

扬水泵站前池防淤积措施研究

李国强

宁夏红寺堡扬水管理处 宁夏 中卫 755100

摘要: 扬水泵站作为水资源调配的关键工程,其前池淤积问题长期制约着工程效能发挥。本文针对扬水泵站前池淤积问题,系统分析了黄河泥沙特性、前池水流运动规律及淤积机理,阐明了淤积对泵站效率、设备安全及工程管理的危害,并识别出泥沙特性、设计参数与运行工况三类关键影响因素。基于此提出工程设计优化、水力调度调控、机械辅助清淤及智能监测防控四类防淤措施,明确了各措施的技术要点与实施路径。

关键词: 扬水泵站; 前池淤积; 影响因素; 防淤积措施

引言: 泥沙淤积导致泵站扬水效率下降、设备磨损加剧,甚至引发安全风险,而现有防淤措施存在着针对性不足、协同性差等问题。本文立足多泥沙河流特性,结合前池淤积机理与危害分析,通过梳理影响因素,构建“设计-调度-清淤-监测”一体化防淤体系。研究旨在弥补现有技术短板,提出贴合工程实际的防淤方案,为类似工程的设计优化与运行管理提供理论依据和实践参考。

1 黄河水流特性及泵站前池淤积机理

黄河的泥沙特性是影响泵站前池淤积的核心因素,其颗粒组成呈现显著的级配差异,通常包含黏粒、粉粒及砂粒等多级颗粒,其中 d_{50} (中值粒径)多在 $0.01\sim 0.5\text{mm}$ 范围,且随流域侵蚀强度呈现季节性波动。泥沙颗粒的沉降速度受粒径、含沙量及水体黏度共同影响,细颗粒($< 0.05\text{mm}$)因絮凝作用常以群体形式沉降,沉降速度可达单颗粒的 $2\sim 5$ 倍;而粗颗粒($> 0.2\text{mm}$)则以离散沉降为主,沉降速度随粒径增大呈幂函数增长。在输移规律上,黄河水在“悬移质-推移质”双重输移特征,洪水期悬移质含沙量可骤增至 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 以上,而平水期推移质以跃移或滚动形式沿河床运动,形成周期性泥沙补给。

扬水泵站前池作为黄河水流从河道进入水泵的过渡段,其水流运动特性直接影响泥沙淤积形态。前池内流态呈现明显的空间分异,进口段因流速骤降形成扩散流,流速梯度可达 $0.5\sim 1.2\text{m}/(\text{s}\cdot\text{m})$;中部段易出现不对称回流,回流强度随扩散角增大而增强,回流区流速多低于 $0.3\text{m}/\text{s}$,为泥沙沉降创造条件。当来流方向与前池轴线存在夹角时,会诱发顺时针或逆时针漩涡,漩涡中心流速趋近于零,形成局部低能区,加速泥沙汇聚。

扬水泵站前池的泥沙淤积机理可归纳为以下三类核心过程:(1)泥沙沉降淤积,当水流速度降至泥沙起动流速的 60% 以下时,粗颗粒泥沙在重力作用下迅速沉降,形成沿程淤积带,淤积厚度沿水流方向逐渐增加;(2)

环流淤积。前池两侧的回流与主流形成闭合环流系统,将悬浮泥沙卷入低速区,形成呈条带状分布的环流淤积体,此类淤积占前池总淤积量的 $40\%\sim 60\%$;(3)死水区淤积。主要分布于前池边角及整流设施后方,因水流交换微弱,泥沙持续累积形成稳定淤积层,其干密度可达 $1.3\sim 1.6\text{t}/\text{m}^3$,清理难度显著高于其他区域^[1]。

