

复杂水域绞吸船清淤疏挖的精准控制技术应用

许靳东¹ 彭宇最²

1 枣阳市禹顺水利工程建设监理咨询有限责任公司

2 湖北禹龙水利水电工程有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i2.6828

[摘要] 在复杂水域环境下开展清淤疏挖作业,对绞吸船的作业精度、稳定性与安全性提出了更高要求。传统疏浚方式难以满足当前高效率、低扰动、环保型工程需求,因此引入精准控制技术成为提升绞吸船作业性能的关键路径。本文围绕复杂水域中绞吸船清淤疏挖过程中的核心环节,系统阐述定位与导航系统、绞刀系统、泥浆输送系统以及智能监控与决策系统在精准控制方面的技术应用。通过多传感器融合实现高精度定位,依托动态路径规划保障航行安全;采用自适应调节机制优化绞刀运行参数,确保挖掘深度精确可控;利用实时监测手段调控泥浆流量、浓度与输送压力,维持系统稳定运行;构建集成化智能监控平台,实现作业状态感知与辅助决策支持。

[关键词] 复杂水域; 绞吸船; 清淤疏挖; 精准控制技术

中图分类号: U698.7 文献标识码: A

Precision Control Technology Application for Dredging and Excavation by Cutter Suction Dredgers in Complex Waters

Jindong Xu¹ Yuzui Peng²

1 Zaoyang Yushun Water Conservancy Engineering Construction Supervision Consulting Co., Ltd.

2 Hubei Yulong Water Conservancy and Hydropower Engineering Co., Ltd

[Abstract] Carrying out dredging and excavation operations in complex water environments has put forward higher requirements for the accuracy, stability, and safety of cutter suction ships. Traditional dredging methods are difficult to meet the current requirements of high-efficiency, low disturbance, and environmentally friendly engineering. Therefore, introducing precise control technology has become a key path to improve the operational performance of cutter suction dredgers. This article focuses on the core process of dredging and dredging in complex water bodies using a cutter suction dredger. It systematically elaborates on the technical applications of positioning and navigation systems, cutter systems, mud conveying systems, and intelligent monitoring and decision-making systems in precision control. Realize high-precision positioning through multi-sensor fusion and rely on dynamic path planning to ensure navigation safety; Adopting an adaptive adjustment mechanism to optimize the operating parameters of the cutter, ensuring precise and controllable excavation depth; Using real-time monitoring methods to regulate mud flow rate, concentration, and transport pressure to maintain stable system operation; Build an integrated intelligent monitoring platform to achieve job status perception and auxiliary decision support.

[Key words] complex water bodies; Cutter suction boat; Dredging and excavation; Precision control technology

引言

随着内河航道整治、湖泊生态修复及港口维护等工程持续推进,清淤疏挖作业日益频繁,作业环境也日趋复杂。复杂水域通常具有水流紊乱、水深变化剧烈、底质不均、障碍物分布密集等特点,对绞吸船的作业稳定性与控制精度构成显著影响。在此类环境中,若仍沿用传统粗放式疏浚模式,不仅难以保证施工

质量,还可能引发设备损坏或生态扰动等问题。因此,亟须将现代精准控制技术融入绞吸船作业全过程,以提升其在复杂条件下的适应能力与作业效能。精准控制技术涵盖从空间定位到执行机构调控、从流体输送到智能决策等多个维度,其有效集成可显著增强绞吸船在动态、不确定环境中的自主作业能力。本文基于绞吸船清淤疏挖作业流程,分别从定位导航、绞刀作业、泥

