

基于多目标优化算法的北极航线路径规划研究

章文俊^{1,2}, 林椿淇^{1,2}, 杨雪^{1,2}, 孟祥坤^{1,2}, 周翔宇^{1,2}, 吴中岱³

1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026;
2. 大连市自主航运安全技术重点实验室, 辽宁 大连 116026;
3. 上海船舶运输科学研究所有限公司, 上海 200135)

摘要: 基于北极海域复杂海冰环境给船舶航行安全与经济效益带来的诸多挑战, 文章提出一种优化航行风速阻力和冰阻力的多目标改进麻雀搜索路径规划算法。以极地操作限制风险评估系统计算所得的风险指数和安全水深阈值作为约束条件来确保船舶的航行安全, 减少了北极航道中外界阻力对船舶航行的影响。首先, 对北极航道的气象要素和海冰数据进行处理, 结合船舶类型构建栅格环境地图; 其次, 筛选可安全通航区域, 建立多目标函数模型; 最后, 利用改进的麻雀搜索算法对航线进行优化, 并与其他典型路径规划算法对比分析, 以此验证该方法的有效性与可行性。结果表明, 基于风阻和冰阻力多目标模型的改良麻雀搜索算法所生成的最优路径能够显著减少船舶航行中所受阻力, 最优可缩小 10.9%, 且路径长短和运行时间与其他算法相比无明显差异, 为北极航道中船舶的航行提供了经济、高效的优化方案。

关键词: 北极航线; 路径规划; 多目标优化方法; 麻雀搜索算法; POLARIS

中图分类号: U6-9 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.016

Research on Arctic route planning based on multi-objective optimization model

ZHANG Wenjun^{1,2}, LIN Chunqi^{1,2}, YANG Xue^{1,2}, MENG Xiangkun^{1,2},
ZHOU Xiangyu^{1,2}, WU Zhongdai³

- (1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. Dalian Key Laboratory of Safety & Security Technology for Autonomous Shipping, Dalian 116026, China;
3. Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: To address the safety and economic requirements for ships navigating the complex ice environments of Arctic waters, this paper proposes a multi-objective improved Sparrow Search Algorithm (SSA) to optimize both wind resistance and ice resistance. The Risk Index Outcome (RIO), calculated by the Polar Operational Limit Assessment Risk Indexing System (POLARIS), and the safe water depth threshold are adopted as constraints to ensure navigation safety and mitigate the impact of resistance on navigation efficiency along Arctic routes. First, meteorological and ice data for the Arctic route are processed, and a grid environment map is constructed according to ship type. Second, safe navigable areas are identified, and a multi-objective function model is established. Finally, the improved sparrow search algorithm is applied to optimize the route and is compared with other typical path planning algorithms to verify the effectiveness and feasibility of the proposed method. The results indicate that the optimal path generated by the improved sparrow search algorithm, based on the multi-objective model of wind and ice resistance, can significantly reduce ship resistance during navigation-achieving a reduction of up to 10.9%. Moreover, there is no significant difference in path length or running time compared with other algorithms. This study provides an economical and reliable optimization solution for ship navigation in Arctic routes.

Key words: Arctic sea route; path planning; multi-objective optimization method; sparrow search algorithm; POLARIS

收稿日期: 2024-09-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2801000); 辽宁省中央引导地方科技发展资金项目(2023JH6/100100055)资助

通信作者: 章文俊(1977-), 男, 教授, 研究方向为船舶安全保障技术。E-mail: wenjunzhang@dlnu.edu.cn

引用格式: 章文俊, 林椿淇, 杨雪, 等. 基于多目标优化算法的北极航线路径规划研究[J]. 中国航海, 2025, 48(4): 141-151.

ZHANG W J, LIN C Q, YANG X, et al. Research on Arctic route planning based on multi-objective optimization model[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 141-151. (in Chinese)

北极航道连接着大西洋和太平洋中的关键水域,是船舶穿越北极的黄金航道,对于降低航运成本、节能减排等诸多方面都具有较高的商业价值。近年来,因气候逐渐变暖导致其海冰减少^[1]。THEOCHARIS 等^[2] 预测分析表明,到 2030 年,4.7% 的航运贸易可能会使用北极航线。在现有的北极航线中,沿俄罗斯海岸的东北航道(Northeast Passage, NEP)连接着亚洲和欧洲,与传统的亚欧苏伊士运河航线相比,航程缩短了 40%^[3]。然而,极端天气频发、海冰分布复杂等环境条件仍给北极航道船舶的航行安全造成了极大挑战。在特定海域环境之下,船舶航行时会遭遇极端海冰环境以及强风带来的双重挑战,导致船冰碰撞及冰困的风险概率大大提升。此外,北极船舶的航行经济成本远高于普通船舶的正常航行,其中冰级船舶航行的成本通常会增加 50% ~ 100%^[4],且航行过程中产生的冰阻力也会影响总运输成本。同时,在这个阶段当中风阻力和冰阻力两者会相互叠加对船舶航行效率造成制约,强风会影响船舶的航行速度和操纵性,冰阻力则在冰层覆盖区对船舶航行形成限制。因此,如何在安全前提下充分考虑风阻和冰阻力从而优化船舶航行路径,成为当前北极航道航行领域亟待解决的问题。

目前,相关学者从不同层面对北极航线进行路径规划研究。WU 等^[5] 使用稳定性控制和碰撞风险控制两个模糊控制器对动态窗口算法(Dynamic Window Approach, DWA)进行改进,减少智能船舶在遇到海冰等障碍物时的大旋转角度,提高了遇到海冰时的安全性。LIU 等^[6] 对船舶性能模型(Ship Performance Models, SPMs)和冰区路径算法(Ice Routing Algorithms, IRAs)的研究现状进行了综述并提出了一种适应极地地区的动态多目标路径算法。ZHANG 等^[7] 将数据驱动的能效分析结合到北极冰区航线规划中。LI 等^[8] 利用 2018 年夏季至 2019 年夏季的气象、海洋和海冰预报作为参数,优化了从鹿特丹到上海之间的航线,并将极地操作限制风险评估系统(Polar Operational Limit Assessment Risk Indexing System, POLARIS)中定义的风险指数结果视为约束条件。LEE 等^[9] 提出了考虑海冰影响的路径规划算法,并利用 POLARIS 对海冰风险进行评估,利用船舶航向角和发动机功率数值计算出的船舶总功耗为目标函数,采用 A* 算法(A Star)得到最优解。WU 等^[10] 开发了基于海冰和气象数据强化

