

激光水深测绘技术在内河航道淤积区疏浚施工精度控制中的应用研究

雒磊

(四川港航建设工程有限公司, 四川 成都 610047)

摘要 激光水深测绘技术具有高精度、高效率及大范围实时获取水深信息的优点, 已成为内河航道淤积区疏浚施工精度控制的重要手段。本研究针对淤积区地形变化快、施工环境复杂的特点, 构建了激光测深数据获取、处理与施工控制的技术流程, 典型疏浚区段应用验证了其适用性。研究结果表明, 该技术可提升水下地形模型精度, 减少浅水、浑水条件下传统测量的误差累积, 增强施工断面控制能力, 提高疏浚成形质量, 为精细化管理提供有益参考。

关键词 激光水深测绘; 淤积区; 疏浚施工; 精度控制; 内河航道

中图分类号: TN24; U61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.042

0 引言

内河航道淤积区形态变化频繁复杂, 常规测深在浅水、多泥沙环境受限, 疏浚施工精度难保持稳定。激光水深测绘技术凭借高分辨率与快速成图能力, 为动态水下地形获取提供新路径, 清晰呈现淤积区特征, 为施工精度控制筑牢数据基础。随着航道高质量治理需求持续增加, 复杂水域高效可靠疏浚控制的实现已成行业关注的焦点。因此, 探讨激光水深测绘技术适用性与应用成效, 可推动航道疏浚向精细化、智能化发展。

1 内河淤积区疏浚施工精度受限的主要因素分析

内河淤积区地形变化受水沙动力显著影响, 河床形态短时间内即可发生冲淤交替, 疏浚施工依赖的水下地貌信息持续不稳定, 传统测深多依赖单波束或多波束声呐, 高含沙水体中易出现信号衰减、回波散射增强等问题, 获取的水深数据存在噪声大、覆盖率不足、浅滩区域空白等缺陷^[1]。淤积区泥沙粒径细、悬浮浓度高, 水体光学与声学特性变化明显, 测深结果随环境条件波动, 难以为疏浚施工断面控制提供连续可靠的数据基础。通航压力较大的河段, 水流紊动增大, 水下地形扰动频率提升, 施工计划常因测深信息滞后无法精确匹配实际作业需求。

施工精度受限的另一关键原因是淤积区材料组成复杂, 软质淤泥层厚度不均, 局部夹杂硬质杂物或残留构筑物, 施工设备推进疏浚时易出现吃力不足、超

挖或欠挖, 机械铲刀或吸头在不同沉积物界面切削阻力差异较大, 缺乏水下地形数据与剖面模型支撑, 施工参数难以实时调控。淤积区通航船舶频繁, 水下螺旋桨扰动加速泥沙再悬浮, 清淤作业区域能见度和水动力环境进一步恶化, 测量设备难以长时间稳定作业。疏浚工程常用的事前测量、过程跟踪与验收测量存在时间差, 淤积持续发生使河床形态短时间内可能出现新变化, 施工单位面对的数据常与真实水下地貌存在偏差, 影响施工断面控制精度。

测绘与施工组织脱节亦是制约精度的重要因素。部分河段施工需在限定通航窗口内完成, 测深、数据处理与施工指挥需在有限时间内循环进行, 传统测量方式在数据解析、网格化建模与成果输出耗时较长, 施工信息更新不及时, 淤积区缺乏统一细化的动态地形监测体系, 测绘成果与施工现场缺乏实时联动, 调度部门难以及时掌握施工断面变化趋势。施工船舶定位系统精度不足, 会造成理论施工线与实际施工轨迹偏移, 地形变化快的河段, 这类偏移对疏浚成形质量的影响被进一步放大, 淤积区在沉积环境、水动力条件、材料属性和作业管理等方面均存在复杂性, 传统测深方式在精度与时效上难以满足精细化施工需求, 成为制约疏浚精度的重要因素。

2 激光水深测绘技术在复杂水域中的适用机理

机载激光测深系统与多波束测深系统一样, 属于条带式全覆盖测深系统。然而不同的是, 多波束测深

作者简介: 雒磊 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 航道整治与疏浚工程。

系统的条带式测深是通过采用发射、接收指向性正交的两组换能器阵,通过点源声波幅度和相位的控制,实现波束形成,一次获得与航向垂直方向上几十个甚至几百个海底地形数据来实现的。机载激光测深系统则是通过扫描装置的转动,从而随着飞机的飞行,激光点在水面形成了条带状的全覆盖水深测量。由于扫描装置的不同,机载激光测深系统的扫描方式被分为直线、弧线、圆形和椭圆形四种。激光水深测绘技术在复杂水域的适用性,依托光学测距原理与高频脉冲激光回波处理机制共同实现,绿光激光可穿透浅水与中浑浊度水体,能量在水界面与水底形成双回波特征,为水深计算赋予可分离性与高精度,激光束发散角小、点位密度高,河道弯曲、滩槽交替及淤积变化显著区域可保持稳定测点分布,对浅滩、坡脚、冲刷坑等细微地形捕捉能力突出^[2]。激光信号在浅水与复杂河床构型条件下噪声干扰更低,不会因多路径反射与水下障碍物引发回波紊乱,提升水底识别能力,结合机载平台快速扫频特性,短时间内可获取高分辨率水下数字地形模型,为淤积区水深测绘提供持续密集的数据支撑。

