

基于 Fossen 模型的四自由度船舶自主靠泊 路径规划与运动控制

隋江华, 郭晓敏, 宋纯羽*

(大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁大连 116023)

摘要: [目的]为提高船舶在实际靠泊过程中的路径规划和运动控制精度, [方法]采用非线性模型预测控制 (NMPC) 与滚动时域估计 (MHE) 相结合的船舶靠泊路径规划方法, 提出一种能预测船舶未来运动轨迹并在线更新船舶运动控制策略的非线性模型预测控制系统。建立船舶在横荡、纵荡、艏摇和横摇 4 个自由度上的 Fossen 动态模型, 以适应船舶在水面上的运动状态和环境变化, 从而提高船舶的靠泊控制精度。以巴布亚新几内亚及其邻近海域和马尼拉国际港的船舶自主靠泊路径规划为例开展仿真试验, 验证该系统的有效性。[结果]结果显示: 采用该系统所得航迹误差均小于 8.0 m, 靠泊位置误差均为 0.6 m。研究结果表明: 所提系统的有效性、泛化性和适用性满足需求; 建立的数学模型能为系统提供更全面的船舶运动信息, 实现更精准的船舶运动控制, 增强系统的鲁棒性。[结论]研究成果可供不同港口环境下的智能船舶自主靠泊路径规划和运动控制参考。

关键词: 自主靠泊; 非线性模型; 模型预测控制; 路径规划; 四自由度

中图分类号: U664.82 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.03.01

Fossen Model-Based Motion Control for Autonomous Berthing Path Planning of a Four-Degree-of-Freedom Ship

SUI Jianghua, GUO Xiaomin, SONG Chunyu*

(Navigation and Ship Engineering College, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: [Purpose] In order to improve the ship in the actual berthing path control accuracy and other issues, [Method] a ship berthing path planning method is proposed based on nonlinear model predictive control (NMPC) combined with moving horizon estimation (MHE), enabling future trajectory prediction and real-time control updates. A Fossen model of the ship is established in the four-degree-of-freedom (4-DOF): heave, pitch, yaw and roll. It adapts to the movement state and environmental changes of the ship on the water surface and improves the accuracy of berthing control. By simulating the simulation experiment of autonomous berthing path planning of papua new guinea and manila international port ships. [Result] The results show that the trajectory error is less than 8.0 m and the berthing position error is only 0.6 m. The effectiveness, generalization and applicability of the proposed algorithm are verified. In order to more accurately simulate the ship's motion response in waves, a 4-DOF ship mathematical model is developed to provide more comprehensive ship motion information for the control system. It further realizes more accurate control and enhances the robustness of the system. [Conclusion] The method provides theoretical and practical support for autonomous berthing in diverse port environments.

收稿日期: 2025-04-05; 修回日期: 2025-08-11

基金项目: 辽宁省教育厅 2023 年高等学校基本科研业务费项目 (JYTQN2023131); 辽宁省科技厅人工智能领域应用基础研究项目 (600024003); 辽宁省教育厅科学研究资助项目 (LJKZ0726)。

作者简介: 隋江华 (1976—), 女, 博士、教授。研究方向: 船舶运动控制。

通信作者: 宋纯羽 (1996—), 男, 博士、讲师。研究方向: 船舶控制与船舶辨识建模。E-mail: scy_dlou@163.com

Key words: autonomous berthing; nonlinear model; model predictive control; path planning; 4-DOF

0 引言

近年来,随着全球航运业的快速发展,船舶靠泊作为保障港口安全高效运营的关键环节,受到广泛关注。传统的靠泊操作多依赖操作人员的经验或视觉判断,存在较强的主观性和不确定性,难以在复杂、动态的港口环境中确保船舶精准靠泊。因此,对复杂港口环境下的船舶自主靠泊路径规划进行研究具有重要意义。靠泊过程可划分为靠泊和镇定靠泊2个阶段^[1],其中镇定靠泊又可细分为泊外镇定、直接靠拢和平行靠拢3种方式^[2],该划分方式为船舶靠泊路径规划中的不同操作阶段提供了清晰的定义,有助于高效、精准实现不同场景下的船舶靠泊路径规划和运动控制^[3]。

船舶在靠泊过程中通常低速航行,受周围狭窄水域以及风、流、水深和岸壁效应等外部因素影响,其操纵特性复杂多变。船舶靠泊过程具有明显的非线性动态特性,涉及制导、导航等和控制多环节协同。为实现船舶自主靠泊,须兼顾多源环境干扰与精确控制需求。在已有研究中:LAN等^[4]基于参数识别方法对非线性Nomoto模型进行优化,提高船舶控制系统的预测精度;SONG等^[5-6]针对船舶靠泊的非线性动态特性,通过提升船舶运动模型的精度和误差处理能力,提高船舶在复杂环境中识别和预测的准确性;YIN等^[7]为提高船舶操纵识别性能,采用偏最小二乘(Partial Least Squares, PLS)回归方法识别Abkowitz模型中的水动力导数,有效识别船舶的动态特征;SONG等^[8]通过建立四自由度船舶操纵模型,设计一种更有效的双曲正切非线性创新识别方案,用于识别船舶操纵运动;LIU等^[9]基于操纵性建模组(Maneuvering Modeling Group, MMG)模型模拟不同航速下的船舶操纵特性;韩旭^[10]基于改进后的A*算法和非线性模型预测控制(Nonlinear Model Predictive Control, NMPC)算法建立三自由度Fossen船舶运动模型,实现无人舰艇自主靠泊。然而,目前大部分船舶运动数学模型未考虑船舶的四自由度动态特性,若考虑其缺陷并结合船舶的特点改进算法,则该模型能得到更好的应用。后续研究大多侧重于靠泊路径和轨迹跟踪控制,目前常用的方法有可视图法、人工势场法^[11-12]和智能方法(学习遗传算法和神经网络^[13]等)。ZHANG等^[14-15]提出一种基于动态虚拟船舶(Dynamic Virtual Ship, DVS)引导原理的鲁棒自适应路径跟踪控制方法,简化控制结构并提高算法的适用性;LI等^[16-17]提出一种鲁棒自适应事件触发控

制策略,针对无人水面舰艇(Unmanned Surface Vessel, USV)与无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)协同系统,实现智能海上搜索。

