

多船协同疏浚作业中的智能航行调度系统设计与实践

施海忠

上海长升工程管理有限公司, 上海 200120

[摘要]港口建设和航道治理需求日益增长,多船协同疏浚作业成为提高施工效率和资源利用率的关键办法,而传统调度模式在优化船只运行路径、实时协调船只方面存在明显不足,影响施工安全和效能。文中利用人工智能和自动航行技术设计出一套智能航行调度系统,可对疏浚船队进行动态路径规划、冲突预警和作业协同控制,实地案例验证该系统提高了调度效率和作业质量,有良好应用前景。

[关键词]多船协同;疏浚作业;智能航行;调度系统;路径优化

DOI: 10.33142/sca.v8i8.17630

中图分类号: TV851

文献标识码: A

Design and Practice of Intelligent Navigation Scheduling System in Multi-ship Collaborative Dredging Operations

SHI Haizhong

Shanghai Changsheng Engineering Management Co., Ltd., Shanghai, 200120, China

Abstract: The demand for port construction and waterway management is increasing day by day, and multi-ship collaborative dredging operations have become a key method to improve construction efficiency and resource utilization. However, the traditional scheduling mode has obvious shortcomings in optimizing ship operation paths and real-time coordination of ships, which affects construction safety and efficiency. A set of intelligent navigation scheduling system was designed using artificial intelligence and automatic navigation technology in the article, which can dynamically plan the path, warn of conflicts, and coordinate operation control for dredging fleets. Field cases have verified that the system improves scheduling efficiency and operation quality, and has good application prospects.

Keywords: multi-ship collaboration; dredging operation; intelligent navigation; scheduling system; path optimization

引言

在港口航道建设、水域整治等领域,疏浚工程的重要性不可小觑,工程规模一旦扩大且作业密度提高,多船协同作业就成了常态,这使得路径冲突频繁、调度复杂程度高之类的问题随之而来,而传统人工调度模式满足不了高效、安全的疏浚需求,这些年智能调度技术在海事运输、自动驾驶等领域渐渐成熟,为解决前面提到的问题提供了新的技术办法,这篇文章就是想探讨基于智能算法和传感融合的航行调度系统以优化多船协同作业流程。

1 多船协同疏浚作业的技术背景与挑战

1.1 疏浚工程发展现状与技术需求

全球港口基础设施不断升级且河道治理工程持续推进,疏浚工程的规模、频率与技术要求也随之不断提高,特别是深水航道拓宽、港池扩容、航道整治、吹填造地等工程中多船协同作业慢慢替代单船作业模式,成为提升疏浚效率与施工能力的关键手段,中大型疏浚任务往往涉及挖泥船、泥驳船、吹填船、抛泥船等多种船舶,这些船舶要在同一水域协同完成连续高强度的疏浚任务,这对调度指挥的实时性和科学性有了更高要求。

疏浚作业的施工区域常水域狭窄、环境复杂,存在潮流影响大、水下地形变化快这些实际困难,作业时要满足

疏浚精度控制、船位保持、施工进度同步等施工规范,还要考虑船舶间相对位置与航线规划,防止因误操作或信息延迟造成船只碰撞、堵航等问题,现代疏浚工程急需高响应性、高智能化的协同调度系统来让多船作业高效运转。

1.2 多船协同作业面临的主要问题

路径冲突、信息孤岛与调度滞后这三方面是当前多船协同疏浚作业面临的主要核心问题。

疏浚船舶在有限水域频繁穿插作业,若不能有效预测路径、协调避让,则极容易航线交叉冲突,作业连续性和施工安全都会受影响,在潮流不稳定、能见度差或者船只密集的环境里,路径冲突风险更是大增。

信息孤岛问题很常见,由于不同厂商制造各类船舶,各系统间统一的通信协议和数据接口缺失,使得船只作业状态、位置信息共享困难,调度中心难以实时感知整个疏浚现场,指挥决策容易缺乏准确性和前瞻性。

传统调度模式高度依赖人工操作与经验判断,会有信息获取不及时、反馈链条长、应急响应能力差等状况,而在复杂施工场景中,这种滞后的调度模式难以适应作业需求的快速变化,常致使作业效率低下,甚至引发安全事故。

