

# 基于《规则》的渔船智能避碰决策研究

王悦凯, 任玉清

(大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 为提高渔船驾驶员的避碰决策能力, 提出一种基于《国际海上避碰规则》(COLREGS) (简称《规则》) 的渔船智能避碰决策方法。该方法按照《规则》的要求确定船舶会遇态势, 根据最近会遇距离 ( $d_{CPA}$ ) 和最近会遇时间 ( $t_{CPA}$ ) 计算得出碰撞危险度 ( $I_{CR}$ )。在针对多位渔船驾驶员避碰行为调查的基础上, 对 Goodwin 海洋观测结果进行修正, 得到渔船安全会遇距离 ( $S_{DA}$ ); 对传统的人工势场法 (APF) 进行改进, 将其与遗传算法 (GA) 相结合, 以确保渔船安全避碰。运用仿真试验验证了该算法的有效性。结果表明: 该算法消除了以往单一人工势场法在船舶避碰决策方面的缺陷, 得到最佳转向幅度及恢复原航迹的时机, 为渔船驾驶员提供一条适用于《规则》、安全无碰撞的避碰决策, 可为驾驶人员避碰实践提供一定的参考。

**关键词:** 人工势场法; 遗传算法; 安全会遇距离; 船舶避碰

中图分类号: U698 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.004

## Research on intelligent collision avoidance decision-making of fishing vessels based on the COLREGS

WANG Yuekai, REN Yuqing

(School of Navigation and Naval Architecture Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Collision accidents pose a serious threat to the navigation and operational safety of fishing vessels. To enhance the decision-making capability of fishing vessel operators, this paper proposes an intelligent collision avoidance decision-making method based on the Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGS). This method determines the encounter situation of the vessel in accordance with the COLREGS requirements and calculates the degree of collision risk, represented by the Collision Risk Index ( $I_{CR}$ ), based on the Distance to the Closest Point of Approach ( $d_{CPA}$ ) and the Time to the Closest Point of Approach ( $t_{CPA}$ ). By investigating the collision avoidance behaviors of multiple fishing vessel operators, the Goodwin marine observation results were revised to establish the Safe Distance Approach ( $S_{DA}$ ) specific to fishing vessels. Furthermore, the traditional Artificial Potential Field (APF) method was improved and integrated with a Genetic Algorithm (GA) to ensure that fishing vessels can avoid collisions safely and effectively. Finally, simulation experiments were conducted to validate the effectiveness of the proposed algorithm. The results demonstrate that the proposed method overcomes the limitations of the single artificial potential field approach in previous vessel collision avoidance decision-making systems. It achieves optimal steering amplitude and determines the appropriate timing for returning to the original course, thereby providing a safe and collision-free decision-making solution that complies with COLREGS. This study can serve as a valuable reference for practical collision avoidance operations by deck officers.

**Key words:** Artificial Potential Field; Genetic Algorithm; Safe Distance Approach; ship collision avoidance

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 农业农村部渔业渔政管理局资助项目 (070522056)

作者简介: 王悦凯 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业船舶安全。E-mail: 491822234@qq.com

通信作者: 任玉清 (1971—), 男, 教授, 研究方向为渔船安全系统工程。E-mail: renyuqing@dlou.edu.cn

引用格式: 王悦凯, 任玉清. 基于《规则》的渔船智能避碰决策研究[J]. 中国航海, 2025, 48(3): 30-40.

WANG Y K, REN Y Q. Research on intelligent collision avoidance decision-making of fishing vessels based on the COLREGS[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 30-40. (in Chinese)

我国是一个渔业大国,渔船保有量居全球第一。同时,我国沿海又是交通最繁忙的水域之一,渔船碰撞事故时有发生,不仅污染海洋环境,还会造成巨大的财产损失和人员伤亡。根据中国渔业互保协会统计<sup>[1]</sup>,超过半数的渔船事故是碰撞事故,驾驶员操作不当和疏忽瞭望是造成渔船碰撞事故的主要原因。据我国渔业主管机关统计表明<sup>[2]</sup>,2010—2020年,共发生渔船碰撞事故338.5起,造成625人死亡。多方面的研究表明,渔船船员对《国际海上避碰规则》(Convention on the International Regulation for the Preventing Collision at Sea, COLREGS)(简称《规则》)不熟悉,安全意识薄弱以及作业方式不规范是导致碰撞事故频繁发生的重要原因。如何减少此类事故已成为国家海事局和农业农村部渔业渔政管理局共同关注的焦点。

1) 近年来,针对渔船碰撞事故,很多专家采用多种方法和模型进行分析,提出相应的策略和建议以预防事故的发生。JUNG等<sup>[3]</sup>提出对渔船方面的要求,建议加强船员安全教育和演习等方面来降低渔船碰撞事故危险;CHOU等<sup>[4]</sup>对不同水域的渔船碰撞进行研究,描述渔船与非渔船碰撞的特征及原因;YANG等<sup>[5]</sup>利用加权核密度估计方法直观分析商船与渔船碰撞事故的空间分布,从主观、客观和智能的海事系统角度提出相关建议。

2) 在船舶自动避碰决策方面,不少学者采用确定性算法和启发式算法来解决船舶自动避碰问题。倪生科等<sup>[6]</sup>利用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和非线性规划理论对船舶避碰路径进行规划,用船舶安全性、路径平滑度和路径长度等因素建立适应度函数,仿真结果显示混合GA能有效地提高船舶对路径的搜索能力;LYU等<sup>[7]</sup>通过修正人工势场法(Artificial Potential Field, APF)的斥力势场函数和相应的虚力,解决动态目标和静态障碍物的避碰问题,仿真结果表明该方法具有快速性和有效性的特点;曾勇等<sup>[8]</sup>提出一种基于粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)-遗传的混合优化算法,基于转向的幅度与航行时间建立避碰决策目标函数,结果证明该算法具有加速全局寻优和降低碰撞事故的优势;陈嘉敏<sup>[9]</sup>利用GA对渔船智能避碰算法与决策系统开展研究,进化遗传相关操作的概率,建立决策模型,仿真结果显示能找到渔船避碰的最优路线,属于专门针对渔船避碰决策开展的探索。

