

基于监测预警的水资源动态调配体系建设研究

喻雪晴

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 针对水资源时空分布不均与极端气候频发背景下传统调度模式响应滞后、决策粗放等问题, 构建基于监测预警的动态调配体系, 实现水资源高效利用的协同优化。采用“边缘智能+云端协同”双层架构, 融合多源感知、智能预警与闭环调控技术, 提升水文过程模拟精度与调度响应时效。系统集成LSTM-GAN混合模型与NSGA-III多目标优化算法, 实现干旱洪涝预测准确率提升、调度方案快速生成与动态修正。在山东南水北调东线工程应用中, 调度响应时间压缩至15分钟内, 水资源利用率提升12.7%, 生态流量保障率达98.5%。研究成果形成可复制的技术范式, 为智慧水利建设提供精准化、智能化、可持续化的系统解决方案。

关键词: 动态调配; 边缘智能; 可解释性AI; 数字孪生; 闭环调控

0 引言

水资源时空分布不均与极端气候事件频发, 持续加剧区域供需矛盾, 传统静态调度模式因监测滞后、响应迟缓, 难以适应复杂多变的管控需求。现有调度体系在数据感知、预警响应与决策执行环节普遍存在时滞与脱节问题, 制约了水资源配置的精准性与韧性。亟需构建以实时感知为基础、智能预警为驱动、动态优化为核心的闭环调配体系, 实现从被动应对向主动防控的转变^[1]。

多源数据融合与智能算法的发展为体系构建提供了技术支撑, 水文过程模拟与机器学习预警模型显著提升了极端事件预测能力。数字孪生平台与物联网感知网络的集成, 推动水利系统向全要素数字化映射演进。然而, 监测数据时空分辨率不足、模型可解释性欠缺、跨部门协同机制缺失等问题仍制约系统效能。现有研究在动态调度中缺乏实时反馈与自适应调控能力, 导致模型对突发性干旱或洪涝响应滞后, 调度指令执行延迟普遍超过60分钟。面向实际应用, 亟需突破感知—预警—决策—反馈全链条的技术瓶颈。智能决策模型在提升预测精度的同时, 必须兼顾透明性与可解释性, 以增强调度人员对系统输出的信任度^{[2][3]}。

1 水资源动态调配体系现状与问题

当前水资源调配正面临由传统经验型向智能化、精细化转型的关键阶段, 监测预警能力的强弱直接决定动态调配体系的科学性与时效性。尽管已有研究在多源数据融合与智能算法应用方面取得阶段性成果, 但实际运行中仍暴露出系统性短板。体系构建需突破数据获取与处理的瓶颈, 实现从“被动响应”向“主动预警”的根本转变。

1.1 研究热点与进展

多源数据融合技术实现了气象观测、水文监测与水利工程运行数据的实时集成, 为动态调配提供了基础信息支撑。通过卫星遥感、地面站网与物联网传感设备的协同部署, 关键水文参数的采集频率显著提升, 初步形成全域覆盖的感知网络^[4]。基于深度学习的水文预警模型在洪水、干旱等极端事件的短期预测中展现出优于传统统计模型的精度, 尤其在非线性水文过程模拟中具备更强的适应能力。数字孪生水利平台的逐步落地, 使得物理流域与虚拟模型之间实现双向映射, 支持对水体流动、蓄泄关系等过程的动态推演。跨区域动态调度优化算法则在多目标约束下尝试平衡供水保障、生态需水与工程运行效率, 初步构建了支持多主体参与的协同决策框架。

1.2 现存技术瓶颈

监测数据的时空分辨率不足仍是制约预警精度的核心问题。部分区域的水文站网密度偏低, 导致流域内水情变化存在盲区, 尤其在山区或偏远地带影响显著。水文模型与人工智能算法的耦合过程中, 常出现“黑箱”现象, 模型输出缺乏可解释性, 难以满足水利决策部门对逻辑可追溯性的要求。跨部门调度协同机制尚未形成闭环管控, 信息壁垒与权限不统一导致指令传递滞后, 影响整体响应效率。此外, 动态调配系统普遍缺乏实时反馈机制, 无法根据实际执行结果动态修正调度方案, 削弱了系统的自适应调控能力。

1.3 典型应用场景缺陷

水文过程模拟与实时监测之间存在15至30分钟的时滞, 导致预警信息滞后于实际变化, 难以支撑及时干预。在复杂边界条件下, 多目标优化算法易陷入局部最优, 收敛速度下降, 难以满足实时调度需求。面对突发

性干旱, 现有模型平均响应滞后2至3个监测周期, 错失关键调控窗口。调度指令从生成到执行的响应时间普遍超过60分钟, 严重制约应急能力。此类缺陷在极端气候频发背景下尤为突出, 暴露出当前体系在快速响应与动态调整方面的结构性短板。系统性重构势在必行, 需从感知层到决策层实现全链条闭环设计。

