

引黄灌区闸坝联合调度优化技术研究

聂鑫鑫

河南省豫东水利保障中心三义寨分中心

DOI:10.32629/hwr.v10i4.6931

[摘要] 引黄灌区输配水过程受来水波动、渠系层级复杂及用水时序差异等因素共同影响,闸坝运行一旦缺乏协同,易引发局部水位失稳、供水偏差扩大与工程效能下降。围绕闸坝联合调度的优化需求,着重分析控制目标耦合特征、运行约束及关键技术支撑,提出兼顾供水保障、输水效率、工程安全与动态响应能力的调度优化思路。研究表明,依托实时感知、联动控制与滚动修正相结合的技术体系,可提升引黄灌区水资源配置精度与运行稳定性,并为现代灌区精细化管理提供支撑。

[关键词] 引黄灌区; 闸坝联合调度; 调度优化; 输配水控制; 工程安全; 精细化管理

中图分类号: TV66 **文献标识码:** A

Research on Optimal Joint Operation of Gates and Dams in the Yellow River Irrigation District

Xinxin Nie

Sanyizhai Sub-center, Yudong Water Conservancy Support Center of Henan Province

[Abstract] The water conveyance and distribution process in the Yellow River diversion irrigation area is jointly affected by fluctuations in incoming water, the complex hierarchical structure of the canal system, and differences in water-use timing. Once coordinated operation between gates and dams is insufficient, local water-level instability, enlarged water-supply deviation, and reduced engineering efficiency are likely to occur. Focusing on the optimization needs of joint gate-dam scheduling, this study examines the coupling characteristics of control objectives, operational constraints, and key technical supports, and proposes an optimization approach that takes into account water supply assurance, conveyance efficiency, engineering safety, and dynamic response capability. The results show that a technical system integrating real-time sensing, coordinated control, and rolling correction can improve both the precision of water-resource allocation and the operational stability of the Yellow River diversion irrigation area, while also supporting refined management in modern irrigation districts.

[Key words] Yellow River diversion irrigation area; joint gate-dam scheduling; scheduling optimization; water conveyance and distribution control; engineering safety; refined management

引言

作为北方农业灌溉的重要命脉,引黄灌区长期承担着农田供水、区域调蓄与生态维系等多重任务,随着灌溉规模持续扩展、用水结构不断调整,原有依赖经验判断的节点分散控制方式已渐显迟滞,上下游响应不顺、局部调节与整体配置脱节等问题也愈发突出。处在渠系控制关键位置的闸与坝,不只是单一工程设施,更是维系灌区稳定运行的联动单元,如何在复杂边界条件下实现协调运用、提升调控精度,已成为灌区运行管理中不可回避的现实课题。

1 引黄灌区闸坝联合调度的运行基础与现实约束

1.1 引黄灌区闸坝系统的功能构成与水力关联特征

在引黄灌区输配水体系中,闸与坝并不是彼此割裂的独立

设施,而是嵌入干渠、支渠及各级分水节点之中的关键调控单元,承担着引水稳流、壅水抬位、分配流量、控制水深与维持渠系连续运行等复合功能^[1]。坝体更多发挥水位塑造与水势调蓄作用,闸门则侧重流量分配与过程调控,二者在运行中相互牵制、彼此制约,一处节点调节幅度发生变化,往往会沿渠系向上下游传递,进而影响后续闸口过流状态、水面线衔接关系及局部渠段输水稳定性。也正因为这种连续性的水力响应特征,闸坝联合调度的价值才愈发凸显——它所调控的并非单一断面,而是整个输水链条中的动态平衡,由此形成以节点联动保障渠系整体效能的运行格局。

1.2 当前闸坝调度中存在的主要问题及其成因分析

从现阶段运行情况看,引黄灌区闸坝调度虽已具备一定工

程基础,但在精细协同、动态响应和整体统筹层面仍有较大提升空间,较为突出的问题在于局部控制较强、系统联动偏弱,水量调配与实际需求之间偶有时差,部分节点对突发来水、阶段性集中用水和上下游工况变化的适配能力仍显不足。究其原因,一方面,灌区渠系长、控制点多、工况转换频繁,单靠经验判断难以持续支撑高精度调度;另一方面,闸坝运行目标本身具有复合性,既要兼顾供水均衡,又要守住工程安全边界,还要尽量降低输水损失,这使传统单点式调节方法越来越难以满足现代灌区管理要求。不过也应看到,正是这些现实约束,为联合调度优化提供了明确方向,依托更高水平的协同控制与更精细的运行组织,闸坝系统完全能够由分散运行走向整体增效。

