· 信息技术 ·

海洋疏浚工程多源数据融合全流程智能管理系统设计与实现*

潘雪成[1]，陶兢喆[2]，刘　琳[2]，许自舟[2]
（1. 中交广州航道局有限公司，广州 广东 510220；2. 国家海洋环境监测中心，大连 辽宁 116023）

摘要：针对海洋疏浚作业中数据源分散、信号断联致定位缺失、人工判断带来的合规风险及工程量核算滞后等问题，开展了主从协同数据融合、电子围栏导航及动态工程量核算等关键技术的研究，采用“感知-传输-服务-应用”四层架构，集成船舶监控、自动识别系统、视频、地理空间以及水文气象等多源数据，开发出全流程智能管理系统，通过主从协同机制达成定位数据的连续输出，利用双层电子围栏与优化射线法实现区域的毫秒级判断，基于舱容利用率模型实现工程量的每日自动核算，某大型疏浚工程应用表明：系统处理 182.69 万条数据，支撑 27 条船舶实现零事故、零违规作业，核算周期从按月核算缩短至每日核算，区域判断响应缩短至 0.3 s 内，该研究为海洋疏浚企业数字化转型提供了可落地的技术方案，对提升行业安全规范水平与施工效率具有实践价值。

关键词：海洋疏浚工程；多源数据融合；电子围栏；工程量动态核算；数字化转型
中图分类号：U616　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0159-07

Design and implementation of full-process intelligent management system for multi-source data fusion in marine dredging engineering

PAN Xuecheng[1], TAO Jingzhe[2], LIU Lin[2], XU Zizhou[2]
(1. CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510220, China;
2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: Addressing challenges in marine dredging, such as dispersed data sources, positioning gaps from signal disconnection, compliance risks from manual judgment, and delayed quantity calculations, this study investigates key technologies including master-slave collaborative data fusion, electronic fence navigation, and dynamic quantity calculation technologies. Adopting a four-layer architecture of “perception-transmission-service-application”, it integrates multi-source data, such as vessel monitoring, automatic identification system, video, geospatial, and meteorological data, and develops a full-process intelligent management system. The system achieves continuous output of positioning data through a master-slave collaboration mechanism. Millisecond-level regional judgment is achieved by means of double-layer electronic fences and an optimized ray casting method. Daily automatic accounting of engineering quantity is completed based on the cabin capacity utilization model. The application in a large-scale project shows that the system has processed 1.826 9 million pieces of data, supported 27 vessels to achieve zero-accident and zero-violation operations, shortened the accounting cycle from monthly to daily, and reduced the regional judgment response time to within 0.3 seconds. This research provides a practical technical scheme for the digital transformation of marine dredging enterprises, and has practical significance for improving the industry’s safety standards and construction efficiency.

Keywords: marine dredging engineering; multi-source data fusion; electronic fence; dynamic calculation of engineering quantity; digital transformation

收稿日期：2025-11-28　　**录用日期：**2026-01-29
***基金项目：**国家重点研发计划项目(2021YFF0704005)
作者简介：潘雪成(1989—)，男，高级工程师，研究方向为港口航道与海岸工程疏浚施工管理。

水运工程

海洋疏浚工程是海洋经济发展的基础性支柱产业，广泛应用于港口扩建、航道疏浚、滨海新城建设等关键领域，其施工作业的合规性、安全性与高效性直接关系海洋生态环境保护成效与海洋产业高质量发展全局。近年来，国家持续强化对该领域的规范化和智能化要求：新修订的《中华人民共和国海洋环境保护法》明确了企业在疏浚物倾倒环节的主体责任及在线监控义务[1]，《“十四五”海洋经济发展规划》则进一步提出推动海洋产业数字化、智能化升级的战略方向，为海洋疏浚工程的数字化转型奠定了政策基础与发展导向[2]。当前疏浚企业数字化管理面临三大核心痛点：1）数据管理碎片化，船舶定位、设备状态、作业参数等数据分散形成“数据孤岛”，生产决策缺乏全面、连续、精准的数据支撑[3]；2）作业管控缺乏全流程科学引导，倾倒时空判断易受环境因素影响，现有管控手段难以动态精准引导[4]；3）工程量动态核算依赖人工阶段性统计，自动化智能化水平不足，难以及时为生产调度提供决策支持[5]。

