

Research on Optimization Design of Irrigation Head Projects and Innovation of Water Diversion and Sand Control Technologies

Juan Li

Xinjiang Changji Fanghui Hydropower Design Co., Ltd., Changji, Xinjiang, 831100, China

Abstract

The irrigation canal head project is a key hub for water allocation, sediment control, and operational safety assurance in agricultural irrigation systems. Its engineering layout and sediment prevention performance directly determine the water delivery efficiency, engineering lifespan, and operational management costs of the irrigation area. Under the natural conditions of complex sediment sources and highly unstable water sediment relationships, traditional canal head projects have exposed many shortcomings in terms of water diversion stability, sediment prevention efficiency, and long-term operational adaptability. This article focuses on the core issue of optimizing the design of irrigation canal head projects and innovating water diversion and sand prevention technologies. Based on a systematic analysis of the mechanism of water and sediment action in canal head projects, research is conducted from the aspects of overall layout optimization, collaborative design of key structures, reconstruction of sand prevention mechanisms, and integration of new technologies. Optimization design ideas and sand prevention technology combination paths for canal head projects that adapt to different water and sediment conditions are proposed. The research results can provide technical references for the planning, design, and upgrading of canal head projects in high sediment irrigation areas.

Keywords

irrigation area engineering; Canal head project; Water diversion and sand prevention; Optimize design; Water and sediment regulation

灌区渠首工程优化设计与引水防沙技术创新研究

李娟

新疆昌吉方汇水电设计有限公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要

灌区渠首工程是农业灌溉系统中实现水量调配、泥沙控制与运行安全保障的关键枢纽,其工程布局与防沙性能直接决定灌区输水效率、工程寿命及运行管理成本。在泥沙来源复杂、水沙关系高度不稳定的自然条件下,传统渠首工程在引水稳定性、防沙效率及长期运行适应性方面暴露出诸多不足。围绕灌区渠首工程优化设计与引水防沙技术创新这一核心问题,本文在系统分析渠首工程水沙作用机理的基础上,从总体布置优化、关键构筑物协同设计、防沙机理重构及新型技术集成等方面展开研究,提出适应不同水沙条件的渠首工程优化设计思路与防沙技术组合路径。研究结果可为高含沙灌区渠首工程规划设计与改造升级提供技术参考。

关键词

灌区工程; 渠首工程; 引水防沙; 优化设计; 水沙调控

1 引言

灌区工程作为农业水利基础设施体系的重要组成部分,在保障粮食安全、提升农业综合生产能力和推动区域经济发展方面发挥着不可替代的作用。渠首工程位于河道与灌溉渠道系统的连接节点,是实现河水引入、流量调控及泥沙拦截的首要工程单元,其运行状态直接影响整个灌区的输水安全与运行效益。

2 灌区渠首工程水沙作用机理分析

渠首工程运行过程中水流结构复杂,水沙运动特征明显受河道来流条件、工程布置形式及构筑物组合方式的共同影响。在引水状态下,河道主流线位置、近岸流速分布及紊动结构决定了不同粒径泥沙进入引水口的概率^[1]。一般而言,细颗粒悬移质泥沙随水流进入渠首的比例较高,而推移质泥沙则更多受河床形态与流速突变影响,在渠首附近发生沉积或再悬浮。渠首工程对水沙过程的扰动主要体现在流线弯折、流速梯度变化及局部水力条件突变等方面。

【作者简介】李娟(1982-),女,中国新疆昌吉人,本科,高级/副所长,从事水利设计与规划研究。

3 渠首工程总体布置优化设计思路

3.1 基于河道水沙特性的渠首选址与平面布置优化

渠首工程总体布置的合理性在很大程度上取决于对天然河道水沙运动规律的准确把握,其核心在于通过工程选址与平面布置优化,主动利用河道已有的水沙分异条件,从源头上降低引水含沙量^[2-3]。在高含沙河流条件下,河道主流线位置往往呈现随流量变化而摆动的特征,主槽区流速大、挟沙能力强,而近岸缓流区则更易形成泥沙沉积带。因此,渠首工程选址应优先避开主流贴岸、冲刷强烈的河段,选择河势相对稳定、河床演变速率较低的顺直河段或缓弯内侧布置引水口,以削弱高浓度泥沙直接进入渠首的可能性。

在平面布置层面,引水口轴线方向与河道主流方向之间宜形成合理夹角,通过控制引水流线的切入方式,使进入渠首的水流主要来自河道中上层清水区,从而实现天然分沙。实践表明,当引水口正对主流布置时,虽然引水能力较强,但易导致高含沙水体整体卷入;而适当偏转引水轴线,可在不显著降低引水规模的前提下,有效降低入渠泥沙浓度。此外,引水口宽度与布置位置应与河宽、河床横向流速分布相协调,避免因局部收缩效应诱发紊流增强,进而加剧底沙再悬浮。通过上述选址与平面布置优化,可在工程层面实现“顺水势、避泥沙”的基础防沙目标。