经过比较系统的梳理分析表明,目前专门针对渔船碰撞事故的研究较少,针对渔船避碰决策的研究更少。在避碰决策研究中还存在算法不够完

善<sup>[10]</sup>、未按照《规则》规定采取避让行动<sup>[11]</sup>、责任与紧迫局面的判断有所欠缺和只能应对他船保向保速的情况<sup>[12]</sup>等问题,针对渔船的避碰决策研究中还存在未考虑渔船尺度特点、操纵避碰特性和驾驶员避碰经验等问题。为此,本文拟在前人研究的基础上,基于APF和GA,综合考虑《规则》要求、船舶碰撞危险度(Collision Risk Index,  $I_{CR}$ )和安全会遇距离(Safe Distance Approach,  $S_{DA}$ )等因素,建立适合渔船避碰的决策模型,以解决判断避让责任和紧迫局面的问题,提高算法的性能和效率,同时,对算法生成的避碰决策进行可行性分析,目的是为渔船驾驶员提供一条受《规则》约束的避碰决策(避让的时机和幅度)。

## 1 会遇态势和安全领域划分

### 1.1 会遇态势

《国际海上避碰规则》是国际海事组织为确保船舶安全和减少船舶碰撞而制定的强制性海上交通规则,规定了海上交通的各种情况和相应的避让方法。根据《规则》的规定,将两船之间的会遇局面划分为4个区域,见图1。图1中:A为对遇区域,迎面行驶当目标船(Target Ship, TS)和本船(Own Ship, OS)的相对方面角在 $[355^\circ, 360^\circ]$ 或 $[0^\circ, 5^\circ]$ 内,并且存在碰撞危险时,根据《规则》第十四条规定,OS和TS各应向右转向,从而各从他船的左舷驶过;B为交叉相遇区域,当TS和OS的相对位置在 $[5^\circ, 112.5^\circ]$ ,两船相遇并存在碰撞危险时,根据《规则》第十五条规定,OS为让路船,TS为直航船,OS通常右转以避免碰撞;C为追越区域,根据《规则》第十三条规定,当OS在目标船正横后大于 $22.5^\circ$ 方向追越时,OS应给目标船让路;D为交叉相遇区域,如果TS和OS的相对位置在 $[247.5^\circ, 355^\circ]$ 内,当2艘船相遇并存在碰撞危险时,根据《规则》第十三条规定,OS为直航船,TS应给本船让路,如果TS不采取避碰措施,本船应根据《规则》第十七条,采取适当的避碰措施,防止碰撞事故的发生。

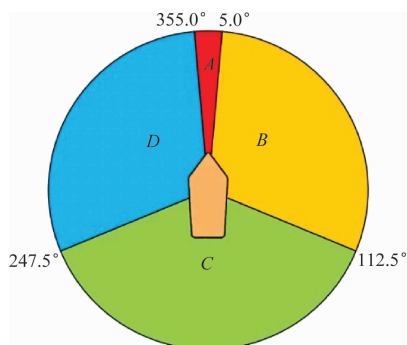


图1 会遇局面的划分

Fig. 1 The division of the situation that will meet

## 1.2 船舶碰撞危险度

船舶之间发生碰撞事故的可能性,通常由  $I_{CR}$  来度量<sup>[13-14]</sup>,本文基于  $d_{CPA}$  和  $t_{CPA}$  2 个参数加权的方式来确定危险度,危险度取值范围为  $[0, 1]$ 。当  $I_{CR}$  为 1.0 时,船舶一定会发生不可补救的事故;当  $I_{CR}$  为 0 时,船舶之间不存在碰撞危险,可自由通航;当  $I_{CR}$  达到或超过 0.5 时船舶就必须采取避碰措施防止碰撞事故的发生。

$d_{CPA}$  和  $t_{CPA}$  的隶属度函数为

$$u_{d_{CPA}} = \begin{cases} 1, & d_{CPA} < d_1 \\ 0.5 - 0.5 \sin \left[ \frac{\pi}{d_2 - d_1} \left( d_{CPA} - \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \right], & d_1 \leq d_{CPA} \\ 0, & d_2 < d_{CPA} \end{cases} \quad (1)$$

$$u_{t_{CPA}} = \begin{cases} 0, & t_2 < t_{CPA} \\ \left( \frac{t_2 - t_{CPA}}{t_2 - t_1} \right)^2, & t_1 \leq t_{CPA} \leq t_2 \\ 0, & 0 \leq t_{CPA} \leq t_1 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)~式(2)中: $d_1$  为船舶最小安全会遇距离; $d_2$  为船舶安全通过距离,文中  $d_2 = 2d_1$ ;  $t_1$  为船舶碰撞时间; $t_2$  为注意时间<sup>[15]</sup>。

本文采用综合模糊评价建立危险度的计算方法为

$$I_{CR} = \min \left( \frac{u(d_{CPA}) + u(t_{CPA})}{2}, 1 \right) \quad (3)$$

当船舶之间存在碰撞危险时,计算 OS 与 TS 之

间的危险度;当船舶间的危险度在规定的区间内  $(0, 0.5)$  时,可认为船舶进行避碰的措施是有效的。

## 1.3 安全会遇距离

在渔船避碰决策的研究中,可通过  $S_{DA}$  来判断船舶在该时刻是否存在碰撞危险, $S_{DA}$  的计算结果可用于确定规避行动的时机。

本文借鉴文献[16]的海洋观测结果见表 1。

表 1 Goodwin 海洋观测结果

Tab.1 Goodwin ocean observations

相对于本船方位/(°)	$d_{CPA}/n$ mile
0 ~ 112.5	0.85
112.5 ~ 247.5	0.45
247.5 ~ 360	0.70

在考虑到对船舶领域进行模糊边界处理及船舶的操作误差时,船舶  $S_{DA}$  为

$$S_{DA} = \text{domain} + |F_{BD}| + |\text{meanerror}| \quad (4)$$

式(4)中: $F_{BD}$  为模糊边界距离,  $F_{BD} = 0.267S_{DA}$ 。

本文通过  $d_{CPA} < S_{DA}$  来判断船舶在该时刻是否存在碰撞危险,考虑到对船长小于 50 m 的渔船而言 Goodwin 所提出的船舶领域太大,2023 年 3—5 月,借大连海洋大学开办渔船驾驶员培训班的机会,对 10 名二级船长和 10 名一级船副就  $S_{DA}$ 、避让时机和避让幅度等因素开展避碰行为调查问卷。在此基础上,结合渔船操纵特性、渔船驾驶员和船长的实际经验,对 Goodwin 的船舶领域进行修订,使之符合渔船操纵避碰实践,得到渔船安全会遇领域  $d_1$  见表 2。

