

复杂水域中船舶靠泊操纵关键技术和实践分析

曲东庆

烟台打捞局海工船队, 山东 烟台 264000

DOI:10.61369/ERA.2025060040

摘要 : 本文聚焦复杂水域船舶靠泊操纵展开系统性研究。通过剖析复杂水域特征与靠泊难点, 深入探讨环境因素应对、船速船位控制及拖轮协同等关键技术, 并结合典型案例挖掘实践经验。最后针对性提出安全增效策略, 旨在为航海领域提供科学且实用的操作指引与理论参考。

关键词 : 复杂水域; 船舶靠泊; 关键技术

Analysis of Key Techniques and Practices for Ship Docking Maneuver in Complex Waters

Qu Dongqing

Yantai Salvage Bureau Marine Engineering Fleet, Yantai, Shandong 264000

Abstract : This article focuses on a systematic study of ship docking maneuvers in complex waters. By analyzing the characteristics of complex waters and the difficulties of docking, it delves into key techniques such as environmental factor response, ship speed and position control, and tugboat coordination, combined with typical cases to explore practical experience. Finally, it proposes targeted safety and efficiency enhancement strategies, aiming to provide scientific and practical operational guidance and theoretical reference for the nautical field.

Keywords : complex waters; ship docking; key techniques

引言

在全球贸易深度融合的当下, 海运作为国际贸易的核心运输方式, 承载着约 90% 的世界贸易量。船舶靠泊作为海运链路的关键节点, 其操纵安全性与效率直接影响物流周转与运输成本。随着船舶大型化趋势加剧 (如超大型集装箱船已达 24000TEU), 以及港口作业密度持续攀升, 复杂水域 (狭窄航道、强流区域、高流量港口等) 的靠泊作业风险日益凸显。据国际海事组织 (IMO) 统计, 近五年全球因靠泊失误引发的事故占港口作业事故总量的 38%, 单次重大事故平均造成经济损失超千万美元, 同时伴随严重的海洋生态污染风险^[1]。因此, 系统研究复杂水域船舶靠泊操纵技术, 对保障航运安全、推动绿色航运发展具有重要现实意义。

一、复杂水域的特点及靠泊操纵难点

(一) 复杂水域的特点

1. 航道狭窄

受地理条件制约, 部分港口航道呈现“瓶颈”特征。以荷兰鹿特丹港“新水道”为例, 其航道宽度仅 230 米, 却需满足双向通航需求, 超大型船舶通过时横向操作裕度不足船长的 1.5 倍, 稍有不慎就可能发生碰撞。此外, 内河航道常伴有弯道、浅滩等复杂地形, 船舶转向半径受限, 需精准控制航迹。例如长江中游荆江河段, 连续弯道与水下暗礁并存, 船舶需在曲率半径仅 500 米的弯道内完成转向, 对舵效和航速控制要求极高^[2]。

2. 水流复杂

潮汐、河口冲淤、海流系统共同作用, 形成多变的流场环境。在长江口北槽航道, 涨落潮最大流速差达 4.5 节, 且存在明

显的分层流现象, 上层水流与下层水流流速、流向差异显著, 导致船舶出现“横倾”“打横”风险。某些海峡区域受地转偏向力影响, 会产生横向补偿流, 对船舶产生持续的侧推力。如英吉利海峡, 受北大西洋暖流与潮汐叠加影响, 船舶在通过时需实时修正航向, 若未及时调整, 每航行 1 海里横向偏移可达 30 米^[3]。

3. 气象条件多变

复杂水域常受多种天气系统叠加影响。在东亚季风区, 冬季寒潮大风可引发 10 级以上强风, 阵风风速超过 28m/s, 对船舶稳性造成极大挑战; 夏季台风季节伴随暴雨、巨浪, 中心附近最大浪高可达 15 米, 曾导致多起船舶断缆搁浅事故。地中海部分海域存在突发性的“玛尔玛风”, 风速短时间内可骤增至 30m/s, 且风向突变频率高, 船舶锚泊期间易发生走锚险情。大雾天气年均出现天数在某些港口可达 60 天以上, 能见度低于 500 米时, 船舶需依赖雷达和 AIS 系统辅助靠泊, 但浓雾会削弱雷达回波强

