

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412489

基于 LQR 的船舶自主靠泊策略研究*

殷 健, 陈国权

(集美大学航海学院 厦门 361021)

摘要: 自主靠泊是船舶自动航行研究领域的热点。为有效解决船舶靠泊过程中的路径规划与控制问题,提出了一种基于 Frenet 框架的改进线性二次型调节器(LQR)控制方法和一种自适应的靠泊策略决策模型,将船舶运动控制、路径规划和靠泊策略选择相结合,实现船舶的自适应自主靠泊。首先,建立风流干扰的船舶动力学模型,根据当前风流环境与泊位的空间关系自动选择靠泊方式;然后,规划靠泊路径并利用 LQR 控制器实现船舶的自主靠泊。为验证控制器的有效性,在仿真实验中充分考虑靠泊过程中的船舶大漂角特性与岸壁效应。仿真实验表明:本文提出的方法对环境干扰具有良好的鲁棒性,能够根据不同工况选择不同的靠泊策略并实现船舶的自主靠泊。

关键词: 自主靠泊策略; Frenet 框架; LQR; 岸壁效应; 大漂角

中图分类号: TP273 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.50

Autonomous berthing strategy based on LQR

Yin Jian, Chen Guoquan

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Autonomous berthing is a prominent topic in ship automatic navigation research. To effectively address the challenges of path planning and control during ship berthing, this paper proposes an improved LQR control method based on the Frenet framework along with an adaptive berthing strategy decision model. The approach integrates ship motion control, path planning, and berthing strategy selection to achieve adaptive autonomous berthing. First, a ship dynamics model accounting for wind flow interference is established, and the berthing mode is automatically selected based on the spatial relationship between the current wind flow environment and the berth. Next, the berthing path is planned, and the LQR controller is utilized to enable the ship's autonomous berthing. To verify the controller's effectiveness, the simulation experiment fully considers the ship's large drift angle characteristics and the shore effect during berthing. The simulation results demonstrate that the proposed method exhibits strong robustness against environmental disturbances, can select appropriate berthing strategies under varying conditions, and successfully achieves autonomous ship berthing.

Keywords: autonomous berthing strategy; frenet framework; LQR; bank effect; large drift angle

0 引 言

船舶自动靠泊一直都是船舶自主航行研究的热点之一。船舶在靠泊时,一般处于低速状态,泊位附近可供操纵水域十分有限,风、流、水深、岸壁等外界环境因素对船舶操纵性能的影响较大,船舶靠泊是一种高度非线性的复杂运动过程。

船舶的自主靠泊是一个复杂的动态过程,涉及制导、导航和控制等环节。Shouji 等^[1]首次将船舶自动靠泊表述为非线性两点边界值的最优控制过程,将靠泊总时间最短为其优化目标。后续的研究^[2-8]则大多侧重于路径或轨迹的跟踪控制。但单纯的靠泊路径最短、靠泊效率最高、靠泊轨迹最优并不能满足自动靠泊的实际需求。自动靠泊应能充分考虑靠泊过程中的风流、泊位、航道走向等客观因素,借鉴人工靠离泊时的经验,合理的利用风

收稿日期:2024-02-06 Received Date: 2024-02-06

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51879119, 52371369)、福建省自然科学基金项目(2022J01323)、福建省科技计划对外合作项目(2023J0019)、福建省科技厅智能船舶关键技术试验与检测公共平台项目(3502ZCQXT2021007)资助

流对船舶运动的影响先验性地选择靠泊方式,实现船舶从航道驶出直至安全平顺地靠在泊位上。

Shimizu 等^[9]提出一种融合监督的强化学习方法,通过训练预定义的路径实现了船舶在风扰动下的自主靠泊。Yuan 等^[10]提出一种基于事件触发的轨迹规划与跟踪控制方法,在考虑风扰动的仿真环境下实现船舶的自主靠泊。Wang 等^[5]提出一种分层搜索优化方法,通过人工引导混合 A* 算法实现船舶在狭窄水道的自主靠泊仿真实验。徐海祥等^[11]在靠泊研究中考虑了风流干扰和岸壁效应,在仿真环境中利用反步法与动态面控制相结合的方法实现了船舶的自动靠泊。以上研究均预先定义了固定的靠泊路径和策略,不能自主根据当前环境自适应的形成靠泊策略。Zhang 等^[12]利用模型预测控制器(model predictive control, MPC)解决了大型船舶在狭窄水域情况下的自动航行问题,成功实现了船舶在模拟的风流干扰下的自动靠泊问题。曾江峰^[13]系统性研究了无人水面艇(unmanned surface vessel, USV)在复杂海况下的路径跟踪控制,提出了基于视线跟踪法(line of sight, LOS)和 Frenet 坐标框架结合的路径规划思路,并利用反步法设计的控制器实现了船舶跟踪控制。

文献[5, 14-16]的研究仅考虑风流、航行障碍物的其中一种对船舶靠泊操纵的影响,而未能系统性地考虑靠泊全过程最优控制。文献[4, 17-19]分析了近年来船舶自主靠泊的研究现状和发展趋势,李国帅等^[20-21]在大型船舶的研究上取得了一定成果,当前智能船舶已经初步实现开阔水域的自主避碰、航路规划等一系列自动化操纵,但船舶自主航行的“最后一公里”即自主靠泊仍未得到有效解决。在实际的航行过程中船舶运动同时受限于环境干扰和船舶自身的物理机械约束,文献[4, 18-19, 22]忽略了靠泊中的低速大漂角船舶水动力变化、靠近泊位前沿时的岸壁效应等动力学特性的影响,这与实际的靠泊仍存在一定的差异。

综上所述,为了解决不同工况下船舶自主靠泊的最优控制问题,本文提出了一种基于 Frenet 框架的船舶自主靠泊控制模型,建立了外界环境干扰下的船舶动力学模型,同时在实验中考虑了船舶靠泊过程中的低速大漂角水动力变化特性和岸壁效应因素,使船舶运动模型更符合船舶实际操纵的动力学特性,验证在不同工况下船舶自主靠泊控制系统的鲁棒性。

