现代渠首工程中泥沙防治技术探讨

杨 飞
新疆伊犁州水利电力勘测设计研究院有限公司 新疆 伊犁 835000

摘 要：渠首工程是引水灌溉和供水系统的咽喉，而泥沙问题是长期困扰渠首安全运行的核心难题之一。本文立足于现代渠首工程中泥沙防治的现实需求，系统分析了泥沙在渠首区域淤积、磨损和堵塞的成因及其对工程运行的不利影响，继而从排沙技术、防沙技术、清淤技术和运行管理优化四个维度全面梳理了当前主流泥沙防治技术体系的基本原理、适用条件和关键技术要点。在此基础上，本文进一步探讨了泥沙防治技术从单一措施向系统集成、从被动清淤向主动防控、从经验管理向智能决策的发展趋势。研究指出，现代渠首工程泥沙防治的本质是在水沙运动规律与工程边界条件之间建立动态适配关系，其技术路径应当坚持“导排为主、清淤为辅、监测支撑、智能调控”的综合防治方针。

关键词：渠首工程；泥沙防治；排沙技术；引水防沙；沉沙池

引言

渠首工程是连接水源与输水系统的关键枢纽，其安全稳定运行关乎下游用水效益。然而，汛期高含沙水流易在渠首落淤，导致进水闸堵、引水能力下降及设施磨蚀，严重威胁工程效率与寿命。泥沙防治历来是渠首工程的核心议题。传统人工清淤和简单排沙方式难以应对高含沙河流及大规模引水需求。随着水力学、泥沙运动力学及自动控制等技术发展，现代渠首涌现出工程布局优化、智能调度、物理拦沙及水力冲刷等多元化防治技术。尽管技术手段日趋成熟，但不同技术的适用条件差异显著，如何根据河流泥沙特性、渠首形式及运行要求精准选型，仍是工程实践中的现实难题。本文旨在系统梳理现代渠首工程泥沙防治关键技术体系，探讨各原理与适用边界，以期为相关工程设计与管理提供理论参考和技术支撑。

1 渠首工程泥沙问题的成因与危害

1.1 泥沙运动的基本规律与渠首效应

泥沙在水流中的运动形式取决于泥沙粒径、水流速度和水深等因素的组合关系。一般而言，细颗粒泥沙以悬移质形式随水流运动，粗颗粒则以推移质形式沿河床滚动或跳跃前进。当水流进入渠首引水区域时，由于断面展宽或建筑物阻水，流速沿程降低，水流挟沙能力相应下降，超出水流挟沙力部分的泥沙便发生落淤。这一现象在进水闸前、引水明渠和沉沙池入口处尤为突出，属于典型的“渠首效应”——即工程建筑物改变了天然河道的水沙条件，诱发泥沙在关键部位的累积。其累积速率与来沙浓度、引水流量、引水时间和渠首布局密切相关，在汛期高含沙洪水期间最为严重。

1.2 泥沙淤积对渠首运行的多维危害

泥沙淤积对渠首工程造成的危害是多方面的。在引水能力层面，进水闸前和引渠内的泥沙淤积使过水断面缩小，同等闸门开度下引水流量显著降低，为满足下游用水需求不得不抬高闸前水位或加大开度，增加了闸门操作难度和水头损失。在工程安全层面，不均匀淤积可能导致闸前流态紊乱，产生偏流和回流，加剧闸前冲刷和局部淘刷，威胁闸室基础稳定；大量泥沙进入输水管道后造成管壁磨损，进入水轮机则引起过流部件磨蚀和振动。在运行维护层面，清淤工作耗费大量人力物力和时间，频繁停水清淤直接影响供水保证率[1]。在极端情况下，严重淤积甚至可导致渠首完全丧失引水功能。

1.3 影响泥沙防治难度的关键因素

渠首泥沙防治的难度取决于多种因素的交互作用。来水来沙条件是首要因素——含沙量大、颗粒级配宽、泥沙硬度高的河流防治难度显著增大。渠首位置和布置形式同样至关重要，位于弯道凹岸的渠首可利用弯道环流实现表层引水，含沙量通常低于凸岸；而采用正面引水或侧向引水的渠首，其防沙排沙条件差异悬殊。运行调度方式的影响也不容忽视——常年引水与季节性引水的淤积模式不同，恒定流量引水与变流量引水的挟沙能力亦有差异。此外，工程投资和维护能力也是制约防治技术选择的重要现实因素。深刻认识这些关键因素之间的耦合关系，是科学选择泥沙防治技术方案的认识起点。