学习的在线交互式路线规划系统(Route View)为北极航线提供最优路线,同时利用合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)数据结合深度学习提取海冰分布。童帮裕等^[11] 改进人工势场法对蚁群算法进行创新性扩展,在复杂冰区环境中显著提高了船舶避冰能力。吕成等^[12] 运用 Dijkstra 最短路径搜索技术和冰阻力公式分析船体参数对船舶冰区航行的影响,建立多目标决策框架来改善冰区航行路线,并生成了在不同目标条件下的最优路径。HAN 等^[13] 提出了一种结合 NT*(Non-uniform Theta*)算法与改进型 DWA 技术的动态混合路径规划模型,实现了无人潜航器的全局引导、局部运动规划和动态避障。WEI 等^[14] 对 21 世纪北极海冰状况以及未来航运活动预测进行了描述并利用气候模式计算船舶可达性,采用最小代价路径算法求解最优路径。

目前,北极航线规划的相关研究中,大多通过规避海冰的方式,降低船舶碰撞的发生概率,应用海冰阻力模型以及缩短航行距离的方法达到优化航线,降低航行成本的目的。这类方法因考虑因素较片面,导致实际应用价值受限。此外,上述研究所采用的传统路径规划算法都依照经典的优化理论,在处理大规模全局路线设计的时候容易出现搜索效率低,收敛速度慢以及容易陷入局部最优解等状况。而现有研究证实麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)、灰狼算法(Grey Wolf Optimization, GWO)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[15] 等群体智能算法凭借自身优异的自适应特性,在解决复杂的路径规划问题方面相较于传统路径规划算法有着明显的优势。

针对上述问题,本文利用 POLARIS 计算出的风险指数计算结果(Risk Index Outcome, O_{RI}) 阈值和船舶不发生浅水效应的安全水深界限作为约束条件,精确筛选出适航区间以确保航行安全,在此基础上,建立对船舶在航行中所受风阻和冰阻的多目标优化模型,并对传统麻雀搜索算法增加多维度变化及高斯扰动,以保证改进后的算法能够跳出局部最优,将上述研究方法融合应用于北极航线路径规划中,进行路径可视化处理并设计对比试验,旨在证明最优路径的可行性与适用性,为北极航线路径规划提供理论参考。

1 研究方法

本节主要阐述不同数据对齐颗粒度的处理过

程,以 O_{RI} 阈值和水深阈值为约束条件的优化模型的构建机制以及路径规划研究的核心算法,研究流

程如图 1 所示。

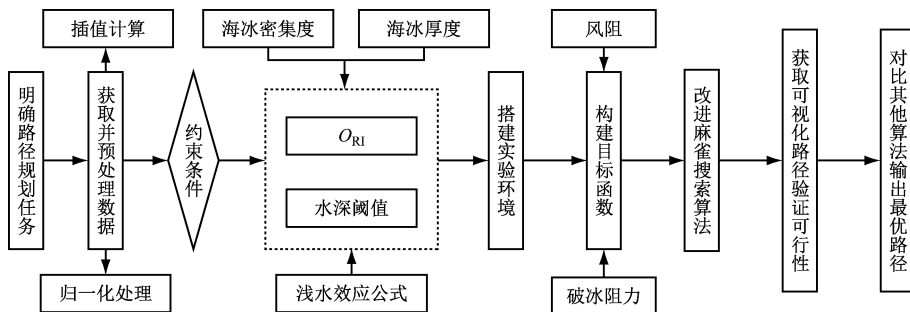


图 1 研究流程

Fig. 1 Method frame diagram

1.1 数据处理方法

1) 本文选定研究区域的经度范围为 M_x , 纬度范围为 M_y , 并把它划分成 G 个均匀分布的网络单元, 则经纬度上栅格数量分别为 $\frac{M_x}{G}$, $\frac{M_y}{G}$, 如图 2 所示。

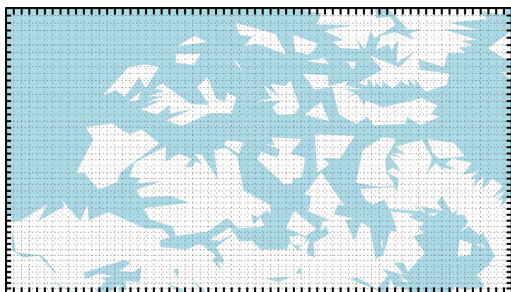


图 2 栅格图

Fig. 2 The grid map

2) 由于不同的海冰密集度、冰厚、风速等数据类型存在不同的颗粒度, 需要将数据统一到设定的栅格单元中, 数据处理方式见式(1):

$$U_o = \frac{\sum_{e \in E} b_{o,e} p_e}{a} \quad (1)$$

式(1)中: O 为预先设定好的栅格集合; U_o 为栅格 o 的属性值; E 为待处理的数据颗粒集合; a 为单个栅格单元的面积大小; p_e 为待处理的数据颗粒 e 的属性值; $b_{o,e}$ 则是描述数据颗粒 e 与设定栅格 o 之间的重叠面积。

1.2 约束条件

1.2.1 RIO 阈值

POLARIS 系统作为冰区航行及船舶操作的参考依据, 由国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 主持制定, 并且已经被中国船级社采纳。该系统采用国际船级社协会 (International Association of Classification Societies, IACS) 的极地冰

级, 以及《芬兰瑞典冰级规则》^[16] 对应的等效冰级。其中, IACS 将船舶冰级 (Polar Class, PC) 定义划分为 PC1 ~ PC7 共 7 个等级, 相关的海冰专用术语参考了世界气象组织对冰情的描述。POLARIS 系统构建的量化模型, 结合海冰数据、船舶冰级、冰龄、冰厚等, 明确船舶航行风险指数值 (Risk Index Values, RIVs)。在实际应用中, 评估冰区船舶航行的风险水平, 需要根据海冰类型选取对应指数值, 结合单元栅格内各类海冰的密集度计算 R_{io} , 见式(2):

$$R_{io} = \sum_{z=1}^n (D_z \times R_z) \quad (2)$$

式(2)中, D_z 表示第 Z 类海冰的密集程度; R_z 为第 Z 类海冰的风险指数值。 R_{io} 值越大, 表明选定海域内冰情越轻, 船舶航行风险也越小。如表 1 所示, 在 $R_{io} < 0$ 的情况下船舶一般要进行高风险操作或特别考虑的操作, 通常需要驾驶员丰富的驾驶经验, 而在风险系数极高的北极航道中, 应最大化保障船舶航行的安全性。本研究中, 在 $R_{io} < 0$ 的情况下, 则认为该区域不可具备通航条件, 即 K_{RIO} 为 0

$$K_{RIO} = \begin{cases} 0, & R_{io} < 0 \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, K_{RIO} 为 R_{io} 风险指数赋值。

