

渠首工程与灌区灌溉系统协同调度的多目标优化方法研究

贾维宏

新疆峻特设计工程有限公司 新疆 喀什 844000

摘要：在经济发展与人口增长背景下，水资源供需矛盾凸显。本文聚焦渠首工程与灌区灌溉系统协同调度的多目标优化，阐述其对缓解供需矛盾、保障农业灌溉、维护生态平衡及促进水资源可持续利用的必要性。构建含目标设定、约束条件、优化方法的多目标框架，并提出加强信息化建设、完善调度机制、强化设施维护、推广节水技术等策略，为系统科学调度提供理论与实践指导，助力水资源高效利用与灌区可持续发展。

关键词：渠首工程；灌区灌溉；系统协同；调度多目标；优化方法

引言：水资源作为经济社会发展的基础资源，其合理调配意义重大。渠首工程与灌区灌溉系统紧密关联，但当前面临水资源供需矛盾突出、农业灌溉保障不足、生态威胁及可持续利用挑战等问题。开展两者协同调度的多目标优化研究十分迫切。通过协同调度整合水资源，可提升利用效率，平衡经济、社会、生态多需求，为灌区稳定发展与水资源可持续利用提供有力支撑。

1 渠首工程与灌区灌溉系统协同调度的必要性

1.1 水资源供需矛盾突出

随着经济社会快速发展，水资源需求量持续攀升，而水资源总量有限且时空分布不均，导致渠首工程与灌区灌溉系统面临严峻的供需矛盾。在干旱半干旱地区，农业灌溉期恰逢降水稀少，用水高峰期与水资源可供量严重不匹配；部分地区因过度开采地下水，引发地下水位下降、地面沉降等问题。

1.2 保障农业灌溉需求

农业是用水大户，稳定的灌溉水源是粮食安全生产的重要保障。然而，气候变化导致极端天气频发，降水波动加剧，依靠天然降水难以满足农作物生长需求。渠首工程与灌区灌溉系统协同调度，可根据作物需水规律，科学规划水量分配与灌溉时间

1.3 维护生态环境平衡

不合理的水资源调度易引发河道断流、湿地萎缩、水质恶化等生态问题。渠首工程作为水资源调控的“总开关”，与灌区灌溉系统协同调度，可统筹考虑生态用水需求。在枯水期，通过渠首适当下泄生态流量，维持河道基本生态功能；在灌区用水过程中，避免过度引水导致下游生态退化。

1.4 促进水资源可持续利用

水资源可持续利用是实现经济社会长远发展的核心。渠首工程与灌区灌溉系统协同调度，可从源头到终

端全链条优化水资源管理。通过精准计量、科学调度，减少输水损耗与无效浪费；结合节水技术推广，提高水资源利用效率。此外，协同调度能够整合地表水、地下水等多种水源，构建多水源联合调度体系，降低对单一水源的依赖，增强水资源系统的韧性，实现水资源的长期稳定供应与可持续开发利用^[1]。

2 渠首工程与灌区灌溉系统协同调度的多目标优化框架

2.1 目标设定

2.1.1 经济目标

经济目标聚焦水资源利用的经济效益最大化。通过协同调度，优化渠首工程与灌区灌溉系统的水资源分配，可减少农业灌溉成本，提高灌溉效率，进而促进农作物增产增收。同时，合理调配水资源，避免水资源浪费与过度开采，降低工程运行和维护费用，提升水资源的经济价值，保障灌区农业经济可持续发展，为区域经济增长提供稳定支撑。

2.1.2 社会目标

社会目标以满足社会公众需求为核心。协同调度旨在保障农业灌溉用水，稳定农产品产量，维护粮食安全，解决民生基本需求。同时，通过合理规划水资源分配，减少因用水矛盾引发的社会冲突，保障不同用水群体的权益，促进社会和谐稳定。

2.1.3 生态目标

生态目标致力于维护生态环境健康与平衡。协同调度时需统筹考虑生态用水需求，确保河道、湿地等生态系统获得必要水量，防止出现河道断流、湿地退化等问题。通过科学调配水资源，减少水污染风险，维持水体自净能力，保护生物多样性，促进生态系统良性循环，实现生态环境与人类活动的协调共生。

2.2 约束条件

2.2.1 水源供应约束

水源供应受自然条件与开发利用能力双重限制。降水时空分布不均导致地表水资源年际、季节波动大,干旱年份或枯水期水源供给量锐减。同时,地下水过度开采引发水位下降、含水层破坏等问题,进一步压缩可利用水源空间。此外,跨流域调水工程供水稳定性、水质达标率等因素,也影响着水源可利用量。渠首工程与灌区灌溉系统协同调度需基于实际水源储量与补给规律,合理规划用水规模,避免超量取水引发水资源危机。