围绕疏浚工程数字化管理的相关研究探索主要形成两类方向：一类聚焦监管端需求，如孙淑艳等[6]融合船舶自动识别系统（automatic identification system，AIS）、雷达等数据构建国家海洋倾废监管系统，实现非现场监管与违规判定；黄亚飞等[7]基于数据抽稀算法设计监管系统，提升违规取证效率；庞启秀等[8]结合船载传感器与 AIS 数据，研发全过程监管系统以强化现场安全管理水平。另一类侧重技术应用探索，如张复宪等[9]通过 AIS 轨迹数据实现作业异常的自动检测；屈斌[10]针对内河航道疏浚提出工程要素数字化与船舶配比优化方法；徐婷等[11]利用聚类算法实现施工轨迹精准识别；李晓峰[12]梳理了港口航道疏浚的智能化发展路径，强调智能装备、数据体系与绿色技术协同升级。现有研究虽取得阶段性进展，但仍存在一定局限：1）研究定位偏重政府监管视角，未充分融合企业效率及安全诉求；2）数据融合机制较简单，难以保障数据在全流程中的连续性与一致性；3）缺乏全流程技术闭环，未形成数据集成、作业管控与效率核算的完整体系。

基于此，本文立足疏浚企业实际运营需求，提出海洋疏浚工程多源数据融合全流程智能管理系统的设计与实现方案。本文主要创新点在于构建“数据集成-作业管控-效率提升”的三阶技术链：以主从协同机制破解数据断联问题，以电子围栏技术实现作业过程的精准引导，以动态核算模型推动效率优化，最终形成全流程技术闭环，为疏浚企业数字化转型提供可落地、可复制的技术方案，助力行业在合规性、安全性与效率性上实现协同提升。

1 总体设计

1.1 建设目标

系统旨在满足企业涉海疏浚工程“安全可控、流程规范、效率提升”的精细化智能化自主管理需求，以打破信息壁垒、规范作业流程、提升管理效能为核心，实现多源数据统一集成与连续管理，通过精准导航与事前提醒降低合规风险，依托动态核算实现进度实时可视化，同时完善合规自查与安全防控机制，确保作业全流程符合相关法律与企业规范要求。

1.2 系统架构

系统采用“感知-传输-服务-应用”四层架构，各层级紧密衔接、层层支撑，为数据集成与全流程管控提供坚实的架构保障。具体架构见图 1。

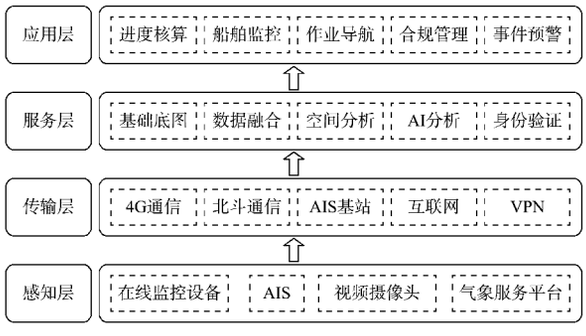


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

感知层作为数据采集的源头入口，核心目标是全面、精准获取多源数据，为数据集成筑牢源头根基。该层通过船载在线监控设备获取船舶实时经纬度、吃水深度、泥门状态等数据，AIS 系

