

恶劣冰况下的船舶脱困路径规划和控制方法

闫灵霄¹, 韩森¹, 孙家豪¹, 丁仕风^{2*}, 周利²

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏镇江 212100; 2. 上海交通大学, a. 海洋工程全国重点实验室;
b. 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: [目的]为提升船舶在恶劣冰况下航行的安全性和脱困能力, [方法]提出一种将基于风险和角度约束的 Theta* (RAC-Theta*) 算法与非线性模型预测控制 (MPC) 方法相结合的脱困策略。RAC-Theta* 算法能通过综合考虑船舶的航行风险和脱困成本来动态调整路径, 选择最佳的转向时机和脱困路径; 非线性 MPC 方法能有效跟随脱困路径, 提升船舶在复杂冰况下的脱困控制能力。[结果]仿真结果表明: 该控制系统能在密集冰区使船舶保持航行稳定性, 尤其是当船舶因遇到大面积浮冰而被困时, 能快速通过脱困路径规划和二次规划使船舶脱困; 非线性 MPC 控制器在纵荡和横荡速度控制方面具有良好的鲁棒性, 能提升船舶的航行安全性和通航能力。[结论]提出的脱困策略能优化脱困时机和路径, 为船舶在冰区安全航行提供重要的技术支持。

关键词: 冰区; 脱困; 路径规划; 模型预测控制

中图分类号: U671.99 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2025.11.03

Ship Extrication Path Planning and Control Method Under Severe Ice Conditions

YAN Lingxiao¹, HAN Sen¹, SUN Jiahao¹, DING Shifeng^{2*}, ZHOU Li²

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, a. State Key Laboratory of Ocean Engineering; b. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: [Purpose] With the increasing demand for Arctic shipping channels, the safety and extrication capabilities of ships in severe ice conditions have become significant challenges. To address this issue, [Method] a risk and angle constraints-based Theta* (RAC-Theta*) algorithm combined with a nonlinear model predictive control (MPC) method has been proposed for the extrication strategy. The RAC-Theta* algorithm can dynamically adjust the route to select the optimal steering time and escape route, considering both the ship's navigational risk and the extrication cost. The nonlinear MPC effectively follows the extrication path, enhancing the ship's extrication control in complex ice conditions. [Result] Simulation results demonstrate that the control system can maintain navigational stability in dense ice areas, particularly when the ship encounters large ice floes, allowing for rapid extrication through path planning and secondary planning. The nonlinear MPC controller exhibits strong robustness in controlling surge and sway speeds, which improves the ship's navigation safety and maneuverability. [Conclusion] In conclusion, the proposed extrication strategy optimizes the timing and path of extrication, providing crucial technical support for the safe navigation of ships in ice-covered areas.

Key words: ice area; extrication; path planning; model predictive control

收稿日期: 2025-01-21; 修回日期: 2025-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0107000); 国家自然科学基金(52401381)。

作者简介: 闫灵霄(2000—), 女, 硕士研究生。研究方向: 船舶路径规划和运动控制。

通信作者: 丁仕风(1981—), 男, 正高级工程师。研究方向: 极地船舶与海洋结构物的载荷预报、极地船舶抗冰结构分析与优化设计、智能船体技术及其软件开发应用。E-mail: shifengding@sjtu.edu.cn。

0 引言

近年来, 随着全球气候日益变暖, 北极航行需求日益增加, 北极地区的航运资源^[1]越来越受关注。然而, 冰区的复杂冰况和环境障碍会显著增加船舶的航行难度, 并给其带来巨大安全风险, 比如航线规划不当易引发冰困事故^[2]。对此, 综合考虑风险成本和转向约束开展冰区航行船舶路径规划和控制方法研究, 对于保证该型船在冰区航行的安全性和稳定性而言具有重要意义。

冰区的复杂性对船舶路径规划和控制提出了很高的要求。近年来, 已有很多学者对该问题进行研究, 主要考虑海冰不确定性、油耗、时间和风险成本等因素。NORSTAD等^[3]建立了航速和航时与燃油消耗的关系模型, 采用回归平滑算法解决船舶在不同环境下航行时产生的变速问题, 加快了算法的收敛速度。KOTOVIRTA等^[4]重点关注燃料、时间和风险成本的影响, 对在波罗的海航行的商船进行了路径优化。HUANG等^[5]基于风险指数结果(Risk Index Outcome*, RIO*)和推进功率与船速的关系, 提出了一种对PC6级极地游船的风险进行评估的方法, 在此基础上进行了航线规划仿真分析。LIN等^[6]考虑最小航行风险和航行距离等因素, 提出了一种近场路径优化模型, 利用雷达回波图像自动选择最优路径。ZHANG等^[7]提出了一种基于A*算法的多约束条件下的极区船舶路径规划方法, 将A*算法与安全风险因素相结合得到一个代价估计函数, 结果显示该方法能为不同类型极区船舶提供一条确保安全的极地航线。CHOI等^[8]提出了一种基于海冰动态行为模拟的航线规划模型, 采用A*算法搜索最优路径。QU等^[9]提出了蚁群优化影响下的目标诱导A*