度, 导致目标识别精度下降 30% 以上^[4]。

4. 船舶密度大

世界级枢纽港作业密度惊人, 新加坡港每日进出港船舶超 500 艘, 港区内船舶间距常不足安全距离的 1.2 倍, 形成高密度船舶流。同时, 渔船、游艇等非标准船舶频繁穿插, 加剧了交通流的复杂性。例如鹿特丹港的马斯勒伊斯港区, 集装箱船、散货船与休闲游艇混行, 小型船舶航迹多变, 大型船舶因惯性大难以快速避让, 导致碰撞风险指数较普通港区高出 2.3 倍^[5]。

(二) 靠泊操纵难点

1. 船位控制困难

环境力耦合作用导致船位控制呈非线性特征。研究表明, 横向水流速度每增加 1 节, 船舶横向漂移量每分钟增加约 30 米; 强风作用下, 万吨级船舶横向漂移速度可达 0.5 - 1 节, 传统操纵经验难以满足精准控制需求。

2. 船速调整复杂

船舶惯性与环境力相互作用形成复杂的动力学响应。以 20 万吨级油轮为例, 从全速 (15 节) 制动至完全停止需滑行约 3 公里, 且在变速过程中, 螺旋桨的伴流、沉深横向力等因素会改变船舶运动状态, 增加速度控制难度^[6]。

3. 操纵反应滞后

大型船舶的水动力惯性显著, 舵效响应存在时间延迟。实测数据显示, 300 米长集装箱船从满舵操舵到产生明显转首效应需 15 - 20 秒, 在紧急避让场景下易错失最佳操纵时机。

4. 环境因素影响大

风、流、浪的动态耦合作用形成复合干扰。例如, 斜向强风与横向水流叠加时, 船舶所受合力方向与大小难以精确预测, 需驾驶员实时解算环境力矢量并调整操纵策略。

二、船舶靠泊操纵的关键技术

(一) 环境因素应对技术

1. 风力应对

采用“分级响应”策略, 构建精细化风力应对体系。当风速低于 6 级时, 可灵活利用侧推器补偿风致漂移, 通过调整侧推器的推力大小与方向, 有效抵消横向风力影响; 6 - 8 级风需提前规划风流压角, 运用“车舵配合”技巧保持航迹, 根据船舶实际受风面积与风舷角, 合理调整主机转速与舵角组合, 确保船舶稳定航行。超过 8 级风则立即启动避风预案, 选择安全锚地避风。以顺风靠泊为例, 需在距离泊位 2 海里处将航速降至 8 节以下, 提前计算并预留足够的倒车冲程, 避免因速度过快难以控制; 逆风靠泊时, 虽可利用风力辅助减速, 但需密切关注风压变化, 通过实时监测风压中心位置, 警惕风压过大导致船舶失控风险, 必要时结合侧推器和拖轮辅助操作^[7]。

2. 水流应对

运用“流压角预配”技术, 基于船舶操纵运动数学模型, 通过精确计算水流矢量与船舶航向夹角, 提前调整航速与舵角。在涨潮急流区, 采用“顶流靠泊”策略, 将航速控制在与流速相当水平, 保持船舶与水流的相对平衡, 降低横向流对靠泊的影响; 落潮时, 由于水流拉力增大, 需加大主机功率以克服水流拉力, 同时根据流态变化动态调整舵角。现代船舶借助 ADCP (声学多

普勒流速剖面仪) 实时测量三维流速场, 获取不同水层的流速与流向数据, 结合电子海图系统进行可视化分析, 提升流场感知精度, 为靠泊决策提供更准确的数据支持^[8]。

3. 气象条件应对

构建“多源信息融合”决策体系, 深度整合雷达、AIS、气象卫星等多源数据。大雾天气启用 ARPA 雷达的“目标录取”功能, 设置 0.5 海里安全警戒圈, 通过雷达回波分析周围船舶动态, 结合 AIS 信息准确识别目标, 确保航行安全; 雷暴天气需提前获取气象卫星云图数据, 分析雷暴移动路径与强度, 远离港口雷暴高发区域, 当闪电距离小于 5 公里时, 立即终止靠泊作业, 选择安全水域抛锚避险, 并做好防雷击措施, 如关闭非必要电子设备, 确保船舶电气系统安全。

(二) 船速与船位控制技术

1. 船速控制

实施“三段式减速”方案, 在距离泊位 3 海里处进入预备减速区 (降至 10 - 12 节), 1 海里处进入主减速区 (降至 5 - 7 节), 500 米内进入精细控制区 (3 - 5 节)。结合主机遥控系统 (ECS) 与侧推器协同控制, 实现 ± 0.1 节的速度精度。例如, LNG 船因货舱压力限制, 需采用“微速倒车 - 微进车交替”的特殊减速策略^[9]。