上述方法在仿真试验中展现出了良好的效能和可靠性,但对靠泊过程中的最优控制问题的考量不足。SHOUJI等^[18]提出一种两阶段和两边界值问题求解策略,充分考虑该问题并逐步优化反馈控制;祁涛等^[19]提出一种滚动时域估计(Moving Horizon Estimation, MHE)方法,降低风浪等不定干扰对控制系统的影响;吴真真等^[20]设计一种适宜在恶劣海况下应用的船舶辅助靠泊装置,提高船舶靠泊的稳定性,并减少直接撞击对吸附板的损害;YUAN等^[21]对风扰动下的船舶自主靠泊仿真试验进行分析,结果显示强海流干扰下的船舶靠泊运动控制仍存在优化空间。

为此,本文考虑船舶航迹跟踪和姿态控制,提出一种基于NMPC算法的四自由度船舶自主靠泊路径规划与运动控制策略,利用MHE方法优化控制输入参数,综合考虑船舶的运动模型、环境干扰和靠泊目标,为船舶自主靠泊路径规划提供一种高精度解决方案,主要创新点如下:

1) 采用的四自由度运动模型在传统的三自由度模型的基础上增加横摇,能更全面地描述船舶在靠泊过程中的运动特性,特别是在海浪影响下的横摇运动。

2) 采用基于NMPC算法和MHE方法的轨迹跟踪控制方法,通过实时优化输入,使船舶平滑地跟踪预定路径,有效应对航行过程中所遇各种强干扰。

3) 利用MHE方法实时估计系统状态,降低观测误差的影响,实现高效的路径规划控制。

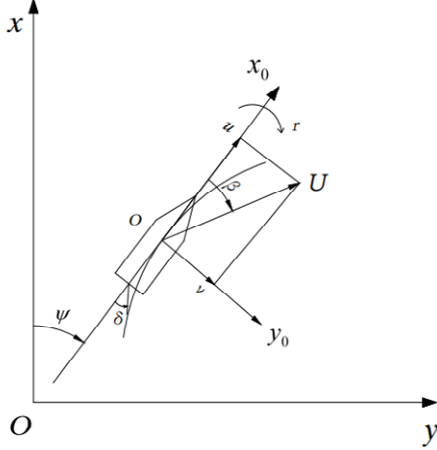
该策略支持船舶直接靠拢情境的精准靠泊路径跟踪姿态控制,契合现代无人舰艇靠泊需求,具有较高的效率和鲁棒性。

1 船舶运动数学模型

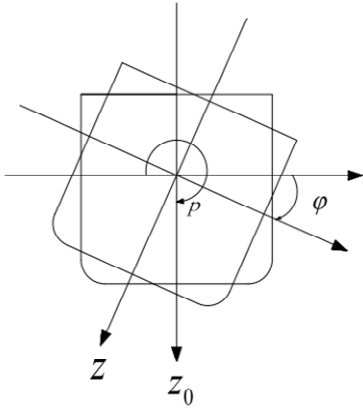
船舶的四自由度运动数学模型主要用于描述船舶在平面内的运动,涵盖航向角和位置控制^[22]。通常采用2种坐标系构建数学模型,即惯性坐标系($O-xyz$)和附体坐标系($G-x_0y_0z_0$)。根据这2种坐标系对船舶的姿态控制和路径规划准确建模。

建立四自由度船舶运动数学模型^[23],考虑恶劣海况下海浪对横摇的影响。船舶的运动参数主要包括纵荡速度 u 、横荡速度 v 、艏摇角速度 r 和横摇角速度 p 。图1为船舶运动坐标系,图1中:惯性坐标

系的原点 O 与船舶初始时刻的重心 G 重合, 该坐标系的 xy 平面位于水平面, 且 z 轴垂直向下为正方向; 附体坐标系 $G-x_0y_0z_0$ 的原点与船舶的重心 G 重合, Gx_0 轴指向船首, Gy_0 轴指向右舷, Gz_0 轴垂直向下, δ 为舵角, β 为漂角。通过这2种坐标系, 可清晰地描述船舶的全局运动和局部运动状态。



(a) 船舶平面运动坐标系



(b) 船舶运动极坐标系

图1 船舶运动坐标系

Fig. 1 Ship Motion Coordinate System

船舶姿态和轨迹方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \cos \varphi \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \cos \varphi \\ \dot{\psi} = r \cos \varphi \\ \dot{\varphi} = p \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{x} 为 x 方向的位置变化率; \dot{y} 为 y 方向的位置变化率; ψ 为船舶航向角; φ 为船舶横摇角; $\dot{\psi}$ 为航向角变化率; $\dot{\varphi}$ 为横摇角变化率。

将船舶理想化为刚体, 参考图1所示的坐标系, 得到四自由度船舶运动方程为

$$\begin{cases} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) vr = X_H + X_P + X_R \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) ur = Y_H + Y_P + Y_R \\ (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} = N_H + N_P + N_R \\ (I_{xx} + J_{xx}) \dot{p} = K_H + K_P + K_R \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为船舶质量; m_x 和 m_y 分别为船舶在 x 轴方向和 y 轴方向的附加质量; I_{xx} 和 J_{xx} 分别为船舶绕 x 轴的惯性矩和附和惯性矩; I_{zz} 和 J_{zz} 分别为船舶绕 z 轴的惯性矩和附和惯性矩; H 为黏性水动力项^[24]; P 为螺旋桨组合动力项; R 为舵力项; X 和 Y 分别为船体纵向力和横向力; N 为偏航力矩; K 为横摇力矩。

Fossen模型^[25]在船舶动力学研究领域具有广泛应用, 能精准描述船舶(包括无人船)在水中的运动特性。本文建立的四自由度Fossen模型非线性动力模型以作用力和力矩为输入参数, 旨在实现对船舶航向和航速的高精度跟踪控制。为简化动力学模型, 降低计算复杂度, 使船体质量均匀分布, 且具有中心轴对称特性, 同时将俯仰运动和升沉运动的影响排除在系统动力学分析之外。基于这些假设, 该模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\psi, \varphi) \cdot v_1 \\ M \cdot \dot{v}_1 + C(v) \cdot v_1 + D \cdot v_1 = \tau + \tau_w \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \eta = [x, y, \psi, \varphi]^T, v_1 = [u, v, r, p]^T \\ \tau = [\tau_u, 0, \tau_r, \varphi]^T, \tau_w = [\tau_{uw}, \tau_{vw}, \tau_{rw}, \tau_{pw}]^T \end{cases} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: η 为船舶的广义位姿向量; x 和 y 分别为纵向位移和横向位移; $J(\psi, \varphi)$ 为惯性坐标系到附体坐标系的转换矩阵; v_1 为船舶在附体坐标系中的运动速度向量; M 为船舶的惯性矩阵, 用于描述系统惯性特性对加速度的影响; $C(v)$ 为科氏力和向心力矩阵; D 为阻尼参数矩阵, 用于描述系统受到的阻尼力; τ 为控制力和力矩矩阵, 包括推进力 τ_u 和船摇力矩 τ_r ; τ_w 为风浪干扰矩阵, 用于表示风浪对纵向速度、横向速度、船摇角速度和横摇角速度的干扰。