在动态水域环境中,该技术借助激光点云处理算法区分浑水中散射光与有效回波,波形分解、能量阈值判别、回波时延校正等模型,可有效剔除漂浮物、气泡群及水体浑浊引发的杂散信号,提升水底回波提取可靠性。复杂流速场下水面扰动引发激光入射角变化,测绘系统借助惯性测量单元与姿态解算模型,实时修正激光发射方向及回波路径,保障测深结果几何精度。机载激光测深可整合近岸地形测绘功能,实现水陆一体化数据获取,河岸线移动明显、淤积与冲刷交界频繁变化区域,能实现连续地形表达,为后续疏浚精度控制提供完整空间参考框架。

多泥沙内河淤积水域中,淤积物颗粒的粒径分布、悬浮浓度及光学吸收特性,对测深精度影响显著。激光水深测绘系统针对性选取特定波段绿光激光源,搭配定制化水体光学参数反演模型,可在一定阈值范围内补偿水体吸收与散射作用引发的激光信号衰减,即便是浑浊度波动频繁的淤积区域仍能稳定维持有效水体穿透能力。回波强度分析可精准区分软质淤泥层、水下硬质构造及密度差异区域,提升复杂水底结构识别性能。针对河床快速演变特性,该技术可高时效完成重复测量,构建多期连续激光点云序列,从地形时序变化趋势中精准识别沉积速率与演变方向,推动疏浚施工控制从静态数据依赖转向动态数据驱动模式,为复杂水域精准疏浚作业奠定坚实的技术基础。

3 基于激光测深的疏浚精度控制流程构建

激光测深构建疏浚精度控制流程的核心是构建贯穿数据获取、三维建模、施工指令生成与动态校核的协调体系,让测深成果与施工过程形成对应关系,激光测深平台进入作业水域,借助高频脉冲激光回波记录完成大范围高密度点云采集,河床起伏显著或淤积堆高不均区域,可经多航线叠加提升覆盖完整性^[3]。点云数据完成姿态、时间与空间坐标统一校正后,结合水面波动补偿模型、光学衰减修正模型重建回波,最终生成的水下表面可达厘米级纵向精度,该阶段成果作为疏浚设计断面基础数据输入,为后续施工控制提供地形参照。

技术流程中段,激光测深点云需转化为工程指挥可用的数字地形模型,经网格化表达、坡度分析与断面线提取,完成目标疏浚深度与现状地形的差值分析,系统依据差值矩阵生成施工控制图层,施工设备可在导航系统实时读取待挖深度、边界线位置与作业限制区域,水体浑浊度变化或淤积速率偏高易引发地形变化偏差,流程中增设动态阈值判断模块,对快速沉积风险区域预警,触发局部补测程序。施工指令生成环节融合地形模型与疏浚船定位系统,赋予施工路径规划连续性与自适应性,提升设备挖削轨迹与设计断面的匹配度。

施工持续进行时,激光测深数据按预设时间间隔或作业进度阶段更新,短周期内捕捉地形变化并反馈至控制系统,动态监测成果进入滤波、配准与时间序列分析模块,生成实时差异图并与疏浚目标比对,即时识别超挖、欠挖及局部反淤区域,系统经控制台向施工设备反馈新深度指令,精细调节挖削强度、推进速度与路径位置。断面线附近关键位置,可依据激光点云密度设定更高检测精度,确保边坡角度与槽底平整度符合施工要求,流程快速循环中持续更新疏浚参考面,推动精度控制从离散测量模式转向连续监测模式,保障整体施工过程稳定的几何精度与空间一致性。

4 典型淤积区疏浚段的技术应用与精度验证

在典型淤积区疏浚实践中,激光测深技术应用始于目标河段全面扫描,高密度点云重建淤积形态动态变化,提供后续分析所需精确空间数据。淤积区多呈现细颗粒沉积占比高、地形过渡突变、软硬界面混杂特征,传统声学测深难以准确识别真实底界,激光测深在此环境下保持稳定数据穿透能力,浅滩、坡折带及局部冲刷坑等地貌单元可维持均匀点位分布^[4]。点

云解算融合多回波分离技术,有效区分水底与水上结构回波信号,提升地形模型细节表达度,初始地形模型清晰呈现淤积分布范围、堆积厚度变化及局部沉积中心,为疏浚强度分区、施工顺序设置及设备功率配置提供可靠依据。