表 2 渔船安全会遇领域  $d_1$

Tab.2 Fishing vessel safety encounter area  $d_1$

与本船相对舷角/(°)	000	090	180	270
n mile	0.85	0.64	0.45	0.70
天气晴朗的环境(白天)	>0.85	>0.64	>0.45	>0.70
黑夜中行驶或天气、海洋情况恶劣	=1.70	=1.28	=0.90	=1.40
气象状况特殊(大雾、大雪等)、能见度差	>1.70	>1.28	>0.45	>0.70

其中  $d_1$  的计算公式<sup>[17]</sup>为

$$d_1 = \begin{cases} 0.85 - \frac{\theta}{180^\circ} \times 0.2, & 0^\circ \leq \theta \leq 112.5^\circ \\ 1.0 - \frac{\theta}{180^\circ} \times 0.73, & 112.5^\circ < \theta \leq 180^\circ \\ 1.02 - \frac{360^\circ - \theta}{180^\circ} \times 0.57, & 180^\circ < \theta \leq 247.5^\circ \\ 0.85 - \frac{360^\circ - \theta}{180^\circ} \times 0.3, & 247.5^\circ < \theta \leq 360^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $\theta$  为来船的相对方位。

## 2 基于混合算法的渔船避碰决策研究

### 2.1 人工势场法

#### 2.1.1 传统人工势场法

人工势场法是文献[18]所提出的一种路径规划方法。基于 APF 避碰的基本思想是将船舶置身于一个势场中,将船舶视为移动物,目的地对船舶产生引力  $F_{att}(q)$ ,障碍物(动态目标船或静态碍航物)对船舶产生斥力  $F_{rep}(q)$ ,船舶在引力和斥力共同作用下控制船舶的目标航向,引导船舶沿着安全的路径避开障碍物到达目标点。

1) 总势场函数为

$$U_{total} = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (6)$$

船舶所受合力  $F_{total}$  定义为目的地产生的引力和障碍物产生的斥力的矢量和,有

$$F_{total} = F_{att}(q) + F_{rep}(q) \quad (7)$$

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} K_{rep} \left( \frac{1}{\rho(q, q_{obs})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \left( \frac{1}{\rho(q, q_{obs})^2} \right) \frac{q - q_{obs}}{\|q - q_{obs}\|}, & \rho(q, q_{obs}) < \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_{obs}) \geq \rho_0 \end{cases} \quad (11)$$

式(6)~式(11)中: $q_{goal}$ 为目标点距离; $q_{obs}$ 为障碍物距离,所设置的关键参数见表3。

表3 公式的参数含义

Tab.3 Parameter meanings of formulas

参数名称	参数含义
$K_{att}$	引力势场比例增益函数
$K_{rep}$	斥力势场比例增益函数
$\rho_0$	障碍物最大影响半径
$\rho(q, q_{goal})$	船舶位置与目的地的最短距离
$\rho(q, q_{obs})$	船舶位置到障碍物的最短距离

#### 2.1.2 改进 APF

采用传统 APF 模型计算船舶航行区域时通常存在以下3个问题。

1) 当在开阔水域中船舶航行时距离目的地太远,受到目的地引力作用大于受到障碍物的斥力作用,障碍物对船舶产生的斥力可忽略不计,导致船舶容易和障碍物发生碰撞。

2) 当目的地附近有障碍物时,目的地引力势场变弱,障碍物的斥力势场变强,船舶受到障碍物的斥力作用大于受到目的地的引力作用,导致船舶反复靠近和远离目的地,造成目标不可达问题。

3) 当船舶、障碍物和目的地三者在同一直线上时,船舶受到目的地产生的引力与障碍物产生的斥力大小相等方向相反,受到的合势场为零,导致船舶无法到达目的地而停滞或徘徊于局部最小点,无法继续向目的地前进。

2) 引力势场由船舶航行目的地定义,船舶引力势场函数为

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} K_{att} \rho(q, q_{goal})^2 \quad (8)$$

船舶所受引力  $F_{att}(q)$  定义为船舶引力势场函数  $U_{att}(q)$  的负梯度为

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = K_{att}(q_{goal} - q) \quad (9)$$

(3) 斥力势场由障碍物定义,障碍物斥力势场函数为

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{rep} \left( \frac{1}{\rho(q, q_{obs})} - \frac{1}{\rho_0} \right), & \rho(q, q_{obs}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_{obs}) > \rho_0 \end{cases} \quad (10)$$

船舶所受斥力  $F_{rep}(q)$  定义为障碍物斥力势场函数  $U_{rep}(q)$  的负梯度,有

① 针对问题1),当船舶距离目的地比较远时,将可能出现引力大于斥力的问题,采用文献[19]修改引力函数进行优化,改进以后的引力势场函数为

$$U_{att}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{att} (q - q_g)^2, & (q - q_g) \leq d \\ d K_{att} (q - q_g) - \frac{1}{2} K_{att} d^2, & (q - q_g) > d \end{cases} \quad (12)$$

改进后的引力为

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = \begin{cases} K_{att} (q_g - q), & (q - q_g) \leq d \\ -d K_{att} \frac{q - q_g}{\|q - q_g\|}, & (q - q_g) > d \end{cases} \quad (13)$$

式(12)~式(13)中: $q$ 为船舶位置; $q_g$ 为目的地位置; $d$ 为引力距离因数。

改进的 APF 通过对引力函数进行优化,使船舶距离目的地较远时,受到的引力减少,从而解决了船舶因为引力过大导致发生碰撞危险的问题。

② 针对问题2),当障碍物在目的地附近时,将可能出现斥力大于引力,导致发生目标不可达问题,采用文献[20]引入调节因数  $n$ ,改进斥力势场函数为

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{rep} \left( \frac{1}{\rho(q, q_{obs})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho^n(q, q_{goal}), & \rho(q, q_{obs}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_{obs}) > \rho_0 \end{cases} \quad (14)$$

改进后的斥力公式为

$$\mathbf{F}_{\text{rep}}(q) = -\nabla U_{\text{rep}}(q) =$$

$$\begin{cases} a_1 K_{\text{rep}} \left( \frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\rho^n(q, q_{\text{goal}})}{\rho^2(q, q_{\text{obs}})} + a_2 \frac{n}{2} K_{\text{rep}} \left( \frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho^{n-1}(q, q_{\text{goal}}), & \rho(q, q_{\text{obs}}) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(q, q_{\text{obs}}) > \rho_0 \end{cases} \quad (15)$$

式(14)~式(15)中: $n$ 为正数,文中设置 $n=2$ ;  $a_1 =$

$$\nabla \rho(q, q_{\text{obs}}) = \frac{q - q_{\text{obs}}}{\|q - q_{\text{obs}}\|}; a_2 = -\nabla \rho(q, q_{\text{goal}}) = -\frac{q - q_{\text{goal}}}{\|q - q_{\text{goal}}\|}。$$

