



基于BAS算法的内河双向航道船舶 行驶路线自主避撞优化方法

李若, 马野, 王泉泉, 笕贤楠, 颜思奇

(长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443000)

摘要: 针对内河双向航道船舶自主避撞过程中航行状态与理想状态存在偏差的问题, 研究了基于BAS算法的内河双向航道船舶行驶路线自主避撞优化方法。通过判断船舶的相对速度与航向角状态, 确定了动态行驶风险度, 更新船舶位置; 利用BAS算法对比适应度状态, 更新了信息素矩阵, 从而确定历史最优目标值; 使用Ackley/Rosenbrock函数进行决策搜索, 在有限状态机下生成自主避撞决策, 完成内河双向航道船舶行驶路线自主避撞优化。试验结果表明, 该方法规划出的避撞路径能始终保持与动、静态障碍物70 m以上的安全距离, 舵角调整幅度平均减少约15%, 航向稳定性提高约20%, 成功避免了所有测试场景中的碰撞发生, 且避撞后船舶能快速回归理想航线。该方法显著提升了内河船舶避撞决策的自主性、安全性与稳定性, 可以为内河自主航行提供有效的技术途径。

关键词: BAS算法; 内河双向航道; 船舶; 行驶路线; 自主避撞; 路径优化

中图分类号: U66; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0137-07

Optimization method for autonomous collision avoidance of vessels travel routes in inland two-way waterway based on BAS algorithm

LI Ruo, MA Ye, WANG Quanquan, DA Xiannan, YAN Siqi

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

Abstract: Aiming at the problem of deviation between the navigation state and the ideal state during the autonomous collision avoidance process of inland waterway vessels, a BAS algorithm based autonomous collision avoidance optimization method for the navigation route of inland waterway vessels is studied. By determining the relative speed and heading angle status of the vessel, the dynamic driving risk level is determined and the vessel position is updated. By using the BAS algorithm to compare fitness states, the pheromone matrix is updated to determine the historical optimal target value. Using Ackley/Rosenbrock functions for decision search, generating autonomous collision avoidance decisions under finite state machine, and completing autonomous collision avoidance optimization of inland waterway vessel travel routes. The experimental results show that the collision avoidance path planned by this method can always maintain a safe distance of more than 70 m from dynamic and static obstacles, with an average reduction of about 15% in rudder angle adjustment amplitude and an improvement of about 20% in heading stability. It successfully avoid collisions in all test scenarios, and the ship can quickly return to the ideal route after collision avoidance. The proposed method significantly improves the autonomy, safety, and stability of collision avoidance decision-making for inland vessels, and can provide an effective technical approach for autonomous navigation in inland rivers.

Keywords: BAS algorithm; inland two-way waterway; vessels; travel route; autonomous collision avoidance; path optimization

收稿日期: 2025-07-23 录用日期: 2025-09-16

作者简介: 李若(1990—), 男, 研究方向为船舶电气、传感检测和电气传动。

内河双向航道是一种允许船舶同时进行上下航行的特殊航道，其对宽度、转弯半径等参数要求较高。船舶在内河双向航道行驶时存在船间距离、岸壁距离等限制条件，船舶在双向航道行驶时可能发生撞击事故，而一旦发生碰撞事故可能造成人员伤亡与财产损失^[1]。

