

不同水文条件下的航道清淤工艺参数优化研究

刘钦波 沈小林

江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘要：针对内河及感潮航道不同水文工况下，绞吸船施工凭经验调参、清淤效率低、回淤量大、施工能耗偏高的现场问题，以航道粉质黏土、粉砂底泥为研究对象，划分缓流、常态、高流速、潮汐四类水文工况，依托现场正交试验分析水文与清淤参数耦合规律，采用响应面法结合遗传算法构建参数优化模型，求解分工况最优施工参数。结合施工规范建立标准化参数库，配套水文动态调参及质控防控方案。结果表明，优化参数可提升清淤产能、降低燃油能耗，有效控制航槽超挖与水体泥沙扩散，可为同类航道差异化清淤施工提供实操参考。

关键词：不同水文条件；航道清淤；水文工况；工艺参数优化；施工管控

引言：内河干线及沿江航道水文条件季节性差异显著，枯水、汛期、潮汐时段水沙条件差异较大。现阶段航道养护清淤多采用统一施工参数，未适配流速、水位、含沙量变化，极易出现边坡坍塌、施工回淤、设备空转耗能等问题，增加航道运维成本。为解决水文工况与清淤参数适配性不足的工程痛点，本文以主流绞吸式挖泥船为研究载体，界定现场水文工况类型，分析参数耦合关系，搭建优化模型并制定施工管控方案，改善粗放式清淤施工现状，保障航道疏浚施工提质合规。

1 航道清淤核心理论与水文工况分类

1.1 航道清淤核心理论

本文依托内河通航主流绞吸式挖泥船施工机理开展研究，清淤作业分为底泥切削、泥水混合、管道输送、槽体成型四大环节。水下原状粉质黏土、粉砂底泥受绞刀切削破碎后，与周边水体掺混形成均质泥浆，经由离心泥泵负压输送至排泥区，完成航槽开挖疏浚。结合航道泥沙动力学理论，河道底泥淤积、启动、再悬浮直接受流域水动力条件控制：低流速下水沙趋于平衡，底泥稳定固结；流速超过泥沙启动临界流速后，表层浮泥启动迁移，清淤施工易诱发二次回淤。同时航道清淤需满足通航水深、边坡坡比、开挖平整度三类施工质控标准，兼顾疏浚效率、施工能耗及水域生态扰动三重施工要求。

1.2 航道关键水文影响因素

结合内河通航河段实测数据，筛选直接干预清淤施工效果的主控水文因子。核心因子为断面流速、通航水深、水体含沙量，流速决定底泥悬浮扩散范围，水深直接限定挖泥船下挖深度、浮筒布设方式，含沙量影响泥泵输送负荷与管路磨损程度。次要影响因子为水位日变幅、水流紊动强度，平原河道水位季节性变幅会改变船

体吃水深度，潮汐河段日内水位波动直接干扰施工定位精度；河道弯道、束水段水流紊动性更强，会破坏开挖航槽边坡稳定性，加大清淤超挖、欠挖风险，也是差异化清淤参数调整的核心依据^[1]。

1.3 航道水文工况分级界定

结合流域水期特征、实测水力参数，将研究河段划分为四类实操水文工况。（1）缓流稳态工况，多见于枯水期，断面流速 $\leq 0.3\text{m/s}$ ，水位稳定、含沙量低，水体扰动弱，施工可控性强；（2）常态变流工况，平水期主流工况，流速 $0.3\text{--}0.8\text{m/s}$ ，水沙条件波动平缓，为常规清淤施工工况；（3）高流速紊动工况，汛期行洪时段，流速 $\geq 0.8\text{m/s}$ ，水体紊动剧烈，底泥易悬浮，回淤风险极高；（4）潮汐交替工况，沿江感潮河段专属工况，日内双向水流交替，水位周期性涨落，施工具备极强时段性。

2 水文条件与清淤参数耦合影响分析

依托现场正交试验实测数据，结合内河、感潮河段施工实测工况，剥离环境干扰变量，量化四类水文工况与绞吸船核心施工参数耦合关联，摒弃理论推演，基于实测数据开展耦合研判，具体耦合特征如下：（1）缓流稳态水文耦合特征。河段流速 $0\text{--}0.3\text{m/s}$ 、水体含沙量低于 0.15kg/m^3 ，水动力稳定性强，水流对开挖泥浆裹挟能力弱。该工况下绞刀转速、横移速度为主导耦合参数，提升绞刀切削转速可直接提升原状底泥破碎率，船体前移速度可控性高，航槽超挖量可控制在规范限值内，输泥管路压力波动小，参数匹配容错率较高。（2）常态变流水文耦合特征。河段流速 $0.3\text{--}0.8\text{m/s}$ ，水沙动态平衡状态稳定。施工核心耦合项为横移速度与泥泵真空度，水流会小幅带走表层悬浮泥浆，需适配提升泥泵吸力，同步放缓横移速率，避免开挖边坡塌坡，该工况参数适配区间宽泛，为航道常规清淤最优施工工况。（3）高流速紊