相关参数矩阵的详细表达式为

$$J(\psi, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \cos \varphi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{zz} - K_p \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m_{33}u \\ 0 & 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & 0 & m_{11}u \\ -m_{33}u & m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -N_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(5)~式(8)中： X_u 、 Y_v 、 N_r 和 K_p 均为附加质量，表示船体加速度的附加惯性作用。

将参数代入式(3)，Fossen模型可表示为

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + T[u(k)\cos\psi(k) - v(k)\sin\psi(k)\cos\varphi(k)] \\ y(k+1) = y(k) + T[u(k)\sin\psi(k) + v(k)\cos\psi(k)\cos\varphi(k)] \\ \psi(k+1) = \psi(k) + T \cdot r(k)\cos\varphi(k) \\ \varphi(k+1) = \varphi(k) + T \cdot p(k) \\ u(k+1) = u(k) + T\{[-m_{33}p(k) - d_{11}]u(k) + \tau_u(k) + \tau_{uw}(k)\}m_{11}^{-1} \\ v(k+1) = v(k) + T\{[m_{22}p(k) - d_{22}]v(k) + \tau_{vw}(k)\}m_{22}^{-1} \\ r(k+1) = r(k) + T\{[-m_{11}u(k) - d_{33}]r(k) + \tau_r(k) + \tau_{rw}(k)\}m_{33}^{-1} \\ p(k+1) = p(k) + T[(m_{33} + m_{11})u(k)^2 - m_{22}v(k)^2 - d_{44}p(k) + \tau_{pw}(k)]m_{44}^{-1} \end{cases} \quad (11)$$

2 NMPC 与 MHE 靠泊运动控制

船舶的运动响应本质上具有非线性特性，采用非线性运动模型，以更全面、精确地刻画船舶在实际动态环境下的行为特征。相比线性模型，该模型综合考虑了船体质量分布、惯性矩和浮力变化等多种非线性因素及其耦合效应。这些非线性因素在实际靠泊中，尤其是在风浪、海流复杂多变的港口海域中，对船舶动态响应应具有决定性影响。非线性运动模型通常可表示为

$$\begin{cases} x(k+1) = f[x(k), u(k)] \\ y(k) = g[x(k)] \end{cases} \quad (12)$$

式中： $f(\cdot)$ 为状态更新函数； $g(\cdot)$ 为输出函数。

未来时刻的状态和输出通过逐步迭代计算实时求解，表达式为

$$\begin{cases} x_{k+i|k} = f(x_{k+i-1|k}, u_{k+i-1}) + \hat{W}_{k+i-1} \\ y_{k+i|k} = g(x_{k+i|k}) + \hat{V}_{k+i} \end{cases} \quad (13)$$

式中： \hat{W}_{k+i-1} 为干扰 W 的估计； \hat{V}_{k+i} 为对测量误差 V 的补偿。

$$y_{k+i|k} = g[f(x_{k+i-1|k}, u_{k+i-1})] = F_i(x_k, u_k, \dots, u_{k+i-1}) \quad (14)$$

式中： $F(\cdot)$ 为 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 组成的非线性函数。

在该非线性系统中，由 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 组成的非线性系统预测模型 $F(\cdot)$ 用于描述系统行为。针对环境干扰或模型失配导致的预测误差，采用MHE方法对历

$$\begin{cases} \dot{u} = [(-m_{33}p - d_{11})u + \tau_u + \tau_{uw}]m_{11}^{-1} \\ \dot{v} = [(m_{22}p - d_{22})v + \tau_{vw}]m_{22}^{-1} \\ \dot{r} = [(-m_{11}u - d_{33})r + \tau_r + \tau_{rw}]m_{33}^{-1} \\ \dot{p} = [(m_{33} + m_{11})u^2 - m_{22}v^2 - d_{44}p + \tau_{pw}]m_{44}^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

式中： m_{ii} 为惯性矩阵参数； d_{ii} 为线性阻尼系数。

采用前向欧拉法，将导数近似表示为

$$\dot{x}(k) \approx \frac{x(k+1) - x(k)}{T} \quad (10)$$

式中： T 为采样时间。

式(3)离散后的形式见式(11)

史数据进行实时校正。

$$\begin{cases} \bar{y}_{k+i|k} = y_{k+i|k} + e_{k+i|k} \\ e_{k+i|k} = y_{k+i|k} - y_k + E(e_k, \dots, e_{k-j}) + \hat{V}_{k+i} \\ e_k = y_k - y_{k|k-1} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \omega_k = [\omega_{k+1}, \dots, \omega_{k+q}]^T \\ \bar{y}_k = [y_{k+1|k}, \dots, y_{k+q|k}]^T \end{cases} \quad (16)$$

式(15)和式(16)中： $\bar{y}_{k+i|k}$ 为校正后的预测输出； E 为误差估计函数； j 为误差估计中参考的历史误差数量； e_k 为 $(k-1)$ 时刻对 k 时刻的输出估计值与实际值之间的偏差； ω_k 为第 k 步的目标轨迹； \bar{y}_k 为预测输出； q 为预测时域。

约束条件 Q 优化问题可表示为

$$\begin{cases} \min_{u_k} J_k = F(x_k, u_k, \omega_k) \\ \text{s.t.} : x_{k+1} = f(x_k, u_k) + W_k + \hat{W}_k, k \geq 0 \\ h(x_k, u_k, \omega_k) \in Q \\ J = \sum_{i=0}^N \|y_{k+i|k} - \omega_{k+i}\|_{W_1}^2 + \|u_{k+i}\|_{W_2}^2 + \|\hat{W}_{k+i}\|_{W_3}^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中： $\|\cdot\|_w^2$ 为平方后的马氏距离，用于在线调整传感器权重； W_1 、 W_2 和 W_3 为对角形式的权重矩阵。