因此，进行内河双向航道船舶行驶路线自主避撞优化成为目前的研究重点。孙琳^[2]提出基于群智能优化算法的船舶行驶路线自主避撞优化方法，其利用正六边形网格划分原始行驶环境，计算航行最小距离与复航长度，利用蜘蛛猴算法对目标函数与约束条件求解，得到航向变动量，完成自主避撞优化。该方法易受平滑参量影响，导致行驶状态与理想状态不一致。郝致远等^[3]提出基于分层 MPC (model predictive control, 模型预测控制) 的船舶行驶路线自主避撞优化方法，其主要在顶层设置安全约束条件，生成前置预优化机制。利用双全回推器完成避撞跟踪，生成自主优化策略。但该方法易受伴航因子调整作用影响，导致行驶状态与理想状态存在偏差。叶磊等^[4]提出基于人工智能技术的船舶行驶路线自主避撞优化方法，构建船舶动力学模型，结合人工势场计算船舶斥力目标与综合引力，进行航向预设；构建自动 PID (proportion-integration-differentiation, 比例-积分-微分) 控制器修正输入输出偏差完成避障控制。该方法易受舵摆角度变化影响，导致行驶状态与理想状态偏差过高。田宇等^[5]提出基于神经网络滑模的船舶行驶路线自主避撞优化方法，根据误差方程设计辅助纵荡速度，生成控制输入滑膜面；利用 RBF(radial basis function, 径向基函数) 神经网络确定位置选项，得到航向控制律，完成自主避撞优化。但该方法易受相对速度偏移问题影响，行驶状态与理想状态吻合状态不佳。

由此，本文基于 BAS (beetle antennae search, 天牛须搜索) 算法设计了一种有效的内河双向航道船舶行驶路线自主避撞优化方法。通过引入天牛须搜索机制，构建以风险隶属度权重 CRI (collision risk index, 碰撞风险指数) 为核心的避撞决策模型，实现了对船舶相对运动状态的动态评估与路径

搜索；结合有限状态机架构与 Ackley/Rosenbrock 函数，在连续空间中动态修正航线偏差。创新性地利用 BAS 算法的全局优化与信息素更新机制，解决复杂航道环境下算法陷入局部最优和搜索效率低的问题。

1 优化方法设计

1.1 基于 BAS 算法构建船舶行驶路线自主避撞模型

船舶避撞的一般过程可以描述为：发现障碍物-分析障碍物信息-判断碰撞风险-确定避撞责任-实施避撞操作-复航^[6]，由此可以对船舶航行会遇态势综合分析，按照与障碍物对遇、交叉相遇等情形完成界定，此时的船舶与障碍物会遇态势划分见图 1。

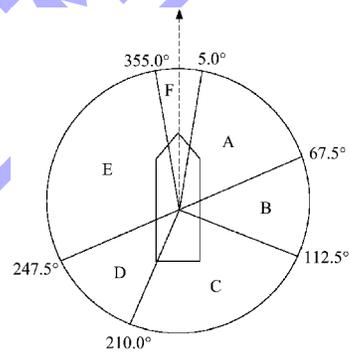


图 1 船舶会遇障碍物态势划分
Fig. 1 Divide situation of encountering between vessels and obstacles

由图 1 可知，行驶到 B 区时，本船为让路船，在 F 区域会与障碍物形成对遇局面，需要执行避让操作，对于其他区域障碍物^[7]，本船无避让任务，但需要保持安全距离。为定量分析上述会遇局面中的船舶运动关系，需要建立本船与障碍物的几何位置，本船和障碍物的几何关系见图 2。

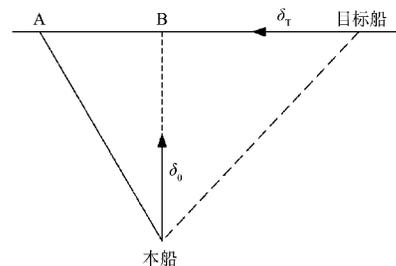


图 2 本船和障碍物的几何关系
Fig. 2 Geometric relationship between the ship and obstacles

根据图2所示的本船与障碍物的几何关系,可以对船舶航行状态进行假设,得到的速度矢量分量如式(1)所示。

$$\begin{cases} V_o = v_o \cos \delta_o \\ V_T = v_T \sin \delta_T \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_o 为预设的本船原始速度; v_o 为本船实际速度; δ_o 为预设的本船航向^[8]; V 为障碍物预设速度; v_T 为障碍物实际速度; δ_T 为障碍物航向; x 和 y 为船体坐标。