2 基于“边缘智能+云端协同”双层架构, 构建全链条闭环系统

该架构通过分层协同机制实现数据采集、处理、决策与反馈的高效联动, 为水资源动态调配提供技术支撑。

2.1 实时感知网络构建

构建覆盖区域水文要素的多源感知体系, 实现对地表水、地下水及用水过程的分钟级数据采集。北斗高精度定位与物联网地面传感网络协同部署, 有效提升了时空分辨率与采样频率, 显著增强对突发性水情变化的响应能力。遥感反演技术对大范围流域实现空间连续监测, 填补了传统站点覆盖盲区, 尤其在地形复杂或人迹罕至区域发挥关键作用。边缘计算节点在数据源头就近完成初步处理, 减少冗余信息上传, 降低网络带宽压力。数据融合过程中引入多源异构数据清洗算法, 结合滑动窗口与异常值检测机制, 有效提升数据可靠性。特征提取模块基于主成分分析与自编码网络, 自动识别关键水文变量, 为后续建模提供高信噪比输入^[5]。

2.2 智能预警模型开发

融合历史水文序列与实时感知数据, 构建 LSTM-GAN 混合模型, 可有效兼顾水文序列的长期时序依赖特征与极端水文事件的生成能力。模型依托长短期记忆网络捕捉径流、降水、水位等要素的时序演变规律, 借助生成对抗网络强化对干旱、洪涝等强非线性过程的拟合与还原能力, 显著提升极端情景下的模拟精度。经实测数据验证, 模型干旱预测准确率提升至 89.6%, 洪涝预警准确率提升至 93.1%, 综合预警准确率达到 91.3%, 整体性能优于传统单一预测模型。

模型进一步嵌入可解释性模块, 结合 SHAP 值解析与注意力机制, 动态量化降水、气温、前期径流等关键因子对预测结果的贡献程度, 以可视化方式呈现决策逻辑, 提升预警结果的可信度与实用性。同时构建动态阈值调整机制, 依托气候趋势分析与历史典型事件对标, 实时修正预警触发条件, 适配气候变暖背景下极端事件频发、序列特征漂移的现实现景。该机制可自适应优化预警边界, 使系统在多变气候情景下保持稳定可靠, 显著降低误报与漏报率, 为水文应急决策提供精准支撑。

2.3 多目标优化调度框架

构建集成供水保障、生态需水与经济效率三类约束的多目标决策体系。NSGA-III算法在高维解空间中实现非支配解集的快速收敛, 支持复杂约束下的帕累托前沿探索。情景模拟引擎基于蒙特卡洛方法与参数扰动策略, 可在毫秒级生成百万级调度方案, 满足应急响应需求。风险矩阵评估模块引入不确定性量化指标, 对供水短缺概率、生态退化风险、投资回收周期等关键维度进行加权评分, 实现方案综合风险评估。自适应反馈机制通过对比实际运行结果与预设目标, 自动识别偏差并触发方案修正流程, 形成闭环优化。系统在山东南水北调东线工程试点中, 调度响应时间缩短68.7%, 显著提升应对突发用水需求的能力。

2.4 数字孪生平台集成

基于三维可视化引擎构建高保真数字孪生体, 完整映射水资源调配物理场景与运行状态, 实现调配全过程动态推演、态势感知与实时交互, 真实还原水系、泵站、闸坝、管网及调水工程的空间关系与运行逻辑。虚拟仿真模块针对极端气候、管道破裂、跨区调水、设备故障等复杂突发场景提供沉浸式模拟, 可快速复现险情发展过程, 直观验证应急预案的科学性与可操作性。决策支持系统深度融合人机协同机制, 支持专家在虚拟场景中灵活调整调度参数、模拟不同方案效果, 还可通过自然语言指令与系统交互, 大幅提升应急决策效率与现场参与度。区块链技术全程嵌入数据存证与调度流程, 对监测数据、调度指令、执行日志、操作记录进行上链存储, 保障全流程数据不可篡改、全程可追溯, 显著提升系统公信力与安全等级。平台支持多部门、多角色并发操作与权限管理, 实现跨区域、跨层级信息高效共享与协同联动, 为水资源精细化调度与应急处置提供稳定可靠的数字化支撑。

3 典型工程应用验证

依托山东南水北调东线工程的实际运行环境, 开展基于监测预警的水资源动态调配体系的系统性验证, 全面检验体系在复杂跨流域调度场景下的适应性与实效性。该工程年均调水规模达15亿立方米, 覆盖5个地级市、23个县区, 涉及泵站、水闸、倒虹吸等38类关键水利设施, 年均调度指令下达超过2000次, 具备高度的系统复杂性及运行强度。通过构建覆盖全流域的多源感知网络, 实现了对水量、水质、流速、水位等核心参数的实时采集与边缘端初步分析。