表 1 R_{io} 风险指数结果

Tab. 1 R_{io} risk index results

R_{io}	PC7
$R_{io} \geq 0$	正常操作
$-10 \leq R_{io} < 0$	高风险操作 *
$R_{io} < -10$	特别考虑的操作 * *

* 高风险操作, 数量越多, 风险程度越高。

1.2.2 水深阈值

船舶航行在不安全水深区域时会产生浅水效

应,这不仅可能导致船舶发生搁浅从而带来安全隐患,且当水深较浅时,航行效率也会因船舶阻力增大受到影响。相关研究表明,当航行水深超过10倍吃水时^[17],水深变化对船舶阻力的影响极小,且该条件符合国际船模水池规定的估算公式。因此,本文将10倍吃水设定为安全水深阈值,建立水深模型如下,栅格数值为1时,可安全通行。

$$K_h = \begin{cases} 0, & h < 10T \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: h 为栅格水深; T 为船舶吃水; K_h 为水深模型赋值。

1.3 多目标优化模型与目标函数

1.3.1 风速阻力模型

北极航道复杂的天气条件会使船舶受到风力作用而产生的阻力影响,导致航行速度减慢、稳定性下降、能见度降低、导航困难增加以及燃料消耗增加等问题。为确保航行安全和效率,本文参照ITTC-1957^[18]计算风阻,见式(5):

$$f_{\text{wind}} = \frac{\mu}{2} \rho_{\text{air}} (w \cos(\theta_{\text{wa}}) - v)^2 A_1 \quad (5)$$

式(5)中: w 代表风速大小; ρ_{air} 代表空气密度; A_1 为水线面正投影面积; θ_{wa} 为风向与船首的夹角; v 表示航行速度; μ 为阻力系数,通常取值为1。

1.3.2 冰阻力模型

在北极海域航行时,船舶不可避免地会与海冰发生接触,当遇见大面积海冰的区域,往往需要开辟出一条可以提供给有冰区航行需求船舶的航道,而船舶破冰需克服一定的阻力,本文通过引入海冰的物理力学特性^[19](盐度(S)、卤水体积(V_B)、抗弯强度(σ_f)),并结合Edwards通过模型和实船试验结果推导出的公式计算求得破冰阻力 f_c ,见式(6)~(9):

$$S = 4.606 + \frac{0.91603}{C} \quad (6)$$

$$V_B = S \left(\frac{49.185}{|T|} + 0.532 \right) \quad (7)$$

$$\sigma_f = 1030 \left(1 - \frac{\sqrt{V_B}}{0.209} \right) \quad (8)$$

$$f_c = \rho_c \left(\rho_w \cdot B \cdot g \cdot C^2 \cdot \left(4.24 + 0.05 \cdot \frac{\sigma_f}{\rho_w \cdot g \cdot C} + 8.9 \frac{v}{\sqrt{g \cdot C}} \right) \right) \quad (9)$$

式(6)~(9)中: C 表示冰厚; T 表示海冰温度; ρ_w 表示海水密度; ρ_c 为海冰密度; B 为船宽; g 为重力加速度。

1.3.3 目标函数

本文基于风阻力与冰阻力设计模型,针对其他相关实际因素,提出假设如下:

- 1) 在气象数据更新时段内,假设风浪和洋流的情况保持不变;
- 2) 将船舶视为一个质点;
- 3) 假设船舶能够按照预期方案航行,即在确定了航行信息后,能够准确地航行。

此外,本文优化的目标是在满足第1.2节约束状态的情况下,分别优化以上两种模型所得出的结果,进而产生一条船舶克服阻力最小的安全路线。目标函数设置为以累加求和的方式对筛选后的可通航海域计算其航行阻力,其中包括船体所受风附加阻力 f_{wind} 和海冰对船体所施加的压力 f_c ,以寻求目标函数为最小值的最优路径,不仅极大降低了航行过程中的风险,也为航线优化提供了实际参考,即建立目标函数总模型 F ,见式(10):

$$F = \begin{cases} \kappa, & K_h = 0 \\ \kappa, & K_{\text{RIO}} = 0 \\ f_c + f_{\text{wind}}, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中: κ 为极大值。

1.4 改进麻雀搜索算法

SSA是一种模仿麻雀的觅食行为与反捕食行为开发出的算法,其中包括侦查者跟随者和发现者三种角色。发现者在群体中的占比一般为10%~20%,其功能是在全搜索区域内寻找食物充足的位置,并为所有跟随者提供觅食区域或方向指引。跟随者与发现者的身份具有互换性,任何能找到更优食物位置的麻雀都可成为发现者,但发现者在整个种群中的比例始终固定。同时,发现者的状态会因捕食者存在与否发生变化:当周围无捕食者时,发现者会开展广域搜索;当侦查者发出的预警信号超过警戒值时,整个种群会在发现者带领下转移,寻找下一个觅食地点。发现者的位置更新规则参见式(11):

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \times \exp\left(\frac{-i}{a \times it_{\text{max}}}\right), & R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + Q \times L, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, it_{max} 为最大迭代次数; j 的取值为(1,2,3,⋯), $X_{i,j,t+1}$ 和 $X_{i,j,t}$ 分别对应第 $t+1$ 代、第 t 代麻雀在 j 维度上的位置; t 为当前种群迭代次数,是 $[0,1]$ 的随机数; Q 为正态分布随机数; L 为元素全为1的向量; S_T 代表安全值($S_T \in [0.5, 1]$), R_2 为预警值($R_2 \in [0,1]$);当 $R_2 < S_T$ 时,觅食区域内无捕食者,