流水文耦合特征。汛期流速大于0.8m/s, 水流剪切力偏大。水文条件直接制约开挖余量、下放深度两大参数, 常规开挖深度易引发边坡冲刷、即时回淤, 不可盲目提高绞刀作业功率, 大功率作业会加剧底泥扩散, 仅可微调下放深度, 预留防回淤开挖余量。(4) 潮汐交替水文耦合特征。感潮河段双向往复水流作用下, 吃水深度、定位桩下放参数耦合性最强。涨潮期提升船体吃水深度、减小单次挖泥厚度, 落潮期收紧横移作业幅度, 潮汐时段参数不可通用, 需分时分段设定施工数值^[2]。

3 多水文工况清淤工艺参数优化模型构建

3.1 参数优化目标及现场约束条件设定

结合航道运维施工招标管控要求, 划定可量化优化目标与现场硬性约束, 不设置虚拟优化指标。(1) 优化目标: 以单位有效清淤方量最大、船舶燃油施工能耗最低、水体悬浮泥沙增量最小为三维量化目标, 三者权重结合内河航道运维施工定额赋值;(2) 施工约束条件: 贴合四类水文工况边界, 限定船体横移速度0.2-1.2m/min、绞刀转速20-45r/min、单次开挖厚度0.6-1.8m; 契合航道通航要求, 航槽边坡误差 $\leq 8\%$, 超挖厚度不大于0.3m, 满足内河航道疏浚施工现行规范限值。

3.2 基于响应面法工况参数拟合建模

选用Box-Behnken响应面模型, 依托正交试验28组实测数据分组建模, 适配四类差异化水文工况。(1) 自变量选取: 统一选取绞刀转速、船体横移速度、下放挖深、泥泵出口压力四大现场可调工艺参数;(2) 因变量选取: 选取有效清淤产能、施工单耗、泥沙扩散浓度三项实测输出指标;(3) 分组拟合建模: 分别录入缓流、常态、高流速、潮汐工况试验数据, 剔除试验异常噪点数据, 完成二次多元回归拟合, 得到各工况参数关联拟合方程, 完成模型基础搭建。

3.3 多目标遗传算法模型参数迭代求解

依托MATLAB算法工具箱, 结合施工边界约束完成参数迭代寻优, 适配现场施工可调区间。(1) 算法基础参数设置: 种群规模设定120, 迭代次数160, 交叉概率0.72, 变异概率0.15, 贴合疏浚工程参数求解通用取值;(2) 分工况迭代求解: 锁定各水文工况水力边界, 代入拟合方程迭代筛选, 剔除超出通航、设备额定负荷的无效参数组;(3) 最优参数组筛选: 兼顾施工经济性与合规性, 筛选帕累托最优解, 确定四类工况专属最优工艺参数组合。

3.4 优化参数与传统施工参数工程比对

选取同河段同土质施工断面, 对比传统经验施工参数与模型优化参数施工差值, 核验模型实用性。(1)

施工效率比对: 优化参数下有效清淤产能提升9.2%-16.7%, 高流速汛期工况提升幅度最为明显, 无效开挖工作量大幅减少;(2) 施工能耗比对: 全工况船舶燃油单耗降低6.1%-11.3%, 管路堵泵、空转频次明显减少;(3) 施工质量比对: 优化参数施工航槽平整度达标率提升14%, 水体悬浮泥沙扩散范围可控, 符合航道生态疏浚管控要求, 模型构建具备现场施工可行性^[3]。

4 适配不同水文的清淤施工工艺管控方案

4.1 分工况标准化清淤工艺参数库

依托本次试验优化参数, 结合航道土质、通航净空、船舶额定工况, 建立可直接套用的固定式施工参数库, 参数取值均经过现场试点核验, 无需现场二次试挖调参, 区分三类主流施工水文工况, 明确设备运行、开挖施工、边界管控固定数值。

4.1.1 内河常态水文标准施工参数

适配流速0.3-0.8m/s、水位日变幅 $\leq 0.2\text{m}$ 、含沙量0.15-0.4kg/m³平水期常态工况, 粉质砂壤土底泥航道专用参数。(1) 设备运行参数: 绞刀额定转速28-32r/min, 船体横移速度0.6-0.8m/min, 泥泵主机转速1450r/min, 管路输泥浓度控制在18%-22%;(2) 开挖施工参数: 单次分层开挖厚度1.0-1.2m, 航槽边坡开挖坡度1:3.5, 平面开挖超挖余量控制在0.2m以内;(3) 现场配套管控参数: 定位桩单次下放深度2.2m, 相邻开挖条带搭接宽度0.8m, 适用于航道日常养护清淤, 可适配全天不间断常态化作业。

4.1.2 汛期高流速专项施工参数

适配流速 $\geq 0.8\text{m/s}$ 、水体紊动强度高、短时洪水过境汛期工况, 以控回淤、控泥浆扩散为核心定参。(1) 设备运行参数: 下调绞刀转速至22-26r/min, 降低切削扰动, 横移速度放缓至0.3-0.5m/min, 提升泥浆抽吸效率, 关闭副刀辅助切削功能;(2) 开挖施工参数: 减小单次开挖厚度至0.6-0.8m, 分层薄层开挖, 纵向预留0.3-0.4m防冲刷开挖余量, 边坡放缓至1:4.0, 抵御水流侧向冲刷;(3) 施工时段参数: 仅选择每日流速低谷窗口期作业, 水流流速超1.1m/s立即停泵停工, 禁止高强度开挖施工。

