

智慧港口建设下航道交通流协同管理策略

马骏

杭州市交通运输发展保障中心 浙江杭州 310013

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22140

[摘 要] 船舶大型化与港口货运量持续增长，传统港航分治模式存在信息割裂、航道拥堵、调度滞后等痛点。本文依托智慧港口新一代信息技术，梳理港口核心要素与港航双向交互机制，从流量预测、船舶分级、应急联动三个维度构建航道交通流协同管理策略。以连云港港为实证对象，结合运营数据验证策略成效，研究成果可为国内港口航道智能化协同管控提供参考。

[关键词] 智慧港口；航道交通流；协同管理

引言：

航运行业快速发展背景下，港口吞吐量持续攀升，航道作为港航衔接的关键通道，其通行效率直接影响港口整体运转能力。当前多数港口与航道管理部门存在信息壁垒，人工调度模式难以应对复杂多变的船舶交通流，通航拥堵、船舶等待、应急处置缓慢等问题频发。智慧港口融合物联网、大数据、人工智能等技术，打通港航数据链路，为航道交通流一体化协同管理创造条件。基于此，探究适配智慧港口场景的航道交通流协同管理策略，对破解港航信息壁垒、提升航道通行效率与港口整体运营水平具有重要现实意义。

1. 智慧港口核心要素、技术及现存问题

1.1 智慧港口核心要素

智慧港口是集多类技术于一体的综合性智能运营体系，4大核心要素相互配合、协同运转，完成从传统人工管理向全域智能化管理的转型，也是航道交通流协同管理的技术根基。

第一，立体感知网络体系。综合运用高精度定位设备、雷达、光电传感器、船舶自动识别系统等设备，搭建覆盖港区陆地、水域、空域的全方位感知网络，全天候采集船舶位置、航速、货物状态、气象水文、航道水深等基础数据，实

现港口与航道运行状态全维度监测。

第二，多源数据融合平台。依托分布式存储与流式计算框架，整合港口生产调度、船舶交通 管控、气象、水文、引航作业等异构数据，借助时空数据挖掘技术挖掘数据关联特征，消除“信息孤岛”，为上层决策提供完整、实时的数据支撑。

第三，智能决策引擎。引入深度强化学习、多目标优化、随机规划等算法，搭建泊位分配、堆场作业、集疏运调度一体化优化模型，根据实时数据动态调配港航资源，重塑作业流程与船舶通航计划^[1]。

第四，自动化作业系统。结合 5G 通信、北斗导航、机器视觉等技术，实现岸桥远程操控、自动导引车导航、智能理货等无人化作业，减少人工干预，提升港口装卸作业效率，间接优化航道船舶周转效率。

1.2 智慧港口技术与现存问题汇总表

结合文献及港口实际运营情况，梳理智慧港口主流应用技术、应用场景以及传统管理模式、智慧化转型过程中存在的典型问题，如下表 1 所示：

表 1 智慧港口核心技术与传统管理问题汇总表

分类	具体技术 / 问题	应用场景 / 问题表现
核心应用技术一	高精度定位、雷达、光电传感器、船舶自动识别系统	港区、航道全域态势感知，船舶动态、环境参数监测
核心应用技术二	分布式存储、流式计算、时空数据挖掘	多部门数据整合、数据清洗、关联分析
核心应用技术三	深度强化学习、模糊层次分析法、博弈论	船舶优先级判定、通航调度、资源优化分配
核心应用技术四	蒙特卡洛模拟、启发式算法	应急事件推演、应急疏导方案快速生成
核心应用技术五	5G、北斗导航、机器视觉	港口无人化作业、远程操控、船岸通信
传统管理问题一	港航信息互通不畅，形成信息孤岛	海事、港口、引航站数据独立，调度指令滞后
传统管理问题二	航道与港口缺乏协同机制	港口作业效率波动引发航道拥堵，航道拥堵反向制约港口泊位利用

传统管理问题三	船舶调度依靠人工经验	无法预判交通流变化，高峰时段船舶扎堆、锚地等待时间过长
传统管理问题四	无差异化船舶通行规则	重点物资船舶、大型集装箱船与普通船舶通航冲突频发
传统管理问题五	应急响应体系不完善	恶劣天气、船舶故障、航道事故处置流程繁琐，响应速度慢

1.3 智慧港口与航道交通流交互影响机制

航道交通流特指特定航道水域内，船舶在时空维度下的动态分布与运行状态，包含船舶密度、航速、航向、通航间距等核心属性。智慧港口与航道交通流存在双向耦合、非线性、时变性的互动关系，二者通过信息流、物流、控制流完成相互作用。