2.2.2 灌溉需求约束

不同作物生长周期、种植结构及区域气候差异,形成复杂多变的灌溉需求。农作物在关键生育期对水量、水质、灌溉时间要求严格,若供水不足或分配不当,将直接影响产量与品质。此外,灌区土地面积变化、种植结构调整等因素,也会动态改变灌溉需水量。协同调度需精准掌握各灌区作物种植信息、土壤墒情及需水规律,平衡不同区域、不同作物的用水需求,确保灌溉服务与农业生产实际需求相匹配。

2.2.3 工程设施约束

渠首工程与灌区灌溉系统的设施性能直接制约调度效果。渠首泵站抽水能力、渠道输水能力、水库调蓄容量等硬件设施存在上限,若超出工程设计标准运行,易引发设备故障、渠道渗漏甚至溃坝等风险。同时,老旧设施老化、破损导致输水效率降低,维修养护周期与资金投入也限制工程运行稳定性^[2]。

2.2.4 生态环境约束

为维持生态系统健康,水资源调度需满足生态环境基本需求。河道需保持最小生态流量,保障水生生物生存与河道自净能力;湿地需定期补水,避免萎缩退化;地下水开采需控制在可恢复范围内,防止地面沉降等地质灾害。此外,水质保护要求限制了污染水体的使用与排放。协同调度必须严守生态红线,在满足生产生活用水的同时,预留必要生态水量,维护流域生态平衡与生物多样性。

2.3 优化方法选择

2.3.1 多目标线性规划

多目标线性规划通过建立线性数学模型,将经济、社会、生态等多目标转化为线性函数,结合约束条件求解最优解集。该方法原理清晰、计算效率高,能直观展现各目标间的权衡关系,适用于目标与约束条件呈线性关系的调度场景。在渠首工程与灌区灌溉系统协同调度中,可快速确定满足水资源供需平衡、工程运行限制的水资源分配方案,为决策提供明确的量化依据。

2.3.2 智能算法

智能算法如遗传算法、粒子群算法等,模拟生物进化或群体智能行为,通过迭代搜索全局最优解。其优势在于对复杂非线性问题适应性强,无需明确目标函数与约束条件的具体数学关系,能处理多变量、多约束的调度优化问题。在灌区调度中,智能算法可有效应对水源变化、灌溉需求波动等动态因素,优化水资源分配策略,提升调度方案的灵活性与适应性。

2.3.3 系统分解协调理论

系统分解协调理论将渠首工程与灌区灌溉系统分解为多个子系统,对子系统分别优化后,通过协调机制实现整体最优。该方法降低了问题求解维度与复杂度,适用于结构复杂、规模庞大的灌溉系统。在实际应用中,可按区域或功能划分灌区子系统,独立优化各子系统的水资源分配,再通过协调机制平衡子系统间的水量交互与目标冲突,实现系统整体效益最大化。

3 渠首工程与灌区灌溉系统协同调度的实施策略

3.1 加强信息化建设

3.1.1 水情监测系统

水情监测系统借助传感器网络,对渠首水位、河道流量、土壤墒情等数据进行实时采集。结合卫星遥感、无人机等技术,实现多源数据融合,动态掌握水资源时空变化。通过构建全域感知体系,为协同调度提供精准基础数据,有效解决信息滞后问题,支撑灌溉用水的科学规划与及时调配^[3]。

3.1.2 信息化管理平台

信息化管理平台整合水情、工程运行、灌溉需求等多源信息,搭建数据共享与交互枢纽。平台以可视化界面呈现水资源调度状态,支持远程监控与设备控制,打破部门间信息壁垒,提升跨层级、跨区域协作效率,实现渠首工程与灌区管理的精细化、一体化,为协同调度筑牢管理根基。

3.1.3 智能决策支持系统

智能决策支持系统融合优化算法与专家经验库,依据实时监测数据模拟不同调度方案。通过多目标分析,快速生成兼顾经济、社会、生态效益的最优策略,应对灌溉需求变化、突发水情等复杂场景,辅助管理人员科学决策,推动协同调度从传统经验模式向智能化、精准化升级。

3.2 完善调度运行机制

3.2.1 沟通协调机制

沟通协调机制旨在打破部门壁垒,构建渠首管理单位、灌区管理部门、用水户间的常态化沟通渠道。通过

定期召开联席会议,共享水情信息、灌溉需求与工程运行状况,协商水资源分配方案;建立线上沟通平台,实现实时信息交互与问题协同解决。该机制可减少因信息不对称导致的调度冲突,保障各方用水权益,促进水资源调度在多方协作下科学有序开展。