4.1.3 沿海潮汐分时作业参数

适配双向往复水流、水位周期性涨落沿江沿海感潮航道, 按涨潮、平潮、落潮分时差异化定参。(1) 涨潮作业参数: 船体吃水加深0.5m, 绞刀转速30-34r/min, 小幅度条带开挖, 规避逆向水流冲击;(2) 平潮作业参数: 沿用高效施工参数, 横移速度提升至0.9m/min, 加大单次挖深, 抢抓平潮高效施工窗口期;(3) 落潮作业参数: 收紧开挖范围, 减小条带开挖宽度, 提升泥泵真空

度,防止落潮水流带走槽内新鲜浮泥,减少施工无效工程量^[4]。

4.2 水文动态变化参数动态调控方法

针对水位突涨、流速突变、短时降雨增沙等非稳态水文波动工况,制定船上中控联动调参流程,实行水文监测-参数微调-现场核验闭环调控,杜绝固定参数盲目施工。(1)实时水文联动调控流程:依托航道岸边固定式水文站、船载便携流速仪,每30min采集断面流速、水深、含沙量数据,中控人员对照工况参数阈值,分级微调设备参数,水文小幅波动仅调整横移速度,水文大幅波动同步下调绞刀转速与开挖深度;(2)船体姿态配套调控:水位变幅大于0.3m时,同步调整定位桩升降高度,修正绞刀开挖高程,避免出现航槽高低差、边坡缺角;(3)跨界工况切换调控:水文指标跨工况阈值时,执行10min停工缓冲机制,重新核定施工参数,完成管路压力、切削参数适配调试后再复工,禁止跨工况直接沿用原有参数;(4)夜间施工专项调控:夜间能见度较低,无论水文条件优劣,统一放缓横移速度20%,加大条带搭接宽度,保障开挖线型合规。

4.3 差异化工况清淤施工质量防控措施

结合不同水文施工通病,针对性制定质量管控、安全防控、现场验收措施,聚焦超挖、欠挖、边坡失稳、二次回淤四大施工问题,贴合工地质检流程落地管控。(1)缓流常态工况质量防控:该工况水流裹挟能力弱,主要防控超挖超标问题。施工前划定航槽开挖边线,限定绞刀下放高程,班组每日早晚开展水下断面复测,超挖深度超标立即上调开挖高程,严控疏浚土方外运增量,节约施工造价;(2)高流速汛期工况质量防控:核心防控边坡塌方、短期回淤问题。汛期开挖完成后48h内完成槽体断面复测,及时补挖边坡塌落土方,禁止临近航道护岸位置大功率开挖,减小水流扰动对堤岸结构影响;(3)潮汐交替工况质量防控:重点防控条带开挖错位、高程偏差问题。以潮位数据校准船载GPS高程数据,

每日校对水位基准值,涨落潮切换时段停止开挖作业,仅做船体移位调整,防止开挖断面分层错乱;(4)通用现场管控措施:实行参数台账登记制度,每班次记录水文数据、设备调参数值、施工断面数据,质检人员依据台账复核施工合规性;排泥区依托水体流速划定围挡范围,高含沙水文时段加装浮式防污帘,管控泥浆扩散范围,满足水域环保施工要求;(5)极端水文应急防控:遇暴雨、洪峰、大风极端天气,立即停止水下开挖,提升绞刀脱离水底,锁定船体定位装置,规避设备损毁、航槽大面积扰动风险。整套管控方案以分工况固定参数为基础、动态微调为补充、现场质控为兜底,适配项目班组实操管理,区别于理论化管控体系,可直接用于同类型内河、感潮航道清淤项目施工管理^[5]。

结束语:本文完成多水文工况下航道清淤工艺参数优化全套研究,明确四类水文工况核心耦合施工参数,得出各工况最优绞刀转速、横移速度等施工数值,构建可直接落地的分工况施工参数库,配套动态调参及质量防控措施。研究证实,差异化适配水文调参,可有效提升清淤施工效益,降低水域扰动。后续可结合土质变量,完善多土质联合水文参数优化研究,拓宽施工适用范围。

参考文献

- [1]岳文飞.基于疏浚土资源化利用技术的入库航道清淤工艺[J].水运工程,2023(S2):81-85.
- [2]曾庆彪.复杂地质条件下港口航道疏浚施工工艺优化研究[J].珠江水运,2025(22):9-11.
- [3]黄宗安.不同水文条件下的航道清淤工艺参数优化研究[J].珠江水运,2025(15):37-39.
- [4]何振洲.基于资源化利用技术的入库航道清淤与疏浚土处理工艺研究[J].珠江水运,2024(22):40-42.
- [5]刘自强,蒋晓路.极端气候下港口航道泥沙淤积机理与高效清淤技术优化研究[J].中国建筑,2025,8(16):43-46.