1 方法描述

1.1 Frenet 框架

Frenet 坐标系是 Werling 等^[23]在 2010 年提出的一种运动轨迹规划坐标系,被广泛应用在汽车自动驾驶领域。

Frenet 坐标系如图 1 所示,通过将船舶的位置状态描述为 s 和 l 方向上的运动,将二维坐标降至两个一维分量以简化计算。在图 1 中,将规划路径的中心线定义为参考线 S , x 和 r 表示某一时刻下的状态点(笛卡尔坐标系下表示为 (x, y)),距离参考线的位置 (s, l) 可以使用纵向距离 s 和横向距离 l 分别表示,通过对时间求一阶、二阶导,可以得到运动速度和加速度。Han 等^[24]详细介绍了笛卡尔坐标系到 Frenet 坐标系的映射过程。

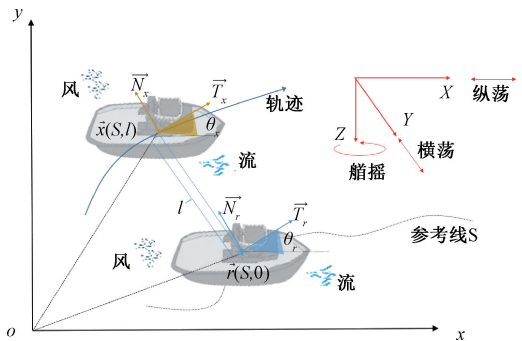


图 1 Frenet 坐标系

Fig. 1 Frenet coordinate system

1.2 船舶运动模型

船舶在靠泊过程中受到的力主要包括惯性水动力、黏性水动力、螺旋桨推力、舵力以及环境干扰力。由于靠泊过程受纵摇、横摇和升沉运动的影响较小,因此本文将船舶的 6 自由度运动简化为 3 自由度的平面运动。根据 Fossen 给出的船舶状态空间模型^[25],本文实验的船舶状态方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} M\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\omega} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{H}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{v} \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{M} 是惯性矩阵, \mathbf{C} 是科里奥利力和向心力矩阵, \mathbf{H} 表示转换矩阵, \mathbf{D} 是阻尼矩阵, $\boldsymbol{\tau}$ 定义为三自由度力和力矩, $\boldsymbol{\omega}$ 是风流干扰因素总和, $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T$ 表示纵向位移、横向位移和航向角, $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$ 表示船舶纵向速度、横向速度和转船速度。

1) 低速大漂角

由于船舶自身的物理特性,在低速域下的船舶水动力参数发生变化,常速域下的水动力参数不在适用,因此需要对低速下的船舶水动力系数进行修正。

本文采用 Yoshimura 提出的大漂角修正模型^[26],其经验公式如式(2)。 X_H^* 、 Y_H^* 和 N_H^* 是无量纲化的表达形式,其中 C_D 是横流阻力系数, C_{YV} 是侧向力修正系数, C_{rV} 是偏航力矩修正系数,符号函数 $sign(\cdot)$ 的表达式如式(3),其他参数计算公式和适用条件在文献[26]中有详细说明,此处不再过多陈述。

$$\begin{cases} X_H^* = 0 \\ Y_H^* = \text{sign}(r) \frac{C_D C_{rY}^2 \tau'}{32} \\ N_H^* = -\text{sign}(r) \frac{C_D C_{rN}^2}{32} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{sign}(\cdot) = \begin{cases} 1, & (\cdot) > 0 \\ 0, & (\cdot) = 0 \\ -1, & (\cdot) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

关于侧推力的计算,本文采用的是Hawkings提出的零航速下船舶的侧推力计算模型,如式(4)。其中, ψ_θ 表示船舶零速状态下侧推的回转角速度, L_θ 为螺旋桨桨叶长度, M_0 表示回转常数, d_θ 为螺旋桨等效半径。

$$Y_L = \frac{\psi_\theta^2 L_\theta^3 d_\theta}{M_0} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Y_L = K_\rho \rho n_L^2 D_p^4 \\ N_L = K_N \rho n_L^2 D_p^4 \end{cases} \quad (5)$$

当船舶在靠泊低速域内航行时,侧推的效率有所下降,考虑到螺旋桨槽道倒角和水流流速的影响,通过螺旋桨图谱插值,对不同螺距侧推的力及力矩进行计算,如式(5)所示,其中, ρ 表示水密度, K_r 为敞水桨推力系数, K_N 为敞水桨转矩系数, n_L 表示侧推螺旋桨的转速, D_p 为侧推的螺旋桨直径。

2) 岸壁效应

岸壁效应是船舶操纵研究和港航论证必须考虑的问题^[27]。在船舶靠泊过程中,靠近岸壁的一侧水流受到伯努利效应影响,产生吸附船舶靠岸的附加力,这种岸吸力可能会导致船舶触碰岸壁。

本文将复杂不规则的岸壁几何形状简化为直立岸壁,如图2所示,采用Norrbin提出的计算式(6)计算此情形下的力和力矩^[28]。

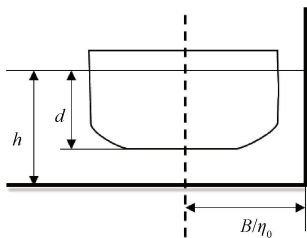


图2 船舶直立岸壁效应示意图

Fig.2 Schematic diagram of ship vertical wall effect

$$\begin{cases} X_w = 0 \\ Y_w = \rho C_b B d u^2 \eta_0 [0.0925 + 0.327(d/h)^2] \\ N_w = -\rho C_b L B d u^2 \eta_0 [0.0025 + 0.0755(d/h)^2] \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_b 为方形系数; d 为吃水; h 为水深; L 和 B 分别表

示船舶的总长和船舶宽度; η_0 定义为船宽与船岸距离比值。

3) 风流干扰

风流等环境干扰因素对于船舶运动控制的干扰一直存在且不可忽略。在靠泊阶段,风流会影响船舶的首摇和横荡运动,在靠泊控制器的设计中无法对风流干扰进行正确补偿是导致靠泊触碰事故的主要原因之一^[19]。

假定对船舶控制起决定性作用的风扰动为稳流风,即风对船舶的影响力矩根据Fujiwara等推导的式(7)计算,其中 ρ_w 和 V_w 表示空气密度和相对风速, μ_w 表示相对风舷角,其余参数的计算和解释在文献[29]中详尽说明。