3.2.2 应急响应机制

应急响应机制聚焦应对突发水情与极端事件,通过制定分级应急预案,明确干旱、洪涝、水质污染等不同场景下的响应流程与责任分工。结合水情监测预警系统,实现应急事件的快速识别与启动响应,动态调整调度方案。

3.2.3 绩效考核机制

绩效考核机制以多目标优化成果为导向,建立涵盖水资源利用效率、灌溉保障率、生态指标达标率等的量化考核体系。通过定期评估调度方案执行效果,对管理部门与工作人员进行考核奖惩,将考核结果与资金分配、人员晋升挂钩。该机制激励各方落实调度目标,推动协同调度从被动执行向主动优化转变,持续提升水资源管理效能。

3.3 强化工程设施维护

3.3.1 定期检查与维护

定期检查与维护通过制定科学巡检计划,对渠首泵站、输水渠道、水库大坝等设施开展周期性检测。运用无损探伤、水质检测等技术,及时发现设备磨损、渠道渗漏、结构隐患等问题。针对检查结果建立维护台账,明确整改责任与期限,开展清淤、防腐、部件更换等修复工作,确保工程设施处于良好运行状态,降低因设施老化引发的输水效率下降与安全风险。

3.3.2 设备更新与改造

设备更新与改造聚焦解决老旧设施性能不足问题,结合技术发展与调度需求,对超期服役、能耗过高的泵站机组、闸门控制系统等进行升级。引入智能化设备,如变频调速水泵、自动化闸门,提升工程调控精度与运行效率;对输水渠道实施防渗衬砌改造,减少水资源损耗。

3.3.3 安全管理

安全管理通过建立全流程风险防控体系,保障工程设施运行安全。制定严格的操作规程与安全管理制度,加强人员安全培训与应急演练;安装实时监控设备,对工程关键部位进行24小时监测,利用物联网技术实现异常情况自动报警。同时,开展安全隐患排查治理,建立风险评估与分级管控机制,从预防、监测、应急等多环节筑牢安全防线,避免安全事故对协同调度的干扰。

3.4 推广节水灌溉技术

3.4.1 渠道防渗技术

渠道防渗技术通过在输水渠道表面铺设混凝土、塑料薄膜、土工合成材料等防渗层,有效减少因渗漏导致的水资源损耗。该技术可降低渠道糙率,提高水流速度与输水效率,输水损失率较传统土渠可降低50%-70%。在渠首工程与灌区灌溉系统协同调度中,渠道防渗能减少中途水量浪费,保障末端农田及时足量供水,同时降低地下水超采风险,使有限水资源得到更充分利用,实现水资源的高效输送与精准分配。

3.4.2 喷灌、滴灌技术

喷灌、滴灌技术以精准供水为核心,喷灌通过喷头将水雾化喷洒,滴灌则利用滴头直接将水输送至作物根系附近。相较于传统漫灌,喷灌可节水30%-50%,滴灌节水率高达40%-70%,且能避免土壤板结、盐分积累等问题。在协同调度中,此类技术可根据作物需水规律灵活调控水量,提高灌溉均匀度与水分利用率,减少无效蒸发,同时降低渠首供水压力,优化水资源配置,实现节水增产双重效益。

3.4.3 雨水集蓄利用技术

雨水集蓄利用技术通过建设蓄水池、水窖、集雨场等设施,收集储存降雨径流。在降雨丰沛期将雨水截留,干旱时用于补充灌溉水源,缓解渠首供水压力。该技术因地制宜,适用于丘陵山区及小型灌区,可减少对地表水、地下水的依赖,提升水资源自给能力。在协同调度中,雨水集蓄利用与渠首供水形成互补,优化水资源时空分配,增强灌区应对干旱等极端气候的韧性,促进水资源可持续利用与生态环境良性循环。

结束语

渠首工程与灌区灌溉系统协同调度的多目标优化,是破解水资源管理难题的关键路径。本研究构建的优化框架、提出的实施策略,为兼顾经济、社会与生态效益提供了理论支撑与实践方向。通过信息化建设、机制完善、设施维护及节水技术推广,可显著提升调度科学性与水资源利用效率。

参考文献

- [1]张生琴,刘斌.智慧灌区农业智能节水灌溉系统设计与应用[J].南方农机,2024,55(15):63-65.
- [2]李华,刘斌,陈亮,等.农业灌区智能节水灌溉系统设计与应用[J].农业与技术,2024,44(02):20-22.
- [3]魏学厚,聂志刚,刘强,等.河西灌区青贮玉米智能节水灌溉系统设计[J].软件,2023,44(01):6-10.