2 扬水泵站前池淤积危害及影响因素

2.1 扬水泵站前池淤积危害

扬水泵站前池淤积对工程运行的危害具有系统性和累积性,主要体现在以下三个层面。(1)从泵站运行效率来看,前池淤积会导致有效过流断面缩减,水流阻力增大,使水泵进口水头损失增加,实际扬程偏离设计值,机组运行效率可降低 $10\%\sim 30\%$ 。淤积形成的不规则地形改变了前池流态,水流在进入水泵前易产生偏流或漩涡,破坏水泵进水条件,进一步加剧能量损耗。(2)从设备安全角度分析,淤积泥沙中的粗颗粒(如砂粒、砾石)随水流进入水泵流道后,会对叶轮、密封环等部件产生磨蚀,导致设备使用寿命缩短 $30\%\sim 50\%$,严重时可能引发叶轮失衡、轴承损坏等故障。淤积物长期堆积可能形成坚硬的泥质板结层,若被水流裹挟进入机组,还会造成水泵卡堵,直接威胁泵站安全运行。(3)从工程管理层面而言,淤积会增加清淤频次和成本。频繁清淤不仅需要暂停泵站运行,影响供水或灌溉的连续性,还需投入大量人力、物力进行机械开挖或水力冲沙,年度维护费用可占工程总运维成本的 $20\%\sim 40\%$ 。若淤积长期未得到有效控制,甚至可能导致前池结构因泥沙压力不均匀而出现裂缝、渗漏等结构性损伤,缩短工程整体使用寿命。

2.2 扬水泵站前池淤积影响因素

前池淤积是泥沙特性、工程设计与运行工况共同作用的结果,主要影响因素可分为以下三类。(1)泥沙

特性。包括颗粒级配、含沙量及输移规律。细颗粒泥沙（粒径 $< 0.05\text{mm}$ ）因沉降速度慢，易随水流进入前池并在低流速区累积；而粗颗粒泥沙（粒径 $> 0.2\text{mm}$ ）则在进口段因流速骤降快速沉降。含沙量的季节性波动（如汛期含沙量可达到平水期的5~10倍）会加剧淤积的周期性变化，形成“汛期快速淤积—非汛期缓慢固结”的循环。（2）前池设计参数对淤积形态起决定性作用。扩散角过大（ $> 12^\circ$ ）易导致边壁回流区扩大，形成对称淤积带；池长不足会使水流未充分扩散即进入水泵，增加主流与边壁的流速梯度；底坡设计不合理（如平坡或反坡）则会削弱水流携沙能力，加速泥沙沉降。整流设施的布置方式（如导流墩间距、高度）若与水流条件不匹配，可能在设施后方形成局部死水区，成为泥沙淤积的高发区域。（3）运行工况的动态变化。泵站开机台数减少时，前池过流量降低，流速低于泥沙起动流速，易引发泥沙沉降；而机组频繁启停会导致前池水位波动，破坏水流稳定性，促进泥沙在回流区沉积。抽排水位差的变化（如灌溉期与非灌溉期水位差 $> 2\text{m}$ ）会改变前池水力梯度，影响泥沙输移路径，加剧局部淤积^[2]。

3 扬水泵站前池防淤积措施

3.1 工程设计优化措施

工程设计优化是扬水泵站前池防淤积的基础性措施，通过以下合理规划前池体型与附属结构，从源头减少泥沙沉降与堆积的可能性。（1）前池体型参数要结合泥沙特性与水流条件综合确定。扩散角宜控制在 $8^\circ\sim 12^\circ$ ，过小会增加池长与工程量，过大则易引发边壁回流，形成淤积死角；池长与水泵进口直径的比值建议取6~10，确保水流在进入水泵前充分扩散，流速梯度稳定在 $0.1\sim 0.3\text{m}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 范围；底坡设计应与来水流速匹配，采用 $0.01\sim 0.03$ 的正向坡度可增强水流携沙能力，避免泥沙在池底滞留。对于含沙量较高的河流，前池进口段可设置1~3m的收缩段，通过短暂加速水流减少粗颗粒泥沙的初期沉降。（2）整流与导流设施的布置要针对性解决流态紊乱问题。在扩散段两侧对称设置导流墩，墩长取前池总长的 $1/3\sim 1/2$ ，间距为池宽的 $1/4\sim 1/5$ ，可将主流约束在池体中部，削弱边壁回流；池底增设高 $0.3\sim 0.5\text{m}$ 的导流坎，坎顶与池底形成 $5^\circ\sim 10^\circ$ 倾角，能引导底层含沙水流向主流区汇聚，减少死水区范围。对于易产生漩涡的区域，可布置格栅式挡板，挡板孔隙率控制在 $30\%\sim 50\%$ ，既不阻碍水流通过，又能破碎大尺度漩涡，降低泥沙在漩涡中心的沉降概率。（3）排沙设施的设计要实现主动排沙与前池运行的协同。底孔排沙口宜设在前池末端靠近水泵进口的一侧，孔口尺寸按排沙流量为泵站设计