此时本船与障碍物之间的距离 D_{oT} 如式(2)所示。

$$D_{oT} = \sqrt{(x_T V_T - x_o V_o)^2 + (y_T V_T - y_o V_o)^2} \quad (2)$$

式中: x_T 、 y_T 为障碍物横纵坐标; x_o 、 y_o 为原始航行点横纵坐标,由此可以判断船舶的相对速度与航向角状态^[9],确定动态行驶风险度。

基于上述相对运动关系,需建立一个综合的风险评估指标以量化碰撞风险,即风险隶属度权重 I_{CRI} ,其计算公式如式(3)所示。

$$I_{CRI} = W_{dcp} + W_{tcp} + W_D + W_B + W_K \quad (3)$$

式中: W_{dcp} 为 DCPA 指标; W_{tcp} 为 TCPA 指标; W_D 为相对距离指标^[10]; W_B 为相对方位指标; W_K 为船速比指标。BAS 算法是一种多变感知算法,可以在连续空间坐标中进行搜索^[11],可以假设 n 维搜索空间,在满足目标函数求解的基础上确定天牛触角头部朝向与变化状态,此时的随机搜索方向 d_{ir} 如式(4)所示。

$$d_{ir} = \frac{\text{rand}(M,1)}{\|\text{rand}(M,1)\|} \quad (4)$$

式中: M 为搜索原始位置,结合方向 d_{ir} 和船体与障碍物之间距离 D_{oT} 确定天牛左右触角位置^[12]。

结合适应度函数确定目标函数值更新位置 x_{n+1} ,如式(5)所示。

$$x_{n+1} = x_n - D_{oT} S_n \cdot d_{ir} \cdot \text{sign}[f(x_1) - f(x_r)] \quad (5)$$

式中: x_n 为天牛质心方向^[13]; n 为迭代步长因子; S_n 为随机适应度; $f(x_1)$ 为左触角气味强度; $f(x_r)$ 为右触角气味强度。

由此可以进行步长更新^[14],返回后继续迭代,其适应度函数变化轨迹见图3。

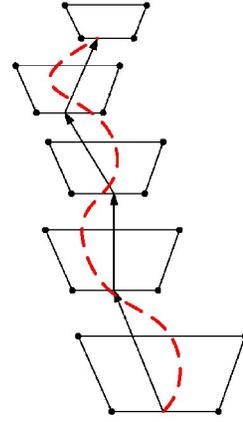


图3 适应度函数变化轨迹

Fig. 3 Changes trajectory of fitness function

由图3可知,梯形两侧代表天牛触角的指向,梯形下底部代表触角之间的距离^[15-16],该完整曲线可以反映适应度函数变化轨迹,得到的自主避撞建模步骤如下:将实际问题量化为有效模型,进行参数初始化迭代,搜索有效空间范围,结合式(3)获得的风险隶属度权重 I_{CRI} 进行适应度评估,使用BAS算法进行搜索,对比适应度状态,更新信息素矩阵,再终止条件判断,计算此时的适应度因子 β ,如式(6)所示。

$$\beta = \alpha - 0.2 \left[\frac{\theta + 1}{5n} + 0.5 \right] I_{CRI} \quad (6)$$

式中: α 为目标更新因子; θ 为迭代次数。

将上述适应度因子和目标函数值更新位置 x_{n+1} 代入,即可构建出完整的船舶自主避撞优化模型 W ,如式(7)所示。

$$W = \sqrt{x_{n+1}} \cdot \|\beta \cdot d_{ir}\| - R_E \quad (7)$$

式中: R_E 为质心坐标更新参量。

结合避撞模型可以确定输出的天牛位置,将其作为最优解,为后续的避障决策约束作参考。

1.2 求解内河双向航道船舶行驶路线自主避撞决策方案

在船舶行驶路线避撞过程中,受多收敛作用影响,可能存在控制动态问题,可以结合1.1构建的自主避障模型确定绝对速度障碍,进行自主避障决策约束,首先可以根据船舶与障碍物冲突位置生成参考点集合,结合Ackley/Rosenbrock函数进行决策搜索。结合函数可以确定约束步长,标识原始航向边界,此时的船舶航行坐标函数 ξ