统获取经纬度数据，视频摄像头获取现场实况等，确保覆盖船舶定位、作业状态、环境条件等全维度管控场景的数据需求。

传输层实现数据流转的核心功能，目标是解决海洋复杂环境下的数据传输稳定性问题，保障数据集成的连续性。采用“4G 为主、北斗补盲、本地缓存、智能补传”的混合传输策略，在线监控设备数据优先经 4G 加密回传，无信号时由北斗短报文分包补盲，AIS 数据与水文气象数据通过第三方接口实现传输，视频摄像头数据则通过虚拟专用网络(virtual private network，VPN)安全隧道远程访问系统。针对不同数据源设计采用差异化的传输方案，确保数据不丢失、可追溯。

服务层聚焦高效管理与智能分析，提供通用支撑服务与核心业务逻辑处理能力。部署地图发布服务实现电子海图与工程要素实时可视化，通过数据融合处理服务确保数据一致性，集成空间分析引擎与 AI 分析支持电子围栏计算、轨迹分析、工程量及进度分析等复杂运算，构建统一身份验证体系保障系统访问安全，最终为应用层提供标准化服务接口。

应用层作为功能落地载体，开发进度核算、船舶监控、作业导航、合规管理、事件预警等核心功能模块，将集成后的数据转化为实际管控效能，支撑全流程管理，确保技术创新能够直接服务于企业管理需求。

1.3　功能模块

系统功能模块以“全流程覆盖、多需求适配”为设计原则，涵盖工程管理、船舶监控、作业导航、事件预警、统计分析五大核心模块，各模块通过数据交互形成闭环，协同支撑全流程智能化管控。系统功能模块见图 2。

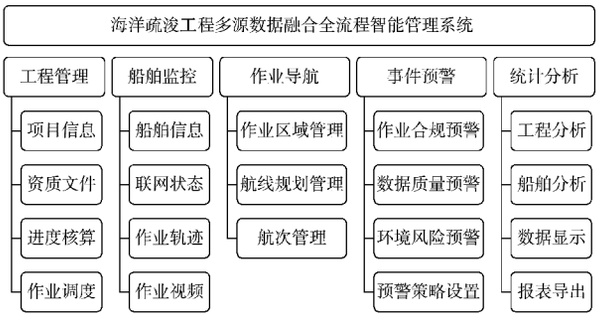


图 2　系统功能模块

Fig. 2　System functional modules

工程管理模块聚焦基础数据与工程的统一管理，涵盖项目信息、资质文件、工程量核算与作业调度等功能，为规范、高效开展施工作业提供技术保障。船舶监控模块围绕全流程动态监控展开，实现联网状态监控、轨迹追溯与视频联动，为作业全流程提供可视化、可追溯的船舶监管手段。作业导航模块以精准作业导航为目标，实现作业区域管理、航线规划管理、航次管理等功能，为船舶作业提供科学、高效的路径指引。事件预警模块构建“多层级、多维度”预警体系，涵盖作业合规预警、监控数据质量预警、环境风险预警等功能，为企业安全、规范作业实时提供保障。统计分析致力于“数据价值挖掘”，通过工程分析、船舶分析、数据显示与报表导出等功能，实现工程与船舶数据的可视化分析及管理决策支持。

1.4　数据来源

系统数据均来自企业可自主获取或合法采购的渠道，确保技术方案的落地可行性。具体分类见表 1。

表 1　数据来源分类

Tab. 1　Classification of data sources

数据类别	主要数据项	数据来源	核心用途
定位主数据	船舶经纬度、航速、时间	在线监控设备	精准导航、航迹追溯
定位辅助数据	船舶经纬度、航速、时间	船舶 AIS 系统	主数据断联时填补空缺，保障数据连续
船舶作业数据	泥门状态、吃水深度、泥浆浓度系数、作业现场视频	在线监控设备、企业工程文件	工程量核算、规范作业管理
地理/环境数据	作业区域边界、风速、浪高、潮汐	管理部门公开文件、气象服务平台	导航建模、安全预判
合规数据	船舶证书、备案材料、许可证	企业工程文件	合规自查、预警提醒

