

破冰船引航条件下的编队航行控制方法

孙家豪¹, 韩 森¹, 丁仕风², 何光伟³, 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; 3. 广船国际有限公司, 广州 511462)

摘 要: [目的]为有效应对破冰船引航条件下复杂时变环境对船舶编队航行控制精度和队形保持的干扰, [方法]提出一种编队航行控制方法, 兼顾编队的航行效率和安全性。在路径规划方面, 提出采用考虑路径长度成本和冰区风险因素的非均匀 Theta*算法优化全局路径; 在引航破冰船控制方面, 提出采用改进自适应视距 (IALOS) 制导算法补偿时变环境干扰导致的侧滑角快速变化, 并设计航向控制器, 提高引航船的路径跟随精度; 在跟随船控制方面, 设计基于非线性模型预测控制 (MPC) 的轨迹跟踪控制器, 自适应调整船舶的间距和航速, 提高编队的航行效率和安全性。[结果]研究表明: 在无环境干扰情况下, 编队航行的位置偏差能控制在 0.25 m 以内, 编队间距能根据冰况自适应调整; 在随机风速和随机风向干扰下, 编队航行的位置偏差最大不超过 0.60 m, 各船的航向角稳定, 能保障编队的控制精度和安全性。[结论]提出的编队航行控制方法能为破冰船引航条件下的编队航行提供一种高效、稳健的解决方案, 有效应对复杂时变环境的干扰, 为极地区域船舶的安全航行提供技术支持。

关键词: 引航破冰船; 编队航行控制; 非均匀 Theta*算法; 路径跟随; 轨迹跟踪

中图分类号: U664.82 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2025.11.01

Formation Navigation Control Method Under Icebreaker Pilotage Conditions

SUN Jiahao¹, HAN Sen¹, DING Shifeng², HE Guangwei³, ZHOU Li^{2*}

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, Jiangsu, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, a. State Key Laboratory of Ocean Engineering; b. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai 200240, China; 3. Guangzhou Shipyard International Company Limited, Guangzhou 511462, China)

Abstract: [Purpose] A formation navigation control method is proposed to effectively mitigate disturbances from complex time-varying environments on formation control accuracy and configuration maintenance during icebreaker-assisted navigation, while balancing formation efficiency and safety. [Method] In the aspect of path planning, a non-uniform Theta algorithm was developed to optimize the global path considering the navigation cost and risk factors. In the aspect of piloting icebreaker control, improved adaptive line of sight (IALOS) algorithm is proposed to compensate the rapid change of sideshow angle caused by time-varying environment interference, and course controller is designed to improve the path following accuracy of piloting icebreaker. In the aspect of following ship control, a trajectory tracking controller based on nonlinear model predictive control (MPC) is designed to adjust ship spacing and speed adaptively to improve the efficiency and safety of formation navigation. [Result] The

收稿日期: 2025-01-22; 修回日期: 2025-04-30

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: 孙家豪 (1999—), 男, 硕士研究生。研究方向: 编队船舶路径规划和运动控制。

通信作者: 周 利 (1983—), 男, 博士、教授。研究方向: 极地船舶与海洋工程研发设计与工程应用。

E-mail: zhouli209@sjtu.edu.cn。

position deviation of formation sailing can be controlled within 0.25 m, and the spacing of formation can be adjusted according to the ice condition. Under the interference of random wind speed and random wind direction, the position deviation of the formation sailing is not more than 0.6m, and the course Angle of each ship is stable, which ensures the control accuracy and safety of the formation. [Conclusion] The proposed formation navigation control method can provide an efficient and robust solution for formation navigation under the pilotage conditions of icebreakers, effectively deal with complex time-varying environmental interference, and provide technical support for shipping in the Arctic and other polar regions.

Key words: pilot icebreaker; formation navigation control; non-uniform Theta*; path following; trajectory tracking

0 引言

随着极地资源开发和北极航道应用的需求日益增加,冰区航行技术逐渐成了海事工程和智能航运领域的重要研究方向^[1-3]。破冰船引航条件下的编队航行是一种高效、安全的通航方式,能确保常规船舶在复杂冰情下安全、高效地通过冰区。然而,由于极地环境较为恶劣,破冰编队在航行过程中仍面临诸多挑战,如冰阻力的不确定性^[4]、船舶间的协同控制^[5]和环境干扰因素^[6]等。因此,研究破冰船引航条件下的编队航行与控制方法具有重要意义。

破冰编队航行面临的一个核心问题是如何构建准确的冰区环境模型。冰的分布和厚度及其动态变化会对船舶的运动特性产生显著影响,进而影响编队的路径规划和控制策略。近年来,已有很多学者针对冰区环境建模进行深入研究。XU^[7]采用基于遥感数据的冰况预测模型、物理冰动力学模型和数据驱动的机器学习模型,提出了一种适用于极地航运的综合风险评估与预测方法。张金奋等^[8]基于极地航行的限制因素,构建了一套风险评估指标体系,通过分析经过网格化处理的海冰密集度和厚度数据,建立了适用于北极航行的风险评估模型,以直观展现不同区域的通航风险水平。通过这些建模方法,可更精确地模拟破冰船与冰之间的相互作用,从而提高编队航行的安全性和效率。

为解决破冰编队航行面临的路径规划问题,需综合考虑海冰密集度和海冰厚度等冰情信息以及航行距离等因素^[9]。HART等^[10]和DANIEL等^[11]分别研究了A*和Theta*等传统方法在计算效率和路径优化方面存在一定的局限性。NAM等^[12]采用海冰模型和路径规划模型设计了一种覆盖整个北极区域的海冰导航系统,为船舶提供航线设计方案并计算运输成本,但采用的数据分辨率较低,精度有待提高。改进的Theta*算法因能生成更平滑的路径得到了广泛关注^[13]。在冰区环境中,由于冰块分布具有不均匀性,改进的Theta*路径规划算法可结合冰厚度、破冰成本和安全风险等因素动态调整航线,提高船舶航行的效率和安全性。