发现者会带领种群在该区域内大范围寻找食物;当 $R_2 \geq S_T$ 时,部分麻雀感知到捕食者存在,会向未感知到捕食者的同类发出预警,整个麻雀种群在接收预警后将立即移动,脱离捕食者攻击范围并飞往其他安全觅食区域。追随者的位置更新规则见式(12):

$$X_{i,j,t+1} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{X_{\text{worst},t} - X_{i,j,t}}{t^2}\right) & \text{if } i > \frac{n}{2} \\ X_{P,t+1} + |X_{i,j,t} - X_{P,t+1}| \times \mathbf{A}^+ \times L & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, $X_{\text{worst},t}$ 对应第 t 代的全局最差位置; $X_{P,t+1}$ 对应第 $t+1$ 代麻雀种群中的最优发现者位置; \mathbf{A} 为 $1 \times D$ 矩阵 $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T \times (\mathbf{A} \times \mathbf{A}^T)^{-1}$, 其每个元素随即赋值为 -1 或 1 。在麻雀种群内,具有警戒机制的麻雀数量占种群总数的 $10\% \sim 20\%$, 这类麻雀的位置通过随机方式产生的,其位置更新规则见式(13):

$$X_{i,j,t+1} = \begin{cases} X_{\text{best},t} + \beta \times |X_{i,j,t} - X_{\text{best},t}| & \text{if } f_i > f_g \\ X_{i,j,t} + k \times \left(\frac{|X_{i,j,t} - X_{\text{worst},t}|}{(f_i - f_w) + \varepsilon}\right) & \text{if } f_i = f_g \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, $X_{\text{best},t}$ 代表 t 代迭代的全局最佳位置; k 为 $[-1, 1]$ 区间内的随机数; β 是服从均值为 0 , 方差为 1 的正态分布随机数; f_i 表示当前麻雀个体的适应度值; f_g 表示全局最优秀麻雀个体的适应度值; f_w 表示全局最差麻雀个体的适应度值; ε 为常数,用于防止分母出现零值。当 $f_i > f_g$ 时,种群边缘的麻雀存在一定的概率受到捕食者攻击;当 $f_i = f_g$ 时,种群中间的麻雀会靠近其他远离捕食者个体,从而躲避攻击。

原始 SSA 在初始化种群麻雀初始位置阶段,麻雀分布均匀性较差,同时总体搜索空间有限,这不仅限制了搜索范围,还可能造成部分种群陷入局部最优。而在更新麻雀位置的过程中,原算法因采用较简便的操作方式,使得算法存在收敛速度慢与收敛精度低的缺陷。因此本文对 SSA 进行以下改进得到 SSA1:

1) 通过混沌映射完成种群初始化,能够有效改善初始解存在的聚集现象,同时提升其在解空间的覆盖率,并增强个体间的差异性。Circle 映射不仅稳定性良好,且混沌值覆盖率较高,不过其混沌值分布仍存在不均匀问题,具体表现为在 $[0.2, 0.6]$ 区间内取值较为集中。基于此,本文对 Circle 映射公式稍作调整,使混沌值分布更均匀。原 Circle 混沌映射表达式见式(14):

$$x_{n+1} = \text{mod}\left(x_n + 0.2 - \frac{0.5}{2\pi} \sin(2\pi \cdot x_n), 1\right) \quad (14)$$

改进之后的 Circle 混沌映射表达式见式(15):

$$x_{n+1} = \text{mod}\left(3.85x_n + 0.4 - \frac{0.7}{3.85\pi} \sin(3.85\pi \cdot x_n), 1\right) \quad (15)$$

式(14)和(15)中, n 为解的维度。为使改进效果的呈现更直观清晰,设定 n 值为 2000 。改进前与改进后的初始解维度分布图,分别对应图 3 和图 4。

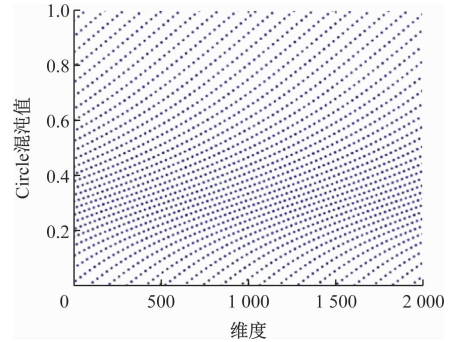


图 3 Circle 映射分布

Fig. 3 Circle mapping distribution map

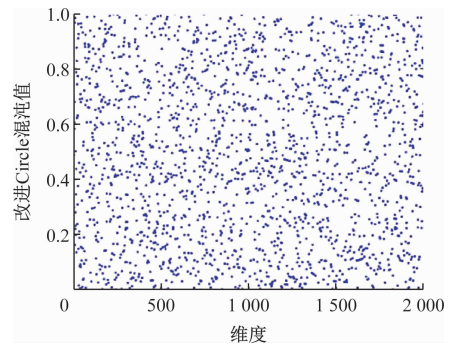


图 4 改进 Circle 映射分布

Fig. 4 Improved Circle mapping distribution map

对比分析图 3 与图 4 可知,经改进后的 Circle 映射,其混沌序列值的分布均匀性得到了显著改善。基于此,本研究引入该改进映射机制对种群进行初始化,旨在丰富初始种群的多样性,并以此为基石,强化算法在后续迭代过程中的全局寻优性能。

2) 针对不同适应度个体的位置添加扰动:对于适应度较优的个体,通过高斯变异实现位置变化,详见式(16);对于适应度较差的个体,通过 Tent 扰动实现位置变化,详见式(17)。该方式可赋予算法更细致的变化特征,使新产生的极值持续更新,使算法能有效规避局部极值陷阱,从而收敛于更优的解。

$$x'_i = x_i \cdot (1 + N(0,1)) \text{ if } f_i \leq f_{\text{avg}} \quad (16)$$

$$x'_i = x_i \cdot (1 + \text{Tent}(0,1)) \text{ if } f_i > f_{\text{avg}} \quad (17)$$

式中, x_i 和 x'_i 分别代表当前以及变化后个体位置信息; $N(0,1)$ 为服从标准正态分布的随机数; $Tent(0,1)$ 是取自 $(0,1)$ 区间 Tent 混沌序列的随机数; f_i 和 f_{avg} 分别代表当前个体的适应度以及种群的平均适应度。

SSA1 算法的伪代码如下:

输入:

u_{max} : 最大迭代次数

n : 种群大小

P_D : 发现者比例; S_D : 侦查者比例

R_2 : 预警值

S_T : 安全值

输出: X_{best}, f_{best}

使用式(14)和式(15)改进的 Circle 混沌映射完成种群初始化。然后, 计算并排序所有麻雀个体的适应度值; 进而, 依此排序确定具有最佳与最差适应度的个体及其在搜索空间中的坐标。

使用式(11)更新发现者的位置。

使用式(12)更新追随者的位置, 使其向适应度值更高的个体靠拢。

使用式(13)随机选取部分个体作为侦查者, 提升解的多样性。

使用式(16)针对适应度较优的个体, 实施高斯变异改变位置; 使用式(17)对适应度较差的个体, 采用 Tent 扰动方式改变位置, 为算法提供更丰富的变化细节, 推动新极值持续更新。

获取更新后的位置并计算适应度值, 用于后续比较和优化。

按照适应度值的大小替换新旧位置。

$t = t + 1$, 重复上述步骤, 直至 $t = T$ 。最终输出最大适应度值及其对应最优个体位置, 得到求解结果。

SSA1 具备高度的灵活性和适应性, 能够很好地应对动态变化的环境, 如东北航道和西北航道中不断变化的冰情和气象条件; 其较好的平衡机制能够有效地在寻找全局最优解和避免局部最优解之间切换, 可以在确保航行安全的同时, 最大化经济效益, 对于开发新航道, 特别是在极端和动态变化的北极环境中, 提供了可行和有效的解决方案。

以改进后的麻雀搜索算法为核心算法, 结合上述构建的优化模型, 计算出目标函数最小值即船舶航行阻力最小值, 通过可视化结果证明优化模型的可行性并设计对比试验得出最优结果。

2 方法应用

基于上述方法, 明确路径规划研究区域, 融合多种实测数据, 搭建完整的应用模型, 进行路径规划

任务。

2.1 研究区域

东北航道沿俄罗斯北部海岸线, 其可航行期限因气候变暖而逐年延长, 大幅缩短欧洲与东亚之间的航行距离, 节省时间和燃料成本。西北航道则穿越北美洲北部, 连接大西洋和太平洋, 虽条件复杂、风险高, 但其可航行性随气候变暖和技术进步而提高。因此本文选定东北航道($15^\circ\text{E} \sim 175^\circ\text{E}, 65^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{N}$)、西北航道($130^\circ\text{W} \sim 75^\circ\text{W}, 65^\circ\text{N} \sim 80^\circ\text{N}$)作为试验环境, 如图5所示。

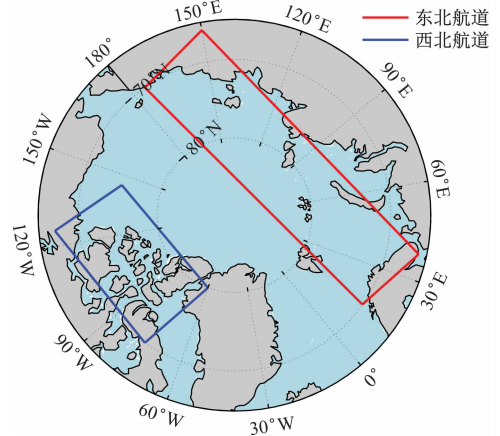


图5 研究区域

Fig. 5 Study area

2.2 数据来源

本文所选用的海冰、风速数据为哥白尼海事数据中心(Copernicus Marine Data Store)于2022年9月15日的实测数据, 如图6~图8所示, 该数据两者均为空间分辨率 $6.25 \times 6.25 \text{ km}$ 的栅格数据; 水深数据则来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)中国地球物理数据中心(The National Geophysical Data Center, NGDC)所开发的ETOPO1全球地形模型, 如图9所示。