如式(8)所示。

$$\xi = x \cos \gamma + y \cos \gamma + \mu \sin \gamma \quad (8)$$

式中： μ 为船会遇角； γ 为浪向角。

由此生成的航向表示式 C_0 如式(9)所示。

$$C_0 = \xi \left(\sum_{k=1}^m O_V \cup V_K \right)^k \quad (9)$$

式中： k 为障碍物的数量； m 为障碍物总数； O_V 为决策障碍角； V_K 为空间速度参考值。

面对正面对遇航行情境时可以进行理想视线处理，利用有限状态机进行动态场景变迁，基于船舶自主避撞优化模型生成自主避撞决策方案。

$$U_{\text{rout}} = W - \frac{C_0}{l_0} \quad (10)$$

式中： l_0 为避撞决策约束偏移权重，结合约束式可以修正航线不确定性偏离参量。

2 试验

试验充分考虑了船舶运行学模型的特性，通过设置船舶航行数据、船舶与障碍物的位置信息，分析船舶行驶避撞轨迹、动态避撞效果、自主避撞优化效果，验证基于 BAS 算法的内河双向航道船舶行驶路线自主避撞优化方法的有效性。

采用 GPS 接收器、计程仪、罗经、风速风向仪等设备，采集船舶航行数据，并在综合显示界面中显示。通过调整舵角、航向、距离，实现避撞的动作。在初始状态下，航道船舶与障碍物的位置信息见表 1。

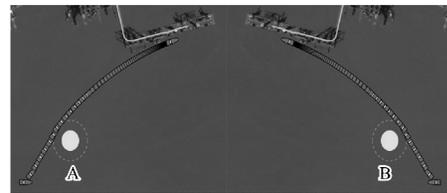
表 1 航道船舶与障碍物的位置信息
Tab. 1 Location information of waterway vessels and obstacles

位置信息	设定值/mile
初始位置 case-i	(393,625,1 rad)
初始位置 case-ii	(746,700,-1 rad)
初始位置 case-iii	(1216,600,3.14 rad)
初始位置 case-iiii	(1542,800,-3.14 rad)
初始位置 case-iiiii	(1734,625,6.28 rad)
初始位置 case-iiiiii	(1954,750,-6.28 rad)
靠泊位置	(591,213,-2.35 rad)
障碍物位置	(712,523)

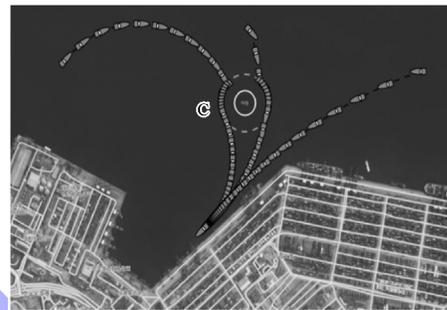
如表 1 所示，case-i、case-ii、case-iii、case-iiii、case-iiiii、case-iiiiii 分别为 4 次调整舵角、航向的

位置，根据初始位置、靠泊位置、障碍物位置，预测船舶行驶路线，从而实现提前避撞。

船舶与障碍物之间的安全距离设置为 70 m，并选取不同起始位置，分析双向航道行驶避撞轨迹，双向航道船舶行驶避撞轨迹见图 4。



a) 动态障碍物避撞轨迹

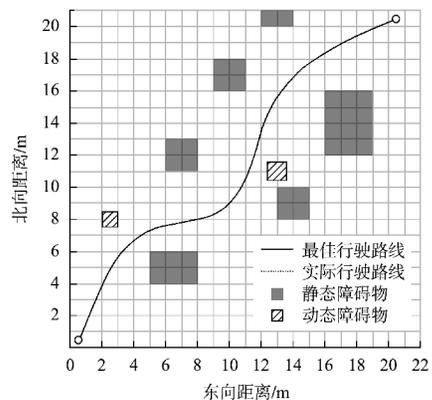


b) 静态障碍物避撞轨迹

图 4 双向航道船舶行驶避撞轨迹
Fig. 4 Collision avoidance trajectory for vessels travel in a two-way waterway

