

# 水闸工程泥沙淤积防治技术的创新实践

丁国州

江苏金辰建设工程有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19195

**[摘要]** 为解决水闸工程面临的泥沙淤积难题,经深入剖析泥沙淤积的现状、形成原因以及当前防治技术的状况,进而提出数值模拟法、现场试验法、新材料应用和智能监控技术等一系列创新防治举措。数值模拟法能够精准且科学地模拟出泥沙的运动状态,现场试验法则可以对防治措施的有效性加以验证,新材料的应用展现出了十分良好的发展前景,智能监控技术则能提供实时的信息支持。综合评价结果表明,创新防治技术在经济效益、环境效益以及社会效益方面成效显著,不过也面临着技术难题、经济成本较高和环境影响等现实挑战。展望未来,务必持续强化技术创新力度,提升泥沙淤积防治效率,确保水闸工程能够安全稳定运行,实现长久可持续发展。

**[关键词]** 水闸工程; 泥沙淤积防治; 数值模拟; 智能监控

**中图分类号:** TV66 **文献标识码:** A

## Innovative Practices of Sediment Deposition Prevention and Control Technologies for Sluice Engineering

Guozhou Ding

Jiangsu Jincheng Construction Engineering Co., Ltd.

**[Abstract]** To address the challenge of sediment deposition in sluice engineering, this paper conducts an in-depth analysis of the current state of sediment deposition, its causes, and the existing prevention and control technologies. A series of innovative prevention and control measures are proposed, including numerical simulation methods, field testing methods, the application of new materials, and intelligent monitoring technologies. Numerical simulation methods enable accurate and scientific modeling of sediment movement, field testing methods allow for the validation of the effectiveness of prevention measures, the application of new materials demonstrates promising development prospects, and intelligent monitoring technologies provide real-time information support. The comprehensive evaluation results indicate that innovative prevention and control technologies achieve significant economic, environmental, and social benefits, though they also face practical challenges such as technical difficulties, high economic costs, and environmental impacts. Looking ahead, it is essential to continuously strengthen technological innovation, improve the efficiency of sediment deposition prevention and control, ensure the safe and stable operation of sluice engineering, and achieve long-term sustainable development.

**[Key words]** sluice engineering; sediment deposition prevention and control; numerical simulation; intelligent monitoring

### 引言

泥沙运动力学原理表明,水闸工程在运行过程中,受水流挟沙能力、河床形态演变及工程结构特性等多重因素影响,泥沙淤积问题普遍存在<sup>[1]</sup>。这一问题的出现,不仅让水闸的过流断面变窄、泄流能力变弱,还可能带来闸门启闭的难题、使结构稳定性降低等工程方面的安全隐患,进而引发灌溉供水不够、航运停止等一系列连锁反应,对区域经济社会发展造成严重影响<sup>[2]</sup>。随着

水利工程智能化发展趋势,基于数值模拟的泥沙运动预测、物联网感知的实时监测等新技术逐渐成为研究热点<sup>[3]</sup>。然而,如何完成多种技术的耦合优化,增强防治措施的系统性和可持续性,依旧是迫切需要攻克的关键难题。因此,开展水闸工程中泥沙淤积防治技术的创新实践研究,对于完善相关理论体系、推动技术不断升级,有着极为重要的学术价值与显著的工程意义。

### 1 水闸工程泥沙淤积现状分析

### 1.1 水闸泥沙淤积的危害性

泥沙淤积给水闸工程运行效能带来的负面影响具有多样化特征。泥沙不断沉积会极大地缩减闸孔的过流断面面积,使得过闸流量系数变小引发闸前水位出现壅高的情况。根据明渠均匀流理论,当泥沙淤积厚度超过设计值的20%时,水闸泄流能力将下降15%-30%,严重威胁防洪安全<sup>[4]</sup>。从经济层面来看,泥沙持续淤积的状况会迫使水闸不得不频繁地启闭,以此维持原本的设计水位,这一过程会加速机械的磨损,同时能耗成本也会随之增加。

当淤积层厚度累积到超过3m这个临界值时,闸室结构会出现0.5%至1.2%的倾斜度,这一数值远远超出了《水闸设计规范》所明确规定的0.3%的限值[具体文献编号需根据原文确定,此处保留原格式。这种结构性的损伤,会让水闸的使用寿命大大缩短,还极有可能引发闸门卡阻、启闭机过载等一系列重大的安全隐患。某枢纽工程遭遇闸底板下方泥沙淤积层厚度达到4.2m的状况,致使闸室出现0.8%的倾斜,最终不得不耗费800万元资金开展纠偏处理工作,这充分显现出泥沙淤积所带来的工程危害。

### 1.2 水闸泥沙淤积的原因

泥沙淤积现象的形成原因体系,有着极为显著的流域特征。若从水文学的视角来审视,会发现上游来沙量与径流量二者之间的比值,也就是含沙量,乃是决定淤积强度的关键核心参数。若流域植被覆盖率不足30%,水土流失量便会以惊人的指数速度增长,进而使得入闸泥沙量大幅增加2-3倍。