(Goal-Induced A* Under Ant Colony Optimization influence, GI-ACO-A*) 算法, 采用一种针对非结构化环境的全局路径规划与局部避障相结合的导航策略, 在考虑船舶轮廓的同时, 提高了路径搜索效率。然而, 已有的冰区路径规划研究多集中于获取从出发点到目的地的全局最优航线, 很少对恶劣冰况下的船舶脱困路径规划问题进行研究。

路径规划的实际执行离不开路径跟随控制。路径跟随控制的目标是使船舶沿规划的路径精确航行, 同时克服外部干扰和非线性动力学带来的挑战。ZHOU^[10]开发了一种用于进行路径跟随和速度维护的视线(Line of Sight, LOS)制导系统和比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制器, 解决了航向角不连续问题, 实现了路径跟随。王鹏^[11]研究了鱼群算法下的船舶避撞路径跟踪控制, 能精准测定船舶实时航行过程中的会遇情形, 提供最佳的避撞路径, 全面实现对港口航行船舶的跟踪控

制。胡子谅^[12]在无人船运动学的基础上提出了一种基于PID控制器的动力学控制方法, 能使被控船舶较好地跟随给定的前向速度和实际角速度。相比开阔水域, 船舶在冰区航行的操纵性控制更复杂。

在复杂冰况下, 脱困是实现船舶继续航行的重要步骤。研究表明, 船舶能通过后退方式脱困^[13], 增加机动空间, 从而为进一步的前进提供条件。HAN等^[14]提出了一种先后退再前进的离泊控制方法, 通过模拟船舶在狭窄环境中的运动特点, 解决了操纵水域受限的问题, 为冰区脱困提供了新的思路。船舶在沿原航道后退脱困时的机动性能相对较差, 给船舶的精准控制带来了挑战。模型预测控制的方法将最优控制理论与滚动优化策略相结合, 能在复杂工况中实现对路径的高精度跟随^[15], 因此适用于恶劣冰况下的船舶控制。

为了解决恶劣冰况下的船舶脱困路径规划和运动控制问题, 本文将基于风险和角度约束的Theta*(Risk and Angle Constraints-Based Theta*, RAC-Theta*)算法与非线性模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)方法相结合, 提出一种船舶“先后退再前进”的脱困策略。该策略能综合考虑船舶的航行风险和成本, 动态调整船舶航行路线, 使得极地船舶摆脱冰困并最终到达目标点。

1 基于RAC-Theta*的路径规划

1.1 环境建模

采用网格图法进行环境建模^[16]。首先选择固定尺寸为66 010 m×66 220 m的海冰遥感图像, 图像内海冰的冰厚是一致的, 见图1(a)。该图像网格的分辨率为943×946, 即每个网格的边长为70 m。

为保障船舶航行的安全性, 需根据海冰的分布情况正确划分环境网格图的风险等级。采用安全网格图表示非均匀单元格的风险成本, 假设海水的风险等级为1, 海冰单元的风险成本用 $R(s)$ 表示, 即

$$R(s)=\begin{cases} 1, & \text{海水} \\ h_i \kappa \left[\text{dist}(p_{(i,j)}, p_{(x,y)}) + 1 \right]^\beta + 1, & \text{海冰} \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为网格单元; h_i 为冰厚度对风险的贡献程度, 当冰厚取为0.03 m时, $h_i=1$; κ 为距离对风险成本的贡献程度, 本文取 $\kappa=0.05$; $p_{(i,j)}$ 为单元格 s 的位置; $p_{(x,y)}$ 为距离单元格 s 最近的冰-水交界处位置; dist 为欧几里德距离; β 为距离变化对风险增加的影响程度, 本文取 $\beta=1.5$ 。