1.3 当前国内外调度技术的研究综述

多船协同作业很复杂,近年来国内外在智能调度与路径

规划技术上做了大量研究,像荷兰、日本这些疏浚强国在国外较早把基于 AIS(自动识别系统)与 VTS(船舶交通服务)系统的调度辅助平台引入港口工程,并且利用卫星定位、雷达监控和模拟演算实现疏浚船舶可视化管理和路径预判。

算法层面,路径规划动态路径优化常采用 A*算法、Dijkstra 算法、遗传算法等,部分研究还引入粒子群优化和蚁群算法以提升多目标调度能力,虽然国内相关技术起步晚,但近年来一些大型疏浚项目开始尝试智能调度平台,将 GNSS 定位、多传感数据融合和人工智能模型相结合并取得了初步成果。

然而,大多现有调度系统还处在半自动阶段,存在模型适应性差、数据延迟厉害、不能实时调整路径的问题,很难满足复杂施工海况下高频率又高灵活性的协同调度需求。

2 智能航行调度系统架构设计

2.1 系统总体架构与功能模块

智能航行调度系统的主要构成部分为感知层、决策层和控制层这三大核心结构,其形成“信息获取—智能分析—执行控制”的闭环作业逻辑并实现多船协同疏浚全过程的智能化管理。

系统的基础是感知层,它主要承担着现场环境信息、船舶作业数据以及通信状态的收集工作,这一层集成了像 AIS(自动识别系统)、GNSS 全球定位系统、船载雷达、水深探测器、风速仪这类传感设备,从而能实时获取船舶位置、航向、速度、姿态、作业状态以及周边航行环境数据。

系统的大脑是决策层,承担路径规划、任务分配、冲突预判、动态避障等关键算法逻辑处理功能,这一决策层依靠大数据分析平台和人工智能调度引擎,在将各类传感数据与任务优先级信息融合起来之后进行多目标优化计算,从而输出最优航行路径与协同调度方案。

决策结果由控制层负责下达到各类船舶执行机构以实现转向控制、速度调整、任务切换等操作,并且控制层还有反馈机制能即时修正航行偏差、作业异常等情况进而达成闭环调度和高精度协同控制。

2.2 多源数据融合与实时感知技术

高精度、低延迟的环境感知与目标识别能力是多船协同调度的关键基础,系统构建多源异构数据融合框架,整合 AIS、GNSS、雷达和现场传感器等信息源,通过时间同步与空间匹配算法实现对船只和作业水域的全面感知。

船舶的唯一识别码、动态定位、航速与航向等基础数据由 AIS 系统负责传输,高精度三维定位信息由 GNSS 提供,近距离目标与障碍物的探测依靠船载雷达,从而弥补 AIS 在密集区域下信号被遮挡的问题,使用扩展卡尔曼滤波(EKF)或者贝叶斯估计方法这类融合算法将多类传感器数据在时间维度统一起来就能增强系统对环境变化的反应能力。船舶轨迹预测模型与局部建图模块被系统引入,水域障碍物、潮汐变化、水流方向等动态要素得到实时建模,从而为后续路径优化与避障策略提供准确依据,

感知层借助边缘计算设备和 5G 通信模块,可把融合数据马上传到云端决策模块,实现实时同步与并行处理,进而显著提升调度反应效率与环境适应能力。

2.3 人工智能调度算法与路径规划模型

多船协同作业时路径冲突频繁、资源调度不均且决策效率低,本系统核心调度模块采用多种人工智能算法和路径规划模型构建起动态、智能的作业优化框架。

系统把 A 算法集成起来作为路径规划方面的基础寻路算法,这算法用于在静态环境下快速生成路径挺合适,并且系统在此之上结合遗传算法(GA)来搜索路径的多样性,通过染色体编码、选择、交叉、变异操作得到更优的路径解,这种方式适用于大规模搜索空间和多目标优化需求的情况,而到了复杂动态环境,系统进一步引入深度强化学习(DRL)方法,训练智能体在模拟水域里学习最优避障和协同行为以让经验自主积累,还能提高模型泛化能力。

