

# 智慧水利框架下的水资源精准调配模型构建

李 行

温州经远建设有限公司 浙江 温州 325000

**摘要：**随着全球气候变化加剧、人口持续增长及经济社会快速发展，水资源供需矛盾日益突出，传统粗放式水资源管理方式已难以满足新时代高质量发展的需求。智慧水利作为水利现代化的重要方向，依托物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术，为实现水资源的精细化、智能化管理提供了全新路径。本文在系统梳理智慧水利内涵与技术架构的基础上，聚焦水资源精准调配这一核心任务，提出一种融合多源数据驱动与智能优化算法的水资源精准调配模型。该模型以“感知—分析—决策—反馈”闭环为核心逻辑，集成水文气象监测、用水需求预测、多目标优化调度与实时反馈调控四大功能模块，旨在提升水资源配置的科学性、时效性与适应性。最后，文章对模型实施中的关键挑战与未来发展方向进行了探讨。

**关键词：**智慧水利；水资源调配；精准管理；多目标优化；数字孪生；人工智能

## 引言

近年来，国家高度重视水资源安全保障，明确提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路，并将智慧水利建设纳入“十四五”国家水安全保障规划和数字中国战略体系。在此背景下，如何借助现代信息技术手段，实现对水资源的精准感知、科学评估、智能调度与高效利用，成为当前水利科技创新的关键课题。传统水资源调配主要依赖经验判断和静态规划，存在响应滞后、信息孤岛、模型简化过度等问题，难以应对复杂动态的水系统变化。而智慧水利通过构建“天空地水工”一体化感知网络，打通“测—报—调—控”业务链条，为水资源调配从“经验驱动”向“数据+模型双轮驱动”转型提供了技术支撑。因此，构建一套适用于智慧水利框架下的水资源精准调配模型，不仅具有重要的理论价值，更具备迫切的现实意义。

## 1 智慧水利的内涵与技术架构

### 1.1 智慧水利的定义与特征

智慧水利是指以新一代信息技术深度融合水利业务为核心，通过全面感知、泛在互联、智能分析与协同控制，实现对水循环全过程的数字化表达、智能化决策与自动化调控的现代水利形态。其核心特征体现在多个维度：首先，在感知层面，智慧水利强调对水文气象、工程运行、生态环境及社会用水行为等全要素的实时、连续、高精度监测，形成覆盖“天空地水工”的立体化感知体系；其次，在业务流程上，它致力于打破部门壁垒与数据孤岛，实现从水源地到用户终端、从规划到运维的全生命周期数据共享与业务协同；再次，在模拟能力方面，依托数字孪生技术构建流域或区域水系统的虚拟

映射，支持“预报—预警—预演—预案”的闭环管理；最后，在决策机制上，通过引入机器学习、运筹优化、知识图谱等人工智能技术，显著提升复杂水系统调度的科学性与自动化水平。

### 1.2 智慧水利技术架构

典型的智慧水利技术架构可分为五层。最底层为感知层，部署各类传感器、遥测站、视频设备、卫星遥感平台等，负责采集降雨、蒸发、水位、流量、水质、土壤墒情以及水利工程运行状态等原始数据。网络层则通过5G、NB-IoT、光纤等通信技术，确保海量感知数据能够高速、安全、低延迟地传输至数据中心。在此基础上，数据层构建统一的数据湖或数据中台，对多源异构数据进行清洗、标准化、融合与存储，形成高质量、可复用的水利数据资源池。平台层是整个架构的智能中枢，包括水利数字孪生平台、模型服务平台和AI算法平台，提供强大的计算、仿真与分析能力。最上层为应用层，面向防洪抗旱、水资源调配、水生态保护、水利工程监管等具体业务场景，开发一系列智能应用系统。在这一整体架构中，水资源精准调配作为核心应用之一，需充分调用各层能力，实现从原始数据到调度决策的价值转化链条。

## 2 水资源精准调配的核心需求与挑战

### 2.1 核心需求

精准调配并非简单地“按需分配”，而是在多重约束条件下，实现水资源在时间、空间、用途上的最优配置。这一过程必须具备高度的动态响应能力，能够实时捕捉来水变化、用水需求波动以及工程运行状态调整等动态因素，并迅速生成适应性策略。同时，水资源调配

本质上是一个多目标优化问题,需要统筹生活、生产、生态三大用水需求,在保障基本民生用水的前提下,兼顾农业灌溉效率、工业用水稳定性以及河流生态健康,实现经济效益、社会效益与生态效益的协同提升<sup>[1]</sup>。此外,水系统本身具有高度不确定性,气象预报存在误差,用户用水行为难以精确预测,突发事件如水质污染或工程故障更会打乱既定调度计划,因此调配模型必须具备足够的鲁棒性与容错能力。最后,公平性与效率性的平衡也是不可忽视的伦理与制度命题,既要防止水资源过度集中于高效益行业,也要避免因过度平均分配而造成整体用水效率低下。