单元格的风险成本能表示海冰的可通行性, 见图1(b)。单块浮冰越向中心, 对应的单元格的颜色越深, 对应的风险成本越高, 船舶的可通行性越低。

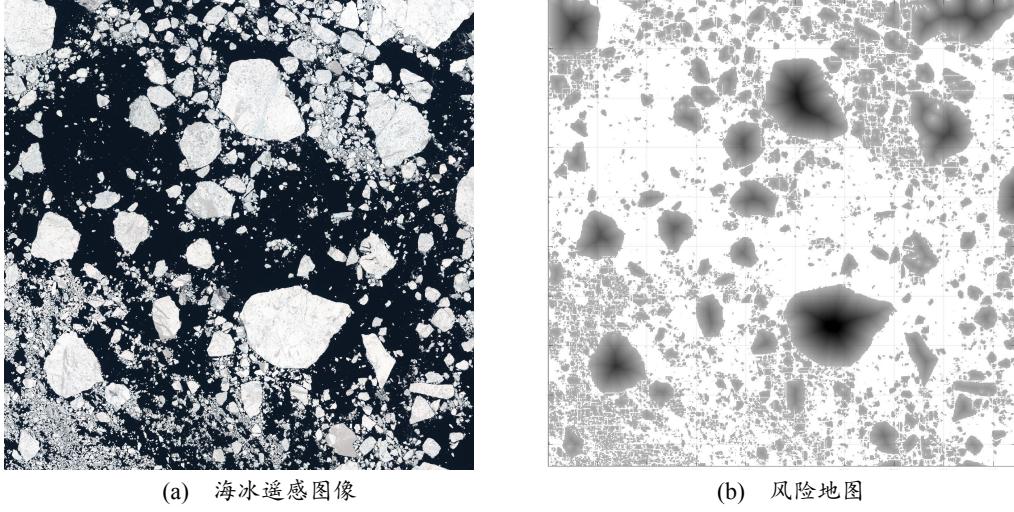


图 1 环境建模图

Fig. 1 Environmental Modeling Diagram

1.2 RAC-Theta*算法

环境建模结束之后，需采用路径搜索算法搜索从起点到目标点的可行路径。在进行极地船舶路径规划时，不仅要考虑船舶航行的安全性，而且要考虑航线距离、操作复杂性和海冰可通行性。Theta*算法在A*算法的基础上提高路径搜索的速度和对环境的适应性，能找到从起点到目标点的最短路径。本文对传统的Theta*算法进行改进，提出采用RAC-Theta*算法规划全局路径，搜索时在每个节点存储4个关键值：

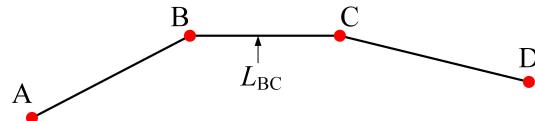
1) $g(s)$ ，表示从起点到迄今为止发现的节点的距离与风险的代价和，表达式为

$$g(s) = g + \gamma \text{dist}(m, n) \quad (2)$$

2) 启发式 $h(s)$ ，用于估计从节点 s 到目标点的距离，表达式为

$$h(s) = \text{dist}(n, p_{\text{oint}}, \text{goal}) \quad (3)$$

$$\Gamma(A, B, C, D) = \angle ABC - \frac{\max\{0, L_{\max} - L_{BC}\}}{L_{\max}} \cdot (\pi - \angle BCD) \quad (4)$$

图 2 $\Gamma(A, B, C, D)$ 函数示意图Fig. 2 Schematic Diagram of $\Gamma(A, B, C, D)$ Function

传统Theta*算法与ASC-Theta*算法的关键区别在于：当采用基础Theta*算法时，全局路径的转向角度可以是任何大小；RAC-Theta*算法考虑网格的风险成本，且转向角度受式(4)的约束。图3为RAC-Theta*算法拓展邻节点时的伪代码，其中 $c(u, s)$ 表示节点 s 到 u 的代价。

3) $f(s)=g(s)+h(s)$ ，用于表示从起点到节点 s 再到目标点的预估总成本。

4) 父指针，简称为 $s.p$ ，用于建立节点之间的父子关系，以提取最终路径。

当RAC-Theta*算法扩展当前节点 s 的邻节点 u 时，应该检查节点 u 与节点 s 的父节点 $s.p$ 之间是否可视，即 $LoS(u, s.p)$ 。如果 $LoS(u, s.p)$ 可视，则将 u 的父节点设定为 $s.p$ 。在网格图上，若从节点 u 到节点 $s.p$ 的直线既不从阻塞单元的内部穿过，也不从共享边缘的阻塞单元之间穿过，则称 $LoS(u, s.p)$ 是可视的。为避免沿全局路径中存在较大的转向角度，并提高路径的可跟踪性，设计一个 $\Gamma(A, B, C, D)$ 函数，其中：A为当前节点；B为A的父节点；C为A的祖父节点；D为A的曾祖父节点。图2为 $\Gamma(A, B, C, D)$ 函数示意图，其表达式可表示为

RAC-Theta*算法能根据初始的船舶姿态规划一条符合动力学约束的全局路径，使其具有较好的可行性和可跟随性。在存在障碍物的情况下，RAC-Theta*算法能保证航段之间有大于135°的转弯角度，有效避免实质性的曲率拐点。此外，RAC-Theta*算法还可根据包含该转折点的航段长

度动态调整转弯角约束, 这种自适应调整有助于消除冗余路径点的不利影响。

```

1:                                     if  $\Gamma(u, s, s.p, s.p.p) \geq 135^\circ$  then
2:                                         if  $\Gamma(u, s.p, s.p.p, s.p.p.p) \geq 135^\circ$  and  $LoS(u, s.p)$  then
3:                                             parent:= $s.p$ 
4:                                             Cost:= $c(s.p)+c(u, s.p)+R(s)$ 
5:                                         else
6:                                             parent:= $s$ 
7:                                             cost:= $g(s)+c(u, s)+R(s)$ 
8:                                         end if
9:                                     end if
10:                                    return [parent, cost]

```

图3 RAC-Theta*算法拓展邻节点时的伪代码

Fig. 3 Pseudocode for Expanding Neighboring Nodes in RAC-Theta* Algorithm

1.3 先后退再前进的脱困策略

船舶在初始时刻先跟随首次规划的全局路径, 船舶驶过的位置风险值等同于海水的风险值。当船舶被困时记录被困点, 同时将被困位置前方标记为不可通行区域, 更新建模环境网格地图。在新的地图上采用RAC-Theta*算法进行脱困路径规划, 此时船舶航向的反方向为初始姿态, 被困点为脱困起点, 终止条件为

$$\begin{cases} \sqrt{(x_w - x_t)^2 + (y_w - y_t)^2} > 50 \\ R(w) < r \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_w 和 y_w 为脱困路径规划的终止点位置坐标; x_t 和 y_t 为被困点位置坐标; $R(w)$ 为脱困终点风险值。