从港口对航道的影响来看，港口泊位周转率、装卸效率、集疏运能力直接决定船舶在港停留时间。当港口作业效率提升，船舶靠离港速度加快，航道占用时长缩短，交通流压力随之降低；若港口作业滞后，已完成装卸的船舶无法及时驶离，待泊船舶积压，形成通航瓶颈，造成航道拥堵。

从航道对港口的反向约束来看，航道通过能力、潮汐窗口期、交通流密度直接限制港口接纳船舶的规模。当航道处于高密度交通流状态时，船舶进出港安全间距被迫拉大，通航间隔延长，港口泊位无法及时接靠新船舶，泊位利用率显著下降。同时，航道疏导不畅会打乱船舶到港计划，破坏港口既定作业序列，进一步降低整体运营效率^[2]。智慧港口凭借数据共享、预测调度、动态资源配置等功能，打破传统港航分离的管理壁垒，实现港口生产计划与航道交通流状态实时匹配，强化整个港航系统的稳定性与自适应能力。

2. 智慧港口下航道交通流协同管理策略

2.1 基于流量预测的动态容量协同管理策略

该策略以交通流预判为核心，实现航道通行能力与港口作业能力动态匹配，解决盲目调度引发的拥堵问题。首先整合船舶自动识别系统历史数据、潮汐变化规律、季节性货运波动等信息，采用时间序列分析结合机器学习算法，搭建分时段、分船型的船舶到港流量预测模型，搭配滑动时间窗口技术捕捉交通流周期性变化与突发波动，实现未来 4 - 72 小时船舶到港态势动态预估。其次，基于预测结果，利用随机规划算法构建航道容量与港口作业能力适配优化模型，将航道通行能力设为时变约束，综合考量潮汐窗口期、能见度、引航资源等客观条件，制定弹性船舶进出港调度计划。当预测到某一时段出现交通流聚集时，系统自动调节船舶航速、优化锚地等待序列、同步调整港口泊位作业计划，实现交通流在时间维度上均匀分布。

整套模式形成流量预测、模型优化、实时调整的闭环管理，充分释放航道潜在通行能力，规避信息不对称、决策延迟造成的航道资源浪费^[3]。

2.2 多类型船舶优先级协同策略

针对船舶类型复杂、通航资源争抢、重点船舶通行保障不足等问题，依托智慧港口数字化平台搭建差异化船舶分级与动态优先权分配体系。第一，选取船舶吨位、货物属性、航线类型、运输时效、安全风险五大维度指标，运用模糊层次分析法建立船舶重要度评价体系，将进出港船舶划分为特殊保障类、时效优先类、常规作业类三个等级。第二，引入博弈论优先权动态调配机制，结合航道实时拥堵情况、船舶等待成本、泊位占用状态，建立优先权与等待时延的非线性关联。当多艘船舶竞争同一段航道资源时，通过求解纳什均衡确定最优进出港顺序。同时结合电子海图、水文数据，计算不同潮汐条件下各类船舶的安全通航间距，动态调整优先级权重。第三，利用深度强化学习算法持续迭代优先级分配规则，在保障重点船舶快速通航的基础上，最大化提升航道整体通行效率，实现航道资源精细化分配^[4]。

2.3 应急场景下的港航联动协同响应策略

聚焦恶劣天气、船舶故障、航道事故等突发场景，发挥智慧港口信息集成优势，建立预案驱动、实时优化的港航联动应急机制。首先按照突发事件对航道通行能力的影响范围、持续时长、危害等级，制定应急事件分级标准，按照影响范围、持续时长、危害等级将突发事件分为一般、较大、重大三级；利用蒙特卡洛模拟推演事件演变趋势，结合历史应急预案构建情景响应知识图谱，完善应急预案库。其次，突发事件发生后，全域感知网络第一时间捕捉异常信号，通过多传感器数据融合技术精准判定事件类型、影响范围。系统结合实时航道占用情况、船舶分布状态，运用启发式算法快速生成船舶疏导、航道管制、泊位调整等应急方案。最后，依托统一数据平台实现海事、港口、引航站、码头企业多方联动，完成指令下发、现场处置、状态反馈的闭环管理，最大限度降低突发事件对港航正常运营的冲击^[5]。