在破冰编队航行过程中,编队中的船舶需保持

合理的队形,以减少破冰能耗并提高通过能力。常见的编队控制方法是通过矩阵形式对编队结构进行描述,利用一系列控制方法进行编队控制求解^[14]。对于引航船而言,需沿采用路径规划算法生成的参考路径航行,并尽可能地减小横向跟踪偏差。FOSSSEN^[15]设计的自适应视距(Adaptive Line of Sight, ALOS)制导定律不仅能完成路径点跟随,而且能有效对抗环境扰动,提高系统的鲁棒性。但是,该方法在求解时变扰动导致的侧滑角快速变化问题方面效果不佳,仍需进一步改进。

对于被引航的船舶而言,其轨迹跟踪精度直接影响整个编队的稳定性。传统的比例-积分-微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制和纯追踪算法在应对复杂的冰区环境时存在一定的不足,而基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的轨迹跟踪控制方法能有效预测未来状态,并提前调整控制输入,以实现高精度的航向保持和队形跟随^[13]。此外,考虑到极地环境具有不确定性,采用自适应MPC方法,使被领航船舶能根据实时冰情和引航船状态调整跟踪策略,提高系统的鲁棒性。

尽管上述研究能为破冰编队航行提供重要支持,但现有的破冰编队航行算法在复杂环境下应用时仍面临很大挑战。如,时变环境干扰会导致侧滑角快速变化,从而使引航船偏离规划的路径,增加破冰难度并削弱引航效果。此外,在破冰编队航行过程中,引航船与跟随船之间的距离过大可能导致破冰航道闭合,引发冰困,而引航船与跟随船间距过小可能会降低船舶航行的安全性。这主要归因于部分算法未能充分考虑冰区环境的动态扰动及其对编队稳定性的影响。因此,如何提升破冰编队算法在复杂环境下的适应性是当前亟需解决的问题。

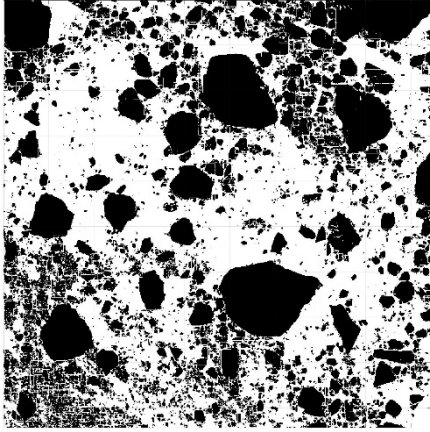
为此,本文基于非均匀Theta*算法,综合考虑航行成本和风险因素规划全局路径。对于引航破冰船,提出一种将改进自适应视距(Improved Adaptive Line of Sight, IALOS)制导算法与比例-微分(Proportional-Derivative, PD)航向控制器相结合控制方法,使引航船能精准应对时变扰动导致的侧滑角快速变化,并根据周围冰况动态调整船舶航速,

避免出现撞冰风险, 提高引航能力。对于跟随船, 设计MPC控制器跟踪领航船的轨迹, 自适应调整编队间距, 提高编队航行的效率和安全性。

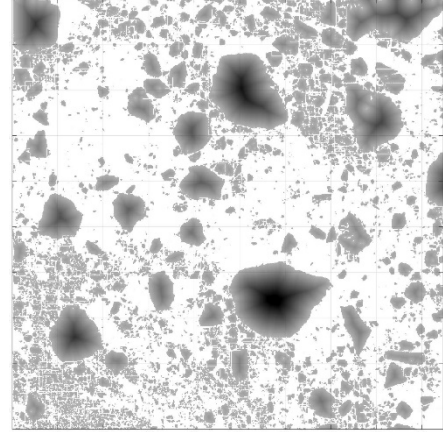
1 环境建模

1.1 冰区环境建模

采用网格图法对环境进行建模。首先, 选用尺寸为66.01 km×66.22 km的海冰遥感图像构建包含



(a) 海冰遥感图像对应栅格地图



(b) 风险地图

图1 冰区环境建模图

Fig. 1 Modeling of Ice Zone Environment

为确保船舶安全航行, 需根据海冰的分布情况正确划分网格图的风险等级。采用安全网格图表示非均匀单元格的危险成本, 假设海水的风险等级为0, 海冰单元的危险成本用 $r(c)$ 表示, 有

$$r(c) = \begin{cases} 0, & \text{海水} \\ w[\|(x_c, y_c) - (x, y)\| + 1]^z + 1, & \text{海冰} \end{cases} \quad (1)$$

式中: c 为单元格; $\|(x_c, y_c) - (x, y)\|$ 为当前单元格 (x_c, y_c) 与最近的海冰交界处 (x, y) 的最小欧几里得距离; w 为距离对风险成本的贡献程度; z 为距离变化对风险增长的影响程度。

如图1(b)所示, 单元格的危险成本用于表示非均匀网格的通行难度。随着危险成本的增加, 单元格的颜色逐渐变深, 意味着海冰的可通行性下降。

1.2 船舶数学模型

本文只考虑船舶在水平面的三自由度运动, 即横荡、纵荡和艏摇。破冰船编队航行的核心目标是保证平面内的路径跟踪精度和队形保持, 其动力学特性主要由这3种运动决定; 在中低速航行状态和相对平稳海况下, 其余三自由度等垂直面和姿态振动对水平运动的耦合影响无需显式引入模型中。

采用2种坐标系:

1) 以船舶自身为参考点的随船坐标系, 记为 $\{b\} = (x_b, y_b, \psi)$, 原点 O_b 位于船舶重心位置。

环境信息的全局地图。将该图像划分为943×946个网格单元, 每个网格的边长为70 m。冰区环境建模图见图1。其中: 图1(a)为海冰遥感图像对应栅格地图, 黑色网格代表海冰区域; 白色网格则代表海水区域。假设船舶穿越冰场时, 越靠近中心风险越高, 则可通过颜色的深浅表示风险等级, 颜色越深代表风险越高。

2) 以大地为参考点的惯性坐标系, 记为 $\{n\} = (X_G, Y_G)$, 原点 O_G 可固定在任意位置。图2为船舶运动坐标系。

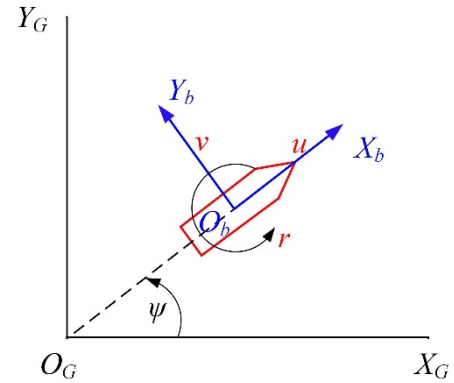


图2 船舶运动坐标系

Fig. 2 Coordinate Systems of Ship Motion

对于船舶三自由度运动模型, 其运动学方程可表示为

$$\dot{\eta} = R(\psi) \cdot v = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} v \quad (2)$$