3.1 试点工程概况

工程覆盖区域内地形地貌复杂多样, 江河水系分布零散且水文条件随季节、气候呈现多变特征, 日常及应

急状态下的水资源调度任务因此具备高度动态的特征,对调度的及时性、精准性要求极高。为适配这一需求,系统全面接入遥感影像、自动水文站实时监测数据、在线水质传感器动态采集数据,同时整合历史调度数据库的海量信息,打通多源异构数据的融合通道,搭建起覆盖全域、全天候运行、全要素监测的水资源感知网络。各类监测终端搭载本地化智能判断模块,可自主对水情异常波动、水质指标突变等关键水文水环境事件进行识别分析,还能按照预设的分级规则完成信息上报,既保障关键信息的高效传递,又有效规避信息过载造成的处理滞后问题。在突发水污染扩散、极端降雨引发水情骤变等场景下,该本地化识别能力可快速完成事件初判与预警信息生成推送,为后续的水资源调度决策抢占时间窗口。系统正式部署应用后,传统以人工研判为主的调度指令生成与下达流程得到全面重构,逐步形成数据驱动分析、智能模型辅助研判、人工决策复核的协同模式,让水资源调度的每一步指令都依托精准数据支撑,大幅提升调度响应的效率与科学性。

3.2 系统实施效果

系统落地后调度响应效率实现大幅提升,原本平均45分钟的调度响应时间被压缩至15分钟以内,响应效率提升近70%,大幅缩短了水情处置的时间周期。依托动态水力模型与实时水情数据的精准匹配,系统可根据实际水文状况自动演算并推荐最优调度方案,大幅减少人工干预带来的操作滞后性,让调度指令的生成更贴合实际水文需求。水资源综合利用率提升至12.7%,这一提升源于系统对输水网络中冗余路径的智能识别与优化,同时结合错峰调度策略的精准实施,让水资源调配更具合理性,实现了水资源的高效利用。面对突发水污染事件时,系统可快速完成污染扩散路径的模拟预测,并与应急调度环节实现无缝联动,使事件处置效率提高40%,能够及时阻断污染扩散趋势,有效规避其对下游供水环节造成的不利影响。在生态流量保障方面,系统的调度效果同样突出,生态流量保障率达到98.5%,远高于传统调度模式下的90.2%,通过对水文数据的动态把控与调度方案的科学制定,为河流生态水文过程提供了稳定支撑,彰显出在水文调控与生态保障层面的显著优势。

3.3 创新价值体现

体系首次实现了监测终端的自主判断与分级上报机制,突破了传统系统中“数据全传—云端处理”的延迟瓶颈,显著提升事件响应速度。通过引入可解释性AI模型,结合SHAP值分析与注意力机制,系统能够输出决策依据的可视化解释,增强调度员对智能建议的信任度与采纳率。模型输出不仅包含调度方案,还提供关键影响因子的权重分析,使复杂决策过程变得透明可追溯。系统构建了“感知—预警—决策—反馈”完整闭环,各环节数据可逆向追溯,形成动态优化机制。该闭环机制支持系统在运行中持续学习,提升长期稳定性。此外,基于验证结果,已制定智能决策模型评估行业标准草案,涵盖模型精度、响应速度、可解释性与鲁棒性等多维指标,为后续推广应用提供技术依据。

结语

基于监测预警的水资源动态调配体系实现了从被动响应向主动防控的范式转变,显著提升了调度响应速度、资源配置效率与极端事件应对能力。该体系通过多源感知、智能预警与闭环调控的深度融合,为智慧水利提供了可复制的技术路径,推动水资源管控向精准化、智能化、可持续化方向发展。

参考文献

- [1]孙梓苑,乔长录,邵珠林,等.基于动态权重策略的五家渠灌区水资源优化调配研究[J].节水灌溉,2026,31(01):79-83.
- [2]陈双,孙振利,赵敏,等.基于数据融合的水资源动态监测与智能预警方法分析[J].数字技术与应用,2025,43(11):220-222.
- [3]黄锦成,吕强强,任小庆,等.基于动态权重和隶属度函数的地热开发监测预警系统研究[J].物联网技术,2025,15(21):32-37.
- [4]何刚,赵疏航,杜宇.基于TQR-EGM模型的水资源生态评价及动态预警[J].水资源与水工程学报,2021,32(01):36-42.
- [5]柯达,龚朝海,左克林.遥感监测技术在水资源动态评价中的应用研究[J].水上安全,2025,27(18):55-57.