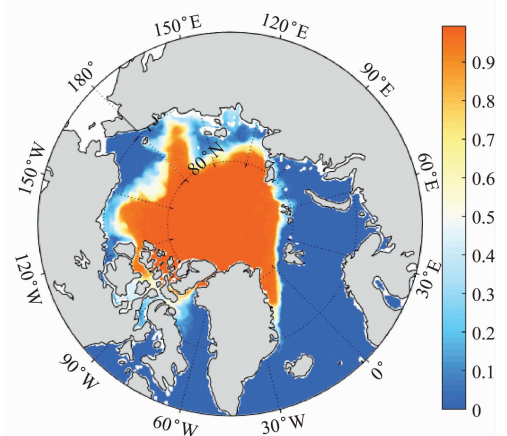


图6 海冰密集度

Fig. 6 Sea ice concentration diagram

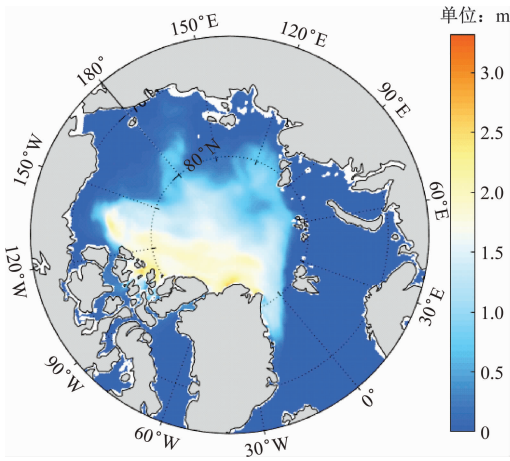


图7 海冰厚度

Fig. 7 Sea ice thickness diagram

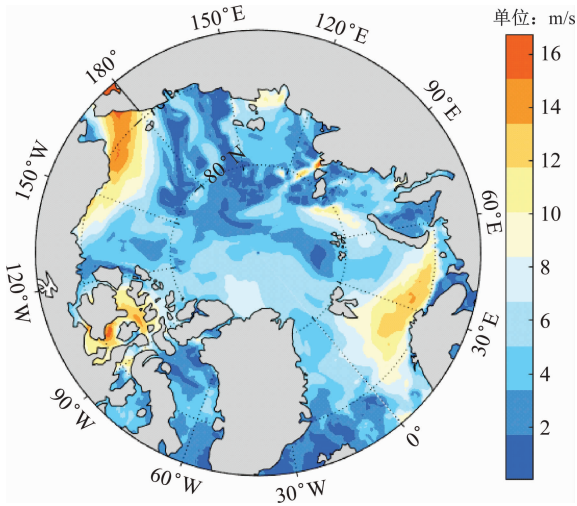


图8 风速数据

Fig. 8 Wind data diagram

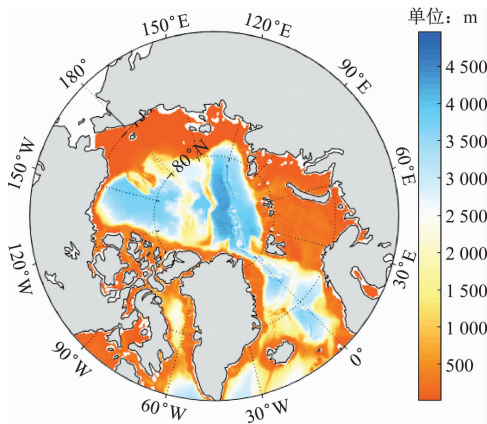


图9 水深数据

Fig. 9 Depth data diagram

2.3 模型参数

2.3.1 船舶参数

以我国商用船舶中第一艘成功航行东北航道的“永盛”轮为研究对象,其船体资料参数,见表2。

表2 “永盛”轮船体资料参数

Tab.2 Main hull data parameters of “Yongsheng”

船名	“永盛”轮
破冰等级	PC7
排水量/t	14 375
船长/m	160.0
船宽/m	23.7
吃水/m	8.7
水线面的正投影面积/m ²	3 792
风向与船首的夹角/°	60
设计航速/kn	7

2.3.2 环境参数

1) 根据不同海冰类型对应的海冰厚度以及PC7级船舶所对应的RIO值(表3、表4)计算得到研究区域内 R_{i0} 值如图10所示,将其结果代入式(3)赋值,得到约束条件 K_{RIO} 。

表3 不同海冰类型对应的海冰厚度

Tab.3 Sea ice thickness corresponding to types

海冰生长阶段	海冰厚度/cm
无冰	/
新冰	< 10
灰冰	[10, 15)
灰白冰	[15, 30)
薄当年冰第1阶段	[30, 50)
薄当年冰第2阶段	[50, 70)
中厚当年冰小于1 m	[70, 100)
中厚当年冰	[100, 120)
厚当年冰	≥ 120
二年冰	/
薄多年冰小于2.5 m	< 250
厚多年冰	≥ 250

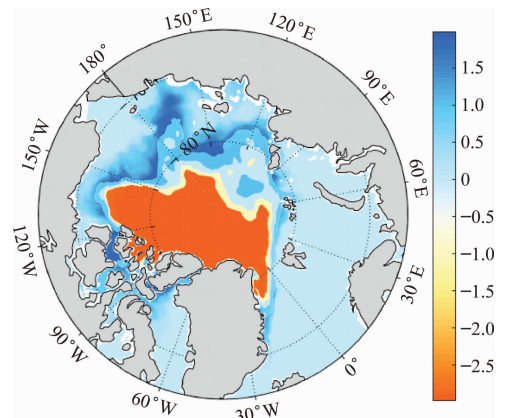


图10 R_{i0} 风险等级

Fig. 10 R_{i0} risk level diagram

表4 PC7级船舶值

Tab.4 PC7 ice class ship value

海冰类型	PC7级船舶 RIVs 值
无冰	3
新冰	2
灰冰	2
灰白冰	2
薄当年冰第1阶段	1
薄当年冰第2阶段	1
中厚当年冰小于1 m	0
中厚当年冰	-1
厚当年冰	-2
二年冰	-3
薄多年冰小于2.5 m	-3
厚多年冰	-3

2) 鉴于研究区域通航环境复杂,为避免搁浅等航行事故的发生,本文将水深设定为第二个约束条件 K_h 。将该条件与前述条件 K_{R10} 条件叠加后,即可确定研究所需的可安全通航区域,如图11所示。