式中: $R(\psi)$ 为船舶三自由度运动的坐标转换矩阵; 状态量 $\eta = [x, y, \psi]^T$ 和 $v = [u, v, r]^T$ 分别为大地坐标系

$\{n\}$ 中的位置矩阵和随船坐标系 $\{b\}$ 中的速度矩阵。

考虑环境扰动和控制力的作用，船舶在随船坐标系下的三自由度动力学方程可表示为

$$\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{\text{wind}} + \boldsymbol{\tau}_{\text{re}} = \mathbf{M}_{\text{RB}} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{M}_{\text{A}} \dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}_{\text{RB}}(\mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{C}_{\text{A}}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r \quad (3)$$

式中： \mathbf{M}_{RB} 为刚体的惯性矩阵； \mathbf{M}_{A} 为水动力附加质量矩阵； $\mathbf{C}_{\text{RB}}(\mathbf{v})$ 为刚体的科氏力和向心力矩阵； $\mathbf{C}_{\text{A}}(\mathbf{v}_r)$ 为附加质量引起的科氏力和向心力矩阵； $\mathbf{D}(\mathbf{v}_r)$ 为阻尼矩阵； $\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c$ 为相对速度矩阵； \mathbf{v}_c 为非旋转流体的流速矩阵； $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u, \tau_v, \tau_r]^T$ 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； $\boldsymbol{\tau}_{\text{wind}}$ 为作用在船上的风载荷； $\boldsymbol{\tau}_{\text{re}}$ 为与航行风相关的冰阻力估计值， $\boldsymbol{\tau}_{\text{re}} = [\varepsilon \cdot r(c), 0, 0]$ 。

$$\mathbf{C}_{\text{A}}(\mathbf{v}_r) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_v v_r + 0.5(N_v + Y_r)r \\ 0 & 0 & -X_u u_r \\ -Y_v v_r - 0.5(N_v + Y_r)r & X_u u_r & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}_r) = \begin{bmatrix} d_{11}(u) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}(v, r) & d_{23}(v, r) \\ 0 & d_{32}(v, r) & d_{33}(v, r) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(4)~式(7)中： m 为船舶质量； I_z 为转动惯量； $X_{(\cdot)}$ 、 $Y_{(\cdot)}$ 和 $N_{(\cdot)}$ 均为水动力系数； $d_{11}(u) = -X_u - X_{|u|u}|u_r| - X_{uuu}u_r^2$ ； $d_{22}(v, r) = -Y_v - Y_{|v|v}|v_r| - Y_{|r|v}|r|$ ； $d_{23}(v, r) = -Y_r - Y_{|v|r}|v_r| - Y_{|r|r}|r|$ ； $d_{32}(v, r) = -N_v - N_{|v|v}|v_r| - N_{|r|v}|r|$ ； $d_{33}(v, r) = -N_r - N_{|v|r}|v_r| - N_{|r|r}|r|$ 。

1.3 环境载荷建模

极地海域中的波浪和海流通常难以实时测量，本文主要考虑风载荷对引航编队航行的影响，仿真均在平缓冰面或小波浪条件下进行。同时，引入波浪载荷需构建更高维度的动力学模型并大幅增加在线计算量，而波浪对水平运动的激励相比持续作用的风载荷可视为高频小量。因此，本文仅考虑风载荷，忽略波浪的影响，该简化在目标场景下对控制精度的影响有限。采用经验公式估算风载荷，有

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{wind}} = \begin{bmatrix} X_{\text{wind}} \\ Y_{\text{wind}} \\ N_{\text{wind}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \rho_a V_{\text{rw}}^2 \begin{bmatrix} C_X(\gamma_{\text{rw}}) A_{\text{FW}} \\ C_Y(\gamma_{\text{rw}}) A_{\text{LW}} \\ C_N(\gamma_{\text{rw}}) A_{\text{LW}} L_{\text{oa}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： X_{wind} 、 Y_{wind} 和 N_{wind} 分别为风载荷作用于船体的纵荡力、横荡力和艏摇力矩； ρ_a 为空气的密度； C_X 、 C_Y 和 C_N 分别为船舶纵荡、横荡和艏摇方向的无因次风力系数； A_{FW} 和 A_{LW} 分别为船舶的纵向和横向受风面积； L_{oa} 为船舶总长； V_{rw} 为相对风速； γ_{rw} 为相对于船头的迎风角。

$$V_{\text{rw}} = \sqrt{u_{\text{rw}}^2 + v_{\text{rw}}^2} \quad (9)$$

$$\gamma_{\text{rw}} = -\arctan 2(v_{\text{rw}}, u_{\text{rw}}) \quad (10)$$

相对速度可表示为

$$u_{\text{rw}} = u - u_w \quad (11)$$

式(3)中的各矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_{\text{RB}} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_g \\ 0 & mx_g & I_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{\text{A}} = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{\text{RB}}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_g r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{\text{rw}} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_w \quad (12)$$

V_w 在 X_b 和 Y_b 方向的分量可表示为

$$u_w = V_w \cos(\beta_w - \psi) \quad (13)$$

$$v_w = V_w \sin(\beta_w - \psi) \quad (14)$$

式(9)~式(14)中： V_w 为大地坐标系下的风速； β_w 为风向。

然而，船舶航行过程中受到的风载荷往往是平均方向和平均速度已确定情况下的随机风向和随机风度。因此，本文通过Weibull分布和高斯分布分别模拟随机风速和随机风向^[16]。

Weibull分布常用于描述风速的统计特性，其概率密度函为

$$f_v(v, \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{\lambda} \right)^k \right), \quad v \geq 0 \quad (15)$$