2 引黄灌区闸坝联合调度优化的关键技术

2.1 多目标约束下的联合调度模型构建

引黄灌区闸坝联合调度之所以具有技术含量,关键并不只在“调得动”,而在“调得准、调得稳、调得经济”,也就是说,供水保障、输水效率、工程安全与运行成本并非彼此孤立,而是共同嵌入同一调度过程之中。基于这一特征,联合调度模型的构建应摆脱单一流量控制思路,转向多目标耦合优化,将闸前水位、闸后流量、坝上壅水能力、渠段过流边界以及用水时序需求纳入统一分析框架,在目标函数中同步体现供水满足度、配水均衡性、调节平稳性和安全裕度。这样建立起来的模型,不只是对当前工况的被动响应,更能对后续若干时段的运行趋势形成前瞻判断,由此提升调度决策的连续性与适应性。

在参数设置上,宜依托分时段、分渠段、分控制节点的方式细化调度变量,将闸门开度、水位控制线、过流能力阈值与输水损失系数进行联动约束,使模型既具理论完整性,又保留工程可实施性。以某中型引水灌区春灌初期运行为例,上游来水短时增加而下游支渠尚未全面启灌,若仍按固定经验值统一抬闸增流,往往会造成中段渠系水位波动偏大;在引入滚动预测模型后,调度中心将未来数小时支渠需水变化、干渠安全水位和坝前调蓄能力同步纳入计算,形成分阶段调节方案,结果不仅削弱了局部顶托影响,也使后续配水衔接更加顺畅,说明多目标模型对提升联合调度精度具有直接支撑作用。

2.2 实时感知与联动控制一体化技术

联合调度能否真正落地,很大程度上取决于信息链与控制链是否贯通。闸坝节点分布广、渠系延伸长,若现场感知滞后、反馈断续,即使模型设计合理,也难以保持调度结果的实时有效性。为此,应依托水位计、流量监测装置、闸位采集单元和视频巡检系统,构建覆盖重点渠段和关键节点的动态感知网络,使工情、水情和运行状态能够被连续捕捉、及时传输,再借助闸门远程控制与联动执行机制,将调度指令快速转化为现场动作,形成“监测—判别—执行—回传”的闭环过程^[2]。此类技术的优势,在于能够将原本以人工经验为主的间断式管理,逐步提升为以数据驱动为特征的连续式调控。

为便于明确技术配置重点,可将联合调度中的核心支撑内容概括如表1所示。

表1 引黄灌区闸坝联合调度关键技术构成与作用

技术类别	主要内容	作用重点
实时监测技术	水位、流量、闸位、视频采集	提升工况识别精度
联动控制技术	闸门远程启闭、坝闸协同调节	缩短调度响应时间
优化决策技术	多目标模型、滚动修正算法	提高配水合理性
预警校核技术	超限报警、运行校验、工况推演	保障工程安全稳定

表1所示内容表明,联合调度并非单项设备升级,而是多类技术协同后的系统能力。以某引黄灌区夏灌高峰期运行实践为例,管理单位在骨干渠首和主要分水口布设水位与流量双监测装置,同时将节制闸与分水闸接入统一控制平台,遇到下游需水骤增时,系统可依据实时回传数据自动校核上游补水条件,再向相邻节点下发联调指令,整个过程较传统人工电话调度明显更平稳,局部断面超限现象也得到有效减少。可见,实时感知与联动控制的结合,不仅提高了调度速度,更增强了调度过程的可验证性与可追踪性。

2.3 滚动修正与情景适配的动态优化技术

灌区运行最突出的特点,在于边界条件持续变化,来水过程并不恒定,用水需求也常随作物生育期、天气状况与渠道工况而调整,因此,静态调度方案往往只能解决某一时点的配置问题,却难以长期保持最优状态。基于这一现实,闸坝联合调度更需要引入滚动修正与情景适配技术,在已生成调度方案基础上,结合实时数据不断更新预测结果,对后续调节策略进行动态微调,使联合调度从“一次定值”转向“连续修正”。这种技术路径的积极意义在于,它并不否定既有经验,而是将经验融入可迭代的决策框架之中,使灌区调度兼具稳定性与灵活性。

在工程实践中,不同情景下的优化重点并不相同:常态供水强调均衡与效率,集中轮灌更注重时段控制与节点衔接,突发来水则更看重安全边界和快速响应^[3]。某灌区在秋灌后期曾出现上游来水偏减、下游集中补灌并存的复杂局面,管理人员没有简单压减全线流量,而是借助情景适配模块,将渠段分为保供优先区、平衡调节区与弹性控制区,随后对关键闸坝实行小幅高频修正,对非关键节点保持稳定运行,由此既稳定了重点区域供水,也避免了全渠系大幅波动。由此可见,动态优化技术的价值,正在于让闸坝联合调度具备“边运行、边判断、边修正”的能力,使灌区从被动应付转向主动调控,技术进步的空间也由此被进一步打开。