2 核心技术

核心技术围绕多源数据集成及全流程管控两大核心目标协同构建，形成“数据集成-作业管控-效率提升”的完整技术链。其中，主从协同多源融合处理技术以定位数据为核心基础数据，解决其分散、断联等问题；基于电子围栏的作业精准导航技术实现作业区域与路径的科学指引；舱容-泥浆浓度系数驱动的工程量动态核算技术则依托集成数据实现工程量及进度的动态核算，三者共同支撑全流程闭环管理。

2.1 基于主从协同的多源数据融合处理

定位数据是船舶作业导航、轨迹追溯、合规管理的核心数据[13]。当前企业定位数据来源分散，且受远海信号断联影响易出现数据缺失，若无法有效整合，将直接影响后续作业引导与管控决策的有效性。因此，该技术以定位数据为核心整合对象，建立主从协同的融合机制，实现数据的统一集成与连续可靠输出，为全流程管控提供数据支撑。

技术实施分为 3 个关键环节：1)主从数据定位。船舶在线监控设备数据参数较多，能够更全面反映船舶作业状态，以船载在线监控设备采集的“北斗定位+泥门状态+吃水深度”数据为主数据；AIS 数据参数较少，主要包括船舶实时经纬度数据，定位精度与主数据相当，数据频率略低于主数据，综合考虑，AIS 数据作为辅助数据。2)数据重叠判断。采用时间窗口匹配法，设定与主数据更新周期一致的时间窗口，当主从数据时间戳落在同一窗口且均有效时，判定为重叠，此时默认采用主数据，既保障数据精度，又避免辅助数据因参数不全导致的决策偏差。3)远海信号断联补全。设计主从协同补全机制，当连续多个数据周期未收到有效主数据，且无本地缓存时，系统判定为主数据断联，自动调用同期 AIS 数据按时间戳匹配填补位置空缺，确保轨迹连续；主数据恢复后自动切换回主数据模式，补全的 AIS 数据保留作为轨迹追溯参考；若 AIS 数据也缺失，则标记为“轨迹中断”，不强行插值。同时，通过格式校验等手段对数据进行清洗，剔除经纬度异常、航速超出合理范围的数据，避免数据突变导致后续判断误差，最终输出连续、规范的标准化定位数据。数据融合流程见图 3。

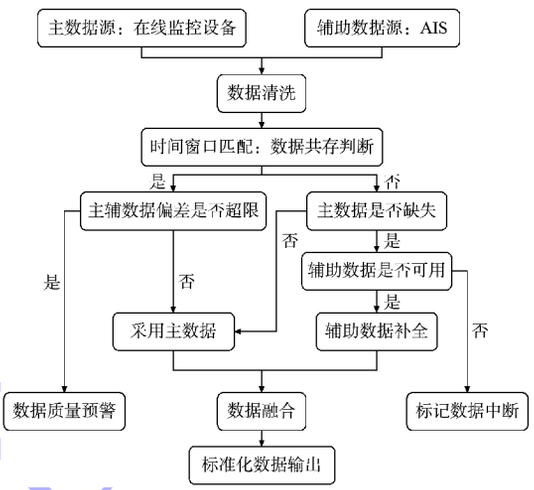


图 3 主从协同数据融合逻辑图

Fig. 3 Logic diagram of master-slave collaborative data fusion

2.2 基于电子围栏的作业精准导航

船舶作业区包括工程区、倾倒区及航行区，作业区域边界判断是合规开展作业的关键环节，传统依赖人工观察海图、判断区域范围的方式受环境、经验影响较大，存在偏离指定区域的风险。该技术将指定工程区、倾倒区边界与规划航线转化为系统可识别、可预警的地理围栏，联动实时定位数据与空间几何算法，通过事前引导替代人工判断，实现作业区域的精准管控，从源头降低风险。

导航建模采用“双层电子围栏+规划航线”的协同设计，见图 4。基于工程区、倾倒区的工程矢量坐标，划分双层围栏。具体思路为：考虑疏浚船舶实际尺寸，将作业区域边界内缩一定距离形成核心合规区，确保船舶整体完全处于法定合规范围内，避免因船身尺寸导致部分船体超出边界；以核心合规区边界为基准外扩一定距离形成预警