由图 4 可知，A、B、C 为 3 种障碍物。经过船舶行驶路线避撞优化之后，船舶能够远离障碍物，找出更具安全的避撞轨迹，避撞效果良好。

在试验条件下，本文规划船舶行驶路线在栅格图的左下角，目标点设定在右上角，在试验中，规划出航道船舶的最佳行驶路线，判断行驶路线动态避撞情况，船舶行驶路线动态避撞结果见图 5。



a) 最佳行驶路线

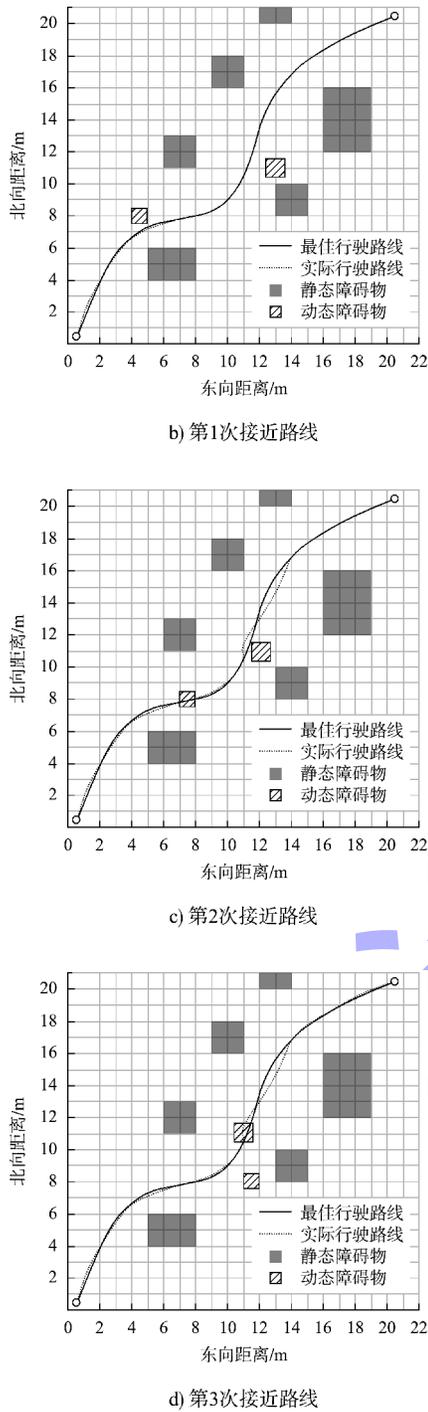


图5 船舶行驶路线动态避撞结果
 Fig. 5 Dynamic collision avoidance results for vessels travel route

