息建模技术、多物理场耦合仿真技术、数据中台技术及边缘计算技术。三维地理信息建模技术基于激光雷达、无人机航测数据,构建流域地形地貌、水利工程的高精度三维模型,实现物理空间的可视化复现,为模型提供几何基础;多物理场耦合仿真技术集成水文水动力、水质模拟、水资源调度等专业模型,模拟水流运动、污染物迁移及水资源分配过程,实现对流域水资源物理行为的精准刻画;数据中台技术承担数据汇聚、存储与分析功能,通过分布式存储架构整合海量实时与历史数据,利用大数据分析引擎挖掘数据关联规律,为模型优化提供数据驱动支持;边缘计算技术部署于数据采集终端附近,实现对实时监测数据的本地化快速处理,降低数据传输延迟,保障模型对流域水资源动态变化的实时响应<sup>[3]</sup>。这些技术协同作用,确保数字孪生模型既能精准映射物理实体,又能实现对水资源过程的动态仿真与优化。

### 3.3 水资源优化配置模型的建立与求解

水资源优化配置模型以“供需平衡、综合效益最大化”为目标,结合数字孪生技术特性构建科学的数学模型并采用高效算法求解。模型建立需明确决策变量、约束条件与目标函数:决策变量包括各水利工程供水量、跨区域调水量、各行业用水量等可调控参数;约束条件涵盖水资源总量约束、工程供水能力约束、生态基流约束、用水需求约束等,确保配置方案的可行性;目标函数为多目标函数,包括经济效益(如农业产值、工业收益)、社会效益(如供水保证率)、生态效益(如生态基流保障率)的综合最大化。模型求解采用改进的非支配排序遗传算法(NSGA-III),该算法能有效处理多目标优化问题,通过模拟生物进化过程生成多个非劣解方案。结合数字孪生平台的可视化功能,将各方案的水资源分配结果、效益指标进行直观展示,采用熵权-TOPSIS法对非劣解进行综合评价,筛选出“经济合理、社会公平、生态安全”的最优配置方案,为水资源管理决策提供量化依据。

## 4 基于数字孪生技术的流域水资源调度策略

### 4.1 实时监测与动态评估

实时监测与动态评估是数字孪生调度策略的基础环

节,通过构建全域覆盖的监测网络与科学的评估体系,实现对流域水资源状态的精准掌控。实时监测网络以“地面监测+空中遥感+水质在线监测”为架构,地面部署水位、流量、墒情等传感器,空中依托卫星与无人机获取流域宏观水文数据,水质在线监测设备实时跟踪水体污染物浓度,所有数据通过5G网络实时传输至数字孪生平台。动态评估体系围绕“水资源状态-利用效率-生态影响”构建指标体系,水资源状态指标包括流域蓄水量、河道流量等,利用效率指标涵盖农业灌溉水利用系数、工业重复用水率等,生态影响指标涉及生态基流保障程度、水质达标率等。通过数字孪生平台整合监测数据,采用模糊综合评价法对各指标进行动态评估,生成流域水资源健康状况报告,及时识别水资源短缺、水质恶化等问题,为调度策略调整提供实时依据,确保调度决策的及时性与针对性。

#### 4.2 智能调度决策支持系统

智能调度决策支持系统是数字孪生技术落地应用的核心载体,集成数据管理、模型仿真、决策分析等功能模块,实现调度决策的自动化与智能化。系统以数字孪生平台为基础,数据管理模块实现多源监测数据的实时更新与历史数据的归档管理,为决策提供数据支撑;模型仿真模块调用水文水动力、水资源配置等模型,基于实时监测数据更新模型参数,精准模拟当前水资源运行状态;决策分析模块融合人工智能算法,通过深度学习历史调度数据与水文情景,构建调度决策模型,当出现水资源供需失衡等问题时,自动生成多种调度方案,包括水库下泄流量调整、跨区域调水优化等,并量化分析各方案的实施效果;可视化展示模块以三维场景形式直观呈现调度方案的执行过程与结果,支持管理人员进行交互操作与方案调整。系统还具备预警功能,当监测数据超出阈值时,自动发出缺水预警、水质超标预警等,辅助管理人员快速响应<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 不同情景下的水资源调度方案模拟

基于数字孪生技术的情景模拟功能,针对流域水资

源管理中的各类不确定因素,构建不同情景并模拟相应的调度方案,为应对复杂局面提供提前预案。情景设置涵盖气候情景、用水情景与工程情景三类:气候情景包括正常水文年、干旱年、丰水年及极端暴雨情景,基于历史气象数据与气候预测模型构建;用水情景考虑人口增长、产业升级导致的用水需求变化,设置基准用水、高用水、节水型用水三种情景;工程情景包括新建水库、跨流域调水工程等重大水利工程投运前后的情景。在数字孪生平台中,针对各情景输入相应参数,调用优化配置模型与调度模型,模拟不同情景下的水资源分配过程、供水保障程度及生态影响,输出各情景下的最优调度方案。例如,干旱年情景下,模拟水库联合调度、应急供水等方案的效果,明确各区域供水优先级与限水措施;极端暴雨情景下,模拟洪水调度方案,确保防洪安全。通过情景模拟为管理人员提供全面的决策参考,提升流域水资源调度的应变能力。

#### 结束语

数字孪生技术为流域水资源优化配置与调度提供智能化路径,核心价值在于虚实融合实现精准、高效与前瞻管理。本文构建基于该技术的配置模型与调度策略,形成完整技术体系。研究表明,其能有效整合多源数据、精准模拟水资源运动,为调度决策提供支撑,助力解决供需矛盾。目前,该技术应用面临模型精度、数据共享等挑战,未来需深化人工智能融合、优化算法,建立跨部门数据共享平台,推动管理迈入智能化新阶段。

#### 参考文献

- [1]王煜,郑小康,彭少明,张迪,吕鸿,尚文绣.黄河流域水资源配置研究与展望[J].人民黄河,2024,46(09):18-24.
- [2]王宗志,叶爱玲,刘克琳,金菊良.流域水资源供需双侧调控模型及应用[J].水利学报,2021,52(03):265-276.
- [3]李自勇.位山灌区数字孪生建设探析与未来展望[J].水上安全,2024,(04):52-54.
- [4]赵宏.流域水资源优化配置研究[J].水利科技与经济,2020,26(4):57-61.