

# Exploration of Precise Positioning Technology for Underwater Dredging of Cutter Suction Dredgers

Xian Zhao

Anhui Construction Engineering Water Resources Development Investment Group Co., Ltd., Bengbu, Anhui, 233000, China

## Abstract

Underwater dredging is an important part of waterway dredging, port management, and water environment management. The cutter suction dredger has gradually become well-known for its high efficiency and sustainability. However, due to its working environment being affected by various factors such as water flow interference, water obstruction, and complex terrain, its underwater positioning accuracy is insufficient, which can easily lead to incomplete dredging, over excavation, and under excavation, seriously limiting the quality and efficiency of construction. This project focuses on the characteristics of suction dredging operations, analyzes their core requirements and evaluation criteria, explores their applicability, establishes a multi-source joint positioning technology system, clarifies the fusion mechanism and collaborative positioning mode of satellite, acoustic, and inertial navigation positioning technologies, and proposes a joint positioning method based on satellite acoustic inertial navigation. It is expected to lay a technical foundation for precise underwater dredging operations of suction dredgers and promote the intelligent and precise development of dredging engineering.

## Keywords

cutter suction dredger; Underwater dredging; precise positioning

# 绞吸式挖泥船水下清淤精准定位技术探究

赵贤

安徽建工水利开发投资集团有限公司, 中国·安徽 蚌埠 233000

## 摘要

水下清淤是航道疏浚、港口治理和水环境治理的重要内容, 绞吸挖泥船以其高效率 and 持续性的特点, 已逐渐被人们所熟知, 但由于其工作环境受水流干扰、水体遮挡和地形复杂等多方面的影响, 使得其水下定位精度不足, 容易造成清淤不彻底、超挖欠挖等问题, 严重限制了施工的质量和效率。本项目以绞吸疏浚作业特点为研究对象, 剖析其核心要求和评判准则, 探索其适用范围, 建立多源联合定位技术体系, 阐明卫星、声学、惯性导航三种定位技术的融合机理和协作定位模式, 提出基于星-声-惯导的联合定位方法, 期望为绞吸式挖泥船水下清淤精准作业奠定技术基础, 促进疏浚工程智能化和精准化发展。

## 关键词

绞吸挖泥船; 水下清淤; 精准定位

## 1 引言

在我国内河航道基础建设和水环境整治的常态化背景下, 我国的水下清淤作业对作业精度的需求不断提高, 而绞吸挖泥船是我国最重要的清淤设备, 其水下定位精度关系到清淤质量、施工效率和安全。目前由于受到水中复杂环境的影响, 常规定位方法存在定位滞后、定位精度低等问题, 难以适配深水、复杂地形及动态作业工况的需求, 严重成为我国航道建设向智能化方向发展的瓶颈。因此这就要求相关部

门便需要对其作业原理和关键技术进行系统的剖析, 建立多源信息融合的精准定位技术体系, 探索其在复杂工况下的精准定位与清淤作业的协同调控机制, 解决我国水下精准定位的难点问题, 为提升我国航道整治的品质和水平, 推动我国水运与水环境治理产业高质量发展提供支撑。

## 2 绞吸式挖泥船水下清淤作业原理

绞吸式挖泥船采用绞刀装置、吸泥管和泥泵等设备配合工作, 以达到对水下淤泥的挖掘、输送和排放一体化。在工作过程中, 采用锚缆定位或动力航行来调节其定位, 绞刀钻进规定的水深范围内, 在电机的带动下, 对水底淤泥、砂石等沉积物进行切割, 与此同时, 泥浆泵产生负压, 通过

【作者简介】赵贤(1988-), 男, 中国山东郓城人, 本科, 高级工程师, 从事水利工程研究。

吸泥管将挖掘后的淤泥混合液抽吸到指定堆泥区或货船上。整体工作过程需要精确地控制刀盘在水下的位置、挖掘深度和切割速率，同时还要考虑到船体的稳定性<sup>[1]</sup>。由于水下的不可见性、水流速度和地形变化等因素，极易造成绞刀头的位置偏移，从而造成超挖或欠挖，从而加大了工程返工成本，所以精准定位是保证排泥工作质量的关键条件。