脱困路径规划结束之后, 以脱困路径的终止点为起点进行二次路径规划, 获取新的全局路径, 最终引导船舶实现“先后退再前进”式脱困, 见图4。

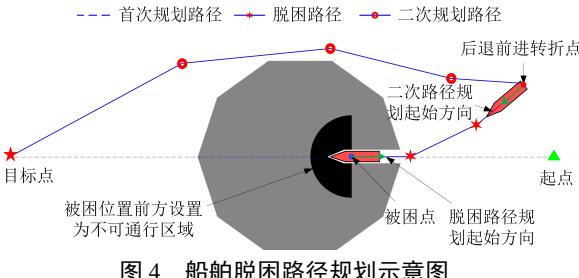


Fig. 4 Schematic of Ship Extrication Path Planning

2 基于非线性 MPC 的路径跟随控制

2.1 船舶数学模型

基于非线性MPC的船舶运动控制是以船舶数学模型为基础实现的。本文只考虑船舶航行时水平面

的三自由度运动, 即横荡、纵荡和艏摇。采用2种坐标系统: 1) 以船舶自身为参考点的随船坐标系, 记为 $\{b\}=(X_b, O_b, Y_b)$, 原点 O_b 位于船舶重心; 2) 以大地为参考点的惯性坐标系, 记为 $\{n\}=(X_G, O_G, Y_G)$, 原点 O_G 可固定在任意位置。图5为船舶运动坐标系。

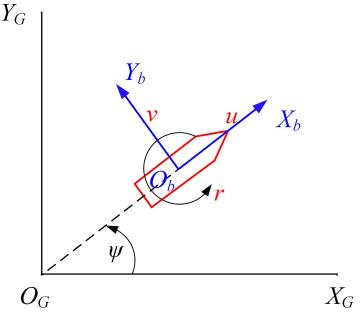


图5 船舶运动坐标系

Fig. 5 Ship Motion Coordinate System

对于三自由度模型而言, 船舶的运动学方程可简化为

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (6)$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}v \quad (7)$$

式中: $R(\psi)$ 为3个自由度的坐标转换矩阵; 状态量 $\dot{\eta}=[x, y, \psi]^T$ 和 $v=[u, v, r]^T$ 分别为惯性坐标系 $\{n\}$ 中的位置矩阵和随船坐标系 $\{b\}$ 中的速度矩阵。

考虑到控制力的作用, 船舶在随船坐标系下的三自由度动力学方程^[17]表示为

$$M_{RB}\ddot{v} + M_A\ddot{v}_r + C_{RB}(v)v + C_A(v_r)v_r + D(v_r)v_r = \tau + \tau_e \quad (8)$$

式中: M_{RB} 为刚体的惯性矩阵; M_A 为水动力附加质量矩阵; $C_{RB}(v)$ 为刚体的科氏力和向心力矩阵; $C_A(v_r)$

为附加质量引起的科氏力和向心力矩阵; $D(v_r)$ 为阻尼矩阵; $v_r=v-v_c$ 为相对速度矩阵; v_c 为非旋转流体

的流速矩阵； $\tau=[\tau_u, \tau_v, \tau_r]^T$ 为控制输入矩阵，包含纵荡控制力、横荡控制力和艏摇控制力矩。 τ_{re} 为与航行风险和航行速度相关的冰阻力估计值，

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_g \\ 0 & mx_g & I_z \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_g r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_v v_r + 0.5(N_{\dot{v}} + Y_{\dot{r}})r \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}} u_r \\ -Y_{\dot{v}} v_r - 0.5(N_{\dot{v}} + Y_{\dot{r}})r & X_{\dot{u}} u_r & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}_r) = \begin{bmatrix} -X_u - X_{|u|u} |u_r| & -X_{uuu} u_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_{|v|v} |v_r| & -Y_{|r|r} |r| & -Y_r - Y_{|r|r} |v_r| & -Y_{|r|r} |r| \\ 0 & -N_v - N_{|v|v} |v_r| & -N_{|r|r} |r| & -N_r - N_{|r|r} |v_r| & -N_{|r|r} |r| \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(9)~式(12)中： m 为船舶质量； I_z 为转动惯量； $X_{(\cdot)}$ 、 $Y_{(\cdot)}$ 和 $N_{(\cdot)}$ 为水动力系数，具体水动力参数见表1。

2.2 非线性 MPC 原理

本文采用非线性MPC方法设计船舶路径跟随控

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R}(\psi)\mathbf{v} \\ (\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A)^{-1} [\tau + \tau_{wind} - \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r - \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r] \end{array} \right\} \quad (13)$$

根据船舶的螺旋桨和方向舵的性能限制，控制输入约束可表示为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{min} \leq \Delta \mathbf{u}(k+i) \leq \Delta \mathbf{u}_{max}, i = 0, 1, 2, \dots, N_c - 1 \\ \mathbf{u}_{min} \leq \mathbf{u}(k+i) \leq \mathbf{u}_{max}, i = 0, 1, 2, \dots, N_c - 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中： N_c 为控制时域的维度，本文取 $N_c=10$ ； \mathbf{u}_{max} 和 \mathbf{u}_{min} 分别为控制输入的上限和下限； $\Delta \mathbf{u}_{max}$ 和 $\Delta \mathbf{u}_{min}$ 分别为控制输入增量的上限和下限。