式中： λ 和 k 分别为尺度参数和形状参数； v 为当前的平均风速。尺度参数 λ 决定风速的平均大小；形状参数 k 影响风速分布的形状。

本文设定形状参数 $k=3$ ，以保证生成的风速分布更符合自然风速的统计特征。 λ 的计算公式为

$$\lambda = \frac{2v \sqrt{L_{\text{cell}}}}{\sqrt{\pi}} \quad (16)$$

式中： L_{cell} 为缩尺参数。

由此即可得到符合Weibull分布的随机风速，表达式为

$$V_w = \lambda \cdot [-\ln(1-U)]^{1/k} \quad (17)$$

式中： U 为均匀分布在区间(0, 1)上的随机数。

β_w 的随机生成采用正态分布实现，其概率密度函数为

$$f_{\psi}(\psi_m, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\psi_m - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (18)$$

式中: μ 和 σ 分别为风向的均值和标准差。

本文将风向的均值 μ 设置为给定的平均风向 Ψ_m , 标准差 σ 设置为 30° , 以模拟风向在自然环境中的波动。风向采用MATLAB软件的内置函数normrnd(μ, σ)生成, 得到一个符合正态分布的随机风向值。

2 基于非均匀 Theta* 的路径规划

提出一种基于非均匀Theta*的路径规划算法, 计算流程如下。

1) 初始化。将起点和终点映射到网格中, 初始化各网格单元的通行代价(即风险成本)。对于每个网格, 计算其风险成本 $r(c)$ 。

2) 开集和闭集的管理。初始化开集(Open List)和闭集(Closed List)。开集包含尚未遍历的网格; 闭集包含已遍历的网格。每次从开集选取1个网格节点作为当前节点进行处理。

3) 邻接点计算。对于当前节点, 计算其邻接节

点的代价。检查2个节点之间的视距(Line of Sight, LOS)是否通畅(即是否存在障碍物或不通的冰区), 若两点之间存在LOS, 则根据非均匀冰况模型调整路径代价。邻接节点的代价计算公式为

$$g(n) = g(p) + \Delta d \cdot w(n) \quad (19)$$

式中: $g(n)$ 为从起点到节点 n 的实际代价; $g(p)$ 为当前节点 p 的代价; Δd 为当前节点与邻接节点之间的距离; $w(n)$ 为节点 n 的非均匀权重, 即由冰况决定的代价。

4) 路径生成。通过追溯父节点, 逐步构建从起点到终点的路径。若终点被加入闭集中, 或开集为空, 则路径规划结束。

5) 路径平滑。由于冰区环境具有不规则性, 即使通过路径规划生成的路径可到达目标, 仍然可能存在不必要的转折或复杂的路径。为提高路径的平滑度, 可对生成的路径进行平滑处理。

基于非均匀Theta*路径规划算法编写的伪代码, 见表1。

表 1 非均匀 Theta* 路径规划算法

Tab. 1 Non Uniform Theta* Path Planning Algorithm

```

Initialize openList, closedList, and map
Initialize startNode, endNode
Set riskCosts based on ice distribution and distances
while (openList is not empty) do
    currentNode = node with lowest cost in openList
    if (currentNode is endNode) then
        Reconstruct path from startNode to endNode
        return path
    end if
    for (each neighbor of currentNode) do
        if (neighbor is not in closedList and is traversable) then
            cost = currentCost + distance(currentNode, neighbor) * riskCost(neighbor)
            if (cost < neighbor.cost) then
                update neighbor.cost and parent
                add neighbor to openList
            end if
        end if
    end for
    move currentNode from openList to closedList
end while
return failure

```

3 编队航行控制方法

为体现引航船与跟随船在动力响应特性上的差异, 基于CyberShip II模型, 将跟随船的纵荡力与艏摇力的最大值、最小值及其单位时间最大变化率约束为引航船对应参数的80%。

3.1 引航破冰船运动控制

3.1.1 LOS 制导的基本原理

图3为LOS制导算法的原理图。本质上, 路径跟随控制的目标是使船首方向与 $O_b P_{LOS}$ 保持一致。采用非均匀Theta*算法生成的期望路径可视为由 n 个

路径点 $P_i(x_i, y_i)$ 、 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 、 \dots 、 $P_{i+n}(x_{i+n}, y_{i+n})$ 连接成的 $n-1$ 个航迹段。 $O_b(x_0, y_0)$ 为领航船当前位置， $P_{LOS}(x_{LOS}, y_{LOS})$ 为领航船的预瞄点，则领航船期望航向角的计算公式为

$$\psi_d = \psi_p - \psi_{LOS} \quad (20)$$

式中： ψ_p 为当前参考航段中 P_i 到 P_{i+1} 的指向； ψ_{LOS} 为LOS角。 ψ_{LOS} 的计算公式可表示为

$$\psi_{LOS} = \tan^{-1} \left(\frac{e_x}{\Delta} \right) \quad (21)$$

式中： Δ 为前视距离。

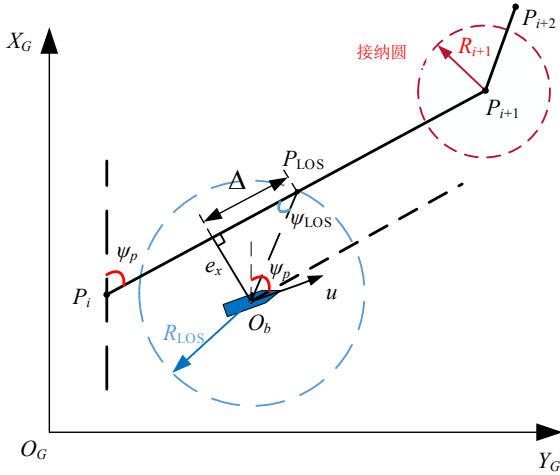


图3 LOS制导算法的原理图

Fig. 3 Schematic Diagram of LOS Guidance Algorithm

R_{i+1} 为LOS的接纳圆半径，领航船当前跟随的航段为 P_iP_{i+1} 。当领航船逐渐靠近期望路径点 P_{i+1} ，满足一定的条件时，期望航段将由 P_iP_{i+1} 切换到 $P_{i+1}P_{i+2}$ 。该条件为

$$\|O_b - P_{i+1}\| \leq R_{i+1} \quad (22)$$

路径跟随可根据位置偏差分为2个阶段：1) 收敛阶段，领航船的位置偏差逐渐减小；2) 引导阶段，领航船稳定地沿期望路径行驶，保持路径跟随精度。

在传统的LOS制导中，前视距离是恒定的。若前视距离太长，领航船需要很长时间才能收敛到期望路径，见图4(a)。为加快修正速度，应采用较短的前视距离。然而，若前视距离太短，当领航船到达路径时可能会出现振荡现象，难以收敛到期望路径，见图4(b)。因此，引入自适应前视距离方法引导船舶航行。采用以领航船当前位置 O_b 为圆心，以 R_{LOS} 为半径的圆与参考航段 P_iP_{i+1} 的交点确定点 P_{LOS} 位置，计算公式为

$$\begin{cases} (x_{LOS} - x_b)^2 + (y_{LOS} - y_b)^2 = R_{LOS}^2 \\ \frac{y_{LOS} - y_b}{x_{LOS} - x_b} = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \end{cases} \quad (23)$$