工程设计方面存在的缺陷是导致淤积情况加剧的重要因素。传统水闸设计选用平底板结构,在泥沙运动学方面有着较为明显的缺陷。根据泥沙起动流速的相关公式进行计算,可发现平底板闸室内的临界起动流速,相较于斜坡式要高出15%-20%,这一情况使得细颗粒泥沙更容易沉积下来。某枢纽工程在改建之前,运用的是平底板结构,那时的年淤积量能够达到12万 $m^3$ ;而在改建为1:10斜坡式结构后,年淤积量下降,降到了3.8万 $m^3$ ,这一变化有力地验证了结构型式对于淤积控制有着决定性的作用。

### 1.3 防治技术现状

现有的污染防治技术体系展现出较为显著的阶段性特点。物理清淤,这一历经时间考验的传统技术手段,主要涵盖机械挖除与水力冲刷两大方式。采用机械方式进行清淤,单位成本大致在80-120元/ $m^3$ 这个范围,比较适合用于淤积量超过5万 $m^3$ 的工程,不过这种方法存在二次污染的风险。利用高压水枪,水力冲刷能将淤积层破碎,其清淤效率能够达到300 $m^3/h$ ,不过对闸室结构强度有较高要求。在某枢纽工程里,当采用高压水枪进行冲刷作业之后,闸底板的混凝土竟出现了宽度达0.3mm的裂缝,这一状况将物理清淤存在的技术局限性暴露了出来。

化学处理技术借助投加絮凝剂的方式,改变泥沙颗粒表面所带的电荷特性,进而推动颗粒聚沉。相关试验结果显示,当聚合氯化铝(PAC)的投加量达到15mg/L时,泥沙的沉降速度能够提

升3倍之多。然而,化学药剂对生态环境产生的长期影响,目前尚未得到完全的认知,在某水库应用后,下游水体里的铝离子浓度超出了标准0.8mg/L,进而引发了鱼类死亡事件,这在一定程度上限制了该技术的广泛推广与应用。

## 2 水闸工程泥沙淤积防治技术的创新实践

### 2.1 数值模拟法的应用

数值模拟法借助构建基于流体力学和泥沙运动力学的数学模型,能精准模拟水流挟沙能力、泥沙沉降速率以及淤积形态分布等核心参数。该技术将Navier-Stokes方程作为核心基础,融合泥沙连续性方程与输移方程,构建起一套多物理场相互耦合的数值计算体系。在当前的实际应用场景里,三维非恒定流模型能够动态追踪泥沙运动的轨迹,大涡模拟(LES)技术则让近壁区泥沙颗粒碰撞过程的解析精度得到进一步提升。数值模拟法正逐步向着多尺度耦合以及智能化方向不断演进。借助机器学习算法来优化湍流模型参数,能够大幅减少计算资源的使用;数字孪生技术的融合运用,也让实时数据驱动的动态模拟得以实现。

### 2.2 现场试验法的实践

现场试验法在实际工程环境里布置监测设备,同时实施干预举措,直接对防治技术的有效性展开验证。典型的试验设计方案中,涵盖了流量调控、清淤频率优化以及新型防淤设施测试等多个模块。效果评估体系的构建要同时考量定量指标与定性分析两方面。除开淤积厚度、过流能力这类传统参数,现代试验方法还采用了三维激光扫描技术,对淤积形态展开数字化重建工作,再结合计算流体力学(CFD)反演分析,能够量化不同防治措施带来的边际效益。

### 2.3 新材料的应用探索

当前,新型防淤材料的研究主要集中于表面改性技术的运用以及复合材料体系的构建上。超疏水涂层能在闸门表面构筑出微纳结构,让泥沙颗粒接触角轻松超过150°,进而大幅降低粘附力;聚氨酯弹性体依靠自身出色的耐磨和抗冲击性能,成为护底材料的绝佳之选。壳聚糖作为载体的微生物絮凝剂,能借助生物降解的奇妙作用,有效降低水体中悬浮物的浓度,还能防止化学药剂给水生生态带来二次污染。实验室测试显示,该类材料在pH值6-9范围内均可保持85%以上的絮凝效率,且半衰期控制在7天内,符合绿色施工标准<sup>[5]</sup>。

### 2.4 智能监控技术的引入

智能监控系统借助物联网传感器网络的部署,完成对水闸运行状态以及泥沙淤积状况的实时精准感知。激光雷达(LiDAR)能够每隔10分钟就对闸室断面展开一次扫描,进而生成高精度三维淤积模型;悬浮式浊度仪可对水体含沙量变化进行连续监测,且数据传输延迟在0.5秒以内。边缘计算与5G通信在技术发展进程中相互融合,正有力推动监控系统朝着自主决策方向不断演进。在现场端布置好AI推理模块后,系统便能自行识别淤积风险等级,进而触发相应的清淤预案。