## 2.2 挑战

然而,当前水资源调配实践仍面临诸多挑战。多源数据的质量参差不齐,时空分辨率不一致、缺失值与噪声干扰等问题严重影响模型输入的可靠性;高精度物理水文模型虽能较好刻画水循环过程,但计算成本高昂,难以满足实时调度需求,而简化模型又可能忽略关键水力过程,导致决策偏差;传统调度规则多基于历史经验制定,缺乏自适应学习能力,在面对极端气候或新型用水模式时显得僵化无力;更重要的是,水资源调配涉及水利、农业、城建、环保等多个行政主体,跨部门数据共享与协同决策机制尚未健全,制约了整体调度效能的发挥。因此,亟需构建一个既能融合多源信息、又能快速响应、兼具鲁棒性与灵活性的智能调配模型。

## 3 水资源精准调配模型构建

### 3.1 模型总体架构

本文提出的水资源精准调配模型采用“感知—分析—决策—反馈”四阶段闭环结构。该架构以数据流与控制流为纽带,形成一个持续迭代优化的智能系统。在感知阶段,系统整合来自遥感、地面监测站、社会经济统计等多种渠道的数据,构建覆盖全流域的实时水情-需情数据库;进入分析阶段后,模型基于历史序列与当前态势,对未来1至7天的来水过程与分行业用水需求进行滚动预测;在决策阶段,系统以多目标优化为核心引擎,综合考虑供水保障、弃水控制、能耗节约与生态维护等多重目标,生成最优调度方案;最后,在反馈阶段,通过物联网回传的实际执行数据与观测结果,对模型预测偏差进行量化评估,并动态修正内部参数或策略权重,从而实现模型的在线学习与持续进化<sup>[2]</sup>。这一闭环机制确保了调配策略能够随环境变化而自适应调整,显著提升了系统的韧性与智能水平。

### 3.2 关键模块设计

#### 3.2.1 多源数据融合与感知模块

多源数据融合与感知模块是整个模型的基础支撑。该模块首先对来自卫星遥感、地面水文站、气象站、智能水表、泵站SCADA系统等异构数据源进行统一接入与预处理。针对空间分布稀疏的监测站点,采用克里金插值或深度学习融合模型(如ConvLSTM)进行空间扩展,生成连续的面状水文要素场;对于传感器可能产生的异常值或缺失数据,则利用孤立森林或自编码器等无监督学习算法进行自动检测与修复,确保数据质量。在此基础上,模块进一步整合社会经济数据,如产业结构、人口分布、作物种植面积等,结合高频用水记录,构建分行业、分区域的用户用水画像。这种细粒度的用水行为建模,不仅提升了需求预测的准确性,也为后续差异化调度策略的制定提供了依据。

#### 3.2.2 用水需求与来水预测模块

用水需求与来水预测模块采用混合建模策略以兼顾精度与效率。在来水预测方面,模型首先引入数值天气预报(NWP)产品作为气象驱动,耦合分布式水文模型(如VIC或SWAT)模拟流域产汇流过程,再利用长短期记忆网络(LSTM)或Transformer等深度时序模型对模拟结果进行偏差校正,有效降低系统性预报误差。在用水需求预测方面,针对农业用水,模型结合遥感获取的植被指数(如NDVI)与作物生长模型(如AquaCrop),动态估算不同生育期的蒸散发量与灌溉需求;对于工业与生活用水,则采用XGBoost或Prophet等先进时序预测算法,融合气温、节假日、经济活跃度等外部变量,实现高精度的日尺度需求预测<sup>[3]</sup>。整个预测模块以7天为周期滚动更新,确保调度决策始终基于最新、最可靠的未来情景。

#### 3.2.3 多目标优化调度模块

这是模型的核心。设调度时段为 $T = \{1, 2, \dots, t\}$ ,决策变量为各水库出流 $Q_{i,t}$ 、闸门开度、泵站启停等。

(1) 目标函数(需加权综合):

$$\min[w_1 \cdot C_{\text{缺水}} + w_2 \cdot C_{\text{弃水}} + w_3 \cdot C_{\text{能耗}} - w_4 \cdot B_{\text{生态}}]$$

其中:

$$C_{\text{缺水}} = \sum_{j,t} \max(0, D_{j,t} - S_{j,t}): \text{缺水量惩罚};$$

$$C_{\text{弃水}} = \sum_{i,t} \max(0, Q_{\text{in},i,t} - Q_{\text{cap},i}): \text{弃水量成本};$$