在船舶实际航行过程中，船舶的方向舵效应会随着速度的下降而减小，甚至消失。因此，艏摇力矩的下界和上界应基于船舶的变化动态调整，即

$$\zeta(k+1) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k-1) + \Delta \mathbf{u}(k)] \\ \mathbf{u}(k-1) + \Delta \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}[\mathbf{P}_1 \zeta(k), \mathbf{P}_2 \zeta(k) + \Delta \mathbf{u}(k)] \\ \mathbf{P}_2 \zeta(k) + \Delta \mathbf{u}(k) \end{bmatrix} = f_d[\zeta(k), \Delta \mathbf{u}(k)] \quad (17)$$

式中： $\mathbf{P}_1 = [\mathbf{I}_n, \mathbf{0}_{n \times m}]$ ； $\mathbf{P}_2 = [\mathbf{0}_{n \times m}, \mathbf{I}_m]$ ； m 为控制输入维度， $m=3$ ； n 为系统状态维度， $n=6$ 。

$$\tau_{re} = [\varepsilon \cdot R(s)(u^2 + v^2), 0, 0]。$$

式(8)中的各矩阵可表示为

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_g r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_v v_r + 0.5(N_{\dot{v}} + Y_{\dot{r}})r \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}} u_r \\ -Y_{\dot{v}} v_r - 0.5(N_{\dot{v}} + Y_{\dot{r}})r & X_{\dot{u}} u_r & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}_r) = \begin{bmatrix} -X_u - X_{|u|u} |u_r| & -X_{uuu} u_r^2 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_{|v|v} |v_r| & -Y_{|r|r} |r| & -Y_r - Y_{|r|r} |v_r| & -Y_{|r|r} |r| \\ 0 & -N_v - N_{|v|v} |v_r| & -N_{|r|r} |r| & -N_r - N_{|r|r} |v_r| & -N_{|r|r} |r| \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(9)~式(12)中： m 为船舶质量； I_z 为转动惯量； $X_{(\cdot)}$ 、 $Y_{(\cdot)}$ 和 $N_{(\cdot)}$ 为水动力系数，具体水动力参数见表1。

制器。定义状态变量为 $\mathbf{x}=[x, y, \psi, u, v, r]^T$ ，控制输入为 $\mathbf{u}=[\tau_u, 0, \tau_r]^T$ ，系统输出为 $\mathbf{y}=\mathbf{x}$ 。根据船舶数学模型建立非线性模型预测控制器。状态空间模型表示为

$$\begin{cases} u_{min}(3) = \max\{\tau_{r,min}, \alpha \cdot V^2 \tau_{r,min}\} \\ u_{max}(3) = \min\{\tau_{r,max}, \alpha \cdot V^2 \tau_{r,max}\} \end{cases} \quad (15)$$

式中： α 为自适应参数； $\tau_{r,min}$ 和 $\tau_{r,max}$ 分别为艏摇力矩的最小值和最大值。

考虑系统约束，定义一个新的系统状态变量，表达式为

$$\zeta(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{u}(k-1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

新的系统状态空间模型为

为保证船舶对规划路径的准确、平稳跟随，设置基于系统状态偏差和控制能耗的目标函数，表达

式为

$$\begin{cases} \min \mathbf{J}(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \mathbf{x}(k+i) - \mathbf{x}_R(tar) \right\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \left\| \Delta \mathbf{u}(k+i) \right\|_R^2 \\ \zeta(k+i+1) = f_d[\zeta(k+i), \Delta \mathbf{u}(k+i)], i = 0, 1, 2, \dots, N_p - 1 \\ \mathbf{x}(k+i) = \mathbf{P}_1 \zeta(k+i), i = 0, 1, 2, \dots, N_p \\ \Delta \mathbf{U}_{\min} \leq \Delta \mathbf{U}(k) \leq \Delta \mathbf{U}_{\max} \\ \mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{M} \Delta \mathbf{U}(k) + \mathbf{U}(k) \leq \mathbf{U}_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为加权矩阵; \mathbf{x}_R 为采用 RAC-Theta* 算法得到的期望参考路径, 包含位置信息和方向信息, 用于引导船舶航行; $\mathbf{x}_R(tar)$ 为参考路径上第 tar 个路径点; N_p 为预测时域的维度, 本文选取 $N_p=10$; \mathbf{U}_{\min} 和 \mathbf{U}_{\max} 分别为控制输入的最小值和最大值集合; $\Delta \mathbf{U}_{\min}$ 和 $\Delta \mathbf{U}_{\max}$ 分别为控制输入增量的最小值和最大值集合; $\mathbf{M}=\mathbf{S}_{N_p} \otimes \mathbf{I}_m$, 其中 \mathbf{S} 为 N_p 阶下三角矩阵。