改进的 APF 通过在原有的斥力函数中添加一个系数项  $n$ , 当船舶在靠近目的地时, 斥力随着船舶靠近目的地而增大, 增大的速率较改进之前减慢了, 在一定程度上缓解了斥力过大的问题。当船舶到达目的地时, 船舶受到的斥力为零, 目的地所在的位置是整个势场的全局最小点, 从而解决船舶距离障碍物过近导致目标不可达的问题。

③ 针对问题 3), 当引力与斥力大小相等方向相反时, 船舶陷入局部最小点时, 引入填平势场解决局部极小点问题。定义填平势场函数为

$$U_{\text{aff}}(q) = \begin{cases} K_{\text{aff}} \rho_{\text{goal}}, & \rho_{\text{goal}} > \rho_a \\ 0, & \rho_{\text{goal}} \leq \rho_a \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: $K_{\text{aff}}$ 为比例增益函数; $\rho_{\text{goal}}$ 为船舶位置与航行目的地的欧氏距离; $\rho_a$ 为船舶是否到达目标点的评判距离。

本文基于式(6), 当船舶陷入局部最小点时, 总场强度包括填平势场。定义总场函数为

$$U = U_{\text{att}}(q) + U_{\text{rep}}(q) + U_{\text{aff}}(q) \quad (17)$$

## 2.2 遗传算法

为解决上述的局部最小点问题, 引入 GA。GA 是历史上最早提出的基于群体的随机算法之一, 是一种众所周知的优化算法, 其灵感来源于生物进化过程, 模拟达尔文的适者生存理论<sup>[21]</sup>。GA 的基本要素由染色体表示, 通常染色体采用二进制字符串格式。在染色体中, 每个位点有 2 个可能的等位基因 0 和 1。染色体被认为是解空间中的点, 通过使用遗传算子来替换其种群。受生物学启发的操作是选择、变异和交叉, 适应度函数用于为种群中的所有染色体分配一个值。

### 2.2.1 路径编码方法

为实现将改进后的 APF 与 GA 相结合应用于渔船避碰决策的研究, 本文采用路径二维真值实数编

码向量来处理复杂的决策变量条件, 染色体中的基因用二进制码“0”和“1”表示, 染色体可对路径点进行解算。

### 2.2.2 遗传操作

1) 选择操作。选择操作是 GA 中的一个重要步骤, 其决定了特定的字符串是否会参与遗传过程, GA 的收敛速度取决于选择压力。本文采用轮盘赌选择法, 轮盘选择法将所有可能的字符串映射到轮盘上, 并根据其适合度值分配轮盘的一部分。根据染色体适应度值随机旋转以选择将参与下一代形成的特定解决方案, 即个体  $i$  被选中的概率为

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_j F_j} \quad (18)$$

式(18)中: $F_i$ 为个体  $i$  的适应度值。

2) 交叉操作。交叉操作是指随机选择一个位点, 通过改变染色体间的子序列来产生后代的过程。本文采用单点交叉算子, 在单点交叉中随机选择 1 个交叉点, 父母双方的遗传信息相互交换。单点交叉示意图 2。图 2 显示交换后的遗传信息, 其替换了双亲的尾部阵列来得到新的后代, 增加了群体的优越性。

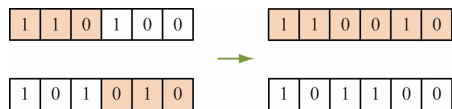


图 2 单点交叉示意

Fig. 2 Schematic diagram of single-point crossing

3) 变异操作。变异操作是根据概率随机翻转染色体的某个或某些遗传因数的基因值的过程, 常见的变异算子有交换突变、反转突变和随机变异等。

### 2.2.3 适应度函数确定

以势场强度大小为约束条件构建适应度函数为

$$f = 1 / \left[ U_{\text{att}} + U_{\text{aff}} + \sum_{i=1}^m U_{\text{rep}}(s_i) \right] \quad (19)$$

式(19)中: $U_{\text{rep}}(s_i)$ 为第  $i$  个障碍物的斥力势场强度; $m$ 为障碍物的个数。

## 2.3 渔船智能避碰决策系统

APF 的优点是算法简单, 路线平滑、实时性强; 缺点是容易陷入局部最小点, 无法应对复杂环境。

GA 的优点是可找到全局最优解,从而保证程序的有效性以及可行性。在通过势场函数进行避碰决策的基础上,应用 GA 的全局搜索能力强的特点对模型进行优化,判断是否为全局最优点,创建渔船智能避碰决策系统。通过船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)等助航设备获得船舶的航行信息,计算出船舶航向,完成会遇局面的判断、避障和恢复航迹。渔船智能避碰决策系统流程见图 3。

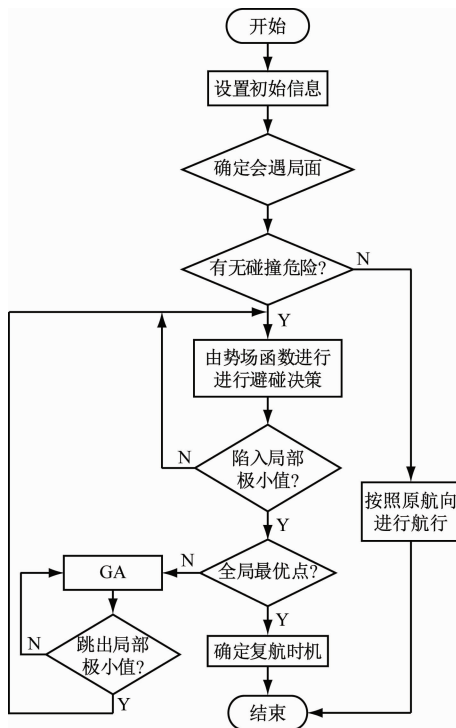


图 3 渔船智能避碰决策系统流程

Fig. 3 Fishing vessel intelligent avoidance decision system process

渔船智能避碰决策系统流程如下。

- 1) 根据船舶信息(航向、航速、距离)等,输入相关参数根据两船之间的方位和航向确定船舶间的会遇局面和船舶间的避让责任。
- 2) 计算  $I_{CR}$ , 判断是否存在碰撞危险,当  $I_{CR}$  超过 0.5 时,启动优化算法。
- 3) 当船舶之间存在碰撞危险时,应用算法进行避碰决策。
- 4) 得到安全的避碰决策和复航时机,避碰结束进行复航,回到原始航向。