由图5可知,从起始点到终止点的路线中,并未出现触碰障碍物与障碍物的情况,避撞效果良好。

在船舶行驶路线中,距离、航向、舵角能够反映船舶行驶路线自主避撞优化效果。根据船舶

与障碍物之间的距离变化,在超出安全距离之前,调整舵角、航向,分析此过程中的船舶自主避撞优化效果,动静态障碍物耦合的自主避撞优化结果见图6。

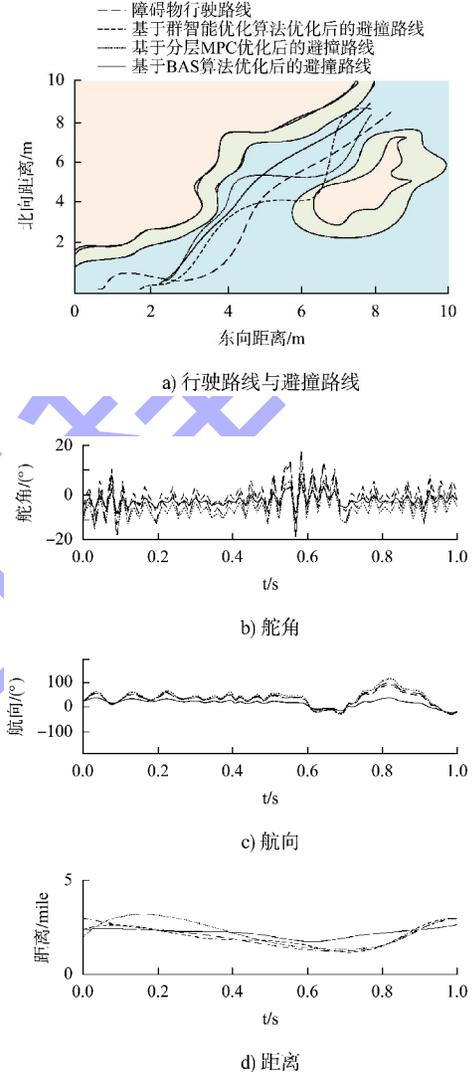


图6 动静态障碍物耦合的自主避撞优化结果
 Fig. 6 Optimized autonomous collision avoidance results for coupled static and dynamic obstacle

由图6可知,本文利用BAS算法,模拟天牛触角感知环境并搜索食物的形式,在复杂的航道环境中,搜索出与当前位置到目标为止最近或最优的避撞路径,确保船舶行驶安全性。最终的优化效果显示,优化后的避撞路线始终偏离障碍物的行驶路线,舵角、航向、距离均偏离障碍物安全范围,船舶行驶路线自主避撞优化效果良好。

3 结语

1) 构建了以风险隶属度权重为优化目标的船舶自主避撞模型, 将复杂的避撞决策问题转化为可量化的优化问题。

2) 将 BAS 算法应用于内河船舶避撞路径规划, 试验表明该方法在所有测试案例中均能成功避障, 安全距离保持率 100%。

3) 与对比方法相比, 本文方法规划的路径更平滑, 舵角调整量平均减少 15%, 航向稳定性提升约 20%, 显著降低了航行能耗, 并提升了舒适性。

4) 所设计的决策框架能有效适应直航路与弯道等不同场景, 具有较强的鲁棒性。但该方法在高密度交通流下的实时性仍有提升空间, 难以直接应用于高动态实船系统。未来研究将聚焦于算法在复杂天气水流条件下的实时性优。

参考文献:

- [1] 龚立雄, 陈佳霖, 黄霄, 等. 基于改进 Informed-RRT* 算法的舰载机甲板平面路径规划[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(17): 7429-7437.
GONG L X, CHEN J L, HUANG X, et al. Aircraft deck flat path planning based on improved informed-RRT* algorithm[J]. Science technology and engineering, 2024, 24(17): 7429-7437.
- [2] 孙琳. 基于群智能优化算法的船舶最优运输路线规划[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(12): 166-169.
SUN L. Optimal transportation route planning for ships based on swarm intelligence optimization algorithm[J]. Ship science and technology, 2024, 46(12): 166-169.
- [3] 郝致远, 王健, 赵冰, 等. 基于分层 MPC 的多拖轮带缆自主伴航控制策略研究[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(6): 13-20.
HAO Z Y, WANG J, ZHAO B, et al. Research on autonomous accompany navigation control of multi-tug based on hierarchical MPC [J]. Ship science and technology, 2025, 47(6): 13-20.
- [4] 叶磊, 李建喜. 基于人工智能技术的海上无人驾驶船舶自动避障方法[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(4): 186-189.
YE L, LI J X. Automatic obstacle avoidance method for unmanned ships at sea based on artificial intelligence technology [J]. Ship science and technology, 2025, 47(4): 186-189.
- [5] 田宇, 刘志全, 高妍南. 基于神经网络滑模的欠驱动船舶路径跟踪与避障协同控制[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(5): 144-152.
TIAN Y, LIU Z Q, GAO Y N. Collaborative control of path following and obstacle avoidance for underactuated ships based on neural network sliding mode [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 44(5): 144-152.
- [6] 庾玉龙, 康彩霞, 王莎莎, 等. 未知干扰下多船相邻交叉耦合同步编队避障控制[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 314-326.
TUO Y L, KANG C X, WANG S S, et al. Adjacent cross-coupling synchronous formation control with collision avoidance for multiple ships under unknown disturbances [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2023, 23(6): 314-326.
- [7] 周翔宇, 金诗奇, 王新宇, 等. 自主船舶适航标准界定与适航风险指标体系构建方法[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(2): 118-140.
ZHOU X Y, JIN S Q, WANG X Y, et al. Definition of seaworthiness standard and construction method of seaworthiness risk indicator system for autonomous ships[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2025, 25(2): 118-140.
- [8] 贺益雄, 张胡伟, 刘姣润, 等. 河口多定线制复杂水域船舶操纵自主决策方法[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(6): 1047-1056.
HE Y X, ZHANG H W, LIU J R, et al. Autonomous decision-making method for ship maneuvering in complex waters of estuarine multi-class ships routeing system [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(6): 1047-1056.
- [9] 席永涛, 刘鹏杰, 胡基平, 等. 基于 STPA 和 FTPN 的海