一般来说，求解得到的交点有1个或2个，当存

在2个交点时，选择距离期望路径点 P_{i+1} 更近的交点作为 P_{LOS} 。当位置偏差 e_x 较大时，这种方法可能使得没有实数解。为避免出现这一情况，将 R_{LOS} 定义为

$$R_{LOS} = \begin{cases} 3L_{oa}, & |e_x| \leq 3L_{oa} \\ e_x + L_{oa}, & |e_x| > 3L_{oa} \end{cases} \quad (24)$$

式中： L_{oa} 为船长。

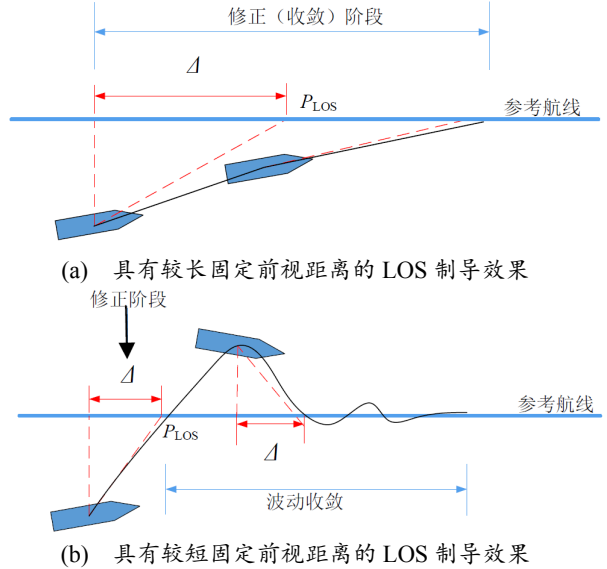


图4 LOS导航中不同前视距离下的性能差异

Fig. 4 Performance Variations with Different Look-Ahead Distances in LOS Guidance

3.1.2 IALOS 算法设计

领航船在复杂海洋环境中航行时，往往会产生侧滑角。侧滑角是指领航船的船向与其实际前进方向（速度方向）的夹角，该夹角在复杂时变环境的干扰下会不断变化。侧滑角的存在使得领航船的实际行驶方向与期望行驶方向有一定的偏差，从而影响路径跟随控制的精度。若不加以修正，这种偏差可能会随着时间的推移而逐渐积累，引发较大的位置偏差。为在复杂环境中稳定地引导领航船沿期望路径行驶，对FOSSSEN^[15]提出的ALOS方法进行改进，提出一种IALOS方法。该方法通过实时测量得到的风速和风向对快速变化的侧滑角进行补偿，使领航船能更准确地沿期望路径前进，其计算公式为

$$\psi_d = \psi_p - \psi_{LOS} - \left[a + b \cdot V_w \sin(\Delta \psi_{pw}) \right] \beta_s \quad (25)$$

式中： a 和 b 为常值参数，本文取 $a=2$ ， $b=2$ ； $\Delta \psi_{pw}$ 为参考航段方向 ψ_p 与风向 β_w 的夹角； β_s 为估计的侧滑角，该值在实海域测试中难以直接测量，可通过计算公式求解。

$$\dot{\beta}_s = \alpha \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (e_x)^2}} e_x \quad (26)$$

式中： α 为增益系数，取 $\alpha=0.0006$ 。

3.1.3 引航破冰船航向控制器

引航船的航向控制采用PD控制器实现, 其控制律为

$$\tau_r = K_p \cdot e_\psi + K_d \cdot \dot{\psi} \quad (27)$$

式中: τ_r 为艏摇控制力矩; K_p 和 K_d 分别为比例和微分增益; e_ψ 为当前航向与期望航向 ψ_d 的偏差角度; $\dot{\psi}=r$ 为引航船的航向角速度。本文设置比例增益和微分增益分别为 $K_p=-2.0$ 和 $K_d=-0.8$ 。

在实际控制过程中, 对控制力矩进行约束, 确保力矩的变化率在物理系统允许范围内, 从而提高系统的控制稳定性。该约束为

$$\begin{cases} \Delta \tau_{r,\min} \leq \tau_r(i+1) - \tau_r(i) \leq \Delta \tau_{r,\max} \\ \tau_{r,\min} \leq \tau_r(i) \leq \tau_{r,\max} \end{cases} \quad (28)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{cases} \mathbf{R}(\psi) \mathbf{v} \\ (\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A)^{-1} [\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{wind} - \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) \mathbf{v} - \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r - \mathbf{D}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r] \end{cases} \quad (30)$$

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

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{\min} \leq \Delta \mathbf{u}(k+i) \leq \Delta \mathbf{u}_{\max}, i=0,1,2,\dots,N_c-1 \\ \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(k+i) \leq \mathbf{u}_{\max}, i=0,1,2,\dots,N_c-1 \end{cases} \quad (31)$$

式中: N_c 为控制时域的维度; \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

$$\boldsymbol{\zeta}(k+1) = \begin{cases} \mathbf{f}[\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k-1) + \Delta \mathbf{u}(k)] \\ \mathbf{u}(k-1) + \Delta \mathbf{u}(k) \end{cases} = \begin{cases} \mathbf{f}[\mathbf{P}_1 \boldsymbol{\zeta}(k), \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\zeta}(k) + \Delta \mathbf{u}(k)] \\ \mathbf{P}_2 \boldsymbol{\zeta}(k) + \Delta \mathbf{u}(k) \end{cases} = \mathbf{f}_d[\boldsymbol{\zeta}(k), \Delta \mathbf{u}(k)] \quad (34)$$