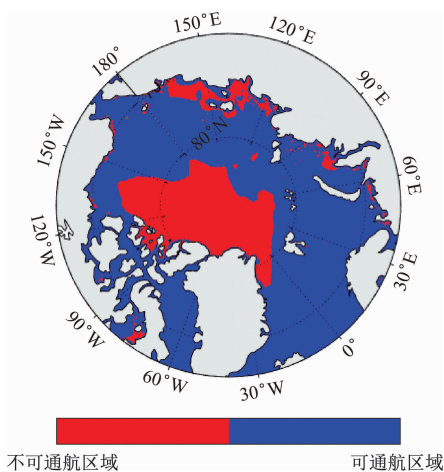


图11 可安全通航海域

Fig. 11 Safe navigation area

2.3.3 阻力参数

将海冰、风速等实测数据代入1.3中的式(5)-(9),计算求得船舶航行过程中所受风阻及破冰过程的阻力,如图12、图13所示。

为便于试验输出可视化路径结果,将图11所筛选的可通航区域与船舶航行阻力值相融合作为目标函数 F 的试验环境,如图14所示。

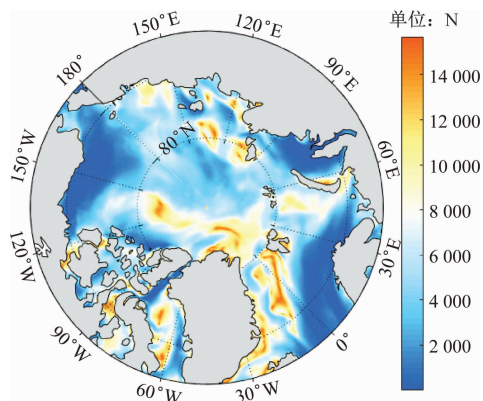


图12 风阻力

Fig. 12 Wind resistance diagram

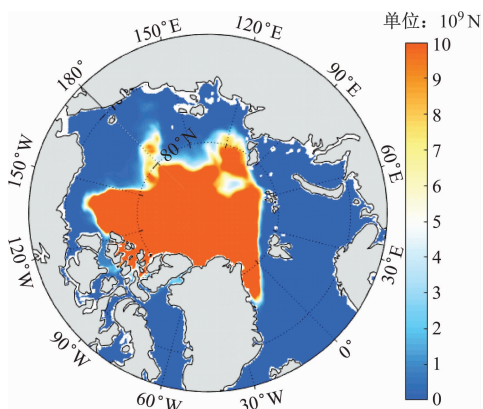


图13 冰阻力

Fig. 13 Ice resistance diagram

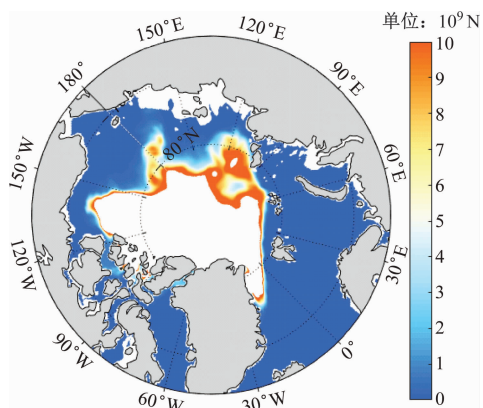


图14 航行阻力

Fig. 14 Navigation resistance diagram

2.4 算法试验参数

本文在建立上述以船舶航行阻力为目标函数的综合优化模型后,结合改进后的麻雀搜索算法(SSA1)拟在北极东北航道、西北航道进行路径规划仿真试验,并通过设计与GA算法、PSO算法、GWO算法以及SSA算法的对比试验,进而验证其可行性与有效性,试验具体参数,见表5。

表 5 试验参数设置
Tab. 5 Experiment parameter settings

算法名称	参数设置	设置依据
GA	种群数 80,最大迭代次数 200,交叉概率 0.6、变异概率 0.1	种群数为 80 时,算法在收敛速度与的质量间平衡较好;交叉概率 0.8 可避免过早收敛;变异概率 0.1 能保持算法整体搜索效率。
PSO	种群数 80,最大迭代次数 200,惯性权重 0.8、个体学习因子 1.2、社会学习因子 1.2	惯性权重为 0.8 有助于保持粒子速度,提升全局搜索能力;学习因子参考文献中常用设置。
GWO	种群数 80,最大迭代次数 200,b 从 2 线性减至 0	b 从 2 线性减至 0,模拟狼群收紧包围圈的行为,有助于算法从探索转向开发,增加了后期迭代的收敛速率和精度。
SSA	安全值 $S_r = 0.6$,发现者比例 $P_D = 0.2$,意识到有危险麻雀的比重 $S_D = 0.1$	发现者比例是根据麻雀社会行为模式设置的,确保有足够的发现者在解空间中进行广泛搜索。
SSA1	安全值 $S_r = 0.6$,发现者比例 $P_D = 0.2$,意识到有危险麻雀的比重 $S_D = 0.1$	较小的危险麻雀比重有助于快速响应环境变化,增加算法的适应性和灵活性。

3 结果与分析

表 6、表 7 分别展示五种算法在东北航道、西北航道的仿真试验结果。根据图 15、图 16 可知,多种算法经 200 次迭代后的运算结果,均为优化目标函数后获得的航行阻力最小值。本文改进的 SSA1 算法

在东北航道运行时,最优路径目标函数值为 1.52×10^7 N,路径长度为 1 150;相较于 PSO、GA、GWO、SSA 算法,目标函数值依次缩小 10.8%、3.9%、8.2%、2.7%,路径长度依次缩短 3.1%、0.7%、1.8%、1.2%。

表 6 东北航道仿真试验结果
Tab. 6 Simulation results of Northeast Passage

算法	航行阻力/N	航行阻力对比结果	路径长度/n mile	路径长度对比结果	运行时间/s
PSO	1.715×10^7	-10.8%	1 187	-3.1%	87
GA	1.592×10^7	-3.9%	1 158	-0.7%	155
GWO	1.667×10^7	-8.2%	1 171	-1.8%	159
SSA	1.573×10^7	-2.7%	1 164	-1.2%	66
SSA1	1.530×10^7	...	1 150	...	104

表 7 西北航道仿真试验结果
Tab. 7 Simulation results of Northwest Passage

算法	航行阻力/N	航行阻力对比结果	路径长度/n mile	路径长度对比结果	运行时间/s
PSO	3.654×10^7	-5.9%	342	-0.3%	76
GA	3.857×10^7	-10.9%	344	-0.9%	118
GWO	3.529×10^7	-2.6%	341	0	174
SSA	3.488×10^7	-1.5%	341	0	88
SSA1	3.437×10^7	...	341	...	108

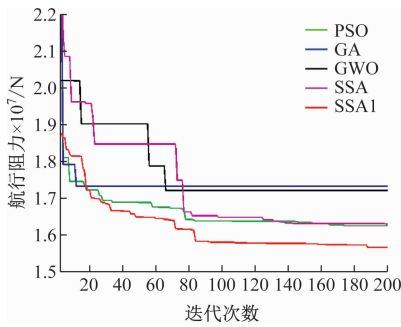


图 15 东北航道目标函数结果

Fig. 15 Results of objective function of Northeast Passage

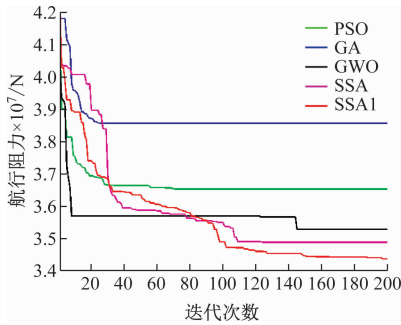


图 16 西北航道目标函数结果

Fig. 16 Results of objective function of Northwest Passage

将构建的优化模型以及算法应用于航行环境更为复杂的西北航道,试验结果如下:SSA1 算法所得最优路径的目标函数值为 3.437×10^7 N, 路径长度为 341;与其他四种算法相比,该改进型麻雀搜索算法的运算结果在两项指标上均处于最优水平。

将路径结果可视化输出,如图 17、图 18 所示,可观察到,优化所得的航线均能有效规避预设的危险航行区域,这为航行安全奠定了坚实基础;同时,其规划结果也与北极地区的实际航行经验高度一致,验证了模型的合理性与实用性,且可视化路径具备良好的平滑性,使仿真试验结果更贴近实际航行的需求。