提醒区，提醒船员做好下一步施工作业准备或提前对可能发生的不规范作业做出预警。此外，以既定航线为基准向两侧延伸一定距离，形成航线缓冲围栏区，与作业区双层围栏共同构成电子围栏管控框架，确保船舶航行与作业均在合规范围内。

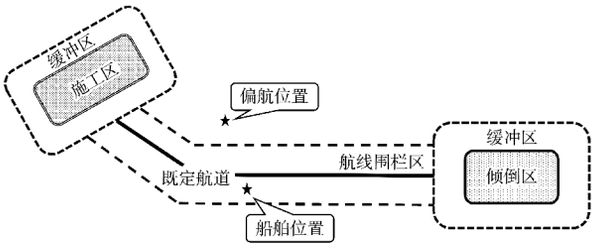


图 4　电子围栏示意图

Fig. 4　Schematic diagram of electronic fence

船舶与电子围栏的位置关系判断采用优化“射线法”：以船舶定位中心点为起点沿 x 轴正方向发射射线，引入 ε 偏移法（$\varepsilon = 10^{-6}$）避免射线起点与围栏顶点重合而导致误判，通过统计射线与围栏边界的交点数判断船舶位置，其中奇数为围栏内部，偶数为围栏外部。对工程区，若判定船舶处于围栏内部且为非本工程船舶，即判定为外来船舶闯入。同时，结合船舶当前位置与历史轨迹区分船舶“驶入”或“驶离”倾倒区的状态。

当作业区域出现船舶驶入/驶离、航线偏离、工程区外来船舶闯入等场景时，系统通过弹窗方式向值班人员推送预警信息，并可通过北斗短报文方式将信息同步发送船上人员，实现岸基与船端高效协同响应。

2.3　舱容-泥浆浓度系数驱动的工程量动态核算

工程进度是企业生产调度、资源配置的核心依据，传统依靠人工记录航次、手工计算倾倒量的方式存在反馈滞后、计算过程复杂、效率低等问题，无法满足实时决策需求。该技术基于船舶吃水深度、舱容等作业参数，建立量化核算模型，实现工程量及进度的动态估算。

单航次工程量核算公式如下：

$$Q_{\mathrm{D}} = V\omega\eta \tag{1}$$

式中：Q_{D} 为单航次工程量，m^3；V 为船舶额定舱容，m^3；ω 为泥浆浓度系数，按项目土质类型、施工方案取经验值初始录入，后续可根据实际校准结果动态修改。η 为舱容利用率，由吃水差值比例线性近似得出：

$$\eta = \frac{h_{\mathrm{R}} - h_0}{h_{\mathrm{F}} - h_0} \tag{2}$$

式中：h_{R} 为实际吃水深度，m；h_0 为空船吃水深度，m；h_{F} 为满载吃水深度，m。

工程总进度如下式：

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{\mathrm{D}}}{Q_{\mathrm{T}}} \times 100\% \tag{3}$$

式中：n 为已完成的航次数，$\sum_{i=1}^{n} Q_{\mathrm{D}}$ 为已完成工程量，m^3；Q_{T} 为工程总量，m^3。

系统基于集成后的作业数据自动分析出航次信息、已完成的工程量及工程进度，每晚后台自动计算并更新。同时建立误差控制机制：定期校准吃水传感器并动态更新泥浆浓度系数，对核算结果进行逻辑校验，如单航次工程量是否超出额定范围，异常时触发人工核查，确保核算结果精准可靠，为生产调度提供有力数据支撑。