式(12)~式(16)对NMPC问题的基本形式进行了阐述，在后续计算中利用CasADi数学求解工具高效求解这类约束优化问题。

针对船舶的多变量输入与输出特性建立约束优

化问题, 定义状态 \bar{X} 与控制 \bar{T} 的约束条件为

$$\bar{X} = R^4 [-\bar{u} \times \bar{u}] [-\bar{v} \times \bar{v}] \times [-\bar{r} \times \bar{r}] \times [-\bar{p} \times \bar{p}] \in R^6 \quad (18)$$

$$\bar{T} = [-\bar{\tau}_u, \tau_u] \times [-\bar{\tau}_r, \bar{\tau}_r] \in R^2 \quad \bar{u}, \bar{v}, \bar{r}, \bar{p}, \bar{\tau}_u, \bar{\tau}_r > 0 \quad (19)$$

所设控制器目标是引导船舶系统沿着由双S型航迹规划^[26]生成的参数化路径运动, 同时确保状态 \bar{X} 和 \bar{T} 满足约束条件。

航迹跟踪的目标是实现船舶状态收敛到预设航迹上, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|X(t) - P\| = 0$ 。同时, 在路径上的收敛要求船舶沿路径正向 $S_x \geq 0$ 移动, 即船舶的运动方向应与预设路径的方向一致, 并持续接近路径各点, 保证航迹的连续性和精确性。此外, 整个过程必须满足一定约束条件, 即:

$$\begin{cases} X(t) \in \bar{X} \\ T_r(t) = [\tau_u(t), \tau_r(t)] \in \bar{T}_r \end{cases} \quad (20)$$

采用多重打靶法规避递归运算的复杂性。通过将状态变量 X 和控制变量 T_r 整合为增广模型的状态变量, 使复杂的航迹跟踪问题重构为高维点稳定性问题。在保证动态约束完整性的同时, 实现3个方面的优化, 即: 降低约束优化的非线性复杂度; 增强算法的收敛性; 减轻长时域预测的计算负担。在每个优化步骤中, 系统模型被用作状态约束, 初始状态 X_0 、时间 t_k 和控制 $T_{r,k}$ 协同作用于状态 X_k 中, 即

$$X_k = F(X_0, T_{r,k}, t_k) \quad (21)$$

F 为基于式 (10) 递推得到的。建立优化问题:

$$\begin{cases} \min_{T, X} J_N(X, T_r) = \sum_{k=0}^{N-1} (\|X - X_r\|_{w_1}^2 + \|T_r - T_{r,r}\|_{w_2}^2) \\ \text{s.t.} \quad X = F(X_0, T_r, t_k) \\ X(t_k | t) - X_{t+k,r} = 0 \\ X(k+1) = f_d[X(k), T_r(k)] \\ X(k) \in \bar{X} \quad \forall k \in [0, n] \\ T_r(k) \in \bar{T}_r \quad \forall k \in [0, n-1] \end{cases} \quad (22)$$

式中: f_d 为离散状态转换函数; X_r 和 $T_{r,r}$ 分别为参考状态和最优控制向量。

当时间 t_k 和初始值 $X(t_k) = X(k) \in \bar{X}$ 时, 式 (12) 与时间 k 无关, 此时, 针对优化问题的目标函数

$J_N: R^6 \rightarrow R^+$, 船舶的控制输入为

$$T_r(t) = \{\tau_{u^*}[t, X(t_k)], \tau_{r^*}[t, X(t_k)]\}^T, t \in [t_k, t_k + \delta] \quad (23)$$

式中: τ_{u^*} 和 τ_{r^*} 分别为对应预测时域内船舶纵向推进力和航向控制力矩的最优控制输入。

船舶未来状态预测可能受风浪干扰和仪器测量误差的影响存在偏差, 使得约束优化后的控制输入难以实现预期效果。假设外部误差项是有界 $\tau_{uv} \leq \bar{\tau}_{uv}$, $\tau_{vw} \leq \bar{\tau}_{vw}$, $\tau_{rw} \leq \bar{\tau}_{rw}$, $\tau_{pw} \leq \bar{\tau}_{pw}$ 其中, τ_{uv} 、 τ_{vw} 、 τ_{rw} 和 τ_{pw} 为未知常数, 且这些误差项被假设在一定范围内有界。当船舶处于静止状态时, 其位置和方位角均可测量, 且测量误差 V 和干扰 W 假设服从为高斯分布特性, 具体的测量误差矩阵为

$$W = \begin{bmatrix} 0, 0, 0, 0, \frac{\tau_{uv}}{m_{11}}, \frac{\tau_{vw}}{m_{22}}, \frac{\tau_{rw}}{m_{33}}, \frac{\tau_{pw}}{m_{44}} \end{bmatrix}^T \in R^8 \quad (24)$$

该模型中船舶的位置信息为 $Y = [x, y]^T \in R^2$, 由观测系统 $\dot{X} = f(X, T) + W$ 和测量模型 $Y_m = h(x) = [x_m, y_m, \theta_m, l_m]^T \in R^4$ 获得。被测物标的坐标为 $Y_f = [x_f, y_f] \in R^2$, 测量模型 $h(x)$ 表征系统的观测和测量过程, 具体为:

$$\begin{cases} x_m = x \\ y_m = y \\ \theta_m = \text{atan2}[(x_f - x_m), (y_f - y_m)] \\ l_m = \text{sqrt}[(x_f - x_m)^2 + (y_f - y_m)^2] \end{cases} \quad (25)$$

由此可得MHE问题的求解公式为

$$\begin{cases} \min_{X, T_r} J_{n_{\text{MHE}}} = \sum_{i=k-n_{\text{MHE}}}^k \|X_i - f(X_{i-1}, T_{i-1}) - \hat{W}_i\|^2 \\ \quad + \|Y(i) - h(X_i) - \hat{V}_i\|^2 \\ \text{s.t.} \quad X(i+1) = f[X(i), T_r(i)] \\ X(i) \in \bar{X}, \quad \forall i \in [k-n_{\text{MHE}}, k] \end{cases} \quad (26)$$