### 3 水下精准定位核心需求与评价标准

#### 3.1 清淤作业对定位精度的要求

绞吸式挖泥船在水下排沙时需要根据不同的施工环境和操作对象进行精确的定位，其关键在于对绞刀头在水中的三维坐标进行精确控制。在航道疏浚作业中，为保障通航安全，必须保证航道底高程误差控制在 $\pm 10\text{cm}$ 内，以防止浅点遗留或过度开挖对航道地基造成损害。港口泊位清淤既要考虑平整度，又要考虑深度精度，定位误差需控制在 $\pm 8\text{cm}$ 内，才能保证船舶停靠承载要求；在水环境整治与疏浚过程中，需要对污染淤泥区域进行精准定位，以防止对洁净水体区域的干扰，其定位精度需达到 $\pm 5\text{cm}$ 。同时需要对绞刀头的动态位移进行实时采集，确保定位数据与实际作业位置同步，以此来为操作调整和控制，避免因定位误差而导致的施工质量问題。

#### 3.2 定位系统的稳定性、实时性、抗干扰性

在复杂的工作条件下，对水下清淤定位的稳定性、实时性和抗干扰能力提出了更高的要求。在稳定系数层面，为避免设备故障或信号中断等原因造成的定位失效，保证工作全过程中的定位数据的连续性和可靠性。实时性要求将位置数据采集、传输和处理时间限制在50毫秒之内，完成绞刀头位置、船体姿态的动态实时反馈，为作业参数调控提供即时支持，消除数据滞后造成的操作误差。在抗干扰上则要针对水下声学噪声、电磁干扰、水体混浊和卫星信号遮挡等问题，通过对信号滤波和抗干扰算法的优化，保证定位数据的精度，增强对复杂水下环境的适配能力。

## 4 绞吸式挖泥船水下清淤精准定位技术体系构建

### 4.1 单一精准定位技术原理

#### 4.1.1 卫星定位技术的应用

绞吸式挖泥船的水面船体定位是十分关键的内容，此项工作的开展需要以GPS为基础，结合差分定位技术，以适应水下工作环境，能够显著提高船舶的定位精度。磁县工作的关键思想是利用船舶上安装的卫星接收设备，利用多个卫星的导航信号获取船舶的三维坐标、航行速度和姿态等信息，并利用差分基站校正对卫星轨道误差和电离层干扰进行修正，最终达到厘米级别的定位精度<sup>[2]</sup>。在工作过程中，也要利用GPS来控制船体的总体位置，为船体的锚定和航行调整提供参考，并协助确定绞刀头在水中的大概位置。这种方法具有定位范围广、无需水下布设设备、易于操作等优点，

适合在开阔水域进行工作，但期间可能会受到水体遮挡、建筑物遮挡和恶劣气候等因素的干扰，导致难以对水下绞刀头进行精确定位，需要联合其他水下定位方法来解决水下定位的不足问题。

#### 4.1.2 声学定位技术的应用

基于水声信号在水下传输的特点，相关人员需要研究基于声波在水中的传播特性，对水下非可见环境进行三维坐标测量。目前普遍采用的方法有超短基线(USBL)、短基线(SBL)和长基线(LBL)三种，其中超短基线(USBL)定位系统，具有体积小、易于安装的特点，在绞吸式挖泥船的排沙过程中得到了越来越多的使用。其基本思想为在船体底部设置一种声学换能器，将声信号发送到绞刀头搭载的应答器，转发器在收到该信号后，将该信息反馈给相应的应答波，换能器捕获该响应信息，并对该响应信号进行处理，得到该声波传播时间，再与声波的传播速率相关联，得到绞刀头在水中的三维坐标。还要根据实际需求提出一种定位精度可达厘米级、不受水体浑浊度影响的水下绞刀头精确定位方法，但是受到水下声噪声和水流折射等因素的影响，其定位范围有限，需要对换能器与应答器进行适当布置以提高其定位的稳定性。