速度和方向变化比较缓慢的流可以作为一种定常扰动处理,海流对于船舶的影响参照给出的计算式(8),其中 V_c 表示流速, μ_c 表示流向角,其余参数的计算和适用条件在文献[30]中给出了具体的描述和计算。

$$\tau_{\text{wind}} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix}_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho_w V_w^2 \begin{bmatrix} C_X(\mu_w) A_T \\ C_Y(\mu_w) A_L \\ LC_N(\mu_w) A_L \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tau_{\text{current}} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix}_{\text{current}} = \frac{1}{2} \rho V_c^2 \begin{bmatrix} C_{XC}(\mu_c) A_{TC} \\ C_{YC}(\mu_c) A_{LC} \\ C_{NC}(\mu_c) A_{LC} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.3 线性二次型调节器

船舶自主靠泊运动控制属于多输入多输出、强耦合的非线性控制,线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)能够很好解决多输入多输出系统(multiple input multiple output, MIMO)的控制问题^[31-33]。

系统状态向量 $\mathbf{x} = [x, y, \psi]^T$, 控制向量 $\mathbf{u} = [u, v, r]^T$, 系统的状态方程(9),其中 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 是系统可控矩阵。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (9)$$

$\eta^*(t)$ 是理想输出, $y(t)$ 是实际的控制输出,定义 $e(t) = y(t) - \eta^*(t)$ 为偏差量,控制器的指标泛函表示为 J 。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T (e^T \mathbf{Q} e + u^T \mathbf{R} u) dt \quad (10)$$

基于Frenet框架,Duan等^[31]利用LQR实现车辆的纵向运动控制,在仿真实验中的测试结果表明,控制器具有良好的稳定性和环境适应性。Yang等^[32]利用LQR实现车辆的横向误差控制,通过不同的场景仿真实验验证了控制器的有效性和稳定性。

文献[13,24,25,33]研究表明,Frenet框架可以将船舶的运动分解为沿着路径的纵向运动和垂直于路径的横向运动,降低了控制难度。同时在Frenet框架下可以方便构建线性化模型,使用LQR分别控制纵向和横向运动,从而大大地简化控制器设计。

基于 Frenet 框架的 LQR 的控制器设计可以有效规避全局坐标下动力学模型过于复杂、线性化困难等一系列难题,充分结合两者的优势可以有效解决船舶自主靠泊的问题。

1.4 靠泊策略

船舶最后的停靠策略主要受当前环境风流和泊位走向的影响,由于实际港口泊位大多为直线型,因此本文选取具有代表性的直线型为研究对象,如图 3 所示。设定靠泊策略标志 γ ,表示最后靠泊的船舶向, γ_w 和 γ_c 是风向、流向与泊位角度 φ_d 的几何关系,如图 4 所示。 θ_w 和 θ_c 表示风和流的方向角, ψ_d 表示风流合力的方向。最终得到靠泊策略 γ 与风向 θ_w 、流向 θ_c 和泊位角度 φ_d 的相关关系如式(12)。

$$\begin{aligned} \gamma_w &= (\cos(\theta_w - \varphi_d), \sin(\theta_w - \varphi_d)) \\ \gamma_c &= (\cos(\theta_c - \varphi_d), \sin(\theta_c - \varphi_d)) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\psi_d = \arccos(\gamma_w \cdot \gamma_c)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} \left(1 - \text{sign} \left(\psi_d + \varphi_d - \frac{\pi}{2} \right) + \text{bmod} \left(\varphi_d, \frac{\pi}{2} \right) \right) =$$

$$\begin{cases} < \frac{\pi}{2}, & \text{掉头靠} \\ > \frac{\pi}{2}, & \text{顺靠} \end{cases} \quad (12)$$

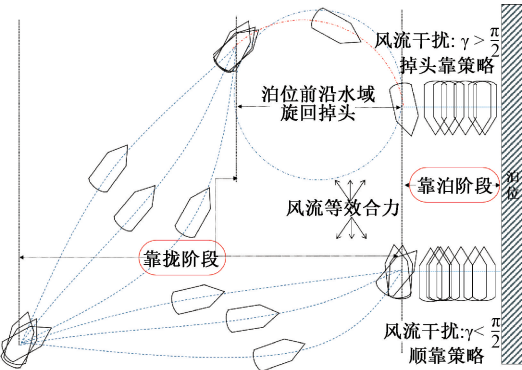


图 3 两种靠泊策略示意图

Fig. 3 Schematic diagram of two berthing strategies

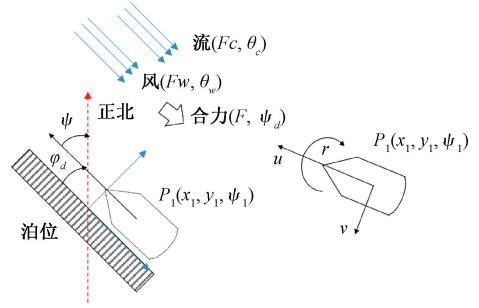


图 4 风流合力示意图

Fig. 4 Wind and current resultant force diagram

2 基于 Frenet 的船舶自主靠泊模型

本文的控制模型如图 5 所示。在靠泊过程中,船舶运动受到风流等外部环境的干扰力和力矩如式(13)所示。由于船舶降速使得船舶水动力模型不再适用,以及靠岸过程中的岸壁效应对船舶产生附加力和力矩,修正后的水动力系数如式(14)。

$$\omega = \tau_{\text{wind}} + \tau_{\text{current}} \quad (13)$$

$$[X, Y, N] = [X_w + X_H, Y_w + Y_H, N_w + N_H] \quad (14)$$

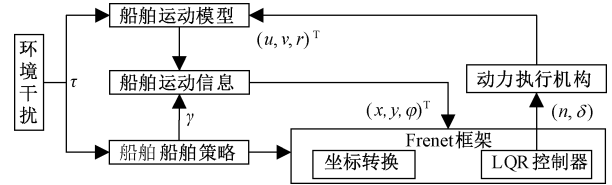


图 5 船舶靠泊控制模型

Fig. 5 Ship berthing control model

通过坐标系转换公式^[32],如式(15),将笛卡尔坐标系下的 $[x, y, \theta_x, v_x, a_x, \kappa_x]$ 转化为 Frenet 坐标系的 $[s, l, \dot{s}, \dot{l}, \ddot{s}, \ddot{l}, l'', l''']$,如图 1 所示。其中 \dot{s} 、 \ddot{s} 和 \dot{l} 、 \ddot{l} 分别表示为船舶在 s 和 l 方向上的速度和加速度。