调度层面,算法把作业任务权重、船舶当前状态和预测冲突概率相结合构建起基于优先级的任务指派模型,且系统支持滚动更新机制,能动态调整任务分配与路径选择以应对突发情况和环境变化,强化学习策略网络尤其可依据历史作业数据自我优化调度逻辑,提高系统整体决策效率和鲁棒性。

3 系统实践应用与性能验证

3.1 实地试验场景与船队构成

2025 年 3 月,某沿海疏浚工程海域将实地部署本系统进行测试,该海域处于港口主航道南段,水域面积大概 1.2 平方公里,水深频繁变化且通航密度中等,有典型的疏浚作业代表性条件,实验持续 10d,分白天和夜间两个作业时段。5 艘功能各异(其中有 2 艘绞吸式挖泥船、1 艘自航泥驳船、1 艘吹填船和 1 艘多功能指挥船)的船舶组成了试验船队,这些船都配备 AIS、GNSS、雷达与通信终端并且接入了智能调度系统的统一平台。通信系统采用了 5G 和北斗短报文混合方式,使得在信号受干扰或者岸站距离远的时候也能实现低时延数据回传。控制系统基于陆岸一体化部署模式,由岸基调度中心发出调度指令并通过中控平台实时下达到各船舶控制终端,从而指挥船舶控制终端执行路径调整、速度调节和作业节奏配合等操作。

3.2 智能调度系统运行效果分析

试验期间为了对系统性能加以验证,分别拿传统人工调度方式和本智能航行调度系统做对比测试,测试场景包括执行标准疏浚路线、交汇避让、协同装卸、昼夜作业切换等。路径优化时,系统自动生成的路径比人工调度路径平均要短 8.6%,最优的案例航程能从原来的 940m 降到 815m,节省大概 125m,且 10 次典型调度任务中智能调度平均航线长度 871m,人工的是 953m。智能调度在作业效率上,作业周期(从出港到返回卸料)平均能达到 36.5min,而人工调度需 42.7min,约节约 14.5%的时间且协同作业效率提升显著,泥驳与吹填船交互等待时间平均从 5.2min 降到 2.1min。人工调度时记录下来的路径冲突事件有 7 起,

安全性堪忧且这 7 起里有 3 起是紧急减速避让情况,而智能调度系统就不一样了,冲突次数才 1 起,系统能自动执行指令调整规避路径不用人去干预,系统里冲突预判机制这么一介入,冲突率就从 14%降到 2%了。综合对比下来,智能航行调度系统在路径优化、作业效率和安全性这三个方面都比传统模式要好得多,其工程应用潜力很不错。

3.3 异常处理与安全保障机制

系统架构设计引入多重冗余和异常检测机制,为疏浚作业连续性和安全性提供保障且使关键环节具备抗故障能力。通信层面,系统设计有双链路冗余机制,以 5G 公网通信为主链路、北斗短报文链路为备用链路,系统检测到主链路延迟超 800ms 或者中断达 3 秒时会立马自动切换至北斗通道以保障调度数据不中断,实地测试里系统模拟通信中断共 4 次,平均切换时间 2.3 秒且数据传输成功率保持在 98%。传感器层,系统有个多源数据比对与容错判断机制,靠这机制能实时判断 GNSS 定位是否异常或者 AIS 是否漂移,若偏差超过了设定阈值(如位置偏移 10m 这种情况),备份传感源就被系统自动调用临时替代且船位路径也由预测模型修正。整套系统运行期间,自动避障命令触发了 5 次、备用链路切换了 2 次且调度干预暂停 1 次,但系统运行无事故,这有效验证了系统识别异常状态的能力以及安全保障机制的稳健性。