#### 4.1.3 惯性导航技术的应用

惯性导航技术是一种不依靠外界信息的自主式定位技术，利用IMU获取目标物体的加速度和角速度等信息，结合积分运算得到目标的位置、速度和姿态等信息，实现适配动态作业工况。绞吸式挖泥船的惯性导航装置以绞刀头和船体为主体，能够对绞刀头的动态位移、船旋转角度及船体的姿态变化进行实时监测，特别是在卫星信号中断或声学信号受干扰的情况下，能够持续地提供定位数据，保证了清淤作业的持续定位。其具有抗干扰能力强、响应快、可自主定位等优点，可有效解决卫星与声学定位技术卫星与声学定位技术的缺陷，适用于复杂的水下环境，但由于累积误差，导致定位精度降低，需要结合其他定位技术对其进行修正，以保证定位的可靠性<sup>[3]</sup>。

### 4.2 多源融合精准定位技术

#### 4.2.1 多源定位数据融合的核心逻辑与算法

多元定位数据融合的核心思想是推进卫星定位、声学定位和惯性三种定位方法相结合，通过数据融合算法消除单一技术的定位缺陷，从而达到对水下清淤的全方位高精度定位。其关键是通过统一校准、滤波去噪与信息互补，结合各技术适配场景动态分配定位权重，实现定位系统整体性能优化。目前主流的融合算法有卡尔曼滤波算法、粒子滤波算法和神经网络算法三种，卡尔曼滤波算法是目前最为流行的算法，利用预测-更新的迭代方式来校正多源定位的误差，滤除随机干扰信号，获得最优定位结果。

此种算法能有效处理动态工况下的定位数据波动，在保证定位精度和实时性的前提下，通过自适应调整滤波参

数, 适配水流、风浪等环境变化。粒子滤波算法适用于非线性、非高斯系统, 能提升复杂工况下的定位稳定性; 在此基础上神经网络算法可通过样本训练优化融合策略, 进一步提升定位精度与抗干扰能力。

#### 4.2.2 船体 - 挖头协同定位模型的构建

船体 - 挖头协同定位模型的关键在于如何将船舶姿态与绞刀头的位置进行联系, 并将二者的定位数据进行协调, 以解决当前船舶作业中存在的绞刀头定位与船舶定位分离的难题。首先, 相关人员需要对船体与绞刀头的几何参数 (如船体长度、绞刀臂长度、绞刀臂悬挂高度等) 的提取, 并在此基础上进行建模, 从而建立三维几何坐标系, 将船体定位数据与绞刀头定位数据统一到同一坐标体系中。利用卫星定位技术获得船体的实时位置与姿态 (俯仰角、横滚角、航向等), 并与惯性导航数据相融合, 获得绞刀臂的摆角、伸缩量等信息, 并利用声学定位对其在水中的真实位置进行校验, 从而建立多参数耦合的协同定位模型。在此期间, 实时更新船体与绞刀头的动态参数, 精确推演绞刀头的位置, 并根据船体姿态变化, 提前预判绞刀头的位移趋势, 为作业调控提供提前量, 消除因船体晃动导致的绞刀头定位偏差, 提高整体定位精度与作业稳定性。

#### 4.2.3 动态工况下定位数据的实时校正

在动态工况中, 由于水流、风浪、船体的晃动以及绞刀头的切削反作用力等影响, 极易引起定位数据的误差, 需要构建定位数据实时校正机制, 以保证其高精度, 为此便需要从三大方向切入。首先是利用惯性导航技术获取的动态参数, 结合水流速度、风浪等因素, 建立误差预测模型, 提前预判定位偏差趋势; 其次是多源数据比对校正, 利用卫星、声学 and 惯性导航技术的定位数据, 进行实时的对比, 筛选异常数据, 借助融合算法修正偏差, 特别是在单一技术定位失效的情况下, 依托其他技术数据完成校正, 以保障定位连续性; 最后是现场标定校正, 通过水下基准点标定和浅水区实测比对, 更新定位系统参数, 消除因设备老化和环境变化引起的系统性误差。