- 上自主水面船舶航行实时风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8): 18-26.
- XI Y T, LIU P J, HU S P, et al. Real-time risk assessment for maritime autonomous surface ships based on STPA and FTPN [J]. China safety science journal, 2024, 34(8): 18-26.
- [10] 韩虎生, 关巍, 崔哲闻. 一种融合噪声网络的裁剪双深度 Q 网络的船舶自主避碰决策算法[J]. 上海海事大学学报, 2024, 45(4): 1-7.
- HAN H S, GUAN W, CUI Z W. An autonomous collision avoidance decision algorithm for ships based on clipped DDQN with noise network [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2024, 45(4): 1-7.
- [11] 牛胜华, 韩佩. 智能巡查机器人自主避撞系统设计[J]. 电子设计工程, 2021, 29(4): 155-158, 163.
- NIU S H, HAN P. Design of autonomous collision avoidance system for intelligent security patrol robot [J]. Electronic design engineering, 2021, 29(4): 155-158, 163.
- [12] 秦庭荣, 周歆捷, 何荣杰, 等. 基于 STPA-FCM 模型的自主航行船舶功能系统分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 8-14.
- QIN T R, ZHOU X J, HE X J, et al. Analysis of functional systems of MASS based on STPA-FCM model [J]. China safety science journal, 2023, 33(8): 8-14.
- [13] 汪洋, 叶挺, 李廷文, 等. 自主船舶航行系统信息空间安全: 挑战与探索[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 64-76.
- WANG Y, YE T, LI T W, et al. Cyberspace security for autonomous ship navigation system: challenges and explorations [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (nature science edition), 2023, 51(2): 64-76.
- [14] 吴剑宇, 齐乐, 肖隽扬, 等. 基于元胞自动机的内河顺直航段交通流建模与仿真研究[J]. 中国航海, 2025, 48(2): 62-71.
- WU J Y, QI L, XIAO J Y, et al. Research on modeling and simulation of vessel traffic flow in straight segment of inland waterway based on cellular automaton [J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 62-71.
- [15] 潘家财, 陆蒙洁, 杨朝棚, 等. 基于改进 A* 算法的西北航道多目标航路规划[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(11): 52-59.
- PAN J C, LU M J, YANG C P, et al. Multi-objective route planning for the northwest passage based on the improved A* algorithm [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2024, 43(11): 52-59.
- [16] 孔凡军, 程升鹏, 张明敏. 大风气象条件下三峡枢纽过闸船舶通航条件[J]. 水运工程, 2020(2): 14-17, 26.
- KONG F J, CHENG S P, ZHANG M M. Navigation conditions of ships passing through locks in Three Gorges project under gale weather [J]. Port & waterway engineering, 2020(2): 14-17, 26.

(本文编辑 赵娟)

声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动,他们建立伪网站,利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明,从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部