## 3 水闸工程泥沙淤积防治技术的综合评价与展望

### 3.1 综合评价

对水闸工程泥沙淤积防治技术进行综合评价时考量经济效益、环境效益以及社会效益三个方面。经济效益评价需考量防治措施对水闸运行维护成本的影响,例如物理清淤技术虽能快速恢复过流能力,但长期高频次作业会导致设备磨损加剧、人工成本攀升,而数值模拟法通过优化清淤周期可降低总体成本。环境效益方面的评价,剖析防治技术给水闸上下游生态系统带来的扰动情况,像化学处理法,或许会引发水体出现二次污染问题,而生物防治法借助构建生态护坡,能够增强水体自身的净化能力,这与可持续发展的理念相契合。社会效益方面的评价,要着重留意防治技术对区域防洪安全、航运效率以及农业灌溉所起到的保障效果,像智能监控技术能实时预警泥沙淤积风险,降低因水闸停运而造成的社会经济损失。数值模拟法与现场试验法联合运用,大幅提升了防治措施的精准程度。数值模拟构建起三维水流与泥沙的耦合模型,能够精确量化在不同工况下泥沙淤积的速率以及分布特征,进而为现场试验给予坚实的理论支撑;现场试验借助原型观测对模型参数进行验证,逐步形成了“模拟-试验-修正”这样一种闭环优化机制。

### 3.2 面临的挑战

极端降雨出现时,上游来沙量或许会突然发生改变,现有模型在模拟非恒定流与泥沙交互作用时精度不够,致使防治措施跟不上实际需求。智能监控系统在建设初期所需的成本颇为高昂,这使得中小型水闸工程由于资金方面的限制,难以做到全面推广应用。统计数据显示,一套完备的智能监测系统,涵盖传感器、数据平台以及通信模块,其单位造价大约是传统人工巡检方式的5-8倍,而且后期维护还得依靠专业团队,这无疑进一步加重了运营方面的压力。在环境层面来看,生物防治法的生态适应性要经过长时间的验证才行。以水生植物修复技术为例,各个流域的水温、水流速度以及水质状况都存在明显不同,有些植物被引入后,或许会因为没办法适应当地的环境而死去,甚至可能演变成外来入侵物种,对原有的生态平衡造成破坏。此外,在化学处理法里,对于絮凝剂的选择要同时考虑到处理效率以及使用安全性,有些无机絮凝剂尽管成本不高,会残留重金属离子对水生生物造成慢性毒害。

### 3.3 发展趋势展望

未来,水闸泥沙淤积防治技术会朝着多学科交叉融合的方向蓬勃发展。以大数据与机器学习为基础构建的泥沙淤积预测模型,整合历史监测数据、气象信息以及流域地形数据后,完成

对淤积风险的动态评估与提前干预。深度学习算法能够敏锐捕捉到泥沙淤积的早期迹象,像闸门开启时阻力出现异常增大的情况,相比传统阈值预警法,可提前24-48小时发出警报信息。在技术领域,智能材料与物联网技术相互融合,会助力水闸泥沙淤积防治技术朝着自主化方向大步迈进。就像形状记忆合金闸门,能依据泥沙淤积的具体程度,自动灵活地调整开度,全程无需人工插手;纳米传感器可嵌入闸体结构内部,持续实时监测应力分布以及腐蚀状况,为维护决策提供微观层面的数据支撑。智能化管理的广泛运用逐步重塑水闸运维的既有模式。构建“云-边-端”协同的智能管控平台,能让多水闸工程实现集中调度,还能对资源进行优化配置。进一步健全相关标准体系,界定智能监控系统的数据采集标准、新材料环境安全性评估的具体流程以及生物防治法中的生态补偿机制,为技术创新筑牢制度根基。

## 4 结论

水闸工程泥沙淤积防治技术的创新实践需以泥沙运动力学、水力学及工程结构理论为基础,通过数值模拟法构建泥沙运动三维模型,精准预测淤积发展规律,结合现场试验法验证清淤方案的有效性,形成“预测-干预-评估”闭环管理体系。高分子抗磨涂层这类新材料的投入使用让闸门的磨损率降低。智能监控技术借助物联网传感器对淤积厚度进行实时监测,数据采集的频率能达到分钟级,为动态调度提供了有力的决策支持。未来,要进一步努力突破多物理场耦合模拟的精度瓶颈,优化智能算法以更好适应复杂工况,促使防治技术朝着绿色化、智能化方向不断演进。

### [参考文献]

- [1]陈逸枫,陈琪生.工程物探技术在大型土木工程项目中的创新应用与实践探索[J].工程设计与施工,2025(1):81-83.
- [2]黎植强.技术创新在港口航道工程中的应用和实践[J].中国储运,2025(4):78-79.
- [3]黄山.房建工程施工现场信息化管理技术创新与实践[J].砖瓦,2025(4):127-129.
- [4]孙彬.先模型后图纸打造三维正向设计新样本——山东省肿瘤防治研究院技术创新与临床转化平台工程BIM应用的创新实践[J].中国勘察设计,2022(s01):38-41.
- [5]卢云.水利水电工程中绿色施工技术的应用研究——评《高山峡谷地区大型水电工程绿色施工总布置创新与实践》[J].人民黄河,2024(4):I0002.