$$\begin{cases} s = s(t); \dot{s} = \frac{v_x \cos(\theta_r - \theta_x)}{1 - k_r l} \\ \ddot{s} = \frac{a_x \cos \Delta(\theta_r - \theta_x) - s^2 \left(l' \left(k_x \frac{1 - k_r l}{\cos(\theta_r - \theta_x)} - k_r \right) - k' l - k_r l' \right)}{1 - k_r l} \\ l = \text{sign}((y_x - y_r) \cos \theta_r - (x_x - x_r) \sin \theta_r) \sqrt{(x_x - x_r)^2 + (y_x - y_r)^2} \\ \dot{l} = v_x \sin(\theta_r - \theta_x); \ddot{l} = a_x \sin(\theta_r - \theta_x) + v_x \Delta \omega \cos(\theta_r - \theta_x) \\ l' = (1 - k_r l) \tan(\theta_r - \theta_x) \\ l'' = (k_r l' + k' l) \tan(\theta_r - \theta_x) + \frac{1 - k l}{\cos^2(\theta_r - \theta_x)} \left(\frac{1 - k_r l}{\cos(\theta_r - \theta_x)} k_x - k_r \right) \end{cases} \quad (15)$$

系统的状态变量为 $\mathbf{x} = [s, e, e', \psi]^T$, 控制输入 $\mathbf{u} = [v, \delta, r]^T$, 其中 e 表示横向 l 上的误差, δ 表示舵角。代入式 (9) 得到 Frenet 坐标系下的状态空间 (16), 其中 $\mathbf{A} = -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{C} + \mathbf{D}), \mathbf{B} = \mathbf{M}^{-1}$ 。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{u} + \boldsymbol{\omega}) \\ \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} \end{aligned} \quad (16)$$

得到控制率 $\mathbf{u}^* = -\mathbf{K}\mathbf{x}$, 增益矩阵 \mathbf{K} 通过求解方程 (17) 得到, 其中 $\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}$ 。

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (17)$$

根据《宁波港域船舶引航技术》中关于船舶靠泊要求^[34], 本文设置了不同风流干扰下的靠泊试验, 通过仿真实验验证提出的控制器在不同工况下的有效性。

2.1 约束条件

文献[34]中详细阐述了人工靠泊的技术指标和操作要领, 给出了船舶靠泊时的速度、距离等安全规范要求, 这些将作为船舶自主靠泊的有效依据。

1) 目标状态约束

船舶完成靠泊时的约束条件表示为式 (18), 其中 $P_1 = (x_1, y_1, \psi_1)^T$ 表示设定的期望靠泊状态, $P_1 = (x_1, y_1, \psi_1)^T$ 是船舶在实际运动控制中的运动状态, d_{ref} 和 ψ_{ref} 是容许的最大误差。

$$P_1 - P_1 \leq [d_{ref}, d_{ref}, \psi_{ref}]^T \quad (18)$$

2) 靠泊区安全距离约束

港口区域属于繁忙狭窄水域, 在靠泊过程中触碰的危险系数极高, 本文仅考虑障碍物作为船舶在港区航行过程中的约束条件, 根据船舶安全领域的知识, 可将任意静态障碍物简化处理为所在的最小外接圆。假设在 t 时刻船舶附近的障碍物有 n 个, 它们的位置坐标分别为式 (19), 且障碍物对应的安全半径为 $\mathbf{r}_s = [r_{s_1}, r_{s_2}, \dots, r_{s_n}]^T$, 则避免船舶与障碍物发生碰撞的约束表示为式 (20)。

$$\mathbf{p}_s = [p_{s_1}, p_{s_2}, \dots, p_{s_n}]^T \quad (19)$$

$$p_{s_i} = (x_i, y_i), i \in [1, n]$$

$$r_{s_i}^2 - \left\| \begin{bmatrix} P_{1t}(\tau) \\ P_{1t} \end{bmatrix} - P_{s_i} \right\|_2^2 \leq 0 \quad (20)$$

3) 靠泊过程约束

船舶运动过程中的位置偏移量 $C_p(\tau)$, 如式 (21), 表示通过 LQR 控制后的实际航迹与期望的误差大小, $C_p(\tau)$ 越小说明实际航迹与期望更接近。

$$C_p(\tau) = \sum_{i=0}^T \|P_{1(\tau)} - P_1\|_2^2 \quad (21)$$

船舶的动力机构由螺旋桨和舵机系统组成, 受到其自身的物理特性的限制, 应当考虑 n 和 δ 构成的机械约束 $[C_{min}, C_{max}]$ 以及变化率 δ' 和变化率 n' 的约束 $[C'_{min}, C'_{max}]$ 。

$$C_{min} = [\delta_{min}, n_{min}]^T, C'_{min} = [\delta'_{min}, n'_{min}]^T \quad (22)$$

$$C_{max} = [\delta_{max}, n_{max}]^T, C'_{max} = [\delta'_{max}, n'_{max}]^T$$

对船舶的停靠速度给出了约束限制 (23), u_t 和 v_t 表示 t 时刻的纵向、横向速度。

$$|u_t| \leq u_{max}, |v_t| \leq v_{max} \quad (23)$$

船舶在靠泊的最后的理想状态是横向运动, 此时船舶或大幅度或频繁的艏摇是不被接受的, 船舶航向约束为式 (24), rot 是船舶转头率, 即航向变化率。

$$|rot| = \left| \frac{\Delta\psi^*}{\Delta t} \frac{180}{\pi} \right| \leq ROT_{max} \quad (24)$$

2.2 目标函数

$n_i(\tau)$ 和 $\delta_i(\tau)$ 是对应时刻的采样值, n_i 和 δ_i 是对应时刻的期望值, λ_1 和 λ_2 是对应控制量的权重系数, 根据式 (25) 计算得到 $F(n, \delta)$ 作为船舶航行过程中的能耗指标。

$$F(n, \delta) = \sum_{i=0}^T \left(\lambda_1 \frac{n_i^2(\tau) - n_i^2}{n_i^2} + \lambda_2 \frac{\delta_i^2(\tau) - \delta_i^2}{\delta_i^2} \right) \quad (25)$$