2. 船位控制

应用“动态参考线”技术, 基于电子海图构建虚拟航迹线, 通过 GPS 差分定位 (精度 ± 1 米) 与视觉导航融合, 实时监测船位偏差。当横向偏差超过 10 米时, 启动“分级纠偏”: 先采用小舵角 (5 - 10°) 微调, 若偏差持续扩大则结合侧推器进行强力纠正。

(三) 拖轮协助操纵技术

1. 拖轮的作用

构建“主从协同”作业模式, 首拖轮负责航向引导 (偏转力矩可达 1000kN · m), 尾拖轮控制速度与横移, 傍拖轮提供横向推力与稳性支持。研究表明, 三拖轮协同作业可使大型船舶靠泊效率提升 40%, 碰撞风险降低 65%。

2. 拖轮的使用方法

依据船舶参数 (船长、吃水、方形系数) 与环境条件, 通过“操纵性指数法”计算拖轮配置方案。常用拖带方式包括: 首八字拖 (适用于强风环境)、尾直拖 (精确控制速度)、傍拖 (狭窄水域)。作业中采用 VHF16 频道建立主副通讯链路, 通过标准化指令代码 (如 “Tug 1, Increase Power 30%”) 确保操作协同。

三、复杂水域船舶靠泊操纵实践分析

(一) 案例介绍

选取某东南亚集装箱枢纽港为研究对象, 该港航道宽度 180 米, 弯曲半径仅 1200 米, 潮流最大流速 3.8 节, 日均船舶流量 450 艘。某 18000TEU 集装箱船在春季季风期执行靠泊任务, 作业时段遭遇 7 级东南风, 流向与风向夹角 60°, 形成复杂的风流耦合环境^[10]。

(二) 靠泊操纵过程

前期准备, 依托港口大数据平台获取 72 小时气象水文预报, 结合船舶操纵性手册制定《风流联合作用下靠泊方案》。组织船岸多方通过 VR 模拟系统进行预演, 明确拖轮配置 (首拖 1 艘、尾

拖 1 艘、傍拖 1 艘)与各阶段操纵参数。在接近码头阶段,在距离泊位 3 海里处启动“渐进式减速”,同步调整航向预配 3° 风流压角。利用激光测距仪实时监测与航道边界距离,通过 ECDIS 系统生成动态安全走廊。靠泊阶段,距离泊位 500 米时,尾拖按预定方案就位。首拖轮采用八字拖方式抵消风致偏转,尾拖轮通过“脉冲式拖带”控制船速,傍拖轮保持 0.5 米安全间距随时应对突发横移。最终船舶以 2 节速度平行靠泊,横移速度控制在 0.1 节以内。

(三) 经验与教训

基于大数据的精准环境预测、VR 模拟预演及标准化指令体系显著提升了协同效率;多源导航设备融合应用确保了船位精度。对潮流的垂向分层效应估计不足,导致船舶在靠泊初期出现意外横倾,后续需加强三维流场数据的分析与应用。

四、提升复杂水域船舶靠泊操纵安全性和效率的建议

(一) 加强船员培训

1. 构建“理论-模拟-实船”三维培训体系

通过分层递进的教学模式强化船员实操能力。在理论教学环节,系统梳理船舶操纵动力学、流体力学等核心知识;模拟训练阶段,引入 VR/AR 技术搭建 1:1 还原的极端场景(如台风过境时的强风急流、船舶动力系统突发故障),利用交互反馈机制提升危机处理能力;实船操作阶段,安排资深引航员全程跟船指导。要求每位船员每年参与不少于 60 小时的专项培训,并建立培训档案追踪学习成效。

2. 建立船员操纵技能评估数据库

依托船舶黑匣子(VDR)、电子海图系统(ECS)等设备,实时采集船舶航行数据、车舵操作记录及环境参数。运用大数据分析技术对历史航行数据进行深度复盘,通过聚类算法识别高频操作失误场景,生成个性化能力评估报告。针对转向过度、靠泊速度控制失准等薄弱环节,定制专项训练方案,并定期组织技能复训与考核,形成“评估-改进-验证”的闭环提升机制。

(二) 完善港口设施

1. 推进“智慧港口”建设,构建多层次感知体系

在码头前沿部署毫米波雷达阵列,利用其高分辨率特性实时捕捉船舶三维运动参数,精度可达厘米级;同步布设水下声呐监测网,覆盖港池全水域,实现对暗礁、涡流等水下风险的 24 小时动态监测。各感知设备通过 5G+ 光纤混合组网,构建全域感知系统,为船舶靠泊提供全方位环境数据支撑。

