

# 智慧灌区水资源优化配置设计及仿真分析

王智鑫

新疆花城勘测设计研究有限责任公司 新疆 可克达拉 835900

**摘要:** 本文聚焦智慧灌区水资源优化配置设计及仿真分析。理论基础融合多学科成果, 构建“感知-决策-执行”框架。系统设计涵盖需求、感知、模型、决策调度等模块。仿真体系明确目标边界, 构建模型并设计多情景方案, 输出结果可视化。同时提出技术、管理、政策与资金保障措施。旨在为智慧灌区水资源优化配置提供理论与技术支持, 推动灌区可持续发展。

**关键词:** 智慧灌区; 水资源优化配置; 多目标优化; 数字孪生

引言: 在全球气候变化加剧与水资源供需矛盾日益突出的背景下, 传统灌区粗放式的水资源管理方式已难以为继, 亟需向精细化、智能化方向转型。智慧灌区作为一种融合现代信息技术的先进模式, 其核心在于通过精准感知与智能决策, 实现水资源的动态优化配置。因此, 科学构建其优化配置体系, 并通过仿真手段验证与调优配置方案, 已成为推动灌区现代化发展的关键理论与技术命题。本文旨在系统探讨这一过程, 为智慧灌区的建设与实践提供路径参考。

## 1 智慧灌区水资源优化配置理论基础

智慧灌区水资源优化配置理论基础融合多学科成果, 以系统性思维构建“感知-决策-执行”闭环框架, 核心理论体系有三大支柱: (1) 水力学与作物需水理论。依据达西定律、伯努利方程等水力学原理及 Penman-Monteith 蒸散模型, 构建作物需水动态预测体系。借助实时监测土壤水分、气象参数, 精准计算作物各生长阶段需水量, 为灌溉决策提供依据。(2) 系统优化与不确定性理论。鉴于灌区复杂特性, 采用线性规划等算法建立水量分配模型, 引入不确定性因素构建鲁棒性框架。如湟史杭灌区用 GWAS 模型划分配置子单元、设置调蓄节点, 实现优化联合调度<sup>[1]</sup>。(3) 可持续发展与公平性原则。遵循水资源可持续利用理念, 平衡农业、工业、生态用水需求。甘肃高台县通过跨区调水等实现超采区采补平衡, 体现生态伦理价值。

## 2 智慧灌区水资源优化配置系统设计

### 2.1 需求分析

智慧灌区水资源优化配置系统需求分析从业务、技术、用户三方面入手。业务上, 要实时监测水资源, 动态监控来水、用水、退水等环节; 能按不同场景生成精准分配方案; 精准下达优化方案指令; 具备用水数据统计、效益分析等监管考核功能。技术方面, 系统需高可

靠, 保障 7×24 小时稳定运行; 高实时, 实现毫秒级响应; 可扩展, 支持功能模块升级与监测点位扩容; 兼容现有灌区管理系统与工程控制系统。用户需求上, 为灌区管理人员提供简洁操作界面与精准决策支持; 为技术维护人员提供便捷运维与故障诊断功能; 为上级管理部门提供数据上报与可视化展示功能, 满足各群体使用需求。

### 2.2 智慧感知体系设计

智慧感知体系设计遵循全面覆盖、精准监测、稳定可靠的原则, 构建“空天地”一体化感知网络。在空间布局上, 按灌区水源地、输水干线、灌溉片区、退水区域划分监测单元, 实现关键节点无死角监测。水源地部署水位计、流量计、水质监测仪, 实时采集水库、河道等水源的水位、流量、pH值、溶解氧等参数; 输水干线在渠道进口、分水口、节制闸等位置安装超声波流量计、雷达水位计, 监测输水过程中的流量、水位变化; 灌溉片区按地块分布部署土壤墒情传感器、作物长势监测摄像头、小型气象站, 采集土壤含水量、作物株高、叶面积指数及气温、降水、风速等数据; 退水区域设置水质监测站和流量计, 监测退水水质和排放量。感知设备选用低功耗、抗干扰、耐恶劣环境的工业级产品, 采用电池供电与太阳能供电结合的方式保障供电稳定。数据传输采用“本地边缘计算+远程云端传输”模式, 边缘节点对采集数据进行预处理和降噪, 再通过5G/物联网网络上传至数据中台, 确保感知数据的精准性和时效性。

### 2.3 多目标优化配置模型构建

多目标优化配置模型构建以实现灌区水资源高效利用、生态保护、经济增收协同发展为目标, 整合多种算法构建复合型模型。模型目标函数涵盖三大核心维度: 经济效益目标, 以灌区农业总产值最大化为导向, 结合不同作物灌溉定额、产量与水价关系, 量化灌溉用水的经济产出; 生态效益目标, 以维持灌区生态基流、保障