约束优化问题同上线求解。控制系统流程图见图2。

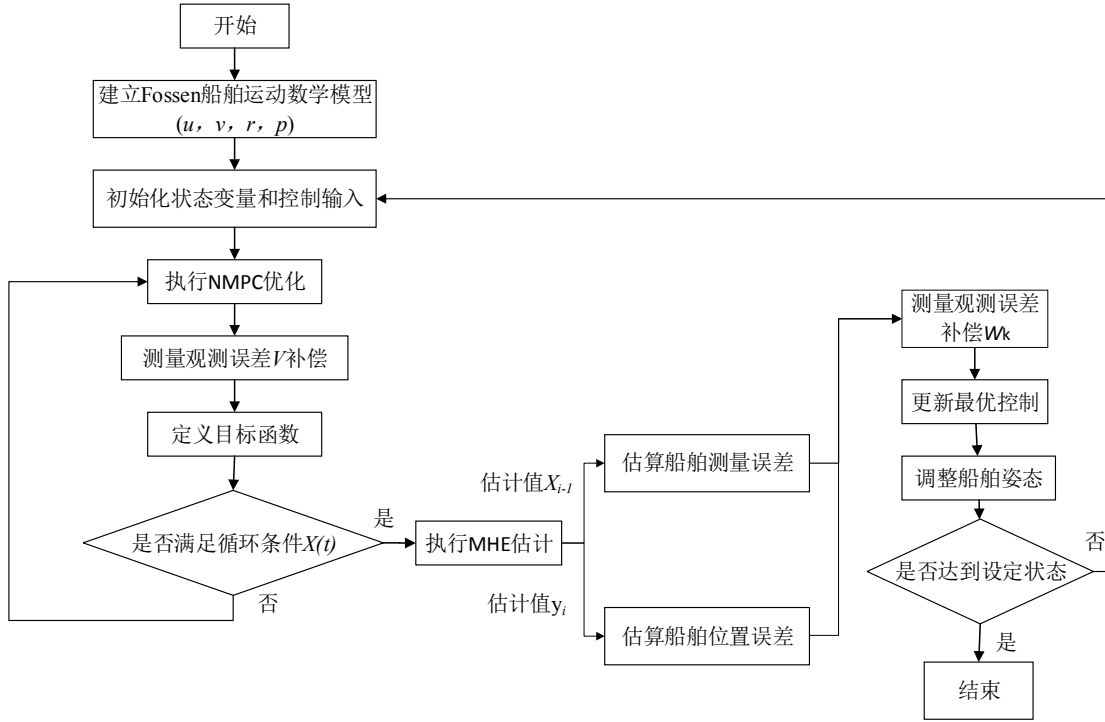


图2 船舶自主靠泊路径规划控制系统流程图

Fig. 2 Flowchart of Ship Autonomous Berthing Control System

3 稳定性分析

基于Lyapunov稳定性理论^[26]，对所设系统的稳定性进行分析。设系统可表示为 $\dot{x}(t) = f[x(t)]$ ，其中， $x(t) \in R^n$ ， $f[x(t)]$ 为 $n \times 1$ 的向量函数，且对于所有 t ，满足 $f(0) = 0$ 。若存在一个分段光滑的标量函数 $V[x(t)]$ 满足：

- 1) $V[x(t)]$ 正定， $\dot{V}[x(t)]$ 半负定，则系统在原点处平衡状态稳定。
- 2) $V[x(t)]$ 正定， $\dot{V}[x(t)]$ 负定，则系统在原点处平衡状态渐进稳定。
- 3) $V[x(t)]$ 正定， $\dot{V}[x(t)]$ 半负定，且当 $\|x(t)\| \rightarrow \infty$ 时， $V[x(t)] \rightarrow \infty$ ，则系统在原点处平衡状态全局稳定。
- 4) $V[x(t)]$ 正定， $\dot{V}[x(t)]$ 负定，且当 $\|x(t)\| \rightarrow \infty$ 时， $V[x(t)] \rightarrow \infty$ ，则系统在原点处平衡状态全局渐进稳定。

5) $V[x(t)]$ 正定， $\dot{V}[x(t)]$ 正定，则系统在原点处平衡状态不稳定。

被控系统的稳定性通过终端约束保证，系统状态须满足

$$\hat{X}(t_k | t) - X_{t+k,r} = 0 \quad (27)$$

在本文所述问题中，建立的Lyapunov方程为

$$V(k) = \sum_{i=1}^N i \left[\hat{X}(k+1|k), \hat{T}_r(k+i-1|k) \right] \quad (28)$$

式中： $i(X, T_r) > 0$ 为代价函数； \hat{X} 为预测状态； \hat{T}_r 为控制输入。

$V(k) > 0$ ，除非 $k=0$ ，具有正定性，随着状态趋向无穷远，Lyapunov函数趋向无穷大。假设在所有控制周期内优化问题都存在可行解，且能通过求解获得全局最优解 V^* 。具体地，优化问题为

$$\begin{aligned} V^*(k+1) &= \min_{T_r} \left\{ \sum_{i=1}^N i \left[X(k+i), T_r(k+i-1) \right] - i \left[X(k+1+N), T_r(k+N) \right] \right\} \\ &= -i \left[X(k+1), T_r(k) \right] + \min_{T_r} \left\{ \sum_{i=1}^N i \left[X(k+i), T_r(k+i-1) \right] + i \left[X(k+1+N), T_r(k+N) \right] \right\} \\ &\leq -i \left[X(k+1), T_r^*(k) \right] + V^*(k) + \min_{T_r} i \left[X(k+1+N), T_r(k+N) \right] \end{aligned} \quad (29)$$

$$V^*(k+1) \leq V^*(k) - i \left[T_r(k+N), T_r^*(k+N) \right] \quad (30)$$

由式(25)可知，由于 $i(X, T_r) > 0$ ，因此

$$\min_{T_r} i \left[X(k+1+N), T_r(k+N) \right] = 0, \text{ 当 } k \rightarrow \infty \text{ 时,}$$

$V^*(k) \rightarrow 0$ ，即 $X^*(k) \rightarrow X_0, T_r^*(k) \rightarrow T_0$ ，进而可得

$0 \leq V^*(k+1) \leq V^*(k)$, Lyapunov函数是非增的, 受控系统具有稳定性。

考虑观测误差 V_k 和干扰 W_k , 优化问题中包含误差补偿 \hat{V}_k, \hat{W}_k , 修正后的状态方程为

$$X_{k+1} = f(X_k, T_k) + W_k + \hat{W}_k \quad (31)$$

误差补偿项 \hat{W}_k 由MHE估计, 保证误差有界即

$$\|W_k - \hat{W}_k\| \leq \varepsilon \quad (32)$$

根据扰动Lyapunov方法, 若误差项有界, 则Lyapunov递推关系仍成立, 即

$$V^*(k+1) \leq V^*(K) - l[X^*(k+N), T^*(k+N)] + \varepsilon \quad (33)$$

当 ε 足够小时, 可证明该系统在误差补偿的影响下仍是渐近稳定的。

4 仿真试验

选取靠泊海域复杂程度不同的2个港池(即巴布亚新几内亚及其邻近海域和马尼拉国际港, 分别见图3和图4)进行仿真试验。利用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)发布的电子海图开展船舶自主靠泊路径规划运动控制仿真试验。仿真时, 将巴布亚新几内亚及其邻近海域地图中的坐标点(32°09.17'N, 132°48.66'E)和马尼拉国际港的坐标点(14°37.18'N, 120°56.03'E)设为原点, 所有坐标都以m为单位表示。