浆输送及智能监控四个方面,系统探讨精准控制技术的具体应用路径,为相关工程实践提供技术参考。

1 定位与导航系统的精准控制

1.1 多传感器融合定位技术

在复杂水域环境中,单一传感器难以达成高精度与高可靠性的定位需求。全球导航卫星系统虽能够提供基础位置信息,然而在桥梁遮挡、峡谷地形或者电磁干扰区域,其信号容易受到遮蔽或者出现失真情况,进而致使定位误差增大。惯性导航系统虽具备短时高精度的特性,不过存在累积误差问题,长时间运行之后定位偏差会逐渐扩大。声学定位系统虽适用于水下目标跟踪,但是受水文条件影响较大,传播延迟与多径效应会降低其稳定性。鉴于此,采用多传感器融合定位技术成为提升定位精度的有效办法。该技术通过整合全球导航卫星系统、惯性测量单元、激光雷达、声呐以及视觉传感器等多源信息,运用卡尔曼滤波或者粒子滤波等算法开展数据融合,从而实现优势互补。在数据处理过程中,系统依据各传感器的实时置信度动态调整权重,以此确保在不同工况下均能够输出稳定且连续的位置与姿态信息。融合系统还具备故障容错能力,当某一传感器失效时,其余传感器仍可维持基本定位功能,进而保障作业的连续性。通过多传感器协同工作,绞吸船可在复杂水域中实现厘米级定位精度,为后续挖掘与航行控制提供可靠的空间基准。

1.2 动态导航与路径规划

绞吸船于复杂水域开展作业期间,需要依据实时环境的变化对航行轨迹进行动态调整,以此来规避障碍物、适应水流扰动并维持作业效率。静态路径规划难以应对突发性的水流变化或者临时障碍物的出现,所以必须引入动态导航与路径规划机制。此机制首先依靠高精度环境感知系统来获取周边水域的实时信息,涵盖水深分布、障碍物位置、流速流向等内容,并且结合船舶自身动力学模型,构建动态可行域。在此基础上,运用基于模型预测控制或快速探索随机树等算法来生成最优航行路径,从而确保路径既能够满足作业覆盖要求,又可以避开危险区域。路径规划模块与船舶控制系统紧密结合,能够将规划结果转化为舵角、推进器转速等控制指令,进而实现自动循迹。系统具备在线重规划能力,当检测到原路径不可行时,能够在毫秒级时间内生成新路径并实现平滑过渡,避免剧烈转向对船体结构或疏浚作业造成冲击。动态导航系统还会考虑潮汐、风浪等外部扰动因素,在路径生成过程中预留安全裕度,以此提升整体作业的鲁棒性。通过上述机制,绞吸船能够在复杂水域中实现自主、安全、高效的航行与定位控制。

2 绞刀系统的精准控制

2.1 绞刀转速与扭矩的自适应调节

绞刀作为绞吸船的核心挖掘装置,其运行参数直接影响疏浚效率与能耗水平。在复杂水域中,底质类型多样,从软泥到硬质黏土甚至夹杂碎石,若采用固定转速与扭矩设定,易导致设备过载或挖掘不足。为此,需建立绞刀转速与扭矩的自适应调节机制。该机制通过安装在绞刀轴上的扭矩传感器与转速编码器实

时采集运行数据,并结合液压系统压力反馈,判断当前负载状态。当检测到地质硬度增加时,系统自动降低转速以提升扭矩输出,防止电机过载;反之,在软质区域则提高转速以加快挖掘进度。调节过程由嵌入式控制器执行,采用闭环控制策略,确保响应迅速且无超调。同时,自适应算法可根据历史作业数据学习不同底质对应的最优参数组合,在后续类似工况中提前调整,减少调节滞后。此外,系统还设置安全阈值,一旦扭矩或温度超过预设限值,立即触发降载或停机保护,避免机械损伤。通过该自适应调节机制,绞刀系统可在多变底质条件下维持高效、稳定的挖掘性能,同时延长设备使用寿命。