流量的 $10\%\sim 15\%$ 确定，孔底高程低于前池正常运行水位 $1.5\sim 2.0\text{m}$ ，确保形成足够的水力梯度；冲沙廊道应沿前池轴线对称布置，廊道进口与来流方向呈 $30^\circ\sim 45^\circ$ 夹角，出口连接下游河道，通过廊道内的高速水流（流速 $\geq 2.0\text{m/s}$ ）将淤积泥沙直接排出池外。当含沙量季节性波动较大时，可在排沙设施出口设置闸门，实现按需启闭。

3.2 水力调度调控措施

水力调度调控通过动态调整泵站运行参数，利用水流自身能量减少泥沙淤积，适用于不同季节与来沙条件的适应性防控，具体措施如下：（1）运行工况的优化要基于实时含沙量数据制定分级策略。当含沙量低于 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 时，采用满负荷运行模式，保持前池流速 $\geq 0.8\text{m/s}$ ，利用高流速携带泥沙通过前池；含沙量在 $5\sim 20\text{kg}/\text{m}^3$ 时，调整开机台数使前池平均流速维持在 $0.5\sim 0.8\text{m/s}$ ，同时避免单台机组长时间运行导致的流态偏斜；含沙量超过 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 时，启动备用机组增加过流量，短时间内将流速提升至 1.0m/s 以上，通过冲刷减少泥沙沉降。（2）周期性冲沙调度要结合淤积速率与水位条件制定规程。冲沙周期根据含沙量动态确定，汛期可缩短至3~7天，非汛期延长至15~30天；冲沙时先降低前池水位至设计最低运行水位，开启排沙设施后逐步提升水位，利用水位差形成的冲刷水流清除池底淤积，冲沙历时控制在2~4小时，确保淤积物充分悬浮并排出。冲沙过程中需监测前池水位与出口含沙量，当出口含沙量降至进口含沙量的 10% 以下时，结束冲沙并恢复正常运行。（3）高低扬程机组的搭配运行可优化前池水力条件。高扬程机组适用于低水位、高含沙期，通过提升出水压力减少前池滞水时间；低扬程机组在高水位、低含沙期运行，可降低能耗并维持前池较高流速。两种机组的切换周期与来水水位变化同步，确保前池水位波动幅度控制在 $\pm 0.5\text{m}$ 以内，避免水位骤变引发的流态紊乱^[3]。

3.3 机械与辅助清淤措施

机械与辅助清淤措施作为工程与调度措施的补充，用于清除已形成的淤积物，防止淤积累积超出控制范围，具体措施如下：（1）机械清淤设备的选型要匹配淤积物特性与前池尺寸。绞吸式清淤机适用于粒径 $\leq 50\text{mm}$ 的泥沙，通过绞刀破碎固结淤积层，再由泵体将泥浆排出，清淤效率可达 $200\sim 500\text{m}^3/\text{h}$ ；耙吸式清淤机适用于松散淤积区，利用耙头收集泥沙后存入舱体，适合池长 $\geq 50\text{m}$ 的前池作业。清淤设备的作业路径需覆盖前池全断面，重点清理导流设施后方、边角等死水区，单次清淤深度控制在 $0.5\sim 1.0\text{m}$ ，避免过度清淤破坏前池结构层。（2）借助水力冲洗进行辅助清淤，能够降低机械清

淤的成本。经过技术改造后,可把水泵高压出水侧(工作压力为0.6MPa)的水引入前池,定期对前池中的固结淤积层展开预破碎作业。操作时,水枪喷射角度与池底保持 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$,顺着淤积区的走向逐行冲洗,使硬块淤积分解成松散颗粒;冲洗形成的泥沙水混合物由水泵抽走,从而减轻机械清淤的负荷。水力冲洗仅需在生产过程中定时操作,能减少停水后机械清淤所需的成本(如

图1所示的高压水管清淤构思图)(3)辅助排沙设施的维护。定期检查底孔闸门的密封性能,每月进行1~2次启闭试验,防止泥沙堵塞导致启闭失灵;冲沙廊道内壁每季度进行一次磨损检测,对磨损深度超过5mm的区域进行修补,确保廊道过流能力稳定;格栅式设施需每周清理附着的漂浮物与细颗粒泥沙,避免孔隙堵塞影响水流整流效果。