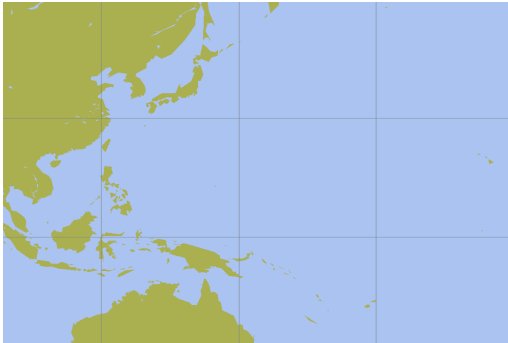


图3 巴布亚新几内亚的一部分
Fig. 3 Part of Papua New Guinea



图4 马尼拉国际港
Fig. 4 Manila International Port

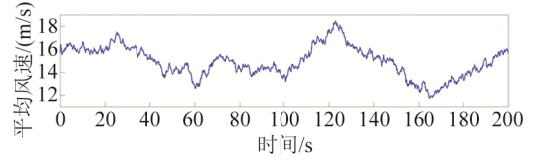
仿真模型采用NMPC和MHE方法, 预测步长为80, 离散系统采样周期为1 s。在优化过程中, 状态变量权重矩阵 Q 和控制变量权重矩阵 R 分别设定为 $\text{diag}(1,1,1,1,3 \ 000,3 \ 000,100,100)$ 和 $\text{diag}=(10^{-4},10^{-5})$, 以平衡优化过程中状态变量 $X=[u,v,r,p,x,y,\psi,\varphi]^T$ 与控制变量 $T_i=[\tau_u,\tau_r]^T$ 的权重。二者的相对大小决定优先级。当控制器限制控制输入时, 会更多地关注状态跟踪。以某海湾级多功能船^[27]为仿真对象进行分析, 该船长38 m, 质量为118 t。根据船舶的物理特性和动力学特性, 可设置Fossen模型相关参数的值, 具体见表1。

表1 某海湾级多功能船的 Fossen 模型参数

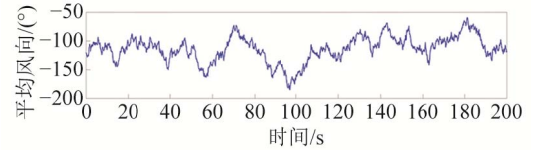
Tab. 1 Fossen Model Parameters for a Gulf-Class Multipurpose Vessel

参数	数值	参数	数值
m_{11}	1.200×10^5	d_{11}	2.15×10^4
m_{22}	1.779×10^5	d_{22}	1.47×10^5
m_{33}	6.360×10^7	d_{33}	8.02×10^6
m_{44}	9.865×10^7	d_{44}	11.71×10^6

采用7级海况进行强干扰仿真试验, 其中, 风速为16 m/s, 风向为030°, 浪向为050°, 此时海面风浪涌起, 风开始将碎浪的白色飞沫吹成条纹。仿真采用的风场和浪场分别见图5和图6。浪场中不同颜色表示波浪高度的变化, 颜色越暖表示波浪高度越大。



(a) 平均风速变化曲线



(b) 平均风向变化曲线

图5 仿真采用的风场

Fig. 5 Wind Farms Used in the Simulation

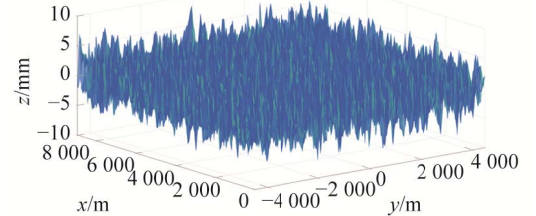


图6 仿真使用的浪场

Fig. 6 Wave Fields Used for Simulation

基于Fossen模型构建一个NMPC约束优化问题, 并通过求解该问题获得控制信号, 进而实现船舶自

主靠泊路径规划运动控制。仿真结果见图7和图8。
由图7和图8可知，该控制方法在船舶航迹跟踪和姿态控制方面具有高效性。

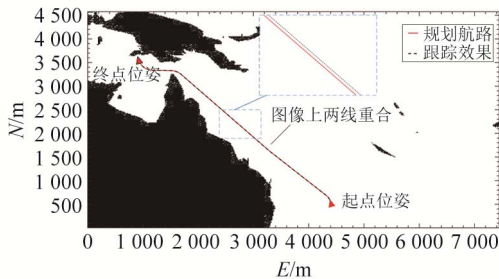


图7 巴布亚新几内亚 NMPC 路径跟踪效果

Fig. 7 NMPC Path Tracking Effects in Papua New Guinea

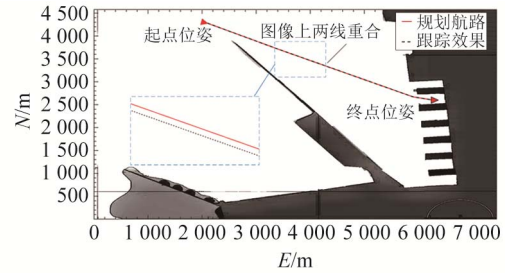
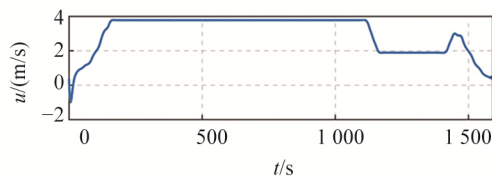
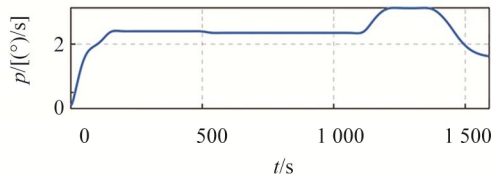


图8 马尼拉国际港 NMPC 路径跟踪效果

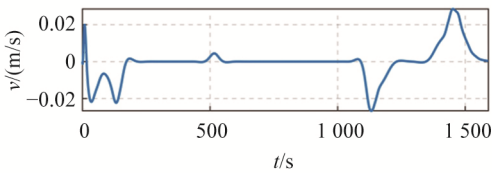
Fig. 8 NMPC Path Tracking Effects in Manila International Port