地下水采补平衡、改善区域水环境质量为核心，设定生态用水量下限和水质达标约束指标；社会效益目标，以保障粮食安全为核心，确保主要粮食作物灌溉用水足额供给，同时兼顾灌溉公平性，平衡不同灌溉区域用水需求<sup>[2]</sup>。模型约束条件包括水源约束，明确各类水源可供水量上限；工程约束，考虑灌溉渠道输水能力、泵站提水能力等工程参数限制；作物需水约束，依据作物生育期需水规律设定需水上下限；水质约束，确保灌溉用水和退水水质符合相关标准。模型求解采用改进遗传算法与粒子群算法融合的优化算法，通过自适应调整参数提高求解效率，实现多目标下的最优水资源分配方案输出。

#### 2.4 智慧决策与调度模块设计

智慧决策与调度模块设计作为系统核心功能模块，实现从数据输入到指令输出的全流程智能化处理。模块架构采用“数据层-分析层-决策层-执行层”四层架构，数据层接收来自智慧感知体系的实时数据和数据中台的历史数据，进行数据清洗、融合与标准化处理；分析层调用多目标优化配置模型，结合实时监测数据动态更新模型参数，完成多场景下的优化计算；决策层基于分析层输出结果，通过人工智能决策算法进行方案评估，从经济、生态、社会三个维度生成方案评估报告，推荐最优调度方案，并支持管理人员人工干预调整；执行层将最终调度方案转化为具体操作指令，通过通信网络下发至灌溉工程控制系统，实现对闸门开度、泵站流量等设备运行参数的自动控制，同时实时反馈设备运行状态和执行效果。模块还具备方案模拟推演功能，支持管理人员对不同调度方案进行预演，预判方案实施效果，另外，模块内置应急调度子模块，在遭遇干旱、洪水等突发情况时，能快速生成应急调度方案，保障灌区用水安全。

### 3 智慧灌区水资源优化配置仿真体系构建与实现

#### 3.1 仿真分析核心目标与边界设定

核心目标为验证智慧灌区水资源优化配置方案可行性、稳定性及有效性，提供调度依据：精准模拟丰/平/枯水年、不同种植结构与水源条件下的分配过程，评估方案适应性；量化经济、生态、社会效益，明确对灌区发展的促进作用；识别配置薄弱环节，为优化调整指路；验证智慧决策模块响应速度与精度，保障运行可靠。边界设定兼顾系统与实用：空间以灌区行政管辖及灌溉供水范围为基准，涵盖水源地、输水工程等关键区域，明确空间范围与工程参数；时间以年为周期，按种植制度和水文周期分灌溉季（旬/月细化）与非灌溉季（季度划分），契合实际生产。输入边界为水源可供水量等参数，输出为分配量、效益指标等结果

#### 3.2 仿真模型构建

以真实灌区水资源系统为原型，结合系统动力学与离散事件仿真，构建多维度高精度模型，含四大核心子模型：水文模拟子模型基于流域水循环原理，整合降水产流等过程，采用SWAT算法模拟不同水文年水源来水，预测供水量；水资源分配子模型嵌入多目标优化算法，模拟资源在区域、作物、用水户间的分配；工程运行子模型依据实际布局，模拟输水损失、提水效率等，量化工程对配置的影响；效益评估子模型建立产量、地下水埋深、灌溉保证率等指标体系，实时计算效益。参数校准结合历史监测与实地调研数据，经敏感性分析筛选关键参数，误差控制在5%内，提升模型可信度<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 多情景仿真方案设计

基于灌区实际条件、政策导向及技术趋势，设计四类核心仿真情景：水文年情景按历史数据设丰（25%保证率）、平（50%）、枯（75%）、特枯（90%）水年，分析来水条件对方案的影响；种植结构调整情景含传统模式（维持现状比例）、高效节水模式（增节水作物面积）、粮经轮作模式，评估种植结构影响；水源开发利用情景含现状、再生水利用、跨区域调水，分析水源结构优化效果；极端天气情景设干旱、暴雨洪涝、高温干旱复合情景，模拟调度及应急响应。各情景明确目标、边界条件、参数设置等，确保科学可比，全面覆盖应用场景。

#### 3.4 仿真结果输出与可视化设计

以直观呈现数据、支撑决策为核心，构建多维度体系。结果输出采用“核心指标+详细数据”分层模式：核心指标含水源利用效率、灌溉保证率等，以统计报表呈现结论；详细数据涵盖各时间单元、区域、作物的分配量等原始数据，支撑深度分析。可视化采用“宏观-中观-微观”三级架构：宏观以全域态势图展示水资源流动与供需平衡，色彩区分盈缺；中观以片区为单元，用柱形图等对比灌溉效率、产量等；微观聚焦工程/地块，动态模拟闸门调控等细节。平台支持缩放、筛选等交互操作，可导出Excel、PDF等格式，为报告编制与方案优化提供支撑。