## 3 仿真

### 3.1 可行性验证

本文通过仿真试验验证所提出混合算法的有效性和必要性,构建  $100 \times 100$  的运动环境,设置船舶

起点为  $(0, 0)$ , 终点为  $(100, 100)$ , 利用 MATLAB 2016a 在处理器为 2.80 GHz、内存为 16 GB 的计算机分别对传统 APF、改进 APF 和混合算法 3 种情况进行试验仿真,以证明算法的有效性。APF 相关参数值的设置见表 4,左侧为试验参数名称,右侧为关键参数值。GA 关键参数设置:交叉概率  $P_c$  为 0.65, 变异概率  $P_m$  为 0.10。

表 4 APF 相关参数值的设置

Tab. 4 Setting the values of relevant parameters of the artificial potential field method

参数	数值
引力势场增益函数 $K_{att}$	0.5
斥力势场增益函数 $K_{rep}$	0.5
填平势场增益函数 $K_{aff}$	0.3
斥力作用范围 $\rho_0$	25
最大迭代次数/次	2 000

使用 MATLAB 中的随机数函数来进行试验,生成均匀分布的伪随机数矩阵,在运动环境中随机设立 10 个圆形障碍物。传统 APF 避碰路径多次尝试结果见图 4,在多次的试验中并不能每次在最大迭代次数中找到避碰路径。相反,在某些情况下,由于梯度下降法的缺陷,船舶所受的排斥力和吸引力在矢量上抵消了,陷入局部最优的缺陷问题。

路径规划仿真结果见图 5。由图 5 可知:障碍物的位置完全一样,且航行目的地附近存在障碍物。船舶陷入局部最优的问题,导致船舶无法到达目的地如图 5a 所示;根据验证的改进 APF,通过上述的改进方法成功解决了局部最优问题  $I_{CR}$ 。由于障碍物的作用,船舶在接近目标点时改进 APF 中受到的斥力大于引力,需绕行较远的距离抵达目标点如图 5b 和图 5c 所示;在采取混合算法后,船舶在接近目标点时,虽仍受到障碍物的影响,但受到的排斥力远没有改进图 5b 中所受到的排斥力大,只需短距离地绕行即可到达目标点。

传统 APF、改进 APF 和混合算法的迭代次数见表 5。从迭代次数和路径可知:混合算法能有效地提高搜索速度;在临近目标点的表现,混合算法比起改进人工势场法能得到更平滑的路径。

表 5 算法的迭代次数比较

Tab. 5 Comparison of algorithm iterations

算法名称	传统 APF	改进 APF	混合算法
迭代次数/次	2 000	1 736	424

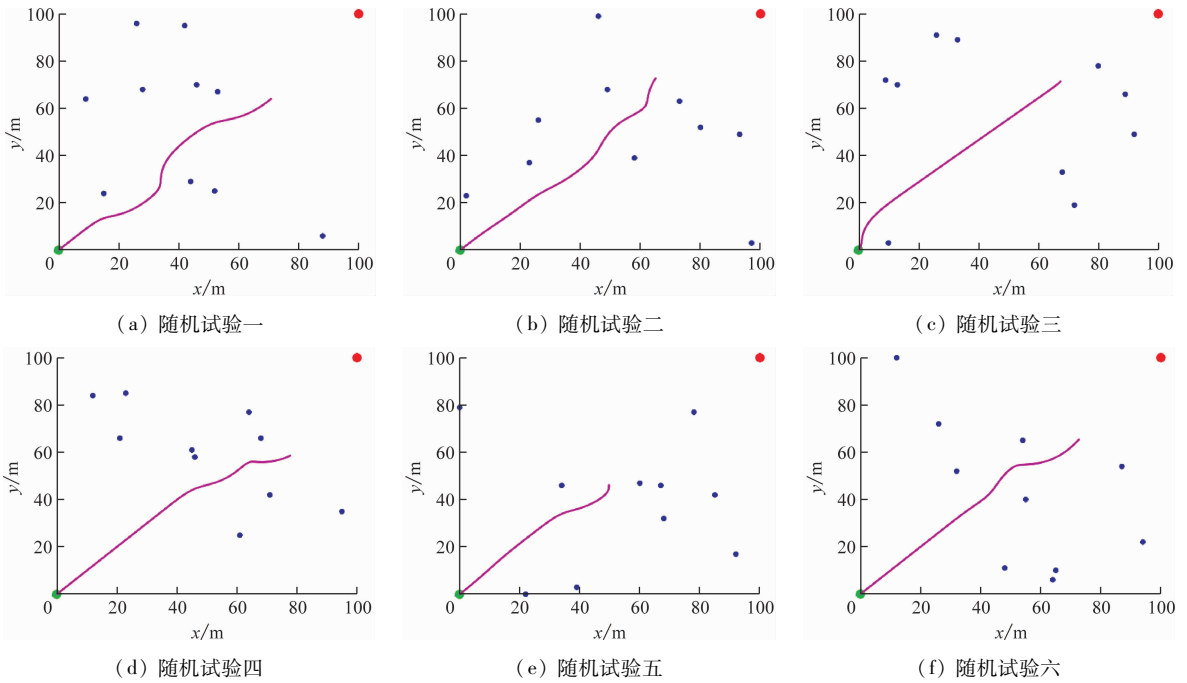


图4 传统 APF 路径多次尝试结果

Fig. 4 Results of multiple attempts on the path of traditional artificial potential field method