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; n 为系统状态维度。

为了保证船舶对规划路径准确、平稳跟随, 设

$$\begin{cases} \min J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{x}(k+i) - \mathbf{x}_R(t_{ar})\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_p-1} \|\Delta \mathbf{u}(k+i)\|_R^2 \\ \boldsymbol{\zeta}(k+i+1) = \mathbf{f}_d[\boldsymbol{\zeta}(k+i), \Delta \mathbf{u}(k+i)], i=0,1,2,\dots,N_p-1 \\ \mathbf{x}(k+i) = \mathbf{P}_1 \boldsymbol{\zeta}(k+i), i=0,1,2,\dots,N_p \\ \Delta \mathbf{U}_{\min} \leq \Delta \mathbf{U}(k) \leq \Delta \mathbf{U}_{\max} \\ \mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{M} \Delta \mathbf{U}(k) + \mathbf{U}(k) \leq \mathbf{U}_{\max} \end{cases} \quad (35)$$

式中: \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为加权矩阵; \mathbf{x}_R 为采用非均匀Theta*算法得到的期望参考轨迹, 包含位置信息和方向信息, 用于引导船舶航行; $\mathbf{x}_R(t_{ar})$ 为参考路径上第 tar 个轨迹点; N_p 为预测时域的维度; \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; $\mathbf{M}=\mathbf{S}_{N_p} \otimes \mathbf{I}_m$,

式中: $\Delta \tau_{r,\min}$ 和 $\Delta \tau_{r,\max}$ 分别为控制力矩的最小变化量和最大变化量; $\tau_{r,\min}$ 和 $\tau_{r,\max}$ 分别为控制力矩的最小值和最大值。考虑到船舶在低速状态下的舵效较差, 需再给控制力矩增加一个与船速相关的约束, 即

$$\begin{cases} \tau_{r,\min} = \max\{\tau_{r,\min}, \alpha \cdot V^2 \tau_{r,\min}\} \\ \tau_{r,\max} = \min\{\tau_{r,\max}, \alpha \cdot V^2 \tau_{r,\max}\} \end{cases} \quad (29)$$

式中: α 为权重系数; V 为船速。

3.2 跟随船运动控制

对于跟随船, 采用MPC方法设计轨迹跟踪控制器, 跟踪引航破冰船的航行轨迹。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, 状态空间模型表示为

下界和上界基于船舶的变化动态调整, 表达式为

$$\begin{cases} u_{\min}(3) = \max\{\tau_{r,\min}, \alpha \cdot V^2 \tau_{r,\min}\} \\ u_{\max}(3) = \min\{\tau_{r,\max}, \alpha \cdot V^2 \tau_{r,\max}\} \end{cases} \quad (32)$$

为考虑系统约束, 定义一个新的系统状态变量, 表达式为

$$\boldsymbol{\zeta}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{u}(k-1) \end{bmatrix} \quad (33)$$

新的系统状态空间模型为

置基于系统状态偏差和控制能耗的目标函数, 见式(35):

其中, \mathbf{S} 为 N_p 阶下三角矩阵。

4 仿真实验

采用数值模拟方法验证提出的规划和控制算法在各种环境载荷下的有效性和适应性。研究对象为1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。为保证具有相同的缩尺比, 对环境地图进行等比例缩放。所有仿真计算都通过MATLAB 2022a软件, 在搭载Intel Core 9 3.6 GHz CPU和32 GB RAM的计算机上进行。

4.1 无环境干扰情况下的编队航行性能

图5为复杂冰况下的引航编队路径规划与控制结果, 其中: 橙色线条为采用非均匀Theta*算法为引航船规划的全局路径; 红线为引航船的航行轨迹, 同时也是跟随船的参考轨迹; 绿色线条和蓝色线条分别为跟随船1和跟随船2的轨迹。从局部放大图中可看出, 引航船的实际航迹与参考路径高度重合, 且跟随船的轨迹与引航船的轨迹能保持较好的匹配。

这表明, 引航船在复杂环境中的引导作用得到了有效体现。

局部放大图5(a)展示的是引航编队在复杂冰况下的航行姿态, 这时编队间距较小, 该现象源于冰况复杂区域的引航船速度受到了一定的限制, 导致跟随船的速度也相应下降。在复杂冰况中, 为避免破冰航道闭合, 编队必须保持较小的间距。图5中的局部放大图5(b)展示的是简单冰况下的编队航行姿态, 此时引航船与跟随船的速度较高, 且编队间距较大, 表明在冰况较为简单的区域, 船速较快, 编队控制更灵活。

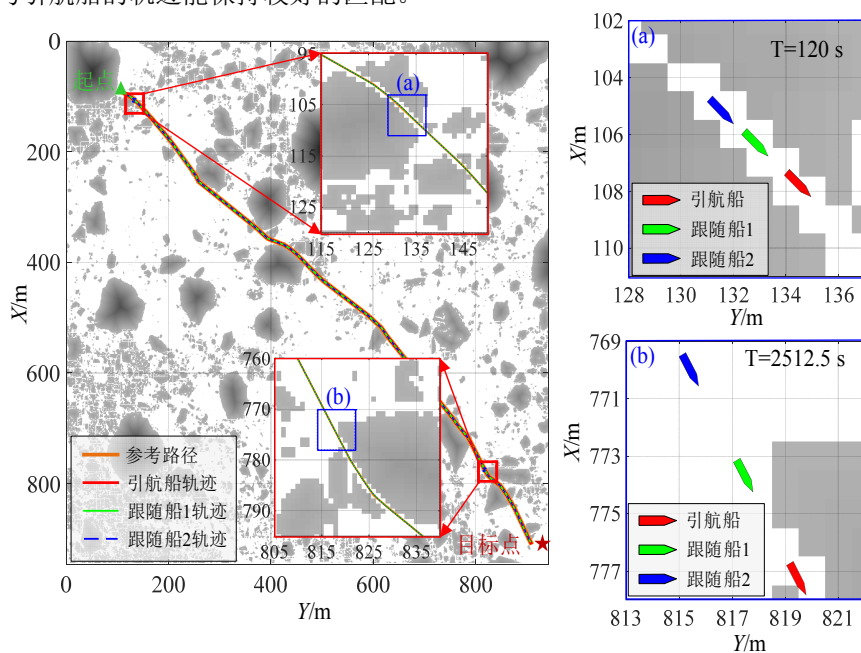


图5 无环境干扰情况下的引航编队航行

Fig. 5 Navigation in Convoy Formation Without Environmental Interference

图6为无环境干扰情况下编队中各船的位置偏差与船舶姿态, 展示了引航编队在航行过程中的位置偏差、航向角、速度和船间距的时历曲线。从图6(a)中可看出, 引航编队在航行过程中的位置偏差始终控制在0.25 m以内, 表现出了较高的航行精度。从图6(b)中可看出, 航向角在航行过程中能保持稳