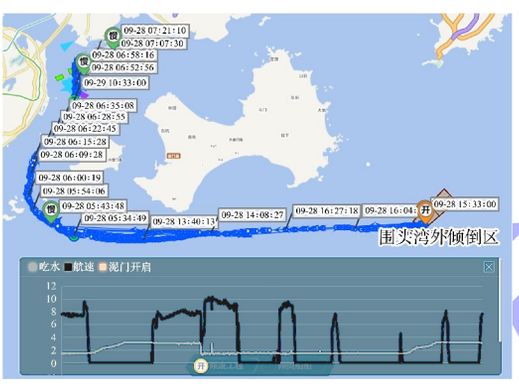
3　工程应用

为验证系统的可行性与实用性，本文选取沿海某疏浚项目作为应用案例，该项目需完成约 1 600 万 m^3 的疏浚物倾倒作业，涉及 27 艘作业船舶，作业区域涵盖近岸工程区与远海指定倾倒区，具备典型性与代表性。

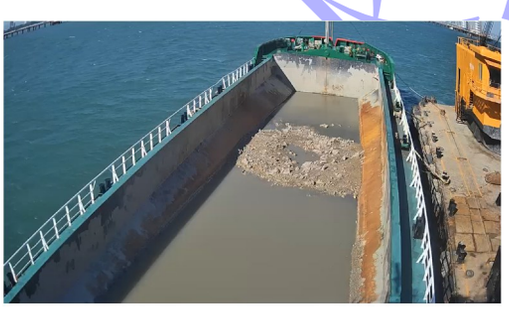
3.1　应用实施过程

作业准备阶段，企业通过工程管理、船舶监控、作业导航等核心功能模块录入基础数据，系统自动完成电子围栏建模、航线规划与核算参数配置，数据集成框架快速整合各类基础数据，为后续管控奠定数据基础。

作业实施阶段，多源数据融合处理技术持续集成船舶定位、作业、环境等数据，确保数据连续可靠；基于集成数据和电子围栏技术，值班人员可通过系统推送的预警信息实时掌握作业状态，全程未出现违规作业与偏航情况；工程量核算从传统的按月或按周统计缩短至每日由系统自动更新，管理人员通过可视化模块及时调整航次安排，保障项目按计划推进；船舶监控模块集成的视频数据为关键节点、作业追溯与异常情况核查提供了直观依据。系统工程应用所产生的作业轨迹及视频见图 5。



a) 作业轨迹



b) 作业视频

图 5　系统工程应用

Fig. 5　System engineering application

作业复盘阶段，系统自动生成包含该项目 1 373 条作业记录及进度报告的完整台账，累计接收来自 AIS 和在线监控设备的有效数据约 182.69 万条，视频存储量达 17.67 TB，企业可基于此数据进一步开展多维度分析，为项目总结与后续优化提供有效数据支撑。

3.2　应用效果

通过该工程应用，验证了系统在数据集成与全流程管控等方面的可行性与实用性，有效解决企业数据断联、作业不规范、工程量动态核算等核心痛点，显著提升了项目生产调度效率与管理精细化水平，为疏浚企业数字化转型提供了有效的技术支撑。

4　结论

1）研究设计的企业端海洋疏浚工程多源数据融合全流程智能化管控系统，通过主从协同的数据融合处理、电子围栏精准导航、舱容-泥浆浓度系数动态核算三项核心技术，构建了“数据集成-作业管控-效率提升”的完整体系。

2）应用验证表明，系统实现多源异构数据集成管理与零事故、零违规作业管控，显著提升了工程管理效能，有效解决了企业核心管理痛点，为疏浚企业合规化、高效化管理提供了可行方案。

3）当前系统在智能调度与能耗数据融合方面尚存拓展空间。未来可融入数字孪生技术，构建工程全场景虚拟映射，实现作业过程可视化模拟与智能调度；拓展数据融合维度，整合船舶能耗数据，助力企业实现绿色低碳生产。

参考文献：

[1] 张辉, 胡振, 石瑞强, 等. 新修订《中华人民共和国海洋环境保护法》视角下的海洋倾废管理研究[J]. 环境保护, 2024, 52(9): 59-62.
ZHANG H, HU Z, SHI R Q, et al. Research on marine dumping management from the perspective of *the newly revised marine environmental protection law of the People's Republic of China*[J]. Environmental protection, 2024, 52(9): 59-62.