### 4.3 定位技术和清淤作业的协同控制

#### 4.3.1 定位数据对挖泥深度、速度的调控机制

在实际操作期间, 相关人员以 RTK-GPS+DGPS 融合定位技术结合声呐测深仪获取的定位数据为核心, 为排泥过程的精确控制奠定基础。利用声学定位与惯性导航技术获得的绞刀头在水下的深度数据, 并与预设清淤清淤深度相比较, 为排泥过程的精确控制奠定数字化数据基础。利用声呐测深仪获得绞刀头在水下的实时高程数据, 并与预设的数字高程模型 (DEM) 中的设计底高程相比较, 在发现欠挖时, 通过调整绞刀桥梁向下移动, 增加开挖深度; 在发生超挖情况下, 将绞刀桥梁抬起, 减小开挖深度, 并根据姿态传感器反

馈的船体横摇、纵倾数据, 修正绞刀头的测深误差, 以保证清淤深度满足工程设计要求。并结合淤泥厚度、绞刀电流变化反馈的土质硬度等地质参数, 对绞刀挖掘作业过程进行动态控制: 在淤泥较厚且坚硬的情况下, 减小船体航行速度, 提高绞刀旋转速度, 配合分层开挖 (每层 0.5-2m) 原则确保挖掘彻底, 结合疏浚范围、边坡坡度的预设要求提高清淤精度。

#### 4.3.2 精准定位和清淤效率的平衡

如何兼顾精确排沙和排泥效率是水下清淤的核心问题, 需要通过对分条开挖的清淤方案和数字化定位的施工工艺的优化来达到二者的协同增效, 避免“重精度轻效率”或“重效率轻精度”的问题。一方面, 根据作业场景及本工法适用的 II 级航道、II - III 级疏浚土质要求, 对高精度需求的区域, 如港池疏浚、码头基槽开挖、航道边坡施工等, 采取 10 次/s 的高频率定位采样和厘米级的 RTK-GPS 定位精度标准, 结合多波束测深仪实时复核开挖面, 确保操作质量。另一方面, 对于需要高效处理的区域, 如浅水区、大面积水库湖泊清淤等, 可适当减少定位采样频率 (每秒 3-5 次), 结合 40m 标准分条、不足 30m 垂直分条的开挖原则提高工作效率, 同时保留 5m 以上的条带重叠区, 避免欠挖土壤形成, 兼顾效率与基础施工精度。在此基础上, 还需要针对性地研究 RTK-GPS、DGPS、姿态传感器、声呐测深仪的多源融合定位技术, 降低定位数据的处理延时, 减少由于定位等待造成的效率损耗; 打造优化船体 - 绞刀头协同定位模型, 实现对绞刀头位移的预测, 从而缩短作业调整时间。同时构建基于实时定位数据、泥浆输送监控数据与清淤作业进程的动态优化机制, 实现作业参数与定位策略的自适应调整, 在保证设计底高程、边坡坡度等位置精度指标的前提下, 结合泥浆浓度、流速的实时监测数据适当提升作业速度。

## 5 结语

综上所述, 绞吸式挖泥船水下清淤精准定位技术是提升疏浚工程质量与效率的核心支撑, 针对水下复杂环境导致的定位精度不足、稳定性欠佳等问题, 相关单位可以分析卫星、声学、惯性导航三种单一定位技术的优势与局限, 整合多源定位数据构建协同定位模型, 优化动态工况下的误差校正方案, 实现了船体与绞刀头的精准联动, 同时建立定位与清淤作业的闭环调控机制, 平衡了定位精度与作业效率。

### 参考文献

- [1] 冯宇. 绞吸式挖泥船在海上施工中的应用与优化[J]. 区域水利水电技术与发展, 2025, (00): 118-122.
- [2] 周继辉, 路萍. 绞吸挖泥船疏浚成本分析与控制策略研究[J]. 水运工程, 2025, (08): 250-254.
- [3] 何顺鹏. 河道治理工程疏浚与护坡施工技术应用研究[J]. 南国博览, 2025, (03): 80-83.