3.2 渠首纵向高程与功能分区协同的整体布置策略

在渠首工程总体布置中,纵向高程控制与功能分区协

同是影响引水稳定性和防沙效果的关键因素。渠首底板高程既是引水水头形成的重要控制参数,也是决定推移质泥沙是否进入引水系统的核心因素。若底板高程设置过低,易在引水过程中卷吸大量河床推移质泥沙,加剧渠首及下游渠道的淤积风险;反之,若底板高程抬高过度,则可能在枯水期造成引水水头不足,影响灌区供水保障能力。因此,渠首纵向高程设计应以多年实测河床演变资料为基础,综合考虑河床冲淤趋势、水位变幅及设计引水流量,通过动态平衡原则确定合理控制高程。

在功能分区布置方面,渠首工程应按照“引水—沉沙—排沙—调控”的水沙演变过程进行整体统筹,使各功能单元在纵向空间上形成连续、平顺的水力过渡关系。引水区应以稳定取水为目标,控制流速和水面扰动;沉沙区则需通过延长水流路径、降低流速来增强颗粒泥沙的沉降条件;排沙区应与河道主槽水力条件相衔接,确保沉积泥沙能够在短时间内高效回排。通过纵向高程的合理分配与功能分区的协同布置,可有效避免水力条件突变引发的局部冲刷与紊流区,从整体上提升渠首工程的引水防沙综合性能^[4]。

4 引水防沙关键技术与结构创新

4.1 基于水流结构调控的主动引水防沙技术原理

为系统阐明渠首工程优化设计与引水防沙技术之间的内在逻辑关系,构建渠首工程引水、防沙与运行调控协同作用机理,如图1所示。

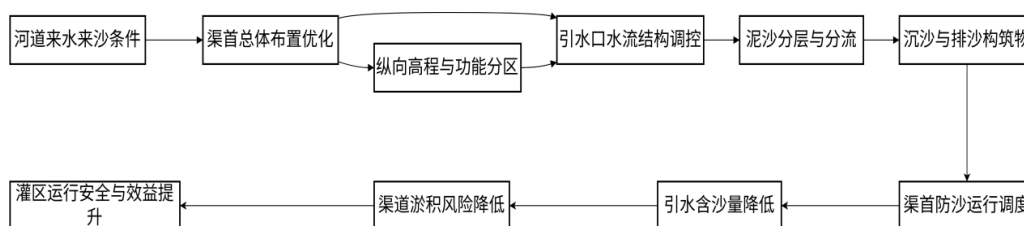


图1 灌区渠首工程引水防沙协同作用机理示意图

传统灌区渠首工程防沙措施多以沉沙池、拦沙坎等被动拦截方式为主,其防沙效果在一定程度上依赖于工程尺度放大和运行频繁排沙,难以从根本上改变泥沙进入引水系统的动力条件。随着水沙动力学研究的不断深化,引水防沙技术逐步由“末端拦沙”向“过程控沙”转变,其核心在于通过调控引水区水流结构,主动改变泥沙运动路径,从而降低泥沙进入渠首系统的概率。从机理上看,不同粒径泥沙在垂向水流中的分布具有显著差异,细颗粒悬移质主要集中于中上层水体,而推移质及高浓度泥沙多沿近底层运动,因此,通过对引水口垂向取水层位与流速分布进行控制,是实现防沙的有效途径。

在工程实践中,通过在引水口前设置导流墩、顺流导墙或底流分离结构,可对来流水体进行分层引导,使高含沙底流沿河道主槽继续下泄,而相对清洁的中上层水体被引入渠道系统。同时,合理控制引水口局部流速,使其低于推移

质泥沙起动流速阈值,可有效抑制河床泥沙被卷吸进入引水系统。该类基于水流结构调控的防沙技术,突破了单纯依赖沉沙空间的传统思路,在不显著增加工程规模的前提下,实现了防沙效率与引水能力的协同提升,具有较强的工程适用性。

4.2 防沙构筑物结构创新及其工程适用性分析

在主动防沙理念指导下,渠首工程防沙构筑物的结构形式不断演化,其设计重点由单一功能向多功能协同转变。以沉沙设施为例,传统矩形沉沙池在高含沙工况下易出现沉积效率随运行时间下降的问题,而通过引入渐变断面、弧形底板及可控排沙廊道等结构创新,可在沉沙过程中维持较为稳定的水力条件,避免局部短流和死水区形成,从而提高长期运行效率。同时,将沉沙与排沙功能在结构上进行一体化设计,有助于缩短排沙路径,降低冲沙水量消耗,提升防沙设施的整体运行经济性。部分新型渠首工程开始采用组合式

防沙结构,将导流、防沙、排沙与调控功能集成于同一工程单元之中^[5]。这类结构创新在工程尺度受限或改造工程条件下尤具优势,可在不大幅改变原有布置的前提下显著改善引水水质。从工程适应性角度看,防沙结构创新需充分考虑不同水文年型和来沙条件下的运行稳定性,通过合理设置