表 1 CyberShip II 的水动力参数
Tab. 1 Hydrodynamic Parameters of CyberShip II

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
m	23.800	X_u	-0.723	Y_r	-7.250	N_v	0
I_z	1.760	$X_{ u u}$	-1.327	$Y_{ v r}$	-0.845	$N_{ v v}$	3.956
x_g	0.046	X_{uuu}	-5.866	$Y_{ r r}$	-3.450	$N_{ r r}$	-0.750
$X_{\dot{u}}$	-2.000	Y_v	-0.890	$N_{ r v}$	0.130	$N_{\dot{r}}$	-1.000
$Y_{\dot{v}}$	-10.000	$Y_{ v v}$	-36.473	N_r	-1.900	$Y_{ r v}$	-0.805
$Y_{\dot{r}}$	0	N_v	0.031	$N_{ v r}$	0.080		

3.1 船舶路径跟随控制与被困场景分析

图6为船舶被困仿真模拟图, 显示船舶在复杂冰况下的路径规划和跟随控制, 其中: 蓝线为 RAC-Theta* 算法为船舶规划的全局路径; 红线为实

3 仿真验证

为检验所提方法的有效性, 以 CyberShip II 号船舶^[18]为研究对象进行仿真验证。该船是一艘缩尺比为 70 : 1 的模型船, 其质量为 23.8 kg, 长为 1.255 m, 宽为 0.290 m。为保证缩尺比相同, 对环境地图进行等比例缩放。仿真计算采用 MATLAB 2018b 软件, 在搭载有 Intel Core 9 3.6 GHz CPU 和 32 GB RAM 的计算机上进行。

际航行轨迹。对被困区域进行局部放大展示, 可看出, 随着船舶逐渐靠近被困点, 船舶轨迹点越来越密集, 亦即船速越来越低。

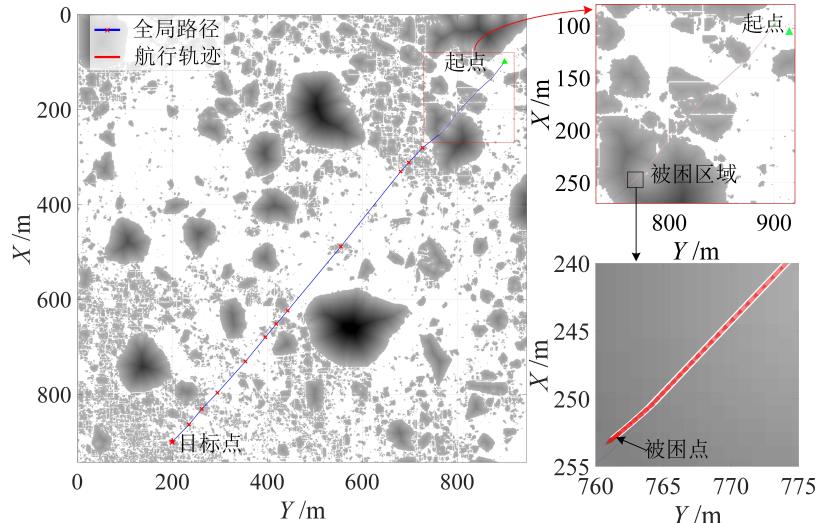


图 6 船舶被困仿真模拟图
Fig. 6 Ship Entanglement Simulation Diagram

图7为位置偏差与船舶姿态，表示船舶被困之前航行的位置偏差、艏向角、纵荡速度和横荡速度的时历曲线。从图7可看出，船舶航行时的位置偏差能有效保持在0.5 m以内。艏向角的稳定性在船舶航行过程中非常关键，由图7(b)可知：在大部分时间内，艏向角维持在较为稳定的状态；当更换目标点时，

图7 位置偏差与船舶姿态

Fig. 7 Position Deviation and Ship Motion States

3.2 船舶脱困路径规划与跟随控制

船舶在航行过程中遇到较厚的冰时很难继续前行，导致被困。这时需选择恰当的脱困路径。在船舶脱困仿真分析中，给出船舶在复杂冰况下脱困的

艏向能及时达到一个稳定方向。由图7(d)可知，曲线尖峰能反映船舶在更换局部目标点时横荡速度的动态响应，推动船舶向新的局部目标点调整艏向。图7(c)中的纵荡速度出现波动与海冰阻力相关，在被困之前，纵荡速度整体处于减速状态，最后逐渐接近0，导致船舶冰困。

图8 船舶脱困仿真模拟图
Fig. 8 Ship Extrication Simulation Diagram

图8上方的局部放大图展示的是脱困与二次规划的交接过程，船舶在减速时姿态较为稳定，在加速前进时，由于冰水阻力值与船速相关，因此出现阶段性的加速和减速过程，最终纵荡速度趋于稳定。图8下方的局部放大区域显示的是更改局部目标点时船舶的航行姿态，可看出船舶缓慢转向，确保航行安全。在未更改局部目标点时，位置偏差基本为0；在更换目标点之后，由于船舶向着下一个局部目标

规划路径和实际航行姿态见图8，其中：蓝色线条为RAC-Theta*算法规划的脱困路径；红色线条为船舶的实际航迹。通过脱困路径的引导，船舶成功地通过“先后退再前进”的方式实现了脱困。