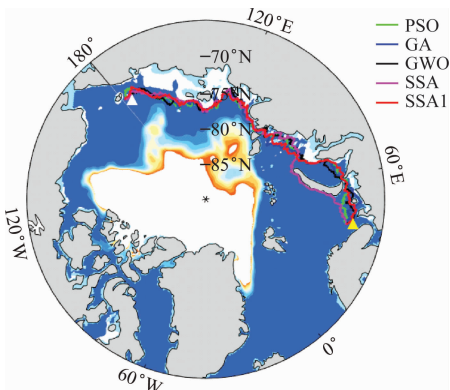


图 17 东北航道路径规划结果

Fig. 17 Results of Northeast Passage path planning

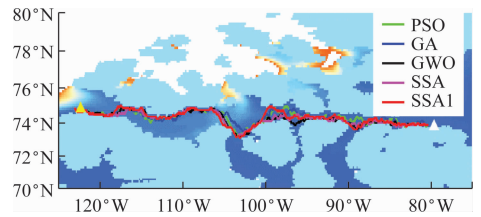


图 18 西北航道路径规划结果

Fig. 18 Results of Northwest Passage path planning

4 结 论

针对北极海冰迅速融化背景下北极航道通航能力的持续增强,重点考虑了船舶在复杂冰区环境中的安全性与航行效率。

通过提出一种综合风速阻力与冰阻力的多目标优化模型,结合改进的麻雀搜索路径规划算法(SSA1)实施路径规划仿真试验,得出以下结论:

1) 本研究旨在为北极航道提供一套可靠的航行优化方案,其核心环节是构建融合气象、冰情数据的栅格化环境地图。在此基础之上,关键步骤在于依据 POLARIS 模型的安全风险指数及安全水深阈值,筛选出安全的通航区域。该方法有效降低了风速与破冰阻力对航行的干扰,并保证了仿真路径与实际航道的高度吻合。

2) 基于综合多目标优化模型的改进麻雀搜索算法,可显著降低航行阻力,最优降幅达 10.9%;同时在路径长度优化上表现突出,最优缩短幅度为 3.1%。试验结果表明,该方法切实有效,为可持续航海的推进提供了兼具理论价值与实践意义的解决方案。

3) 本研究后续可进一步丰富数据来源,获取更高精度的北极航道气象及冰情数据,涵盖海冰运动、温度变化等多维度信息,以此提高模型预测的准确度与可靠性。在构建多目标函数模型时,本文仅考虑了 PC7 级船舶能够安全通航的试验环境,模型中没有包括破冰船援助,在实践中,多数低冰级船舶北极航行都是在破冰船护航下进行的,可进一步构建满足不同船型(PC1-PC7)安全通航的优化模型,以提高模型的适用性;基于两条航道在北极航线中的重要性以及其复杂多变的环境,本文并未对北极航线中其他航线开展额外试验,未来的研究将包括扩展测试范围,具体考察算法在其他北极航道的效果,以确保其全面性。

参 考 文 献

- [1] HSIEH T H, WANG S, GONG H, et al. Sea ice warning visualization and path planning for ice navigation

- based on radar image recognition[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2021, 29(3): 280-290.
- [2] THEOCHARIS D, PETTIT S, RODRIGUES V S, et al. Arctic shipping: a systematic literature review of comparative studies [J]. *Journal of Transport Geography*, 2018, 69: 112-128.
- [3] TSENG P H, ZHOU A, HWANG F J. Northeast passage in Asia-Europe liner shipping: an economic and environmental assessment [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2021, 15(4): 273-284.
- [4] CHEN A, CHEN W, ZHENG J. Arctic route planning and navigation strategy: the perspective of ship fuel costs and carbon emissions[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(7): 1107-1308.
- [5] WU H, WANG F, MEI X, et al. A novel fuzzy control path planning algorithm for intelligent ship based on scale factors[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2023, 80(1): 202-225.
- [6] LIU Q, WANG Y, ZHANG R, et al. Arctic weather routing: a review of ship performance models and ice routing algorithms [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1190164.
- [7] ZHANG C, ZHANG D, ZHANG M, et al. Data-driven ship energy efficiency analysis and optimization model for route planning in ice-covered Arctic waters[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106071.
- [8] LI Z, RINGSBERG J W, RITA F. A voyage planning tool for ships sailing between Europe and Asia via the Arctic[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2020(1): 1-10.
- [9] LEE H W, ROH M I, KIM K S. Ship route planning in Arctic Ocean based on POLARIS [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 234: 109297.
- [10] WU A, CHE T, LI X, et al. Route view: an intelligent route planning system for ships sailing through Arctic ice zones based on big earth data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 1588-1613.
- [11] 童帮裕, 胡坚堃. 基于改进蚁群算法的船舶冰区航行路径规划[J]. *中国航海*, 2020, 43(1): 24-28.
- TONG B Y, HU J K. Navigation path planning of ship ice area based on improved ant colony algorithm[J]. *Navigation of China*, 2020, 43(1): 24-28. (in Chinese)
- [12] 吕成, 崔濛, 吴刚. 基于 Dijkstra 算法的极区船舶航线规划方法[J]. *船舶工程*, 2022, 44(6): 10-19.
- LU C, CUI M, WU G. Polar ship route planning method based on Dijkstra algorithm [J]. *Ship engineering*, 2022, 44(6): 10-19. (in Chinese)
- [13] HAN S, WANG L, WANG Y, et al. A dynamically hybrid path planning for unmanned surface vehicles based on non-uniform Theta* and improved dynamic windows approach [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111655.
- [14] WEI T, YAN Q, QI W, et al. Projections of Arctic sea ice conditions and shipping routes in the twenty-first century using CMIP6 forcing scenarios [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104079.
- [15] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [16] FEDI L, FAURY O, ETIENNE L. Map and analysis of maritime accidents in the Russian Arctic through the lens of the polar code and POLARIS system [J]. *Marine Policy*, 2020, 118: 103984.
- [17] 孙帅, 王超, 常欣, 等. 浅水效应对船舶阻力及流场特性的影响分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(4): 499-505.
- SUN S, WANG C, CHANG X, et al. Analysis of the influence of shallow water effect on ship resistance and flow field characteristics [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(4): 499-505. (in Chinese)
- [18] DONNELLY D J, NEU W L. Numerical simulation of flow about a surface-effect ship: 11th International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2011 [C]. Washington, D. C.: American Society of Naval Engineers, 2011.
- [19] 王晓雪. 极地平整冰中破冰船运动数学模型[D]. 大连:大连海事大学, 2021.
- WANG X X. Mathematical model of icebreaker motion in polar level ice [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021. (in Chinese)