在疏浚施工过程中,需在不同施工阶段持续获取多期测深数据,检验激光测深技术空间精度与动态监测能力,点云序列时间维度叠加分析可反映河床实时变化,短周期内识别槽底成形形态与设计断面的偏差,施工船结合高精度定位与激光测深成果完成路径校核,挖削刀头或吸头位置误差控制在厘米级。局部区域出现反淤或淤泥液化引发的塌边趋势时,点云纵向剖面变化可即时暴露异常区域,系统随即调整施工参数并触发局部补挖流程,保障槽底平整度与设计深度一致。水流紊动较强河段,激光测深依托惯导系统实时修正姿态扰动,获取数据保持稳定几何精度,为施工控制提供可连续追踪依据。

施工完成后的精度检验阶段,最终点云与设计地形的差异分析可直观呈现施工断面成形质量。差值模型揭示超挖、欠挖区域,反映边坡线坡比合理性、槽底微起伏残留及局部回淤迹象,差值网格统计支撑精度验证量化疏浚效果,帮助施工单位掌握平均偏差、最大偏差、体积误差等关键控制指标,激光测深高分辨率特性提升指标计算可靠性,浅滩及形态变化频繁区段,传统方法易出现的空白带与误差累积显著减少。精度验证结果为完善施工参数、优化作业组织方式及评估淤积动态提供全面数据支撑,推动疏浚控制从经验式判断转向精细化量化管理。

5 激光测深辅助疏浚控制的成效提炼与方法总结

激光测深在疏浚控制中的成效源于高密度点云构建的连续地形表达,淤积区复杂多变的河床形态被准确捕获,施工区域空间信息保持实时更新,高分辨率测深成果清晰呈现槽底起伏、边坡过渡及软硬界面分布的结构特征,为疏浚参数设定提供精细化依据^[5]。点云数据在差异分析中表现突出,多期序列构建可量化表达淤积速率、冲刷趋势及局部沉积中心移动轨迹,赋予疏浚控制空间预测能力,快速覆盖能力提升大范围作业区扫描频率,测量环节不再制约施工进度,整体作业组织的流动性与协调度同步提升。

在持续施工控制中,激光测深与导航定位系统、施工机理模型紧密耦合,控制方式从静态分段式转向动态跟踪式,点云实时配准后生成的差值矩阵,助力施工设备精确识别当前作业点深度偏差,系统对偏差

矢量化处理,自动调整挖削路径、推进速度及刀头姿态控制参数,使设备挖削轨迹与目标断面保持收敛关系。复杂河段水动力变化引发的局部反淤,可通过激光测深快速识别并纳入补挖流程,动态环境下仍能保障施工断面稳定性可控。在边坡控制上,高密度点云强化坡脚线识别能力,施工人员可依据实时坡度曲线调整作业方式,避免过度切削导致坡面失稳,也防止欠挖形成的陡直界面影响后续维护。

施工完成后的质量评估阶段,激光测深三维表达优势将工程质量控制从点状抽查模式升级为面状全覆盖模式,点云差异统计可使疏浚体积、边界线偏移、槽底平整度及异常区域分布以量化指标呈现,提升验收过程的客观性与可追溯性。淤积活动频繁、地形易重塑的河段,多期点云序列能揭示施工后的短期回淤趋势,助力管理部门及时制定维护决策,延长疏浚成效保持周期。激光测深在疏浚控制中形成的完整方法体系,使测量、建模、施工与检验形成闭环,让复杂水域施工精度控制具备高频修正、高度透明与高可靠特征,为内河航道淤积区精细化治理提供稳定技术支撑。

6 结束语

激光水深测绘技术在淤积区疏浚施工中的实践,为复杂水域精度控制提供了可靠的数据基础与高效技术路径。高密度点云的连续表达、动态更新能力及与施工系统的深度耦合,推动了传统静态测量作业方式转向实时监控与精细化调控。淤积区河床快速变化带来的地形不确定性,经激光测深有效削弱,疏浚断面、槽底形态与施工轨迹保持更高一致性。该技术在应用流程、验证方式与控制策略上形成完整体系,展现出多类型内河航道适用潜力,可为后续治理维护奠定坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] 朱淑丹.面向电力系统稳定性的高精度功率器件控制策略设计[J].产业创新研究,2025(22):97-99.
- [2] 贺蜀光,丁勇,陈文秀,等.三氟化氯制备生产线提高氯气流量控制精度的方法[J].化工自动化及仪表,2025,52(06):1006-1009.
- [3] 林培章.南澳河综合整治中的护坡疏浚施工关键技术研究[J].水利技术监督,2025(08):315-318.
- [4] 廖君伟.水下地形复杂区域航道疏浚施工工艺创新研究[J].珠江水运,2025(07):47-49.
- [5] 谢永春,严林,马丽媛.航道施工中耙吸挖泥船疏浚施工数据深度挖掘与产能优化[J].珠江水运,2024(22):118-120.