

智能船舶航行安全管控中的避碰应急处置逻辑探析

李金萍

杭州市交通运输行政执法队 浙江 杭州 310000

摘要: 为提升智能船舶复杂水域航行安全水平, 本文围绕智能船舶避碰应急处置核心逻辑展开系统研究。首先梳理避碰安全管控理论体系与系统核心模块, 划分各类航行碰撞风险与应急场景, 阐释态势感知、决策生成、动态执行及人机协同的完整运行机制。针对复杂水域感知局限、多船决策适配不足、极端海况响应滞后等短板, 提出机器学习预判、分层博弈决策、极端工况提速等优化方案, 并构建全流程、船岸协同的闭环管控策略, 可为智能船舶避碰应急体系迭代完善提供参考。

关键词: 智能船舶航行; 安全管控; 避碰应急处置逻辑

引言: 随着航运智能化转型提速, 智能船舶自主航行技术逐步落地, 避碰应急处置能力成为保障海事航行安全的核心关键。相较于传统人工驾船, 智能船舶依托自主感知与决策系统实现自动化避碰, 但复杂航道、多船交汇、极端海况等场景下, 现有处置逻辑仍存在诸多短板, 易引发航行安全隐患。为规范智能船舶避碰操作、契合海事规则要求、补齐应急处置漏洞, 本文深度剖析避碰应急处置核心逻辑, 梳理现存问题并提出优化管控策略, 助力提升智能船舶航行安全管控智能化与可靠性。

1 智能船舶航行安全管控中的避碰安全管控基础理论与体系

1.1 智能船舶航行安全管控核心内涵

(1) 智能船舶自主航行与安全管控核心要素。智能船舶自主航行以“感知-决策-执行”为闭环逻辑, 安全管控核心要素涵盖航行环境数据、船舶运动状态、会遇态势特征及系统软硬件可靠性, 强调对船舶自身及它船动态的精准掌控。(2) 航行安全管控的层级与运行机制。采用“宏观航线规划—中观战术避让—微观应急响应”三级管控架构, 逐层递进; 运行机制包括常态监控、风险预警、避碰决策和应急干预, 并保持人机协同与岸基支持通道的实时贯通。(3) 海事规则(COLREGs)对智能避碰的约束要求。COLREGs为智能避碰提供基本法律与操作依据, 要求系统在规则适用水域内严格遵循对遇、交叉、追越等局面下的避让责任划分, 并兼顾良好船艺, 确保决策合法合规。

1.2 智能船舶避碰系统架构与核心模块

(1) 环境感知与信息采集模块(AIS、雷达、视觉

感知)。该模块融合AIS动态静态数据、雷达回波、视觉图像及电子海图等多源信息, 经去噪、关联与融合处理, 生成统一航行态势图, 为后续评估决策提供可靠数据基础。(2) 风险评估与态势研判模块。基于采集信息, 运用碰撞危险度模型、运动外推及会遇态势识别方法, 量化最小会遇距离、最小会遇时间等关键指标, 结合水域环境与COLREGs要求, 完成危险等级划分与演变趋势研判^[1]。(3) 自主决策与应急执行模块。依据评估结果, 生成符合COLREGs的避让策略, 包括转向、变速或组合机动方案, 并通过自动舵、主机遥控系统精准执行; 在突发应急状态下, 支持快速预案触发与人机权限切换。

1.3 船舶碰撞风险成因与应急处置场景分类

(1) 动态船舶交汇碰撞风险成因。主要源于双方航向交叉、相对速度大、会遇态势突变或通信不畅, 导致避让意图不明或协同失误, 尤其在多船交汇时, 局部航行态势高度耦合, 易诱发连锁风险。(2) 静态障碍物与复杂航道碰撞风险成因。包括浅滩、沉船、桥区及航道弯曲狭窄处, 船舶操纵受限, 富余水深不足, 风流影响显著, 加之导航误差或驾驶员疲劳, 易发生触碰、搁浅等事故。(3) 常规会遇、紧急突发、多船混战等应急场景划分。常规会遇指典型两船态势, 按COLREGs规则避让; 紧急突发场景涵盖舵机失灵、主机故障或人员落水等意外事件; 多船混战指三船及以上密集交汇, 局面复杂, 需综合权衡安全、经济与通航秩序, 迅速做出联动响应。