2.2 绞刀挖掘深度的精确控制

绞刀挖掘深度会直接对疏浚断面的成型质量以及工程量控制精度产生影响。在复杂水域环境当中,因为水深起伏程度较大,且船体姿态容易受到波浪的影响,要是仅仅依靠人工操作或者开环控制,就很难保证挖掘深度具有一致性。基于此,需要构建一套基于反馈控制的深度调节系统。该系统将高精度深度传感器作为核心,能够实时对绞刀头相对于河床的实际位置进行监测,并且结合船舶纵倾、横摇等姿态数据开展补偿计算,以此消除船体运动给深度测量带来的干扰。控制单元会依据设定深度与实测值之间的偏差,借助电液比例阀对绞刀架升降油缸的伸缩速度进行调节,从而实现深度的闭环控制。在控制算法方面,采用前馈-反馈复合控制结构,前馈部分会根据船速与水流方向对深度变化趋势进行预判,提前对执行机构作出调整,反馈部分则用于消除残余误差,以此确保稳态精度。系统具备分段深度设定功能,可以根据设计疏浚断面自动对目标深度进行切换,进而实现变坡度、变高程的精细化作业。在整个调节过程中,系统能够保持响应平稳,避免因频繁大幅调整而致使绞刀冲击床底或者悬空空转,从而保障作业的连续性与成型质量。

3 泥浆输送系统的精准控制

3.1 泥浆流量与浓度的实时监测与调节

泥浆输送作为绞吸船作业链的关键环节,其流量与浓度的稳定性会直接对疏浚效率和管道磨损程度产生影响。在复杂水域开展作业时,因底质出现变化以及挖掘参数产生波动,泥浆浓度常常会出现剧烈起伏的情况,进而造成流量不稳定,甚至还会引发管道堵塞或者泵送中断的问题。为解决这一问题,需要建立起泥浆流量与浓度的实时监测和调节系统。该系统会在排泥管路中布置密度计与电磁流量计,持续采集泥浆密度与体积流量数据,并且通过数据融合算法计算出固体颗粒浓度。控制单元会依据预设的浓度与流量目标值,动态调整绞刀转速、船速以及泥泵转速等参数,从而形成多变量协同调节机制。当检测到浓度过高时,系统能够适当降低绞刀转速或者提升泥泵转速,以此稀释泥浆并维持输送稳定性,反之,则进行反向调节以避免稀浆造成能源浪费。调节过程采用非线性控制策略,充分考虑泥浆流变特性与管道阻力变化,确保控制指令与实际效果保持一致。系统具备异常预警功能,当浓度或流量偏离正常范围时,会及时发出警报并启动保护程序,防止设备受到损坏。通过

该实时调节机制, 泥浆输送系统能够在复杂工况下维持高效、稳定地运行状态。

3.2 泥浆输送压力的稳定控制

泥浆输送压力作为反映管道系统工作状态的重要指标, 其产生的波动不仅会对输送效率造成影响, 还极有可能加速管壁磨损或者引发爆管风险。在长距离且高扬程的输送场景当中, 压力控制显得尤为关键。为实现压力的稳定, 需要构建基于反馈的泥泵调速控制系统。该系统借助压力传感器对排泥管出口以及关键节点的压力值进行实时监测, 并且结合流量与浓度方面的数据, 综合判断系统的负载状态。控制单元运用变频驱动技术来调节主泥泵电机的转速, 从而匹配当前的输送需求。当检测到压力呈现上升趋势时, 系统会适度降低泵的转速, 减少能量输入, 当压力出现下降情况时, 系统则提升泵的转速以维持输送能力。控制算法采用自抗扰控制或者滑模控制等先进策略, 能够有效抑制因底质突变或者阀门动作所引起的压力扰动。系统设置了多级压力保护阈值, 一旦压力超过安全上限, 便立即触发降速或者旁通泄压机制, 以此保障管道安全。压力控制与流量、浓度调节模块协同开展工作, 形成统一的输送优化策略, 避免因单一参数调节而引发其他指标失衡。通过上述一系列措施, 泥浆输送压力能够在复杂作业条件下保持高度稳定, 确保整个疏浚流程的连续可靠。