对于系统的控制目标函数可以写成式 (26), 其中 K_F, K_{C_p} 是对应的权重参数, 取值依据实际情况而定, 本文取 $[0.5, 0.5]$ 。综上即可得到靠泊系统的目标函数式 (26) 和约束函数式 (27)。

$$\min K_F * F + K_{C_p} * C_p \quad (26)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} P_1 - P_1 \leq [d_{ref}, d_{ref}, \psi_{ref}]^T \\ |u_i(\tau)| \leq u_{max}, |v_i(\tau)| \leq v_{max} \\ r_{s_i}^2 \leq \left\| \begin{bmatrix} P_{1t}(\tau) \\ P_{1t} \end{bmatrix} - P_{s_i} \right\|_2^2 \\ |rot| \leq ROT_{max} \\ C_{min} \leq C \leq C_{max} \\ C'_{min} \leq C' \leq C'_{max} \end{cases} \quad (27)$$

3 仿真实验与分析

实验地图环境选自厦门港区和平码头, 距离航道直线距离大约 165 m, 码头对开 -10 m 等深线宽度 266 m。本文实验使用文献[30]中的 Supply 船舶模型, 根据船舶参数 (如表 1 所示) 在泊位外划定船舶旋回水域直径约为 3.5 倍船长, 掉头区域回旋直径满足大于 2 倍船长的规范要求, 如图 6 所示。实验在 i5-9500 CPU @ 3.00 GHz 的环境下进行, 实验用到的仿真参数如下表 1 所示, 风流环境如下表 2 所示。

3.1 靠泊仿真结果

在不同工况下 (如表 2 所示), 进行多次船舶自主靠泊任务的全过程仿真实验, 结果如图 7~10 所示。实验考虑了船舶降速后的大漂角效应以及在靠泊过程中的

表1 仿真实验船模参数

Table 1 Parameters of the simulation experiment ship model

参数	实验值
船长 L/m	76
船宽 B/m	19.2
吃水 m	6
质量 m/kg	6.0×10^6
方形系数	0.650 1
舵角 δ 最大变化值/ $^\circ$	35
螺旋桨转速 n 最大变化值/ rps	100
$[d_{ref}, \psi_{ref}]$	$[0.5 \text{ m}, 5^\circ]$
$[u_{max}, v_{max}]$	$[0.15 \text{ m/s}, 0.15 \text{ m/s}]$
ROT_{max}	$5^\circ/s^2$
仿真时间	6~7 min

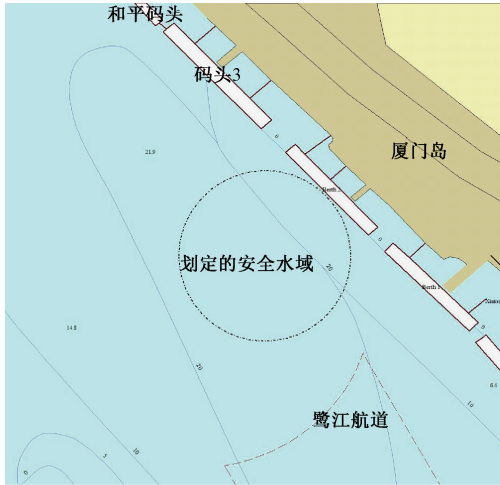


图6 泊位外安全旋回水域

Fig. 6 Safety turning waters outside berth

表2 实验参数设置

Table 2 Experimental parameter settings

实验组	风流环境	
	风(单位:m/s, $^\circ$)	流(单位:m/s, $^\circ$)
#1	(0, 225)	(0.1, 225)
#2	(2.5, 225)	(0.5, 225)
#3	(6.2, 225)	(1.0, 225)
#4	(9.3, 225)	(1.0, 225)
#5	(9.3, 45)	(1.0, 45)
#6	(6.2, 45)	(1.0, 45)
#7	(2.5, 45)	(0.5, 45)
#8	(0, 45)	(0.1, 45)

岸壁效应。当泊位水域风流影响因素 $\gamma > \pi/2$ 时,如图7所示,直接靠泊的策略是可行的。

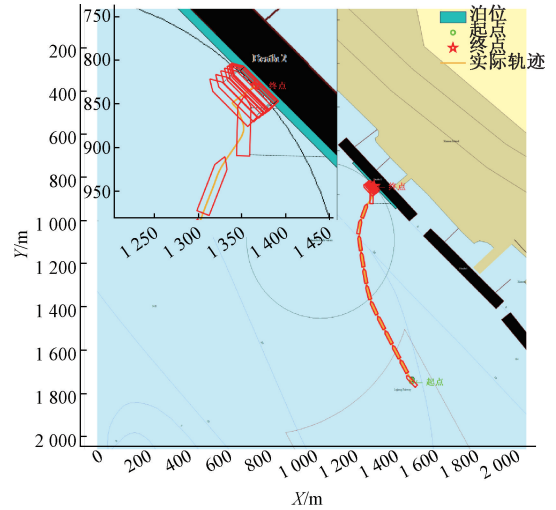


图7 顺靠示意图(#1:(0, 225 $^\circ$),(0.1, 225 $^\circ$))

Fig. 7 Direct berthing diagram

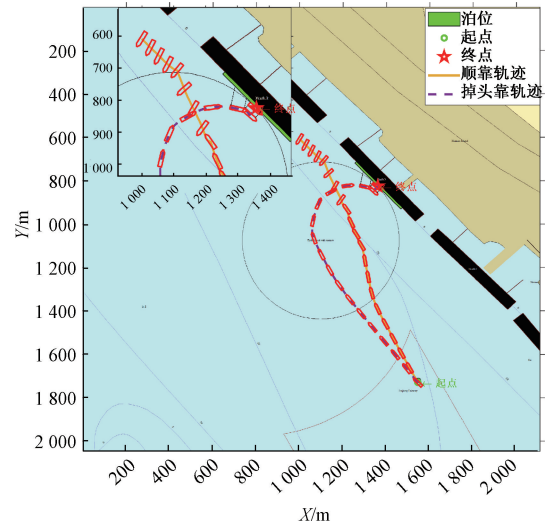


图8 掉头靠示意图(#6:(6.2, 45 $^\circ$),(1.0, 45 $^\circ$))