2 智能船舶航行安全管控中的避碰应急处置核心逻辑与运行机制

2.1 避碰应急态势感知与风险研判逻辑

(1) 多源航行数据融合与态势实时感知逻辑。以 AIS、雷达、视觉传感器和电子海图为基础数据源,采用时空同步与特征级融合技术,将不同来源的目标信息统一至同一坐标系和同一时刻基准下,结合卡尔曼滤波对目标轨迹进行平滑与预测,生成涵盖本船运动状态、它船动态分布及周围环境要素的综合态势图,以不低于 1Hz 的刷新率持续更新,确保感知信息与真实场景保持同步^[2]。(2) 碰撞风险量化评估与时序预警机制。基于最小会遇距离(DCPA)和最小会遇时间(TCPA)构建基础风险指标,结合船舶操纵性能和水域环境复杂度进行加权修正,采用风险矩阵法将碰撞危险划分为注意、警戒、警告和紧急四级,对应不同预警信号和处置时限;同时根据风险变化趋势进行递进式预警,避免单一阈值报警导致的误报或漏报问题。(3) 复杂环境下感知偏差与风险误判规避逻辑。在雨雾、夜间、遮挡等复杂条件下,采用多传感器交叉验证策略,当单一传感器数据异常时自动降权处理,优先信任一致性较高的信息来源;同步引入目标运动一致性检验机制,对瞬时跳变目标进行滤波剔除,对短暂丢失目标采用轨迹外推维持跟踪,避免因感知短暂异常而触发虚假警报或延误真实风险响应。

2.2 基于海事规则的避碰决策生成逻辑

(1) 对头相遇、交叉相遇、追越场景的规则适配逻辑。严格遵循 COLREGs 相关规定,对头相遇时双方各向右转向,明确转向幅度不低于规则建议值;交叉相遇时依据来船方位判定让路船与直航船角色,让路船采取大幅右转避让,直航船保向保速;追越场景中追越船选择从他船左舷或右舷安全驶过,并持续监测相对位置变化,确保整个避让过程与规则条文逐项对应,消除决策的规则模糊性。(2) 单目标与多目标船舶避碰决策差异化生成逻辑。单目标场景下,决策重心集中于计算最佳转向角度和幅值,直接输出避让方案;多目标场景则需先对各目标进行危险度排序,确定首要威胁与次要威胁,采用逐次消解或协同优化的方式生成联合机动方案,必要时将复杂多船冲突拆解为若干有序的子冲突逐步处理,确保在高度交织的局面下仍能形成可执行的避让指令^[3]。(3) 决策最优性、合规性与安全性协同平衡逻辑。构建以航行安全为首要约束、COLREGs 合规性为硬性约束、航程和能耗损失为优化目标的多目标评价函数,通过启发式搜索或优化算法在可行解空间内筛选最优方案;当合规性方案与安全性方案存在冲突时,以安全为优先考量并记录偏离规则的决策依据,确保系统在

极端情况下仍能做出合理权衡。

2.3 避碰应急动作执行与动态调控逻辑

(1) 航向、航速调整的分级应急执行逻辑。依据风险紧急程度将执行策略划分为三级:一级为常规避让,采用小幅度转向或微速调整,保持航行连续性;二级为紧急避让,执行较大幅度转向结合主机减速,迅速扩大安全间距;三级为极危避让,启动满舵转向配合全速倒车,以最大能力避免碰撞,同时自动发出高频声光警报警示他船。(2) 避碰过程中航行轨迹动态修正机制。在执行避让机动期间,系统持续跟踪它船运动变化,若发现实际相对态势与预期偏差超出容忍范围,立即启动滚动修正程序,以当前状态为起始点重新计算剩余避让路径,实现避让轨迹的动态微调,确保在整个应急过程中始终维持安全裕度,避免因它船突发机动导致原先方案失效^[4]。(3) 应急处置完成后的航线复位与状态复盘逻辑。当确认两船安全驶过且相对距离恢复至安全阈值以上后,系统逐步将船舶从避让航向平稳过渡回原计划航线,控制复位过程中的横移率和超调量;同时自动存储应急处置全过程态势数据和决策指令链,生成处置事件记录,为后续系统优化和事故分析提供完整的数据支撑。

2.4 人机协同应急处置辅助逻辑

(1) 人机权限划分与自主/人工干预切换逻辑。设定全自主、决策建议和人工控制三级运行模式:常规工况下由系统自主完成全部避碰操作;当风险等级升高或系统置信度下降时,切换至建议模式,系统提供避让方案供驾驶员审核确认;在系统故障或岸基明确要求时,立即切换至人工控制模式,权限转移过程清晰无延迟,并伴有明确的声光提示。(2) 极端工况下人工应急兜底处置逻辑。在感知系统大面积失效、通信链路中断或自主决策系统异常等极端情况下,系统保持基本航向航速维持功能,及时向驾驶员发出强制接管警报并同步推送最后有效的态势快照;驾驶台保留独立的手动操控界面和基础导航信息显示,确保人工能够在信息有限条件下完成应急操纵,形成可靠的安全兜底防线。

3 智能船舶航行安全管控中的避碰应急处置短板优化与管控策略

3.1 当前避碰应急处置逻辑存在的核心短板

(1) 复杂混行水域态势感知与预判局限性。在内河、港区及航道交汇等船舶密集水域,大量小型渔船、工程船未安装 AIS 设备,雷达和视觉传感器因遮挡严重难以连续跟踪,致使系统获取的态势信息不完整;同