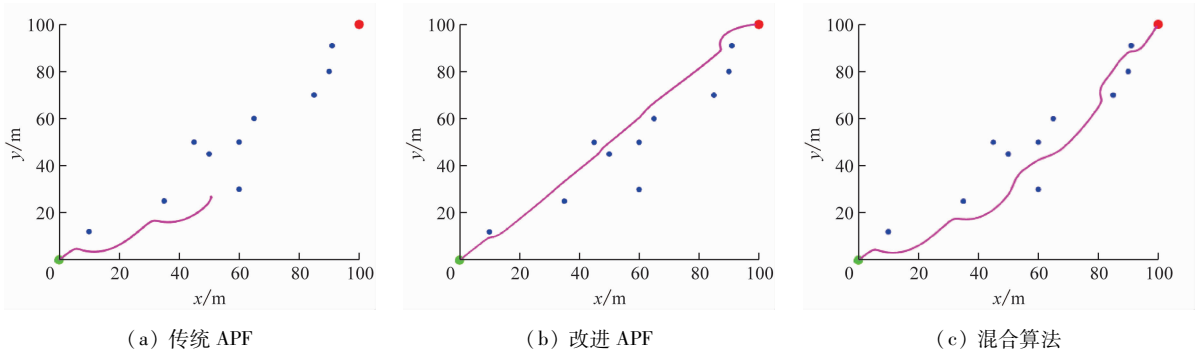


图5 路径规划仿真结果

Fig. 5 Path planning simulation results

### 3.2 会遇局面仿真

以2艘未从事捕鱼作业的渔船作为研究对象,根据《规则》定义,未从事捕鱼作业的渔船应当属于普通的机动船。为验证渔船在实际航行中应用混合算法进行避碰决策的可行性与先进性,对不同会遇态势下的避碰路径进行求解,仅考虑2艘船舶会遇情况,以江苏166总吨钢质冷藏收鲜船(渔船A),广东133总吨钢质双拖渔船(渔船B)为研究对象进行仿真研究。渔船A总长为35.60 m,渔船B总长为30.65 m,不同会遇局面下渔船A和渔船B的初始信息见表6。

假设渔船A为让路船,渔船B为直航船,运动状态保持不变,对船舶避碰决策进行仿真验证。得到渔船A和渔船B在避让过程中的两船会遇态势、运动路径、距离和危险度的变化曲线见图6~图9。

图6中渔船A和渔船B构成对遇局面,位于

表6 渔船A和渔船B的初始信息

Tab. 6 Initial information on fishing vessel A and fishing vessel B

会遇局面	对遇	右交叉	左交叉	追越
渔船A坐标	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
渔船A船速/kn	6	8	8	10
渔船A航向/(°)	45	45	45	45
渔船B坐标	(15,15)	(10,5)	(0,5)	(6,6)
渔船B船速/kn	3	4	8	3
渔船B航向/(°)	225	270	90	45

图1船舶会遇局面划分的A区。根据《规则》第14条,渔船A采取右转22°的避让措施,从渔船B的左舷驶过,渔船B并未采取任何措施,最终渔船A距渔船B 2.4 n mile 以上的距离通过,避碰开始到结束共运行0.8 h,算法在解除碰撞危险后向左转向35°恢复原航迹。

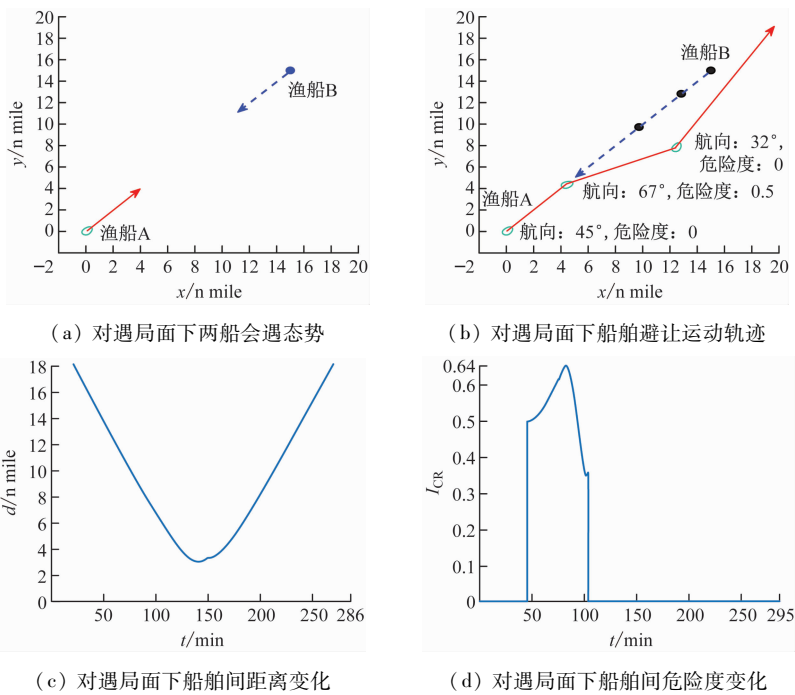


图6 对遇局面

Fig.6 Head-on situation

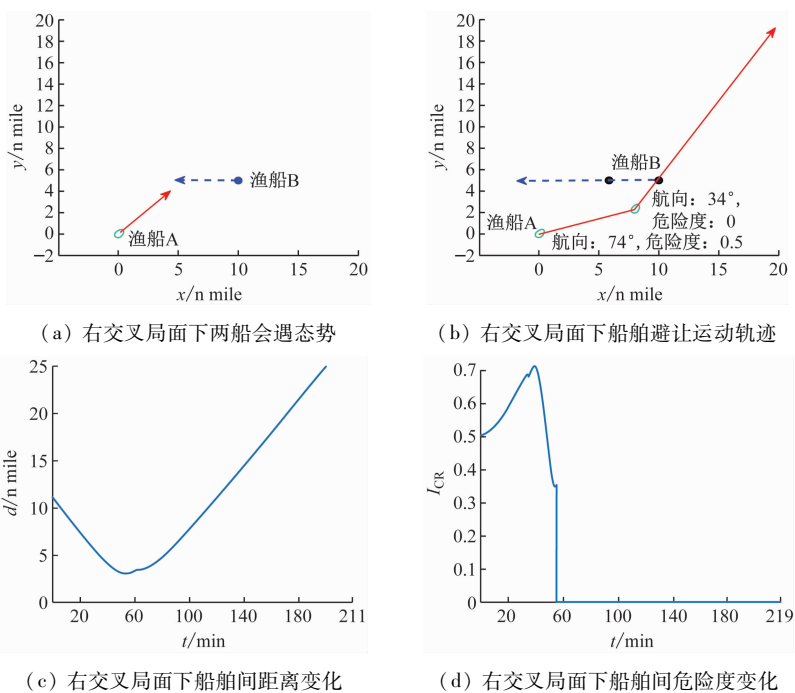


图7 右交叉局面

Fig.7 Right cross situation

图7中渔船B位于图1中船舶会遇局面划分的B区,构成右交叉相遇局面。根据《规则》第15条,渔船A为让路船,采取右转29°的避让措施,从渔船B的右舷驶过,渔船A距渔船B 2.8 n mile外驶过,避碰开始到结束共持续0.86 h,算法在解除危险后向左转向30°恢复原航迹。

C区,两船构成左交叉相遇局面。根据《规则》第15条,渔船B为让路船,渔船A为直航船。当两船碰撞危险度到达0.5时,渔船B并未采取任何措施,为避免发生碰撞,渔船A向左转向28°进行避让,渔船A距离渔船B 1.9 n mile外驶过,避碰开始到结束共持续0.51 h,算法在解除危险后向右转向32°恢复原航迹。