Fig. 8 U-turn berthing diagram

当泊位附近水域风流环境影响 $\gamma < \pi/2$ 时,如图8所示,图中实线表示船舶在当前环境下选择顺靠策略的路径,此时选择顶风顶流的停靠策略能够防止船舶受到环境干扰力矩过大而无法停靠,船舶不再适合选择顺靠策略。与直接靠泊的策略方式相比,虽然船舶泊位前掉头操作增加了一定的时间,但在靠泊条件相对较差的环境下实现稳定安全的靠泊作业。

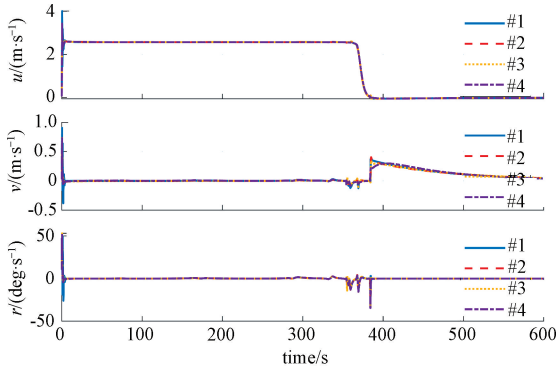
3.2 结果分析

分析图9(a)~(c)图对应的局部放大图可以发现,风流干扰对于靠泊控制的干扰主要表现在转艏速度 r 和横向靠泊速度 v 上。

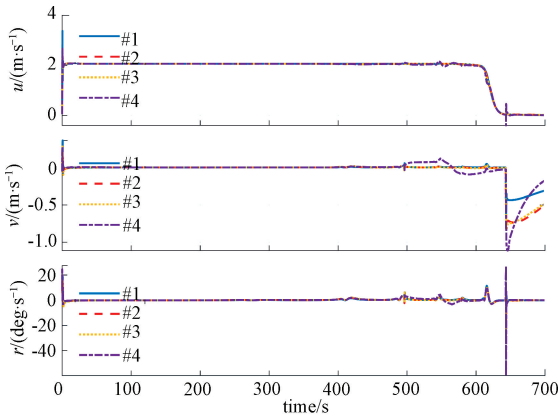
当选择不同的靠泊策略时,在实验设计的第4种工

况(#4、#5 极端条件)下,船舶的靠泊运动控制均出现明显的大幅度操纵变换,其余的3种情况下,船舶能够较好的完成自主靠泊。

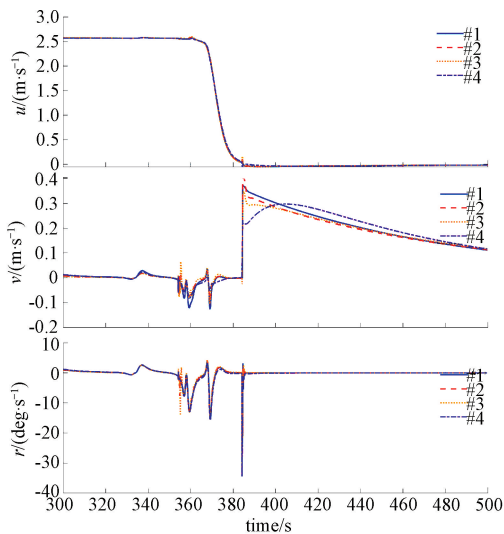
结果表明:水文气象条件是决定船舶安全靠泊的前提条件,在恶劣的环境下,船舶自主靠泊效果并不理想。当环境的风流影响逐渐增大时,如图9(a)和(c)左,选择顺靠方式的船舶,在300~400 s阶段出现明显的艏摇震荡,这对船舶的靠泊作业而言是极具风险的。相较之下,在码头前沿水域掉头而后进行靠泊的方式能够较好地减



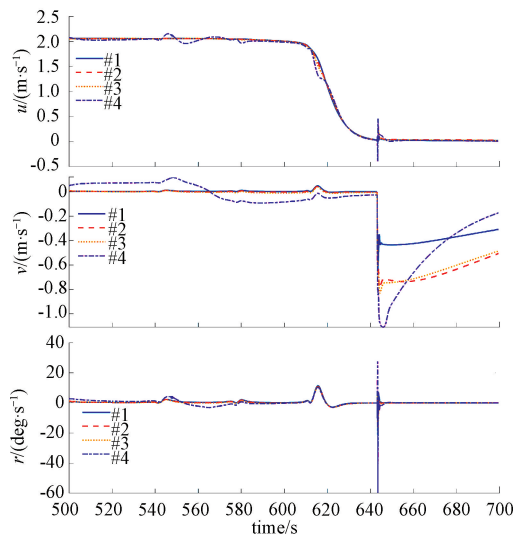
(a) 顺靠运动曲线
(a) Direct berthing movement curve



(b) 掉头靠运动曲线
(b) U-turn berthing movement curve



(a) 顺靠运动误差曲线
(a) Direct berthing error curve

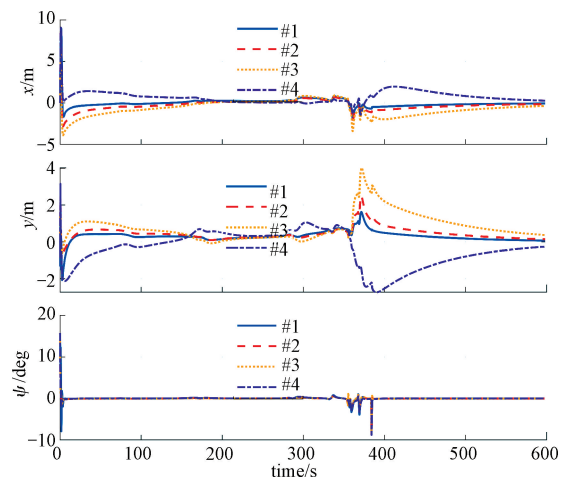


(c) 局部放大图
(c) Local amplification of motion curve

图9 不同工况下两种靠泊策略的运动过程参数对比
Fig. 9 Comparison of motion parameters for two berthing strategies under various operating conditions