时, 现有运动外推算法难以捕捉船舶频繁变速转向的非线性行为, 导致对未来数分钟内态势演变的预判精度显著下降, 制约了应急处置的提前介入能力。(2) 多船冲突场景决策逻辑的适配性不足。现有避碰决策主要针对两船会遇建立规则匹配模型, 当遭遇三船及以上交织的“混战”局面时, 系统容易在多个避让目标的优先级排序上出现矛盾, 甚至产生“来回摇摆”的指令震荡, 缺乏面向多目标协调的专用冲突解脱算法, 使得决策结果在工程上难以执行, 削弱了系统在复杂局面的实战效能。(3) 极端海况下应急处置响应滞后问题。在狂风、巨浪、暴雨雪等恶劣天气下, 船体横摇纵倾加剧, 舵效变差, 主机响应延迟增大, 但多数系统仍以静水模型为基准计算避让参数, 未实时引入风流浪修正因子; 加之传感器受干扰导致数据更新率下降, 从风险识别到指令输出的全流程耗时明显延长, 错过最佳避让窗口。

3.2 多场景适配的避碰应急逻辑优化方案

(1) 基于机器学习的风险预判逻辑优化。采集大量历史会遇轨迹与事故案例, 构建基于长短期记忆网络(LSTM)或图神经网络的目标运动预测模型, 学习不同船型、水域的典型航行模式, 提前2~3分钟输出高概率冲突热点区域; 同时引入注意力机制, 自动识别最危险目标, 将预判结果作为应急触发的先行信号, 大幅提升感知的前瞻性。(2) 多船博弈场景分层决策逻辑优化。建立“协同层—分配层—执行层”三层求解框架: 协同层综合各船态势, 确定整体避让走廊与禁止转向区域; 分配层按危险程度和COLREGs责任划分, 将多船冲突拆解为有序的两船子问题并逐一求解; 执行层对子方案进行组合校验, 剔除相互制约的动作, 最终输出各船均可执行的协调机动指令, 确保多目标避让的可行性和一致性^[5]。(3) 极端工况快速响应应急处置逻辑优化。构建环境扰动与船舶运动响应之间的实时映射模型, 根据风速、浪高、流向等参数动态调整转向半径、加速度等操纵特性; 设置高海况专用应急通道, 一旦触发, 自动简化评估流程, 直接选用大角度转向结合减速的保守策略, 同时加密指令刷新频率, 将响应周期压缩至常规工况的60%以内, 有效弥补执行延迟。

3.3 智能船舶航行安全避碰管控完善策略

(1) 搭建全流程避碰应急风险管控体系。沿“风险识别—预警发布—应急响应—效果评估—体系改进”主

线, 建立闭环管理流程, 配套分级应急预案和量化考核指标, 实现从日常监控到事后复盘的全程可追溯、可量化管理, 确保每个环节均有标准可依、有记录可查。(2) 强化船岸协同的应急联动管控机制。构建船端—岸基高速数据链路, 实现航行态势、决策方案和执行状态同步共享; 当船端系统遇高不确定场景时, 自动向岸基专家推送求助请求, 岸基可远程复核并下发修正指令; 定期开展联合演练, 明确信息交互格式与决策权责边界, 提升协同处置的默契度和时效性。(3) 完善智能避碰应急处置校验与迭代机制。建立应急处置案例知识库, 对每次避碰动作的时效性、安全裕度和能耗成本进行量化评估, 识别逻辑缺陷; 通过数字孪生仿真平台, 对新策略进行海量场景测试, 验证改进效果; 采用月度迭代更新机制, 将验证通过的新模型部署至船端, 使系统持续适应复杂多变的水域环境, 逐步提升智能化水平。

结束语

本文系统拆解智能船舶避碰应急处置的完整逻辑体系, 明确感知研判、决策执行、人机协同的运行机理, 精准识别当前技术应用中的核心短板。通过适配多复杂航行场景, 提出针对性的逻辑优化方法与全流程管控完善策略, 有效弥补传统避碰系统的场景适配缺陷。研究成果可有效提升智能船舶复杂工况下的避碰应急处置效率与安全性, 为智能航运安全管控体系建设、船舶自主航行技术优化提供理论支撑与实践依据。

参考文献

- [1] 关巍, 郝淑慧, 崔哲闻, 张鑫. 基于改进DDPG算法的无人船自主避碰决策方法[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(1): 172-180.
- [2] 孙晓晴, 张可. 基于改进速度障碍算法的直航船避碰决策研究[J]. 水运工程, 2025, 33(08): 102-108.
- [3] 杨胜飞, 袁伟, 李丽娜. 复杂受限水域智能船舶航行风险管控与应急避碰策略[J]. 大连海事大学学报, 2024, 50(03): 36-43.
- [4] 王宁, 张英俊. 智能船舶航行避碰应急处置的规则适配与逻辑优化[J]. 中国航海, 2023, 46(04): 78-84.
- [5] 胡启星, 史成昊, 陈昊. 基于强化学习的规则合规船舶避碰控制策略[J]. 海洋工程, 2024, 42(06): 118-125.