$C_{\text{能耗}}$ : 泵站提水能耗;

$B_{\text{生态}}$ : 生态基流满足度收益(如满足河道最小流量要求)。

(2) 约束条件:

水量平衡方程;

水库库容限制( $V_{\min} \leq V_t \leq V_{\max}$ );

工程输水能力限制；  
生态基流约束 ( $Q_{\text{out},t} \geq Q_{\text{eco}}$ )；  
用户最低保障水量。

求解算法可采用改进NSGA-II（非支配排序遗传算法）、粒子群优化（PSO）或强化学习（如DQN、PPO）。对于大规模系统，可引入分解协调策略（如Benders分解）提升求解效率。

### 3.2.4 实时反馈与自适应调控模块

实时反馈与自适应调控模块赋予模型持续学习与自我完善的能力。每当调度方案被执行后，系统通过物联网平台自动采集实际供水量、水库水位变化、用户端用水反馈等执行数据，并与模型预测值进行比对，计算各项指标的偏差。基于这些偏差信息，模型采用在线学习机制（如增量学习或贝叶斯参数更新）动态调整预测模块的超参数或优化目标的权重系数，使模型逐渐适应区域用水模式的长期演变。此外，该模块还内置应急响应机制：当监测到极端干旱、突发水质污染或重大工程故障等异常事件时，系统将自动触发应急预案模式，暂停常规优化流程，优先保障城乡居民生活用水与关键生态节点的基流需求，确保水系统在危机状态下仍能维持基本功能。这种“常态优化+应急兜底”的双模运行机制，极大增强了模型在复杂现实环境中的适用性与可靠性。

## 4 讨论：实施挑战与未来方向

### 4.1 实施挑战

尽管所构建的模型在仿真环境中展现出良好潜力，但在实际推广应用过程中仍面临若干现实挑战。首先是数据壁垒问题，水利、农业、住建、环保等部门的数据标准不一、共享意愿不足，导致多源数据融合受阻，亟需加快国家层面水利数据标准体系建设，推动“一数一源、一源多用”的数据治理模式。其次是模型可解释性不足，当前广泛使用的深度学习等“黑箱”模型虽预测精度高，但其决策逻辑难以被管理者直观理解，影响信任度与采纳意愿，未来应探索可解释人工智能（XAI）技术，如通过注意力机制可视化或SHAP值分析揭示关键影响因子。再次，部分偏远地区受限于网络覆盖与边缘计算能力，难以支撑复杂模型的本地部署，需发展轻量化

模型架构与“云-边”协同计算范式<sup>[4]</sup>。最后，技术先进性必须与制度创新同步推进，水权交易机制、阶梯水价政策、跨行政区协调机制等配套改革若不到位，再智能的模型也难以发挥最大效能。

### 4.2 未来趋势

展望未来，水资源精准调配研究将朝着更高阶的智能化方向演进。一是构建流域级数字孪生体，实现物理水系统与虚拟模型的双向实时互动，全面支撑“预演—预案”闭环管理；二是引入大模型技术，训练水利领域专用的大语言模型或基础模型，整合结构化数据与非结构化知识，提升语义理解与复杂推理能力；三是探索碳水协同管理路径，将水资源调配与区域碳排放核算相结合，服务国家“双碳”战略；四是利用区块链技术构建基于智能合约的水权交易平台，实现用水权的自动结算、溯源与交易，推动水资源市场化配置改革。

## 5 结语

本文在智慧水利框架下，构建了一套集感知、预测、优化与反馈于一体的水资源精准调配模型。该模型突破了传统调度方法的局限性，通过多源数据融合、智能预测与多目标优化，实现了水资源在时空维度上的高效、公平、可持续配置。智慧水利不仅是技术革新，更是管理理念的深刻变革。未来，随着数字孪生、人工智能、5G等技术的持续演进，水资源精准调配将朝着更高水平的自主化、协同化与绿色化方向发展。然而，技术落地离不开制度、标准、人才等多维度支撑。唯有坚持“技术+机制”双轮驱动，方能真正实现“让每一滴水都发挥最大价值”的治水愿景。

## 参考文献

- [1]李鲁刚.融合多源数据的水库水资源调配与优化研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(09):28-31+45.
- [2]杨长燊.基于区间多目标规划模型的水资源优化调配研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(08):137-141.
- [3]李承龙,杨侃,蔡玉琴,等.基于改进粒子群算法的水资源优化调配模型研究[J].人民黄河,2022,44(07):69-74.
- [4]杨长燊.基于区间多目标规划模型的水资源优化调配研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(08):137-141.