小风流环境对船舶靠泊操纵的影响,如图9(b)和图9(c)右中500~600 s阶段。

图10是两种靠泊策略在4种工况下的靠泊运动误差曲线,可以发现在工况较好的情况下(#1、#2、#7、#8),2种靠泊策略在控制上都保持在较小的误差范围内,当工况变得极端时(#4、#5),2种靠泊策略在姿态控制上都表现出较大的误差,采用顺靠策略在整个靠泊过程都表现出的误差震荡,而掉头顶风顶流靠泊则仅在靠泊的最后阶段存在一定状态误差。



(a) 顺靠运动误差曲线
(a) Direct berthing error curve

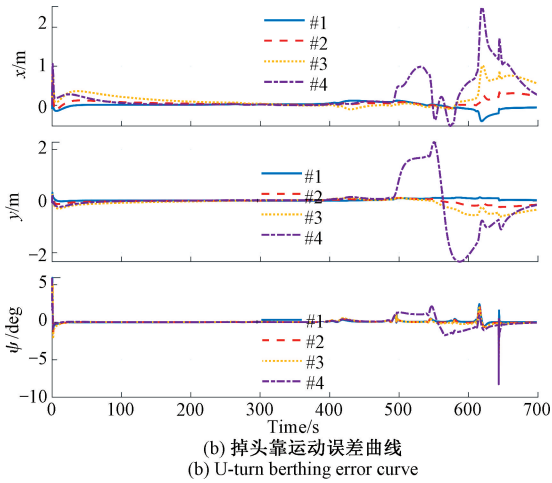


图 10 不同工况下两种靠泊策略的位置误差变化
Fig. 10 Position error changes of two berthing strategies under different working conditions

实验结果验证船舶靠泊控制系统的有效性和鲁棒性。同时也可以发现,在港口环境相对良好的情况下,两种靠泊策略在控制上都能够较好地完成靠泊任务,在环境影响较小的作业环境下,顺风顺流(顺靠)策略可以优先选择。

船舶在靠泊时受到的风流干扰影响可以通过调整靠泊方式进行有效化解,不同的靠泊策略能够充分利用外界环境的相互作用,实现靠泊全过程安全。

3.3 实船测试

借助集美大学航海学院的智能船舶协同控制与研究测试平台,使用实体船舶(集航一号)进行算法功能行测试验证。集航一号船舶参数如下表 3 所示,实物图如图 11 所示。

表 3 集航一号实船参数配置表

Table 3 Parameter configuration of real ship

参数	值
船长 L/m	5
船宽 B/m	2.2
巡航速度 $/(m \cdot s^{-1})$	3.6
质量 m/kg	2 000



图 11 实物图
Fig. 11 Physical appearance

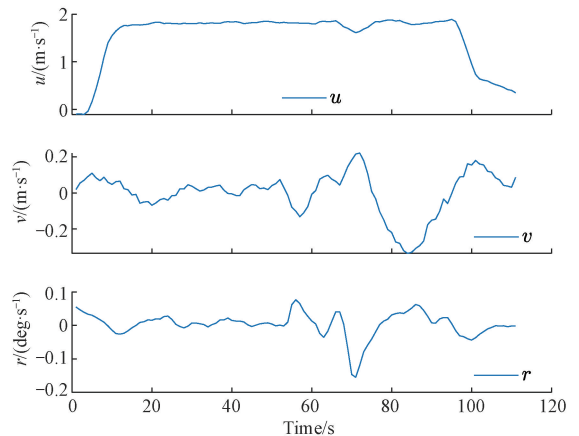
测试结果如图 12 所示。从实验结果可以发现,本文提出的算法在实体船上能够通过功能性测试,但对于环境的干扰如风力和潮流的复杂变化尚未完全适应。虽然在模拟环境下算法表现出了一定的鲁棒性,但在实际户外测试过程中发现:海况的多变性和不可预测性需要进一步研究和优化,以确保搭载算法的船舶能够在各种环境条件下稳定可靠。



(a) 实船测试场地示意图
(a) Schematic diagram of the actual ship test site



(b) 实船测试轨迹
(b) Trajectory diagram of the actual ship test



(c) 实船测试速度
(c) Actual ship test speed chart

图 12 实船验证数据结果图
Fig. 12 The result of the verification data of the actual ship

4 结 论

本文在参考 Frenet 坐标系的基础上,提出了一种自主靠泊控制框架,该框架包括船舶运动控制、路径规划和靠泊策略选择。在仿真实验环境中,充分考虑船舶所处的外部环境干扰,增强了所设计控制器的可信度。选取多组工况仿真实现船舶从航道到泊位的自主靠泊,仿真结果表明,自主靠泊效果良好,在不同的工况环境下,船舶能够自主确定最佳的安全靠泊策略,验证了所提出方法的有效性和适用性。