2 渠首工程主流泥沙防治技术分类探讨

2.1 排沙技术的原理与典型型式

排沙技术旨在通过专用设施在泥沙造成危害前将其排出渠首，属于主动防治范畴。渠首最经典的排沙方案

是“拦沙坎+冲沙闸”组合：拦沙坎横置于进水闸前，利用壅水区降低流速以促使粗颗粒泥沙落淤；待淤积至一定高度后开启冲沙闸，借助上下游水位落差形成的高速水流将泥沙冲刷排出。该方式对推移质和粗颗粒悬移质排除效果显著，但依赖充足的水头差和冲沙水量。另一种重要技术是沉沙池，通过引入宽阔人工水池大幅降低流速，使泥沙充分沉降。按运行方式分为间歇式与连续式：前者结构简单、投资低，但需定期停水清淤；后者底部设排沙廊道或链斗式清淤机，可引水同时不间断排沙，适用于含沙量高且不宜停水的大型渠首[2]。其设计核心在于确定合理的池长与池深，确保目标粒径泥沙有效沉降而不被带出。近年来，为适应有限用地需求，出现了基于斜板或斜管沉淀原理的高效沉沙池，通过增加有效沉降面积缩短水力停留时间，显著减小了占地面积。

2.2 防沙技术的原理与典型型式

防沙技术旨在泥沙进入渠首前或初期将其引导、拦截，防止其侵入引水系统，属于主动防治范畴。弯道防沙是渠首布局中最经典的防沙技术。利用河道弯道水流横向环流特性—— 表层清水流向凹岸，底层含沙水流流向凸岸—— 将进水闸布置在弯道凹岸下游附近，并在凸岸设置排沙底孔或排沙闸，形成“表层引水、底层排沙”的自然分离格局。该技术不消耗额外水量和能量，高效且经济。拦沙网与拦沙栅也是重要防沙手段。通过在进水闸前或引渠入口设置格栅或筛网，可直接拦截推移质和粗颗粒悬移质。金属拦沙栅结构坚固，适用于大颗粒推移质；合成纤维拦沙网柔韧性好、安装灵活，网目尺寸可调。维护关键在于及时清理拦截物，防止堵塞导致水头损失增加或上游局部冲刷。此外，近年来出现了在渠首上游河道设置导沙坎或潜坝的技术，通过改变河床局部形态，将底层含沙水流导向排沙通道而非引水口，从更上游位置实现水沙分流，进一步提升了防沙效果。

2.3 清淤技术的分类与适用场景

清淤技术属于被动防治范畴，主要是对已经发生的淤积进行清除，恢复过流能力。传统的人工清淤方式在现代渠首中已逐步被机械化清淤取代。水力清淤是最常见的方式—— 利用高压水枪冲刷淤积泥沙使之成为泥浆后由泥浆泵抽排，具有设备简单、操作灵活的优点，但耗水量较大且对高浓度淤积效果有限。机械清淤则使用挖掘机、抓斗机或链斗式清淤机直接开挖淤积物，清淤效率高，适用于大面积、高厚度的淤积清理，但需注意避免机械操作对渠首建筑物基础的扰动。对于水下难以直接到达的部位，可采用气力清淤装置，通过压缩空气提升泥沙，实现不排水条件下的精准清淤。清淤方式的选择应综合考虑淤积量、淤积物特性、清淤频率和设备可用性等因素。

2.4 运行调度管理的防治效能

从运行调度的角度看，泥沙防治往往可以通过非工程手段实现事半功倍的效果。排沙调度是其中最为关键的手段—— 在汛期高含沙洪峰到来时，主动关闭进水闸、加大冲沙闸开度，利用洪水的天然流量进行集中排沙，既排出了前期淤积物，又避免了高含沙水体进入引水系统。这一策略的实质是“以洪排沙、以水治沙”，核心在于准确掌握洪峰到达时间、含沙量过程线和闸门操作时机[3]。此外，在非汛期低含沙条件下，适当加大引水流量以提高渠道挟沙力、防止细颗粒泥沙在渠首段落淤，也是日常调度中常用的防治措施。在梯级渠首群中，还可通过上下游联合调度，合理分配引水与排沙负荷，避免泥沙在某一级渠首集中淤积。

3 泥沙防治技术的集成应用与优化方向

3.1 多技术协同的综合防治策略

任何一种单一的泥沙防治技术都有其适用范围和性能极限。对于泥沙问题严重的渠首工程，必须采取多种技术协同配合的综合防治策略。典型的综合防治体系遵循“导—拦—排—沉—清”的递进逻辑：首先通过弯道导流或导沙坎将大部分泥沙导向排沙通道；其次利用拦沙设施拦截粗颗粒泥沙；再通过冲沙闸或排沙廊道将拦截和沉积的泥沙排出；部分细颗粒泥沙即使进入引水系统，也可通过沉沙池进一步沉降处理；最后对沉沙池和渠道内的残余淤积安排计划性清淤。各环节相互衔接、互为补充，构成从源头到末端的全流程防治链条。多技术协同的设计原则是：上游环节的防治效力越高，下游环节的处理负担就越小，整个体系的运行成本就越低。