点前进，因此与规划路径有一定的偏差，但最大偏差不超过1.5 m。

图9为脱困时船舶的位置偏差和航行姿态。在船舶由后退转前进过程中，其横荡速度有明显的变化，推动艏向变化，进而实现转向。船舶纵荡速度缓慢由负值逐渐增大为正值，从而实现从后退到前进的过渡。

— 30 —

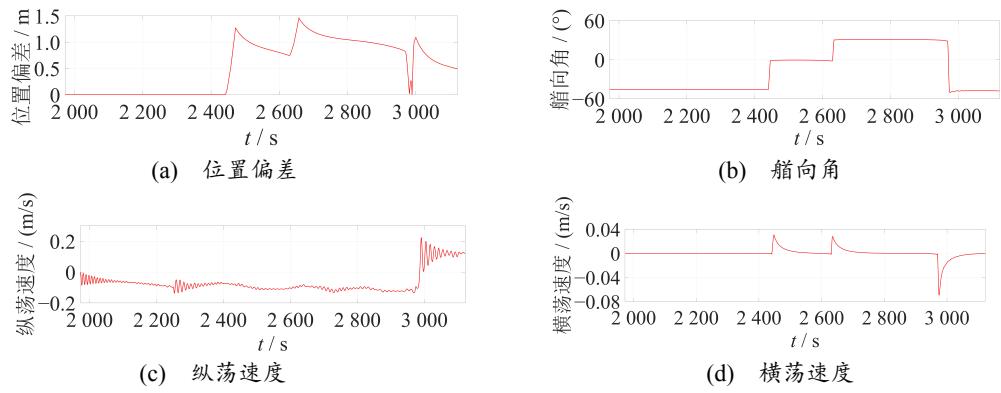


图9 脱困时船舶的位置偏差与航行姿态

Fig. 9 Position Deviation and Navigation Attitude of Vessel During Distress

3.3 船舶脱困后二次规划与跟随控制

图10为二次规划控制船舶仿真模拟图, 显示船舶在复杂冰情下的二次规划航线。由图10可知: 船舶脱困之后能跟随二次规划的路径, 且没有遇到冰

困; 船舶大部分时间内能较为精确地跟随新的航线, 偏差保持在较低水平。规划路径转角的大小对偏差的影响非常明显, 路径转角越小, 跟随控制过程的偏差越小。

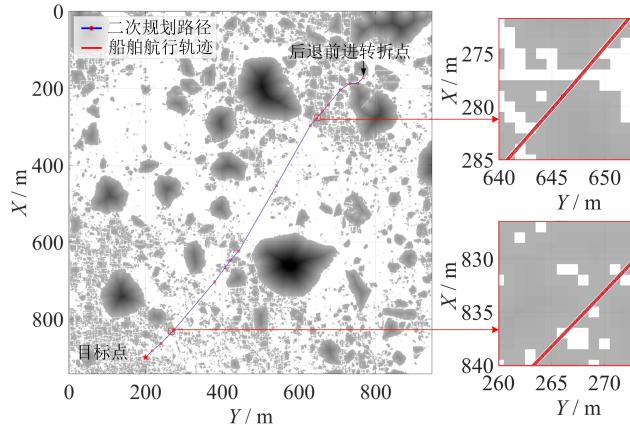


图10 二次规划控制船舶仿真模拟图

Fig. 10 Ship Simulation Diagram of Secondary Path Planning Control

图11为脱困后船舶的位置偏差和航行姿态。从图11可看出, 在经历局部目标点的变换时, 舵向角、纵荡速度和横荡速度有明显的波动。纵荡速度在经过冰水交界时有明显的变化, 因为冰与水的阻力大