2. 开发“数字孪生港池”平台,整合 GIS 地理信息、船舶动力学模型与实时感知数据。

通过 AI 算法对港池气象、潮汐、航道条件进行多维度分析,每秒生成超 10 万次靠泊模拟,提前预测偏荡、擦碰等潜在风险。基于风险评估结果,平台自动生成包含航速控制曲线、舵角调整方案的最优靠泊路径,并通过船岸协同系统实时推送至驾驶室,实现船舶靠泊过程的智能化决策与动态优化。

(三) 建立应急响应机制

1. 编制《复杂水域靠泊风险图谱》

运用大数据分析 with 风险评估模型,系统梳理急流、大雾、强风等 32 类典型风险场景,从气象水文、船舶设备、人为操作等维度构建风险矩阵。针对每类风险制定标准化处置流程,明确风险

预警分级、应急响应措施及多方协同机制,形成可视化、可操作的风险防控指南。

2. 每季度开展船岸联合应急演练

模拟碰撞搁浅、燃油泄漏、人员落水等复杂场景,采用“双盲”演练模式提升应急处置实战性。重点强化多船协同救援调度能力,优化应急资源调配流程;同时,联合环保部门开展污染应急处置演练,规范溢油围控、污染物回收等操作流程,通过演练复盘持续完善应急预案体系。

(四) 加强信息共享

1. 搭建区域性海事信息云平台

该平台通过物联网传感器网络实时采集港口水域的风速风向、潮汐变化、流速流向等关键数据,结合船舶 AIS 自动识别系统和 VTS 船舶交通管理系统的动态信息,构建三维可视化数据模型。运用大数据分析技术,对采集数据进行深度挖掘,基于船舶类型、吃水深度、操纵性能等参数,为船舶靠泊提供个性化航行建议与风险预警,助力船员提前制定最优靠泊方案。

2. 推广基于区块链技术的船岸信息交互系统,确保数据不可篡改与实时可信

该系统利用区块链分布式账本特性,将船舶靠泊计划、货物装卸清单、港口调度指令等关键信息加密存储于去中心化节点网络中。通过智能合约自动执行船岸数据交互规则,实现装卸流程自动化与数据实时共享。当船舶进港时,系统自动核验船舶证书、航行日志等文件,确保信息真实性,有效规避因数据篡改引发的靠泊安全隐患与法律纠纷,提升船岸协同作业效率与安全性。

五、结论

复杂水域船舶靠泊操纵是融合航海技术、环境科学与系统工程综合性课题。本文通过理论分析、技术研究与案例实践,系统揭示了复杂环境下的操纵规律,提出的关键技术 with 优化策略具有较强的工程实用性。未来研究可进一步结合人工智能、数字孪生等前沿技术,构建智能化靠泊决策支持系统,推动航运业向安全、高效、绿色方向发展。

参考文献

- [1] 陈锦标,洪碧光,张新宇.基于数值模拟的船舶靠泊水动力研究[J].中国航海,2022,45(4):8-13.
- [2] 刘敬贤,杨益生,石爱国.受限水域船舶靠泊操纵运动建模与仿真[J].系统仿真学报,2021,33(11):2337-2346.
- [3] 王洪波,李铁山,章文俊.基于模糊推理的船舶靠泊风险评估[J].中国航海,2021,44(3):10-15.
- [4] 张显库,刘佳,王鹏.船舶自动靠泊控制技术综述[J].大连海事大学学报,2020,46(4):1-10.
- [5] 李丽娜;陈国权;杨凌波;许春亮;王兴华;文婷.船舶拟人智能避碰决策算法测试及应用[J].中国航海,2022(01).
- [6] 黄立文;李浩宇;梁宇;赵兴亚;贺益雄.基于操纵过程推演的船舶可变速自动避碰决策方法[J].交通信息与安全,2021(06).
- [7] 贺益雄;梁宇;熊勇;牟军敏;李梦霞;张可.开阔水域多物标动态自适应智能航行方法[J].交通运输工程学报,2021(05).
- [8] 谢鸿伟;张英俊;邢胜伟;高宗江.基于模型预测控制的船舶自主避碰方法[J].船舶工程,2021(08).
- [9] 李宗宜;卜仁祥;章沪淦.结合改进 RBF 与虚拟圆弧的船舶路径滑模控制[J].西北工业大学学报,2021(01).
- [10] 马杰;苏钰栋;熊勇;张煜;杨鑫.基于速度障碍和人工势场的受限水域船舶避碰决策方法[J].中国安全科学学报,2020(11).