定, 特别是在局部目标点更换时, 航向能迅速调整并保持稳定。从图6(c)和图6(d)可看出: 在复杂冰况下, 编队的航速下降, 船间距减小, 以确保安全通航, 避免航道闭合; 在简单冰况下, 速度保持在0.44 m/s, 船间距平均保持在4.01 m。

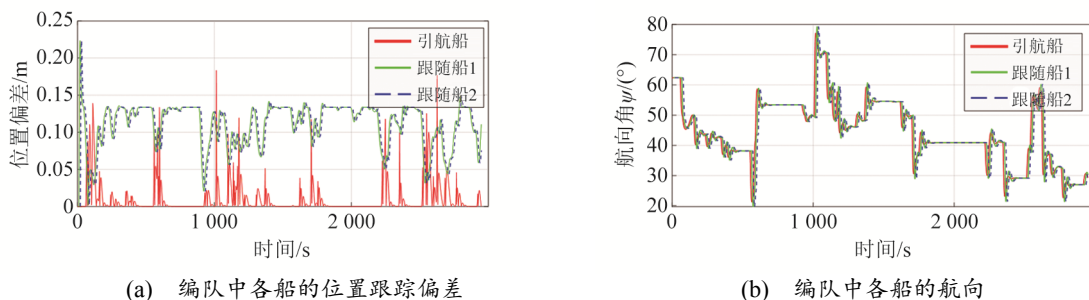


图6 无环境干扰下编队中各船的位置偏差与船舶姿态

Fig. 6 Position Deviation and Ship Attitude of Each Ship in Formation Without Environmental Interference

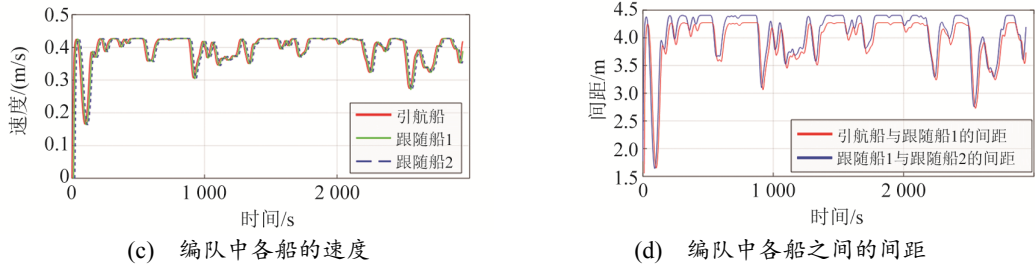


图6 无环境干扰下编队中各船的位置偏差与船舶姿态 (续)

Fig. 6 Position Deviation and Ship Attitude of Each Ship in Formation Without Environmental Interference (Continued)

4.2 有环境干扰情况下的编队航行性能

为分析所提控制算法在环境干扰下的跟踪性能，在仿真中引入平均风速为1.5 m/s、风向为090°的随

机风干扰模型。图7为随机风在风速和风向上的时历曲线。

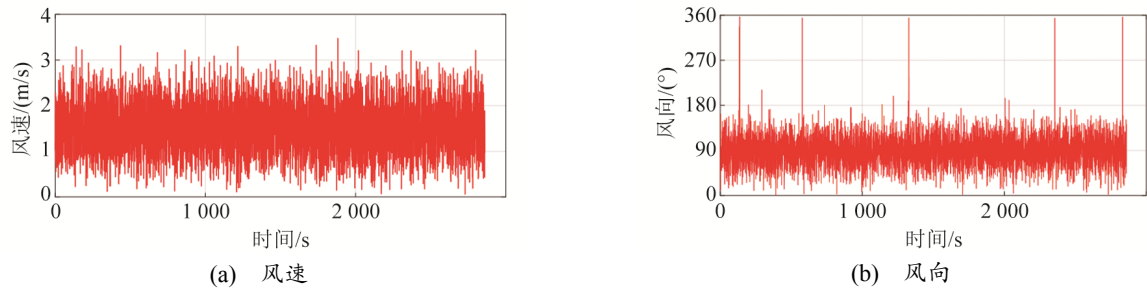


图7 有环境干扰工况下的风速和风向

Fig. 7 Environmental Disturbances in Wind Speed and Direction

图8为有环境干扰情况下的引航编队航行，展示了引航编队在复杂冰况和环境干扰下的路径规划及控制结果，其中：橙色线条为领航船规划的全局路径；红色线条为领航船的实际航迹；绿色线条和蓝色线条分别为跟随船1和跟随船2的航迹。在有环境干扰的情况下，由局部放大图可知，领航船的轨迹在转弯处出现小幅偏移，但跟随船轨迹与参考轨迹

依然保持良好的匹配，能保证编队航行的安全性。图8中的局部放大图8(a)展示了复杂冰况下的编队航行姿态，领航船和跟随船能通过调整姿态有效抵抗环境扰动，从而避免出现冰困和航道闭合情况。图8中的局部放大图8(b)展示了简单冰况下的编队姿态，编队在保持合理间距的同时，能确保航向的稳定。