4 推广应用与未来优化方向

4.1 系统可扩展性与多作业场景适应性

实际疏浚作业中智能航行调度系统的表现显示其有着不错的平台兼容性与多船型适配能力,该系统现有的架构为模块化设计,能灵活地与不同类型船舶的控制接口和作业参数对接,不管是绞吸式挖泥船这种以精准作业为主的,还是自航泥驳船这种以运输为主的,又或者是对节奏匹配要求更高的吹填船、抛泥船,系统都能根据它们不同的任务角色加载对应的调度模型和路径规划算法。在实际工程里,疏浚、运输、卸料这些工序常并行开展,这就需要各类船舶高频次地协同起来,系统靠统一的调度框架和动态任务分发机制,把不同作业任务的资源统一调配,并且依据实时的水域分布、船舶状况以及作业优先级,动态调整路径与作业顺序,从而达成跨作业场景的高效协同。第三方设备管理平台、环保监测系统、能耗控制系统等都能被系统支持对接,这给疏浚作业实现信息化、绿色化、精细化管理提供了不错的技术基础,后续在内河疏浚、水库清淤、围海吹填等场景推广的可行性很高。

4.2 融合 5G 通信与边缘计算的前景

信息传输的时效性与稳定性是调度系统要求极高的方面,传统的无线通信方式如 VHF/UHF 受距离和带宽限制,在复杂协同任务下的数据回传需求面前已难以满足,而 5G 通信有高带宽、低时延、大连接的优势,为调度系统实时性与灵活性的提升提供了理想的技术条件。系统基于 5G 网络的数据传输初步得以实现且平均通信延迟被控制

在 20ms 以内,从而指令下达与船舶响应速度得到大幅提升,在此基础上结合边缘计算节点部署,使部分数据预处理、局部路径规划、感知冗余判断等功能能在本地完成,进而对中心服务器的依赖显著降低,避免了单点故障导致全局调度失效的情况。未来“调度-通信-计算”一体化架构会被系统进一步拓展,边缘网关与轻量型调度引擎将被部署在重点港区、施工船队中心或者浮动作业平台以构建分布式调度决策网络,云边协同架构能保障调度指令响应时间和大规模扩展与部署能力,有助于系统智能化、广域化应用的实现。

4.3 人机协同与调度智能决策演进

当前系统在调度智能化上虽说取得了显著进展,但在人机协同效率、调度决策透明性、自适应能力这几方面还有可优化之处,未来系统的发展得从“调度自动化”慢慢朝着“调度智能决策”和“人机共融协同”转变。系统的自主学习能力得进一步强化,引入深度强化学习和联邦学习机制后,系统能依据不同水域的历史作业数据,持续优化调度策略、风险评估模型和路径生成逻辑,逐步形成有知识迁移能力的泛化调度框架。人机交互界面的优化非常关键,当前系统大多展示二维地图、路径标识和状态信息,以后要集成三维作业可视化、语音交互、手势控制这些交互技术以提高调度员操作效率、加深调度员理解并防止调度员界面复杂或者信息过载而误判。智能调度系统的推广离不开调度逻辑的解释性,若建立决策链条溯源、算法透明呈现与任务执行可回溯机制,调度决策过程就能“可解释、可追溯、可干预”,从而为全流程无人化疏浚作业在未来的实现创造了条件。

5 结束语

多船协同疏浚作业对调度效率与航行安全提出了更高要求,传统人工指挥模式已很难满足现代施工场景的复杂需求,本文深入探讨智能航行调度系统的架构设计、关键技术与实践应用,验证了其在路径优化、提升效率、控制风险方面的明显优势,实地测试表明系统稳定性、扩展性和适应性良好,以后随着 5G 通信、边缘计算和人工智能不断融合,调度系统在人机协同、自主决策、跨场景应用等方面会有更大突破,推动疏浚作业全面进入智能化时代。

[参考文献]

- [1]李华文,高亮.疏浚作业航运公司安全管理对策研究[J].中国海事,2025(6):37-40.
 - [2]孙健.耙吸挖泥船疏浚作业数据分析与优化决策系统设计[D].镇江:江苏科技大学,2018.
 - [3]唐建中.绞吸式挖泥船疏浚作业优化与控制研究[D].杭州:浙江大学,2007.
 - [4]何纯桥,陈绪义,黄骅赵东石油平台航道及港池疏浚作业中的创新研究[J].中国水运.航道科技,2017(25):23-25.
- 作者简介:施海忠(1986.2—),男,江苏人,现就职上海长升工程管理有限公司,船长,长期从事航道疏浚船舶驾驶工作。