4 智能监控与决策系统的精准控制

4.1 作业状态实时监控与故障诊断

绞吸船于复杂水域开展作业期间, 其设备运行状态呈现复杂多变态势, 依靠人工监控难以全面覆盖所有关键参数。基于此, 需要部署集成化的作业状态实时监控与故障诊断系统。该系统借助遍布全船的传感器网络, 采集涵盖定位信息、绞刀参数、泥泵状态、液压力、电气电流、温度振动等数百项运行数据, 并通过高速工业总线将这些数据传输至中央处理单元。数据处理模块采用边缘计算架构, 在本地完成初步的数据清洗、滤波与特征提取工作, 以此减少通信延迟。监控界面以三维可视化的形式呈现船舶的整体状态, 操作人员能够直观地掌握各子系统的运行情况。故障诊断模块基于规则引擎与机器学习模型双重机制, 对异常数据进行分级识别。针对已知的故障模式, 系统依据预设规则库快速匹配并定位故障源, 对于未知异常情况, 则通过聚类分析或异常检测算法识别潜在风险, 并生成相应的诊断建议。诊断结果会实时推送至操作终端, 同时记录至历史数据库, 以供后续分析使用。整个监控与诊断过程具备高实时性与高可靠性, 能够在故障初期发出预警, 避免小问题演变为重大事故, 从而保障作业的安全与连续性。

4.2 基于大数据的智能决策支持

在长期开展的疏浚作业过程中, 所积累起来的海量运行数据蕴含着十分丰富的工况规律以及操作经验, 这些能够为作业优化提供重要的决策依据。基于此, 构建以大数据为基础的智能决策支持系统成为提升绞吸船智能化水平的关键方向。该系统会先建立起统一的数据仓库, 将来自定位、挖掘、输送、监控等各个子系统的结构化与非结构化数据进行整合, 并开展标准化处理工作。在此前提之下, 运用数据挖掘技术识别不同底质、水深、流速条件下最为优化的作业参数组合, 进而形成知识图谱。当船舶进入全新作业区域时, 系统能够自动匹配相似的历史工况, 推荐初始控制参数, 从而缩短调试所需的时间。系统具备多目标优化功能, 会综合考量疏浚效率、能耗水平、设备磨损等多方面因素, 生成帕累托最优的作业方案。决策结果会以指令集的形式下发至各个执行单元, 以此实现半自动或全自动的作业模式。系统还拥有在线学习能力, 每次作业结束之后会自动更新模型参数, 持续提高决策的准确性。

5 结语

本文围绕复杂水域绞吸船清淤疏挖作业, 系统阐述了定位导航、绞刀作业、泥浆输送及智能监控四个核心环节中精准控制技术的应用路径。通过多传感器融合与动态路径规划, 实现高精度空间定位与安全航行; 依托自适应调节与深度闭环控制, 保障绞刀系统在多变底质下的稳定高效运行; 借助实时监测与压力调控, 维持泥浆输送系统的连续可靠; 结合状态监控与大数据决策, 提升整船智能化作业水平。各项技术相互协同, 共同构成面向复杂水域的精准控制体系, 为清淤疏挖工程提供坚实的技术支撑。

[参考文献]

- [1]李红静,陈海波,陆海明,等.环保绞吸船清淤作业过程对湖泊水环境的影响[J].环境工程学报,2023,17(12):3897-3905.
- [2]叶家祥,黎龙,关永恒,等.绞吸船清淤施工技术在黑臭水体综合治理中的应用[J].城市建筑,2020,17(18):185-186
- [3]郭小兵,方金玉.疏浚吹填施工中绞吸船清淤施工工艺[J].水运工程,2019,(01):208-212.
- [4]谢飞.湖泊综合整治工程绞吸船清淤标高控制施工技术研究[J].中国水运(下半月),2020,20(02):159-160.

作者简介:

许靳东(1989--),男,汉族,初级,本科,从事水利水电工程,市政工程。

彭宇最(1991--),男,洪湖市人,工程师,本科,从事工作:水利水电工程,农田水利工程,市政工程。