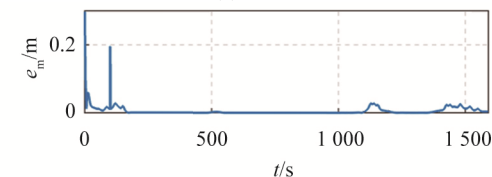
(a) 纵向速度对比



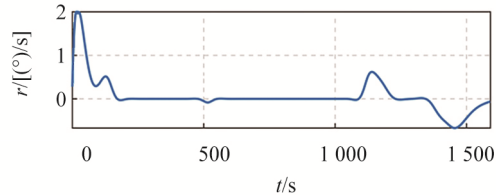
(c) 横摇角速度对比



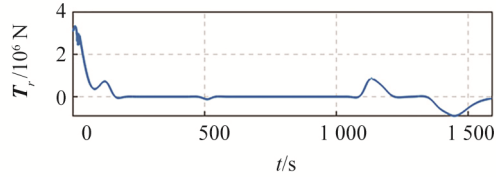
(e) 横向速度对比



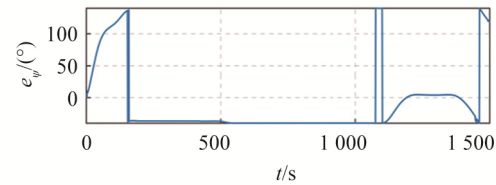
(g) 观测误差补偿对比



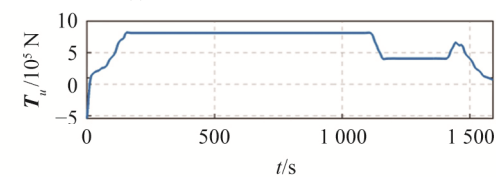
(b) 艏摇角速度对比



(d) 纵向推力对比



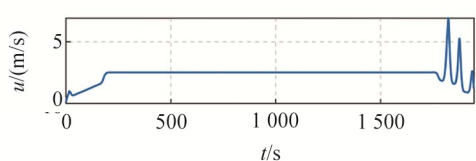
(f) 航向误差对比



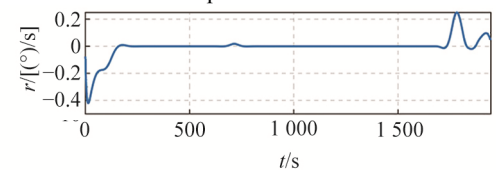
(h) 艏摇力矩对比

图9 巴布亚新几内亚 NMPC 控制过程主要参数

Fig. 9 Main Parameters of the NMPC Control Process in Papua New Guinea



(a) 纵向速度对比



(b) 艏摇角速度对比

图10 马尼拉国际港 NMPC 控制过程主要参数

Fig. 10 Main Parameters of the NMPC Control Process in Manila International Port

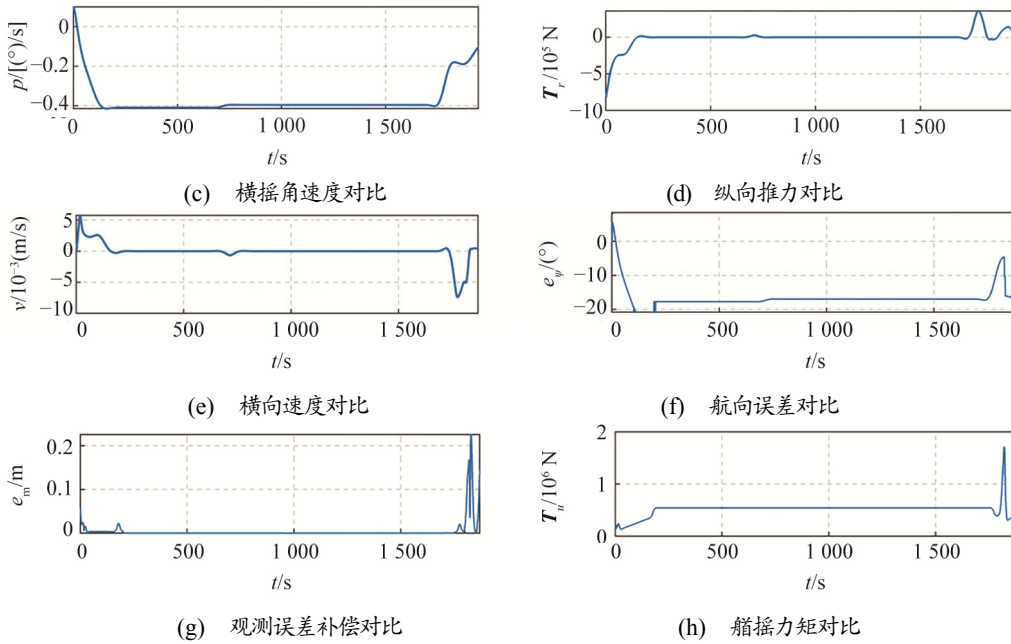


图 10 马尼拉国际港 NMPC 控制过程主要参数 (续)

Fig. 10 Main Parameters of the NMPC Control Process in Manila International Port (Continued)

在仿真模拟试验中, 两港船舶的纵向速度和横向速度在靠泊起始时和终止时均接近0, 满足所需速度调控需求。在整个控制过程中, 纵向推力和船摇力矩的变化趋势平稳, 航迹跟踪连续且无明显波动, 体现出了良好的动态响应性能。试验结果验证了所提控制策略在靠泊任务中的实时性和有效性, 能实现对船舶运动状态的高效调节, 确保路径跟踪平滑且稳定。两港船舶航迹误差 l 对比见图11和图12。