可调参数,使防沙构筑物在洪水期与枯水期均能保持良好工作状态,为灌区渠首工程的长期安全运行提供可靠保障。为进一步对不同引水防沙技术措施的作用机理与工程适用性进行对比分析,表1对典型防沙技术的功能特征进行了归纳总结。

表1 不同渠首防沙技术措施的作用机理与工程适用性比较

防沙技术类型	主要作用机理	适用水沙条件	工程优势	主要局限
平面布置优化引水	利用河道水沙分异,避开高含沙主流	河势稳定、主槽明显河段	源头减沙、运行成本低	对河势变化敏感
底流分离与导沙结构	控制近底层高含沙水体回归主槽	推移质含量高河段	防沙效率高、占地小	设计精度要求高
沉沙池与排沙廊道	降速沉降并集中排沙	悬移质占比较高	技术成熟、适用性强	运行维护频繁
组合式防沙结构	多机制协同控沙	高含沙、工况复杂灌区	防沙稳定性好	初期投资较高
运行调度控沙	错峰引水、动态调控	含沙季节性显著河流	不增加工程规模	依赖管理水平

由表1可见,不同防沙技术在控沙机理与工程适用条件下各具侧重,需结合河道水沙条件与渠首工程布置特征进行综合选用。

5 渠首工程防沙运行调度与管理协同机制

5.1 基于水沙过程认知的渠首引水运行调度优化

在完成渠首工程结构层面的防沙设计之后,其实际防沙效果在很大程度上取决于运行调度策略是否与河道水沙过程相匹配。由于河道来水来沙过程具有显著的季节性与非稳定性特征,单一固定工况下形成的防沙效果往往难以适应全年运行需求,若缺乏针对性的调度控制,易出现设计防沙能力未能充分发挥的问题。因此,渠首工程运行调度应以水沙过程认知为基础,将防沙目标纳入引水调度决策体系之中,实现工程设计与运行管理的协同优化。在高含沙期,尤其是洪水初期与涨水阶段,河道含沙量通常快速升高,此时若持续保持大流量引水,极易造成大量泥沙进入渠道系统。

5.2 渠首防沙工程运行管理体系与长期效能保障

渠首工程防沙能力的可持续发挥,除依赖合理的运行调度外,还需以完善、稳定的运行管理体系作为支撑。长期运行实践表明,部分灌区渠首工程在初期阶段防沙效果较为理想,但随着运行年限增加,受监测手段不足、维护滞后或管理制度执行不力等因素影响,防沙构筑物逐渐出现淤积加剧、结构磨损和功能弱化等问题,工程整体效能明显衰减。因此,有必要从系统管理层面构建以防沙目标为导向的运行管理机制,确保渠首工程防沙功能的长期稳定发挥。

在运行管理体系构建中,应将水沙过程监测作为基础性环节,通过持续获取来水流量、含沙量、粒径组成及沉沙设施淤积状态等关键参数,为运行调度和维护决策提供科学依据。同时,建立防沙构筑物巡检与维护制度,定期评估沉沙池、导流设施及排沙通道的结构安全性与水力条件变化,及时消除因磨损、变形或局部堵塞引发的运行隐患,防止小

尺度问题演变为系统性功能失效。针对规模较大或运行条件复杂的灌区渠首工程,可进一步引入信息化管理技术,提升防沙运行管理的精细化水平。通过布设流量、含沙量及水位等在线监测设备,结合视频监控与数据采集系统,实现渠首工程水沙状态的实时感知;在此基础上,将监测数据与引水调度、冲沙排沙工况相结合,构建防沙运行状态分析与辅助决策模块,为引水时段选择、排沙频率控制及维护计划制定提供技术支撑。

6 结论

渠首工程作为灌区水沙调控的核心节点,其优化设计与引水防沙技术水平直接关系灌区工程的安全运行与综合效益。通过系统分析渠首工程水沙作用机理,结合总体布置优化、构筑物协同设计及防沙技术创新,可显著提升引水防沙效果并增强工程运行的适应性。研究表明,源头控制与过程调控相结合的防沙思路,是解决高含沙灌区渠首工程问题的有效途径。相关研究成果可为新建灌区渠首工程规划设计及既有工程改造提供技术参考,对推动灌区工程高质量发展具有积极意义。

参考文献

- [1] 刘磊. 某灌区渠首枢纽工程典型设计探析[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(05): 71-72+83. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2025.05.001.
- [2] 郭燕雄. 扎兰屯市红光灌区渠首水闸枢纽工程安全评价[J]. 东北水利水电, 2025, 43(04): 63-66. DOI: 10.14124/j.cnki.dbslsd22-1097.2025.04.017.
- [3] 李杨. 溧史杭灌区渠首枢纽工程安全监测分析评价[J]. 治淮, 2024, (07): 17-19.
- [4] 曲霞, 马晓彤. 龙潭灌区渠首改造工程与效益分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(02): 118-121.
- [5] 杨庆华. 浅析卫星灌区渠首冲沙泄洪闸工程[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(06): 93-94+122. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2021.06.026.