参考文献

- [1] SHOUJI K, OHTSU K, MIZOGUCHI S. An automatic berthing study by optimal control techniques[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1992,25(3): 185-194.
- [2] LIAO Y L, ZHANG M J, WAN L. Serret-frenet frame based on path following control for underactuated unmanned surface vehicles with dynamic uncertainties[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(1): 214-223.
- [3] QIN J M, GUO CH. Path following control of unmanned surface vessel with unknown ocean currents disturbances[C]. Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Automation Conference. Springer Singapore, 2022: 56-64.
- [4] MARTINSEN A B, LEKKAS A M, GROS S. Autonomous docking using direct optimal control[J]. IFAC-Papers on Line, 2019,52(21): 97-102.
- [5] WANG X W, DENG ZH L, PENG H J, et al. Autonomous docking trajectory optimization for unmanned surface vehicle: A hierarchical method [J]. Ocean Engineering, 2023,279(1): 114156.
- [6] LI W, WANG F, BAI J, et al. Model predictive control with disturbance observer for unmanned surface vessels path tracking [C] 2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 2023: 681-685.
- [7] 余荣臻,袁剑平,李俊益. 基于蝗虫优化算法的大型运输船舶自适应控制[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(3): 66-74.
YU R ZH, YUAN J P, LI J Y. Adaptive control of large transport ship based on grasshopper optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(3): 66-74.
- [8] 孙岩霆,王荣杰,蒋德松. 融合 A* 与 DWA 算法的水面船艇动态路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 301-310.
SUN Y T, WANG R J, JIANG D S. Dynamic path planning of surface ships based on A* and DWA algorithms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(1): 301-310.
- [9] SHIMIZU S, NISHIHARA K, MIYAUCHI Y, et al. Automatic berthing using supervised learning and reinforcement learning [J]. Ocean Engineering, 2022, 265(1): 735-745.
- [10] YUAN SH ZH, LIU ZH L, SUN Y X, et al. An event-triggered trajectory planning and tracking scheme for automatic berthing of unmanned surface vessel [J]. Ocean Engineering, 2023,273(1): 113964.
- [11] 徐海祥,朱梦飞,余文墨,等. 面向智能船舶的自动靠泊鲁棒自适应控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020,48(3): 25-29, 40.
XU H X, ZHU M F, YU W ZH, et al. Robust adaptive control for automatic berthing of intelligent ships [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,48(3): 25-29, 40.
- [12] ZHANG M, YU S R, CHUNG K S, et al. Time-optimal path planning and tracking based on nonlinear model predictive control and its application on automatic berthing[J]. Ocean Engineering, 2023,286: 115228.
- [13] 曾江峰. 复杂海况下 USV 路径跟踪控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2019.
ZENG J F. Research on USV path tracking control method under complex sea conditions [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [14] JAMUDA K, LAMA R, KARMAKAR S. A secured scheme for optimal navigation of a berthing ship[C] 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET). IEEE, 2022: 1-6.
- [15] WU G X, LI D B, DING H, et al. An overview of developments and challenges for unmanned surface vehicle autonomous berthing[J]. Complex & Intelligent Systems, 2024, 10(1): 981-1003.
- [16] CHEN Q D, HUANG S W, HO M H, et al. Vector field-based guidance method for collision avoidance of unmanned surface vehicles[C]. 2023 IEEE Underwater Technology (UT), 2023: 1-7.
- [17] LI S, LIU J, NEGENBORN R R, et al. Automatic docking for underactuated ships based on multi-objective nonlinear model predictive control [J]. IEEE Access, 2020, 8: 70044-70057.
- [18] LEITE P N B. A self-guided docking architecture for autonomous surface vehicles[D]. Universidade do Porto (Portugal), 2019.
- [19] SHUAI Y, LI G, CHENG X, et al. An efficient neural-

- network based approach to automatic ship docking[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 191(1): 106514.
- [20] 李国帅, 张显库, 张安超. 智能船舶靠泊技术研究热点与趋势[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 3-14.
LI G SH, ZHANG X K, ZHANG AN CH. Research hotspots and tendency of intelligent ship berthing technology[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1): 3-14.
- [21] LIU ZH CH, WANG Q, SUN J T, et al. Intelligent tracking control algorithm for under-actuated ships through automatic berthing[C]. 2021 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech), 2021: 232-237.
- [22] ZHANG C, CHENG P, DU B, et al. AUV path tracking with real-time obstacle avoidance via reinforcement learning under adaptive constraints [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 256(15): 111453.
- [23] WERLING M, ZIEGLER J, KAMMEL S O R, et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét frame[J]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 987-993.
- [24] HAN X, ZHANG X. Tracking control of ship at sea based on MPC with virtual ship bunch under Frenet frame[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 247(1): 110737.
- [25] PEREZ T, FOSSEN T I. Kinematic models for manoeuvring and seakeeping of marine vessels [J]. *Modeling, Identification and Control (MIC)*, 2007, 28(1): 19-30.
- [26] YOSHIMURA Y, TAKASE K Y, FUKUI H, et al. Simulation of ship drift motion with a simplified mathematical model under the wind[J]. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 2020, 31: 47-57.
- [27] 孙洪波, 李丽娜. 基于MATLAB的船舶岸壁效应预报仿真[C]. 第二届海洋工程与航海技术国际学术会议, 2009: 54-58.
SUN H B, LI L N. Simulation of ship's shore effect prediction based on MATLAB [C]. The Second International Conference on Ocean Engineering and Navigation Technology, 2009: 54-58.
- [28] VANTORRE M, DELEFORTRIE G, ELOOT K, et al. Experimental investigation of ship-bank interaction forces[J]. 2003.
- [29] FUJIWARA T, UENO M, NIMURA T. Estimation of wind forces and moments acting on ships[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1998, 1998(183): 77-90.
- [30] FOSSEN T I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [31] DUAN X, WANG Q, TIAN D, et al. Implementing trajectory tracking control algorithm for autonomous vehicles [C]. 2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), 2021: 947-953.
- [32] YANG T Q, HU J Q, ZHANG Y M. Trajectory tracking for autonomous vehicles based on Frenet frame[C]. 2022 37th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2022: 1460-1465.
- [33] TENG Q, WANG X, HAN B, et al. Research on the trajectory planning method of inland waterway vessels based on Frenet coordinate system [C]. 2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2023: 644-650.
- [34] 潘国华, 胡甚平. 宁波港域船舶引航技术[M]. 上海浦江教育出版社, 2023.
PAN G H, HU SH P. *Ningbo port ship pilotage technology* [M]. Shanghai Pujiang Education Press, 2023: 115-118.

作者简介



殷键, 2021年于四川农业大学获得学士学位, 2024年于集美大学获得硕士学位, 研究方向为船舶运动控制和仿真建模。

E-mail: yinjian1182@jmu.edu.cn

Yin Jian received his B.Sc. degree from Sichuan Agricultural University in 2021, and received his M.Sc. degree from Jimei University in 2024. His main research interests include ship motion control and simulation modeling.



陈国权(通信作者), 2016年博士毕业于大连海事大学航海学院, 自2019年起任集美大学航海学院副教授。主要研究方向为船舶避碰自动化、自主水面船舶、船舶运动控制和船舶操纵仿真。

E-mail: cgg0802@foxmail.com

Chen Guoquan (Corresponding author) received his Ph.D. degree in Navigation College from Dalian Maritime University, China, in 2016. He is currently an associated professor with the Department of Navigation College, Jimei University since 2019. His research interests include ship collision avoidance automation, autonomous surface vessel, ship motion control and ship handling simulation.