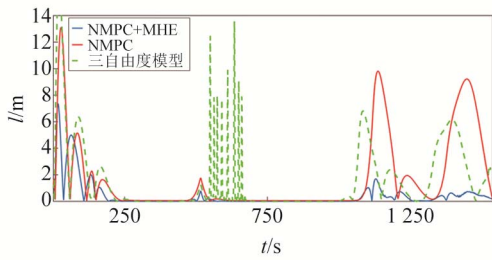


图 11 巴布亚新几内亚航迹误差对比

Fig. 11 Track Error in Papua New Guinea

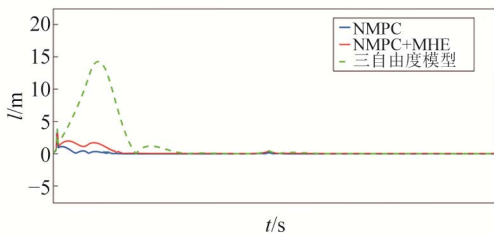


图 12 马尼拉国际港航迹误差对比

Fig. 12 Track Error in Manila International Port

由图11和图12可知: 传统三自由度模型控制下

的靠泊航迹误差波动较大, 最大可达12 m~18 m, 采用NMPC控制方法之后, 航迹误差降至10 m~14 m, 相比传统方法平均误差减小约20%。引入MHE方法之后, 提出的NMPC+MHE算法能将航迹误差稳定控制在8 m以内, 相比三自由度模型和NMPC控制方法, 平均误差分别减小75%和70%。在最终停泊阶段, NMPC+MHE算法的位置偏差保持在0.6 m以下, 而三自由度模型和NMPC算法的位置偏差分别约为1.5 m和1.2 m。控制策略在执行过程中保持输出响应的平滑性和无延迟特性, 体现出了良好的动态性能。该结果充分验证MHE方法在不显著增加计算负担的前提下, 能通过对模型误差和外部扰动进行实时估计与补偿, 增强系统状态感知的准确性和控制的实时性, 有效提升靠泊控制系统的精度和鲁棒性。

5 结论

本文针对复杂港口环境中船舶在恶劣海况下的非线性动力特性, 提出一种基于NMPC方法的四自由度船舶自主靠泊路径规划控制方案, 以巴布亚新几内亚和马尼拉国际港的自主靠泊路径规划为例, 通过仿真试验和理论分析, 主要得出以下3个结论。

1) 船舶在两港靠泊过程中的初始速度和最终速度均为0, 实现了对速度的精准控制, 同时能避免船舶出现过大的冲击力和不稳定的靠泊姿态, 使其按规划的路径精确靠泊至码头或泊位。

2) 在靠泊阶段, 航迹误差均小于8 m, 靠泊位置误差均小于0.6 m。前者表明, 基于NMPC方法的

航迹跟踪控制策略能精确预测并调整船舶运动轨迹；后者表明，通过运用MHE算法整合历史测量数据，实时估计系统的状态，能降低观测误差影响，显著提高控制精度。

3) 控制过程中所需推力和力矩变化平稳，航迹跟踪平滑，未出现剧烈波动或失控现象，表明该控制策略在不同港口复杂动态环境下具有较强的可靠性和鲁棒性。

未来将重点考虑外部环境因素（如海流、风力和拖船作用力等）对船舶运动的影响，为实现更高效、可靠的船舶自主靠泊提供辅助支持。

参考文献：

- [1] 张玉宝. 欠驱动无人艇自动靠泊控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
ZHANG Y B. Research on Automatic Berthing Control Methods for Under-Actuated Unmanned Surface Vehicles[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [2] YANG L, XU H X, YU W Z. Null-Space-Based Active Disturbance Rejection Control Allocation for Ship Autonomous Berthing[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 128-136.
- [3] 张强, 张显库, 林南均. 船舶自动靠泊简捷非线性神经网络控制器[J]. 中国航海, 2017, 40(4): 11-15.
ZHANG Q, ZHANG X K, LIN N J. Concise Nonlinear Neural Network Controller for Ship Auto-Berthing[J]. Navigation of China, 2017, 40(4): 11-15.
- [4] LAN J, ZHENG M, CHU X, et al. Parameter Prediction of the Non-Linear Nomoto Model for Different Ship Loading Conditions Using Support Vector Regression [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(5): 903.
- [5] SONG C, ZHANG X, ZHANG G. Attitude Prediction of Ship Coupled Heave-Pitch Motions Using Nonlinear Innovation via Full-Scale Test Data[J]. Ocean Engineering, 2022, 264: 112524.
- [6] SONG C, ZHANG X, ZHANG G. Nonlinear Innovation-Based Maneuverability Prediction for Marine Vehicles Using an Improved Forgetting Mechanism[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(9): 1210.
- [7] YIN C J, ZOU J Z, XU F. Parametric Identification of Abkowitz Model for Ship Maneuvering Motion by Using Partial Least Squares Regression[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2015, 137(3): 031301.
- [8] SONG C, ZHANG X, ZHANG G. Nonlinear Identification for 4-DOF Ship Maneuvering Modeling Via Full-Scale Trial Data[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(2): 1829-1835.
- [9] LIU C, LI T, WU W, et al. Event-Triggered Predictive Path Following Control of Autonomous Ships with an MMG Model[J]. Ocean Engineering, 2024, 314(P1): 119582.
- [10] 韩旭. 船舶靠泊路径规划与模型预测航迹保持控制 [D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2023.
HAN X. Ship Berthing Path Planning and Model Predictive Course Keeping Control[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2023.
- [11] SEN H, LEI W, YITING W. A Potential Field-Based Trajectory Planning and Tracking Approach for Automatic Berthing and COLREGs-Compliant Collision Avoidance[J]. Ocean Engineering, 2022, 266(P3): 112877.
- [12] LIAO Y, JIA Z, ZHANG W, et al. Layered Berthing Method and Experiment of Unmanned Surface Vehicle Based on Multiple Constraints Analysis[J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 47-60.
- [13] SHOMA S, KENTA N, YOSHIKI M, et al. Automatic Berthing Using Supervised Learning and Reinforcement Learning[J]. Ocean Engineering, 2022, 265: 112553.
- [14] ZHANG G, ZHANG X. A Novel DVS Guidance Principle and Robust Adaptive Path-Following Control for Underactuated Ships Using Low Frequency Gain-Learning[J]. ISA Transactions, 2015, 56: 75-85.
- [15] ZHANG G, LI J, JIN X, et al. Robust Adaptive Neural Control for Wing-Sail-Assisted Vehicle Via the Multiport Event-Triggered Approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 52(12): 12916-12928.
- [16] LI J, ZHANG G, ZHANG X, et al. Integrating Dynamic Event-Triggered and Sensor-Tolerant Control: Application to USV-UAVs Cooperative Formation System for Maritime Parallel Search[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 25(5): 3986-3998.
- [17] LI J, ZHANG G, ZHANG W, et al. Cooperative Path Following Control of USV-UAVs Considering Low Design Complexity and Command Transmission Requirements[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 9(1): 715-724.
- [18] SHOUJI K, OHTSU K, MIZOGUCHI S. An Automatic Berthing Study by Optimal Control Techniques[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1992, 25(3): 185-194.

(下转第 22 页)