3.2 泥沙监测与智能排沙技术

在监测层面，在线浊度计、激光粒度仪和声学多普勒流速剖面仪等设备可实时监测来水含沙量、泥沙级配和流速分布，为排沙决策提供定量依据。在控制层面，将实时监测数据接入自动控制系统，设定含沙量阈值和淤积高程预警值，当监测值触发预警时系统自动启动排沙闸门或发出排沙操作建议[4]。近年来，基于水沙动力学模型与实时数据同化技术的智能排沙决策支持系统开始应用于大型渠首，能够根据预测的来水来沙过程自动优化排沙时机、冲沙流量和持续时间，实现“预测式排沙”而非“反应式排沙”。智能排沙技术将排沙操作从依赖人工经验提升为数据驱动的科学决策，显著提高了排沙效率和水量利用率。

3.3 防治效果的综合评价

评价应从技术效能、经济性和运行可靠性三个维度展开。技术效能的核心指标包括排沙效率（排沙量与来沙量的比值）、淤积减少率和引水保证率；经济性指标涵盖工程投资、年运行维护费用和水量损失成本；可靠性则关注设备的故障率、操作的便捷性和对不同水文条件的适应性。综合评价的目的是在各种防治技术方案之间进行系统比选，避免片面追求排沙效果而不计成本，也避免因过度节省投资而选用防治能力不足的方案。需要特别指出的是，评价应建立在足够长的运行周期之上，充分考虑丰水年与枯水年交替带来的水沙条件变化。

4 泥沙防治技术发展趋势与若干思考

4.1 从单一目标到多目标协调的理念转变

渠首泥沙防治的目标正在从单一的“防淤保引”向“防淤、节水、生态”多目标协调转变。传统排沙方式往往需要消耗大量水量，在水资源日趋紧缺的背景下，高效节水的排沙技术受到更多关注—— 如通过优化冲沙闸开启策略以减少无效弃水，或采用高浓度排沙技术降低单位排沙量的耗水率。同时，大规模排沙对下游河道的泥沙补给和河床演变具有不可忽视的影响，在防治方案设计中应统筹考虑下游河道的泥沙平衡和河势稳定，避免“上游清了、下游淤了”的生态转移问题。

4.2 结构优化与材料革新的持续推进

在结构型式方面，针对传统平流沉沙池占地面积大的缺点，出现了采用涡流或离心分离原理的紧凑型泥沙分离装置，其原理是将含沙水引入旋流器产生离心力场，利用泥沙与水的密度差实现快速分离，停留时间缩短至数分钟甚至数十秒。在材料方面，超高分子量聚乙烯、耐磨陶瓷复合涂层等新型抗磨材料在排沙闸门和输水管道中的应用，显著提高了过流部件的抗泥沙磨蚀能力，延长了检修周期。结构优化和材料革新的方向始终朝着“更高效、更耐久、更经济”的目标推进。

4.3 对规划设计理念的前瞻性思考

在规划布局阶段，应尽可能选择河势稳定的河段、利用河流弯道自然防沙条件，并将排沙设施的空间需求纳入枢纽整体布置。在设计阶段，应以水沙运动的系统视角审视每个细节—— 进水闸底槛高程应适当抬高以避免推移质入渠，冲沙闸位置应选在泥沙易于集中的区域，防沙设施应考虑检修维护的便利性。前瞻性的规划设计理念要求工程师具备水沙动力学的系统思维，而不是将泥沙防治视为可以靠后期“打补丁”解决的局部问题。唯有在源头上将“防沙基因”植入渠首工程的总体设计，才能从根本上降低全生命周期的泥沙防治成本。

结束语

泥沙防治是贯穿渠首工程建设与运行全过程的持久课题。本文从泥沙问题的成因与危害出发，系统探讨了现代渠首工程中排沙、防沙、清淤和运行管理四类防治技术的基本原理与适用条件。核心认识在于：任何单一技术都难以独立解决复杂多变的泥沙问题，有效的防治方案必然是多种技术协同配合的集成体系。渠首泥沙防治的本质是在水沙运动规律与工程边界条件之间建立动态适配关系—— 这一适配既要发生在工程设计层面（通过合理的布局和结构为水沙分离创造有利条件），也要发生在运行调度层面（通过科学的操作和控制实现实时调控）。展望未来，随着泥沙监测技术、水沙动力学模型和智能控制技术的持续进步，渠首泥沙防治正朝着更加精准、高效和智能的方向稳步发展，技术集成的优势将在新的技术条件下得到更加充分的释放。

参考文献

[1]胡春宏,王延贵,张世奇.引水工程泥沙防治技术研究进展[J].泥沙研究,2022,47(4):1-9.

[2]方红卫,何国建,黄哲浩.水沙动力学理论及其在渠首防沙中的应用[J].水力发电学报,2021,40(8):1-13.

[3]曹文洪,毛继新,刘大滨.沉沙池设计理论与优化方法研究综述[J].水利学报,2022,53(10):1155-1166.

[4]张红武,汪家寅,李远发.弯道引水枢纽防沙设计关键技术[J].水利水电技术,2023,54(1):78-86.