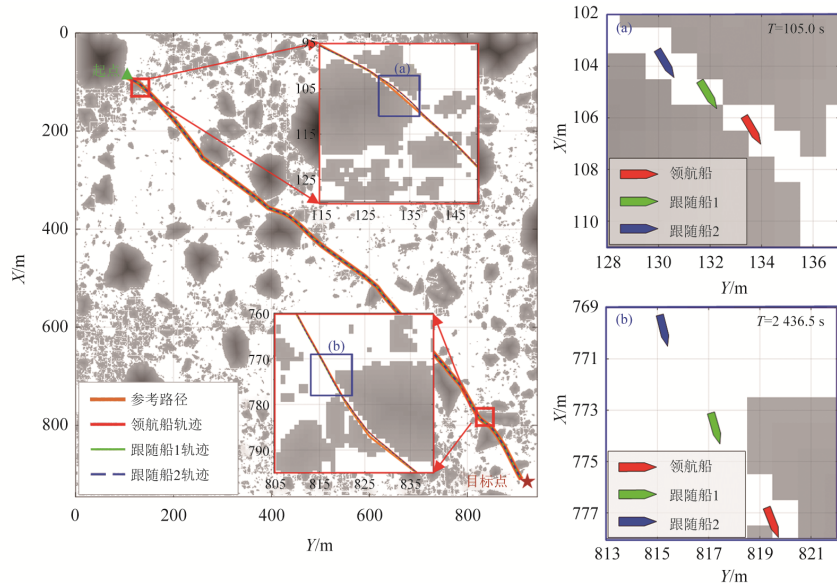
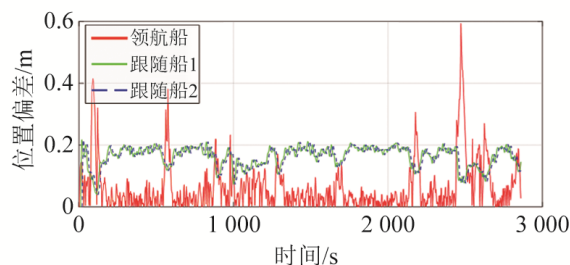


图8 有环境干扰情况下的引航编队航行

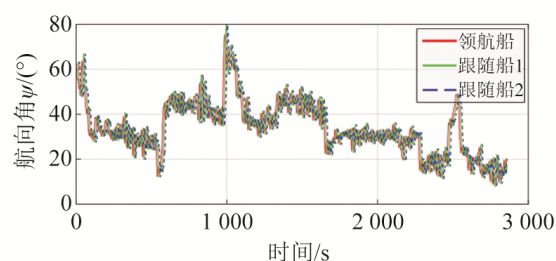
Fig. 8 Navigation in Convoy Formation with Environmental Interference

图9有环境干扰情况下编队中各船的位置偏差与船舶姿态,展示了有环境干扰情况下,编队在航行过程中的位置偏差、航向角、速度和船间距的时历曲线。由图9(a)可知,领航船的偏差基本保持在0.4 m以内,尽管在转弯处偏差略微增加,但不超过0.6 m。跟随船的误差基本上都小于0.2 m,表明即使有环境扰动,跟随船也能高效跟踪领航生成的破冰

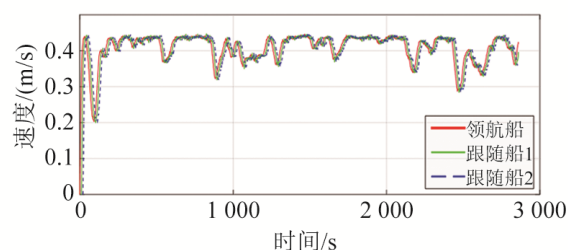
航道,确保安全航行。图9(b)展示了3艘船的航向角波动,特别是在转弯时,航向角出现一定范围的波动。该波动反映了算法在面对快速环境变化时采取的灵活应对策略。由图9(c)和图9(d)可知,在有环境干扰的情况下,船间距有所增加,平均增幅为0.13 m,表明编队仍能有效保持相对稳定的航行状态。



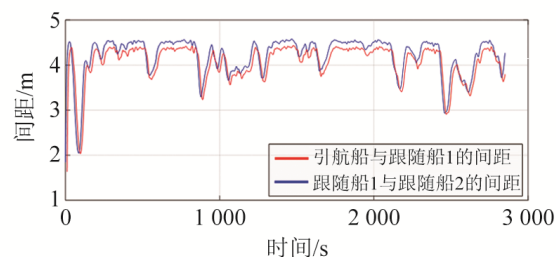
(a) 编队中各船的位置跟踪偏差



(b) 编队中各船的航向



(c) 编队中各船的速度



(d) 编队中各船之间的间距

图9 有环境干扰情况下编队中各船的位置偏差与船舶姿态

Fig. 9 Position Deviations and Ship Attitude in Formations Under Environmental Disturbances

5 结论

本文提出了一种破冰船领航条件下的编队航行控制方法,旨在提升复杂环境下编队航行的效率 and 安全性。通过对冰区环境进行精确建模,结合环境载荷和时变扰动等因素,设计了基于非均匀Theta*的路径规划算法、IALOS-PD路径跟随控制算法和MPC轨迹跟踪控制算法。

仿真结果表明,在无环境干扰的情况下,基于非均匀Theta*的路径规划算法能为领航船提供精确的航线规划,兼顾航行效率和安全性。所提控制算法能将编队的位置偏差控制在0.25 m以内,控制精度较高。对于领航船跟随参考路径而跟随船跟踪领航船轨迹的控制模式,确保编队间距能根据冰况动态调整,保证编队的安全间距和破冰航道的通航能力。在有环境干扰的情况下,算法仍具有良好的适应性和鲁棒性。领航船通过IALOS算法对侧滑角进行补偿,并动态调整航速和航向,使得编队能在随机风速和随机风向等干扰下稳定运行,编队的位置偏差最大不超过0.6 m,转向时船向角能快速调整并保持稳定。

综合来看,本文的研究为破冰船领航编队航行

控制提供了新的思路,尤其是在动态冰区和复杂环境下,能显著提升编队航行的安全性、效率和适应性。本文所述算法在不同干扰条件下均表现出了较高的稳定性和可操作性,为极地航运的可持续发展提供了技术保障。

未来可进一步提升路径规划算法的多目标优化能力,以应对更复杂的极地航行任务。同时,结合遥感数据和实地走航观测,深入获取海冰和波浪的空间分布特征及关键物理参数,实现对实际冰况的高精度模拟。这些数据将为冰阻力和波浪载荷建模与船舶控制策略优化提供重要依据,进而提升船舶在冰区航行的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] ZHANG G Q, ZHANG X K, ZHENG Y F. Adaptive Neural Path-Following Control for Underactuated Ships in Fields of Marine Practice[J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 558-567.
- [2] 李振华. 基于冰情分析的北极东北航道通航条件研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2017.
- LI Z H. Research on the Navigability of the Arctic