3 引黄灌区闸坝联合调度优化技术的实施路径

3.1 构建分层协同的联合调度组织体系

闸坝联合调度优化若要真正转化为灌区运行效能,单靠模型输出或节点控制并不充分,更关键的,在于形成权责清晰、层级衔接顺畅、信息流与指令流同步运行的组织体系。引黄灌区线路长、节点多、工况转换频繁,调度实施不宜停留于单闸单坝的局部管理,而应依托灌区总控、渠段联控、节点精控三类层级,建立纵向贯通、横向协同的运行格局,使不同控制单元在统一目

标下形成稳定配合。总控层侧重调度边界设定、配水总量平衡及关键时段统筹，渠段层承担上下游衔接、流态平衡与过程修正职责，节点层则对应闸门开度、水位幅度和现场状态的精准执行，由此将宏观配置意图与微观控制动作有效衔接起来。

3.2 完善数据驱动的调度执行与反馈机制

联合调度优化技术的实施，归根结底要落实到“调度方案能够执行、执行状态能够感知、异常变化能够修正”这一闭环过程之中，而这一过程能否稳定运行，取决于数据采集、状态识别、指令下达与反馈校核之间是否形成连续联系。对引黄灌区而言，闸坝运行具有明显的动态性与时序性，任何一个控制节点的调节偏差，都可能在输水过程中逐步放大，因此，实施路径应围绕数据驱动展开，将实时监测、边界校验和过程反馈深度嵌入调度执行环节。依托水位、流量、闸位和设备状态等基础信息，可使调度中心及时识别运行偏差；借助动态反馈机制，则能够在调度执行过程中持续校核模型输出与现场状态的一致性，避免方案与工况脱节。

3.3 推进技术平台与管理机制的深度融合

实施路径的成熟，不仅需要技术系统本身具备可靠性，也需要管理机制与技术平台形成同向发力的关系^[4]。闸坝联合调度优化并不是孤立的工程控制问题，而是涉及制度规则、运行标准、岗位协同和平台支撑的综合性管理命题，因此，在推进过程中应将技术建设与管理转型同步考虑，避免出现“平台建成而机制滞后”或“制度存在而技术脱节”的情况。较为可行的方向，是依托统一调度平台整合监测、决策、控制和预警功能，同时围绕调度权限划分、操作流程规范、异常工况处置和绩效评价标准建立配套制度，使技术成果能够稳定嵌入管理日常。如此一来，联合调度就不再只是阶段性的技术应用，而能够成为灌区运行管理中的常态机制。

从更长远的视角看，平台与机制的融合还意味着灌区治理方式的更新。随着数字化基础不断完善，闸坝联合调度的实施将逐渐突破单次调水、单段控制的局限，转向全过程、全链条、全要素协同，灌区运行也会由被动处置型管理向主动配置型管理加快转变。管理标准的统一、技术接口的规范、运行规则的明晰，将共同提升联合调度优化技术的可复制性和推广价值，使其不仅适用于当前引黄灌区的运行需求，也能够为后续智慧灌区建设、精细配水管理及高效节水治理提供持续支撑。

4 结语

对引黄灌区而言，闸坝联合调度优化并不只是运行手段的更新，更是灌区资源配置理念、工程控制方式与管理能力的同步提升。随着精细化用水需求持续增强，依托协同控制、动态修正与平台支撑而形成的调度体系，能够更稳地统筹供水安全、运行效率与工程韧性，也将进一步推动灌区由经验管理走向精准治理；其价值，不止体现在当下输配水效能的改善，更在于为现代灌区高质量运行奠定了更具持续性的技术基础。

[参考文献]

- [1]赵青松.引黄灌区工程管理中水利管理信息化及工程建设分析[J].中华建设,2025,(08):66-68.
- [2]冯涛,闫丰,左其亭,等.引黄灌区多目标水资源优化配置-调度双层模型[J].人民黄河,2023,45(12):65-70.
- [3]陶洁,李行,孙鑫豪,等.引黄灌区水资源调配模型及和谐评估[J].水资源与水工程学报,2023,34(01):1-9.
- [4]徐征和,侯玉松.位山引黄灌区适水发展的调查与思考[J].山东水利,2022,(01):4-7.

作者简介:

聂鑫鑫(1984--),女,汉族,河南开封人,本科,工程师,研究方向:水利水电工程。