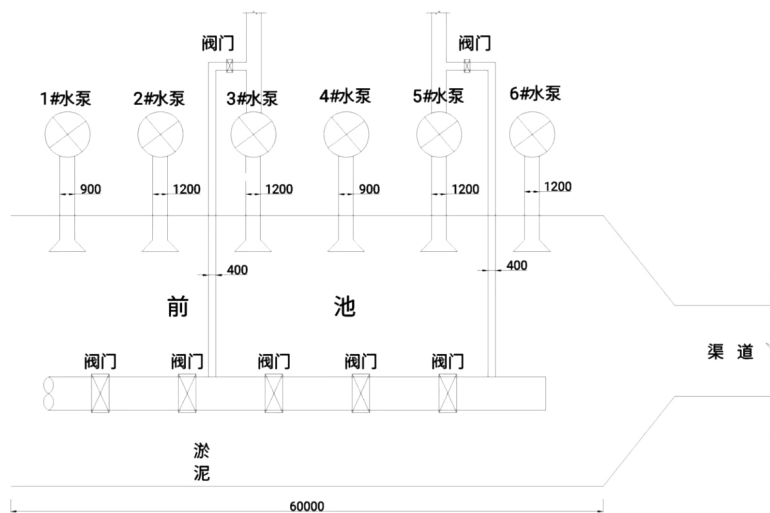


图1 高压水管清淤构思图

3.4 监测与智能防控措施

以下监测与智能防控措施通过实时掌握淤积状态,实现防淤措施的精准调控,提升防控效率。(1)淤积状态监测系统要覆盖前池关键区域。采用超声波传感器阵列(布置密度为每 100m^2 1个)监测淤积厚度,传感器测量精度控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内,数据采集频率为每小时1次;在池底不同位置布置压力式水位计,结合水位变化计算过流断面面积,间接判断淤积分布;通过在线含沙量仪(测量范围 $0\sim 50\text{kg}/\text{m}^3$)实时监测进口与出口的含沙量差值,评估泥沙沉降速率。监测数据通过无线传输至中控系统,形成淤积状态动态图谱。(2)智能调控系统基于监测数据自动生成防控方案。当监测到局部淤积厚度超过 0.3m 时,系统自动启动对应区域的水力冲洗设备;淤积面积占前池总面积20%以上时,触发机械清淤预警,提示操作人员安排清淤作业;含沙量骤升时,系统根据预设算法自动调整机组运行台数与排沙设施开启度,维持前池流速在合理范围。调控指令通过PLC控制系统执行,响应延迟时间 ≤ 10 秒,确保措施及时生效。(3)防控效果反馈机制要定期校验措施有效性。每月对监测数据与实际淤积量(通过抽样测量)进行对比,修正传感器测量误差;每季度分析不同防淤措施的应用效果,统计

淤积控制成本与能耗,优化措施组合方案;每年开展一次全池淤积量普查,评估年度防淤措施的总体效能,为下一年度防控策略调整提供依据^[4]。

结束语:本文通过对扬水泵站前池淤积问题的系统研究,揭示了淤积形成的内在机理与影响路径,提出的四类防淤措施在技术上具有协同性和可操作性。工程设计优化奠定防淤基础,水力调度实现动态调控,机械清淤解决存量淤积,智能监测保障措施精准落地。研究成果不仅为扬水泵站的防淤实践提供了成套技术方案,也为水利工程中类似泥沙问题的治理提供了思路。未来可进一步探索新型材料与智能化技术的融合应用,提升防淤措施的长效性与经济性。

参考文献

- [1]徐杰.多泥沙河流泵站泥沙淤积和防淤措施研究[D].江苏:扬州大学,2021(03):22-23.
- [2]王忠元,王文婕.水沙条件下水库泥沙淤积及排沙特征研究[J].地下水,2025,47(01):242-243+249.
- [3]王海东.多泥沙河流各类泵站前池的数值模拟与试验研究[D].宁夏:宁夏大学,2023(02):33-34.
- [4]钱新妮.多泥沙河流渠首引水排沙综合处理技术[J].水利技术监督,2021(4):151-154.