小不同, 导致控制力发生变化, 因此, 纵荡速度变化较大, 但经过一段时间的调整之后可趋于一个稳定值。

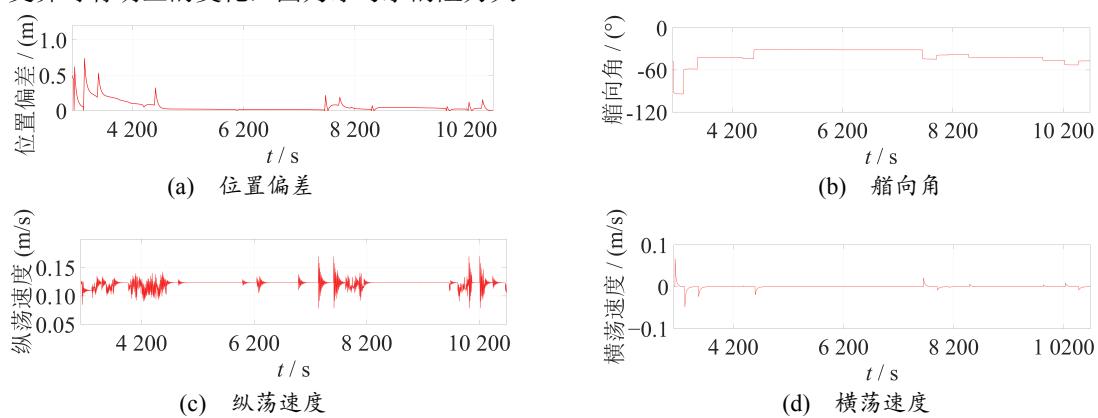


图11 脱困后船舶的位置偏差和航行姿态

Fig. 11 Position Deviation and Navigation Attitude of Vessel After Freeing

4 结论

本文结合冰区的特殊环境，提出了一种将RAC-Theta*算法与非线性MPC相结合的“先后退再前进”脱困控制策略。通过动态调整船舶的运动路径提高船舶在恶劣冰况下的脱困能力。仿真结果验证了控制系统在密集冰区中的航线保持能力，尤其当船舶遭遇大型浮冰被困时，该系统能快速重新规划脱困路径，控制船舶实现“先前进再后退”式脱困。采用非线性MPC实现路径跟随控制，能有效减小位置偏差和艏向角变化，确保船舶安全航行。系统对船舶纵荡和横荡速度控制显示其具有很强的鲁棒性，进一步增强船舶在复杂冰况下的操控能力。

未来将建立一个更精确的冰阻力模型，并考虑控制不确定性等因素，提高算法的控制精度，确保船舶在极端冰况下安全航行。此外，采用遥感技术与实地走航结合的方式获取海冰分布情况和实际海冰参数，更精确地模拟实际冰况，为冰阻力计算和船舶控制策略优化提供关键数据，为船舶在冰区航行提供更安全和可靠的技术支持。

参考文献：

- [1] 余春. 北极航道改变世界的未来[J]. 广东造船, 2022, 41(1): 18-20.
YU C. The Arctic Shipping Route Changes the Future of the World[J]. Guangdong shipbuilding, 2022, 41(1): 18-20.
- [2] 刘文博, 鲁阳, 薛彦卓. 面向冰区船舶航线的混合规划算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(11): 2065-2074.
LIU B, LU Y, XUE Y Z. A Hybrid Route Planning Algorithm for Ship Routing in Ice Areas[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(11): 2065-2074.
- [3] NORSTAD I, FAGERHOLT K, LAPORTE G. Tramp Ship Routing and Scheduling with Speed Optimization[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2011, 19(5): 853-865.
- [4] KOTOVIRTA V, JALONEN R, AXELL L, et al. A System for Route Optimization in Ice-Covered Waters[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(1): 52-62.
- [5] HUANG Y, SUN C, SUN J, et al. Route Planning of a Polar Cruise Ship Based on the Experimental Prediction of Propulsion Performance in Ice[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(9): 1655.
- [6] LIN X, WANG S, ZHANG X, et al. Near-Field Route Optimization-Supported Polar Ice Navigation via Maritime Radar Videos[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021(1): 2798351.
- [7] ZHANG M, DI Z, FU S, et al. A Method for Planning Arctic Sea Routes Under Multi-Constraint Conditions[C]//The 24th International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. 2017.
- [8] CHOI M, CHUNG H, YAMAGUCHI H, et al. Arctic Sea Route Path Planning Based on an Uncertain Ice Prediction Model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 109: 61-69.
- [9] QU Z, MEI X, WU H, et al. Fast Path Planning for Polar Surface Unmanned Vessels Based on GI-ACO-A* Algorithm[C]//14th International Conference on Information Science and Technology (ICIST). 2024.
- [10] ZHOU Q. Numerical Simulation for Ship Manoeuvring and Path Following in Level Ice[D]. St. John's: Memorial University of Newfoundland, 2014.
- [11] 王鹏. 基于鱼群算法的物流运输船舶港口避撞路径跟踪控制[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(24): 208-211.
WANG P. Port Collision Avoidance Path Tracking Control of Logistics Transport Ships Based on Fish Swarm Algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(24): 208-211.
- [12] 胡子谅. 无人船协同目标包围控制方法[J]. 计算机与网络, 2024, 50(6): 549-554.
HU Z L. Unmanned Surface Vehicle Cooperative Target Encirclement Control Method[J]. Computer & Network, 2024, 50(6): 549-554.
- [13] 刘浩珩. 探索船艇如何在冰区航行[J]. 中国水运, 2019(13): 75-76.
LIU H H. Exploring How Boats Navigate in Ice Areas[J]. China Water Transport, 2019(13): 75-76.
- [14] HAN S, YAN L, SUN J, et al. Automatic Unberthing for Underactuated Unmanned Surface Vehicle: Model-Based Planning and Control Approaches in Constricted Harbors[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119059.
- [15] LIU K, DING S, YAN L, et al. COLREGs-Compliant Autonomous Collision Avoidance and Improved Adaptive LOS-Based Motion Control for USVs in Complex Waters[J]. Ocean Engineering, 2025, 318: 120127.
- [16] LEE T, KIM H, CHUNG H, et al. Energy Efficient Path Planning for a Marine Surface Vehicle Considering Heading Angle[J]. Ocean Engineering, 2015, 107: 118-131.
- [17] FOSSEN T I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control[M]. St. John's: John Wiley & Sons, 2011.
- [18] SKJETNE R, SMOGELI Ø N, FOSSEN T I. A Nonlinear Ship Manoeuvering Model: Identification and Adaptive Control with Experiments for a Model Ship[J]. Modeling Identification and Control, 2004, 25(1): 3-27.