2.4 航道交通流协同管理全流程

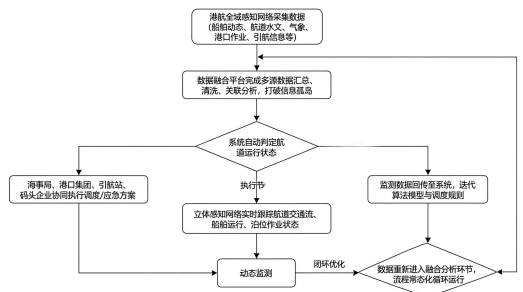


图 1 智慧港口框架下航道交通流协同管理全流程

3. 案例分析——以连云港港为例

3.1 案例背景

连云港港是江苏省第一大海港、我国沿海主枢纽港，也是“一带一路”重要支点港口，下辖连云港区、赣榆港区、徐圩港区、灌河港区四大作业区，主航道为 15 万吨级深水航道，是港口核心通航通道。根据官方统计数据，2022 年连云港港货物吞吐量突破 3 亿吨，集装箱吞吐量超 500 万标箱，日均进出港船舶超 200 艘次，10 万吨级以上大型船舶常态化靠泊。随着航运需求持续增长，港口运营强度大幅提升，传统人工分散管理模式弊端凸显：港航信息孤岛严重、航道资源配置效率低、多类型船舶通航冲突频发、应急响应能力不足，制约港口发展。为此，连云港港依托智慧港口建设，全面落地航道交通流协同管理策略。

3.2 协同管理策略落地实施

连云港港采用“技术赋能+机制创新”双轮驱动，搭建全流程协同管理体系。搭建全域感知与数据融合体系。在主航道、锚地部署船舶自动识别系统、雷达、船舶交通管理系统、视频监控、水文气象传感器等设备，实现船舶动态、航道环境全要素采集。依托连云港海事局“智汇江海”大数据平台，打通海事、港口集团、引航站、码头企业的数据壁垒，运用数据抽取、转换、加载技术与实时流处理框架整合异构数据，实现“一屏观全域”的态势感知。

创新多部门协同决策机制。成立由海事局牵头，港口集团、引航站、码头企业共同参与的协同管理专班，基于共享数据平台落实船舶分级优先级规则，通过甚高频通信、船载终端、线上群组等多渠道传递调度指令，保障指令快速落地。智能化调度与应急管控落地。运用深度强化学习算法搭建动态优先级评估模型，为船舶智能规划通航路径；为特殊船舶开设“绿色通道”，保障优先通行；在大风、低能见度等恶劣天气下，系统依托船舶自动识别系统预测与风险模型自动触发分级管制预案，动态调控航道交通流。

3.3 实施效果

3.3.1 通航效率显著提升

实施协同管理策略后，连云港港主航道船舶平均通过时间缩短 20%；15 万吨级大型船舶进港时间由原来 4-5 小时压缩至 3-4 小时；高峰时段航道拥堵率下降 35%，船舶锚地平均等待时间降至 5.2 小时，航道资源利用率提升 28%，船舶积压问题得到有效缓解。

3.3.2 安全保障能力全面增强

依托智能感知与预警系统，近三年航道内船舶事故率同比下降 40%，危险品船舶运输实现零事故；恶劣天气下应急响应时间缩短至 15 分钟以内，未发生因协同不畅引发的重大安全事故，航道通航安全指数达 94.6 %。

3.3.3 港口运营效能稳步增长

协同管理体系为港口吞吐量增长提供有力支撑，据连云港市政府、江苏省交通运输厅官方数据显示，2023 年连云港港完成货物吞吐量 32023.31 万吨，同比增长 6.68%；集装箱吞吐量 613.67 万标箱，同比增长 10.21%；全年新增 12 条远洋航线，泊位利用率提升至 76%，港口综合竞争力持续增强。

结语

在船舶大型化、港口智能化发展趋势下，港航协同是提升航道通行效率、保障港口安全运营的必然选择。本文结合智慧港口四大核心要素，剖析港航双向耦合机制，提出流量预测动态容量、船舶优先级分级、应急联动响应三大协同策略，并通过连云港港案例证实策略具备较强实用性与可复制性。但本文受限于研究范围，未对复杂航道网络、跨港区联动场景做深入仿真，后续可进一步拓展研究。未来，随着 5G、人工智能、数字孪生、区块链等技术深度融合，智慧港口与航道交通流协同管理将向精细化、一体化、智能化方向持续升级，进一步释放港航资源潜力，助力我国水运行业高质量发展。

[参考文献]

- [1]刘仁衫.基于智慧港口建设的航道交通流协同管理策略[J].中国航务周刊,2025(42):57-59.
- [2]蔡嘉诚,连峰,杨忠振.基于非集计和 LSTM 模型的港口水域船舶短时交通流预测研究[J].中国航海,2025,48(1):77-83,123.
- [3]刁世良.基于人工智能技术的港口航道交通管理系统设计与优化[J].珠江水运,2025(3):25-27.
- [4]赵悦.锦州港航道通过能力仿真研究[D].大连:大连海事大学,2024.
- [5]陈争阳.沿海港口航道网络交通态势识别研究[D].大连:大连理工大学,2023.