图8中渔船B位于图1中船舶会遇局面划分的

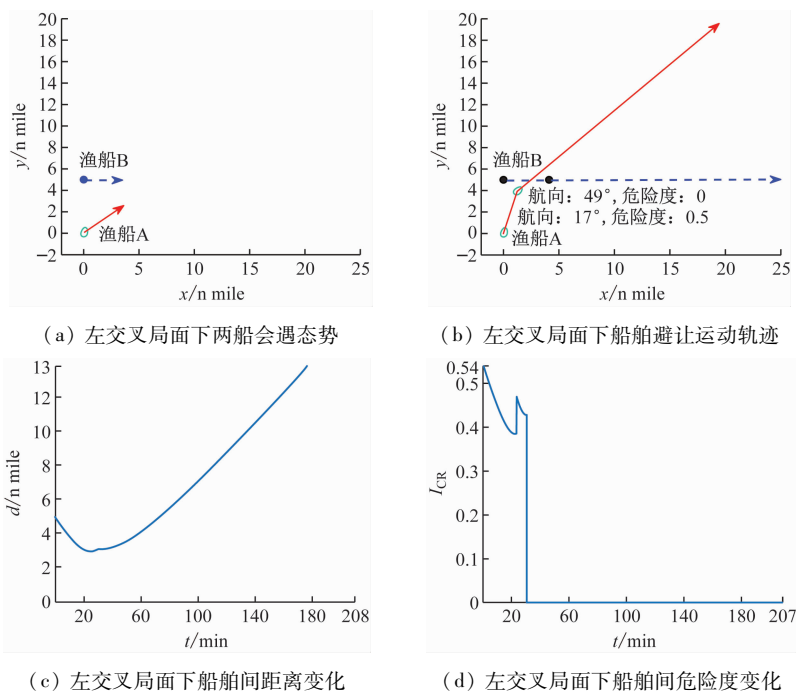


图8 左交叉局面

Fig. 8 Left cross situation

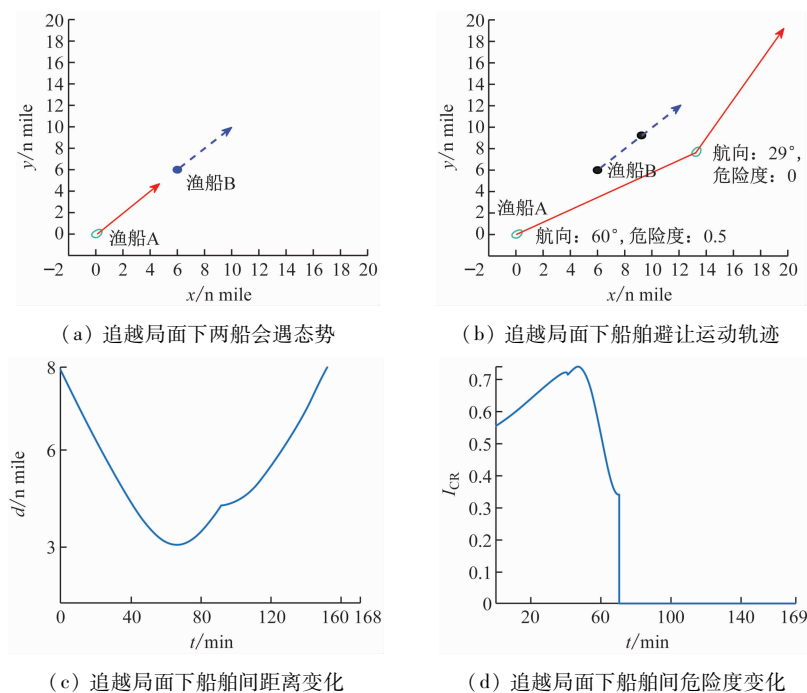


图9 追越局面

Fig. 9 Overtaking situation

图9中:渔船A追越渔船B,渔船B位于图1中船舶会遇局面划分的C区。根据《规则》第13条,渔船B为直航船,渔船A应为渔船B让路。当两船碰撞危险度超过0.5时,进入紧迫局面,渔船A采取右转 $15^\circ$ 进行避让,使两船在2.4 n mile的距离外驶过,避碰开始到结束共花费1.53 h,算法在解除危险后向左转向 $31^\circ$ 恢复原航迹。

由图6~图9可知:船舶间距离变化曲线光滑,距离均匀变化,两船间的距离满足 $S_{DA}$ 的要求。4组试验中,算法运行时间最长耗时8 s,最短耗时4 s,平均耗时6.25 s,比起单一改进算法,本文提出的混合算法能提供更快的运行速度。

1) 从两船的危险度变化曲线可知危险度最高不超过0.76,两船之间不存在碰撞危险。

2) 从本船航向可看出,通过右转向的方式来避免碰撞,转向角度应满足《规则》中“大幅度”的要求,转向角的幅度至少为 $15^\circ$ 。

3) 从船舶运动路径可以看出,让路船采取避让行动时的路径平滑。

从仿真结果可以看出本文设计的渔船避碰决策模型可准确地判断船舶之间的会遇态势和两船间的避让责任,符合《规则》第13条、第14条、第15条和第16条的要求,安全地采取避让措施。综上所述,本文提出的混合算法可得到有效的渔船避碰决策。

## 4 结束语

本文综合考虑《规则》,通过 $d_{CPA}$ 和 $t_{CPA}$ 计算船舶碰撞危险度,在对渔船驾驶员避碰行为调查的基础上,对Goodwin所提的船舶领域进行修正,定义了渔船 $S_{DA}$ 。本文主要针对应用传统APF进行避碰存在的缺陷提出改进算法,通过改进引力函数,成功解决船舶距离目标点过远时引力过大的问题;通过改进斥力函数,在一定程度上缓解了船舶距离障碍物过近时斥力过大导致目标不可达的问题;通过引入填平势场使得势场函数能够跳出局部极小点;通过路径二维真值实数编码方式对避碰路径进行编码,考虑APF的路径平滑、算法简练和GA的全局最优能力的特点,结合2种算法的优点,利用混合算法对全局路径进行优化,消除了以往单一APF在船舶避碰决策方面的缺陷,获得最佳转向幅度及恢复原航迹的时机,得到一条符合《规则》的安全且平滑的避碰决策,可为驾驶人员避碰实践提供一定的参考。当然,本文目前仅考虑理想情况下两船间的会遇情况,未考虑多船会遇局面和实际航行中船舶操纵特性(如操舵时间和舵角)和天气(风浪)等因素,避碰决策中也只考虑转向避让方式,未考虑变速避让方式,本研究也未与最新的启发式算法结合,未进行对比试验以判断算法的优劣性。因此,在未来的研究中,将尽可能综合考虑在实际海上可能会出现更复杂局面,结合其他启发式算法开展研究探索,以提升渔船避碰决策算法的实用性和可靠性。

## 参 考 文 献

[1] 中国渔业互保协会. 中国渔业船舶安全分析报告(1994—2015)[M]. 北京:中国农业出版社, 2018: 76-78.  
China Fishery Mutual Insurance Association. Analysis report of China fishery vessel safety (1994—2015) [M]. Beijing: China Agriculture Pres, 2018: 76-78.