[2] 周滢, 张戟. 数字化赋能疏浚企业科技管理[J]. 交通企业管理, 2024, 39(2): 58-60.
ZHOU Y, ZHANG J. The digital inclusive empowerment to

dredging enterprises science and technology management[J]. Transportation enterprise management, 2024, 39(2): 58-60.

[3] 李夏, 周子琛. “数智疏浚” 架构设计与应用实践[J]. 港口航道与近海工程, 2025, 62(4): 124-128, 135.
LI X, ZHOU Z C. Architecture design and application practice of “data intelligence dredging” [J]. Port, waterway and offshore engineering, 2025, 62(4): 124-128, 135.

[4] 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.
LI H W, GAO L. Study on safety management strategies for shipping companies involving dredging operations[J]. China maritime safety, 2025(6): 37-40.

[5] 郑文怡, 章哲颜, 陈云飞. 北斗定位在内河疏浚船舶管理中的研究与应用[J]. 水运工程, 2022(5): 152-158.
ZHENG W Y, ZHANG Z Y, CHEN Y F. Research and application of BDS in inland dredging ships management[J]. Port & waterway engineering, 2022(5): 152-158.

[6] 孙淑艳, 许自舟, 刘述锡, 等. 基于非现场监管的海洋倾废监督管理系统[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(1): 160-164.
SUN S Y, XU Z Z, LIU S X, et al. Design and implementation of national marine dumping supervision and management system [J]. Marine environmental science, 2023, 42(1): 160-164.

[7] 黄亚飞, 翟艳辉, 梁杰, 等. 基于数据抽稀算法的海洋倾废监管系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(10): 191-194, 199.
HUANG Y F, ZHAI Y H, LIANG J, et al. Design of marine dumping supervision system based on data thinning algorithm[J]. Computer measurement & control, 2020, 28(10): 191-194, 199.

[8] 庞启秀, 李怀远, 王克勤, 等. 航道疏浚全过程智能监管系统研发[J]. 航海技术, 2024(2): 18-21.
PANG Q X, LI H Y, WANG K Q, et al. Research and development of intelligent supervision system for the whole process of channel dredging [J]. Marine technology, 2024(2): 18-21.

[9] 张复宪, 屈斌, 周溪召. 上海港公共航道维护保障智慧管理关键技术研发与应用[J]. 水运工程, 2021(9): 142-146.
ZHANG F X, QU B, ZHOU X Z. Development and application of key technology for intelligent management of Shanghai Port public channel maintenance and support[J]. Port & waterway engineering, 2021(9): 142-146.

[10] 屈斌. 内河航道疏浚智慧管理系统研发与应用[J]. 交通与港航, 2023, 10(3): 68-73.
QU B. Research and application of inland waterway dredging project management information system [J]. Communication & shipping, 2023, 10(3): 68-73.

[11] 徐婷, 戴文伯, 鲁嘉俊. 基于自动识别系统大数据的船舶施工轨迹识别与预测[J]. 水运工程, 2019(12): 119-122, 126.
XU T, DAI W B, LU J J. Identification and prediction of ship construction path based on AIS big data[J]. Port & waterway engineering, 2019(12): 119-122, 126.

[12] 李晓峰. 基于水运需求增长的港口航道疏浚工程智能化发展路径分析[J]. 珠江水运, 2025(14): 58-60.
LI X F. Analysis of intelligent development path of port channel dredging project based on the growth of water transport demand [J]. Pearl River water transport, 2025(14): 58-60.

[13] 苏宏明, 张志坤, 刘玲, 等. 基于北斗的人工岛建造数智化关键技术及平台研究[J]. 水运工程, 2025(4): 149-155, 169.
SU H M, ZHANG Z K, LIU L, et al. Key digital technologies and platforms for artificial island construction based on BDS[J]. Port & waterway engineering, 2025(4): 149-155, 169.

(本文编辑　赵娟)

水运工程