### 4 智慧灌区水资源优化配置保障措施

#### 4.1 技术保障

技术保障体系围绕智慧灌区水资源优化配置系统的稳定运行、技术升级和创新应用构建，涵盖技术研发、设备保障、数据安全三大核心内容。技术研发方面，建立“高校+科研机构+企业”协同研发机制，针对多目标优化算法优化、极端天气预测、生态效益量化等关键技

术难题开展联合攻关,定期组织技术研讨和成果评审,确保技术先进性。设备保障方面,制定感知设备、通信设备、计算设备等全生命周期管理规范,建立设备台账,定期开展巡检、校准和维护,对老化、故障设备及时更换,同时建立设备备件库,储备关键设备备件,缩短故障修复时间。数据安全保障方面,构建“多层次防护”安全体系,数据采集阶段采用加密传输技术防止数据泄露;数据存储阶段采用分布式存储和异地备份,保障数据完整性;数据使用阶段实施权限分级管理,明确不同岗位人员的数据访问权限,配备数据审计系统,实时监控数据操作行为。建立技术培训机制,定期对技术人员开展传感器运维、模型参数校准、系统操作等技能培训,提升技术团队专业能力,同时跟踪行业技术发展动态,适时引入新技术、新设备,推动系统技术迭代升级。

#### 4.2 管理保障

管理保障体系以规范智慧灌区水资源优化配置工作流程、明确管理职责为核心,构建全流程规范化管理机制。组织架构方面,成立智慧灌区管理专门机构,明确机构职责的同时,设立监测运维组、调度决策组、技术保障组、考核评估组等专项工作组,明确各小组岗位职责和 workflows,形成“统一领导、分工负责、协同配合”的管理格局。流程管理方面,制定《智慧灌区水资源监测管理办法》《水资源优化配置调度工作规程》等一系列管理制度,规范数据采集、模型计算、方案审批、指令下达、效果评估等各环节工作流程,明确各环节的操作标准、时间节点和责任主体,确保工作有序开展。考核评估方面,建立科学的考核指标体系,涵盖水资源利用效率、灌溉保证率、系统运行稳定性、效益目标达成率等关键指标,采用月度抽查、季度考核、年度评估相结合的方式开展考核,考核结果与管理人员绩效挂钩。定期对灌区工程运行状况、用水户执行情况、管理人员履职情况进行监督,及时发现并解决管理过程中的问题,保障优化配置方案有效落实。

#### 4.3 政策与资金保障

政策与资金保障作为智慧灌区水资源优化配置工作的重要支撑,构建“政策引导、资金多元、监管到位”

的保障体系。政策保障方面,结合区域水资源管理实际,制定《智慧灌区建设管理办法》《水资源优化配置实施细则》等专项政策,明确智慧灌区建设的目标任务、技术标准和各方责任;出台激励政策,对采用高效节水灌溉技术、严格执行用水方案的用水户给予水费减免、补贴等奖励,引导用水户主动参与水资源优化配置;建立跨部门协调机制,明确水利、农业、财政、科技等部门的职责分工,加强部门间政策衔接和工作协同<sup>[4]</sup>。资金保障方面,构建“政府主导、社会参与、市场运作”的多元投融资模式,加大政府财政投入力度,将智慧灌区建设、运行维护资金纳入年度财政预算;积极争取国家、省级水利专项补助资金,重点支持感知体系升级、模型研发等关键环节;通过特许经营、PPP模式等引入社会资本,参与灌区工程建设和运营管理;建立资金专项管理制度,明确资金使用范围和审批流程,确保资金专款专用。同时,加强资金使用监管,定期开展资金使用审计,提高资金使用效益。

#### 结束语

智慧灌区水资源优化配置是保障水资源高效利用、促进灌区可持续发展的关键举措。本文从理论、系统设计、仿真分析到保障措施进行了全面探讨,通过构建多目标优化模型、设计多情景仿真方案等,为实际调度提供科学依据。未来,需持续完善技术体系、强化管理执行、落实政策资金保障,不断优化配置方案,以适应灌区发展新需求,实现水资源可持续利用。

#### 参考文献

- [1]段丽芳.灌区节水改造工程中农田灌溉渠道防渗关键技术研究[J].南方农机,2023,54(18):178-180.
- [2]刘晓云.浅析灌区节水灌溉及水资源优化配置[J].四川建材,2023,49(06):254-256.
- [3]杜军凯.游进军.仇亚琴.等.面向“四预”的水资源智能业务应用体系研究[J].水利发展研究,2023,23(8):1-6.
- [4]赵冬.锦州市水资源优化配置研究[J].黑龙江水利科技,2024,52(1):25-28.