(in Chinese)

- [2] 王丹,吴反修. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2021.  
WANG D, WU F X. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Pres, 2021. (in Chinese)
- [3] JUNG C H. A study on the requirement to the fishing vessel for reducing the collision accidents[J]. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 2014, 20(1): 18-25.
- [4] CHOU C C, LI R F, SU Y L, et al. A study of the distribution of marine incidents in the harbours and waters surrounding Taiwan [J]. Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2019, 233(3): 809-824.
- [5] YANG J, SUN Y, SONG Q, et al. Laws and preventive methods of collision accidents between merchant and fishing vessels in coastal area of China [J]. Ocean & Coastal Management, 2023, 231: 106404.
- [6] 倪生科,刘正江,蔡垚,等. 基于混合遗传算法的船舶避碰路径规划[J]. 上海海事大学学报, 2019, 40(1): 21-26.  
NI S K, LIU Z J, CAI Y, et al. Ship collision avoidance path planning based on hybrid genetic algorithm [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2019, 40(1): 21-26. (in Chinese)
- [7] LYU H, YIN Y. COLREGS-constrained real-time path planning for autonomous ships using modified artificial potential fields [J]. The Journal of Navigation, 2019, 72(3): 588-608.
- [8] 曾勇,张金奋,张明阳,等. 基于粒子群-遗传优化算法的船舶避碰决策 [J]. 中国航海, 2020, 43(1): 1-6.  
ZENG Y, ZHANG J F, ZHANG M Y, et al. Collision avoidance decision-making based on particle swarm optimization and genetic algorithm [J]. Navigation of China, 2020, 43(1): 1-6. (in Chinese)
- [9] 陈嘉敏. 渔船智能避碰算法与决策系统研究[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2021.  
CHEN J M. Research on intelligent collision avoidance algorithm and decision system of fishing vessel [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021. (in Chinese)
- [10] XUE Z B, LIU J C, WU Z X, et al. Development and path planning of a novel unmanned surface vehicle system and its application to exploitation of Qarhan Salt Lake [J]. Science China Information Sciences, 2019, 62: 1-3.
- [11] SONG L, CHEN Z, DONG Z, et al. Collision avoidance planning for unmanned surface vehicle based

- on eccentric expansion [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16(3): 1-9.
- [12] SZLAPCZYNSKI R. Evolutionary planning of safe ship tracks in restricted visibility [J]. *The Journal of Navigation*, 2015, 68(1): 39-51.
- [13] 郝增辉. 北极航线航行经济性分析与运输分担率预测[D]. 大连:大连海事大学, 2017.
- HAO Z H. Economic analysis and transportation sharing rate prediction of Arctic route navigation[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese)
- [14] 柳成志, 冀国盛, 许延浪. 地球科学概论[M]. 第二版. 北京:石油工业出版社, 2010.
- LIU C Z, JI G S, XU Y L. An outline of earth sciences [M]. Second Edition. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 吴金龙, 代广树, 黄路华. 航海学[M]. 大连:大连海事大学出版社, 2017.
- WU J L, DAI G S, HUANG L H. Navigation [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2017. (in Chinese)
- [16] GOODWIN E M. A statistical study of ship domains [J]. *The Journal of Navigation*, 1975, 28(3): 328-344.
- [17] 朱天鹏, 姚玉南, 但家梭, 等. 基于安全会遇距离模型的智能船舶航行行为可靠性评估[J]. *中国修船*, 2021, 34(5): 25-29.
- ZHU T P, YAO Y N, DAN J S, et al. Reliability assessment of intelligent ship navigation behavior based on safe encounter distance mode[J]. *China Shiprepair*, 2021, 34(5): 25-29. (in Chinese)
- [18] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90-98.
- [19] 段建民, 陈强龙. 基于改进人工势场-遗传算法的路径规划算法研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(3): 19-24.
- DUAN J L, CHEN Q L. Research on path planning algorithm based on improved artificial potential field-genetic algorithm [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(3): 19-24. (in Chinese)
- [20] 宁君, 马昊冉, 李铁山. 基于改进人工势场法的船舶路径规划与跟踪控制 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(10): 1414-23.
- NING J, MA H R, LI T S. Underactuated surface vessel path planning and following control based on an improved artificial potential field method [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(10): 1414-23. (in Chinese)
- [21] MICHALEWICZ Z, SCHOENAUER M. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems [J]. *Evolutionary computation*, 1996, 4(1): 1-32.
- Technology, 2021, 10(3): 1177-1186. (in Chinese)
- [30] 夏继豪. 纯电动汽车的火灾特性及热释放速率探讨 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(3): 1028-1032.
- XIA J H. Discussion on fire characteristics and heat release rate of blade electric vehicles [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(3): 1028-1032. (in Chinese)
- [31] 石军花, 朱梅, 李进, 等. 化工园区储罐火灾热辐射模型仿真研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(增刊1): 79-83.
- SHI J H, ZHU M, LI J, et al. Simulation study on thermal radiation model of storage tank fire in chemical industry [J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32 (Suppl. 1): 79-83. (in Chinese)

(上接第 29 页)

- [27] FU Y, LU S, SHI L. Combustion characteristics of electrolyte pool fires for lithium ion batteries [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, 163(9): A2022-A2028.
- [28] CHEN M, MEI J, LIU H. Comparative experimental study on combustion characteristics of typical combustible components for lithium-ion battery [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(1): 218-228.
- [29] 黎可, 穆居易, 金翼, 等. 磷酸铁锂电池火灾危险性 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(3): 1177-1186.
- LI K, MU J Y, JIN Y, et al. Fire risk of lithium iron phosphate battery [J]. *Energy Storage Science and*