

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2614916

基于复合博弈的多水面无人船分层 协同对接导航方法研究*

王海滨¹, 李亚妹¹, 谢文博², 李鸣阳¹

(1. 哈尔滨理工大学自动化学院 哈尔滨 150080; 2. 上海大学未来技术学院 上海 200444)

摘 要:针对多水面无人船 (USV) 集群协同对接过程中存在的目标分配冲突、欠驱动系统轨迹震荡及扰动环境下控制性能下降等问题,提出一种融合势博弈与微分博弈的分层分布式协同对接导航方法。首先,在决策层针对水面无人船目标分配中的利益冲突问题,构建了基于势博弈的分布式优化框架,通过构造反映集群总代价的全局势函数,驱动各水面无人船自组织地收敛到纯策略纳什均衡。其次,在制导层为解决欠驱动系统运动耦合特性导致的轨迹震荡问题,设计了基于 S 型函数动态调节连续变权重制导策略,实现了从远场趋近模态到近场对准模态的平滑过渡。最后,在控制层将跟踪误差积分项引入增广模型,构建九维增广状态空间,并将对接与避碰需求建模为伴随性能指标与非线性势场约束;结合具体对接需求构造二次型成本函数,并基于微分博弈及最优控制理论求解代数黎卡提方程,得到全局最优状态反馈控制律。仿真验证表明,所提方法在纵向与横向两类典型对接场景中均能成功实现对接任务。积分增广最优控制结构可有效抑制扰动,使稳态误差不超过 0.1 m,各水面无人船之间相对距离始终保持在安全阈值以上,同时总能耗成本降低约 46%,对接时间缩短约 20%,展现出优异的鲁棒性与高效性。

关键词: 无人船;对接规划;博弈论;纳什均衡;变权重制导

中图分类号: TH166 TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Hierarchical cooperative docking navigation of multiple USV based on composite game theory

Wang Haibin¹, Li Yamei¹, Xie Wenbo², Li Mingyang¹

(1. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Future Technology, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: To address the problems of target allocation conflicts, trajectory oscillations in underactuated systems, and degraded control performance under disturbance conditions during the cooperative docking of multiple unmanned surface vessel (USV) clusters, this study proposes a hierarchical, distributed cooperative docking navigation method that integrates potential and differential game theories. First, at the decision-making layer, a distributed optimization framework based on potential games is formulated to resolve conflicts of interest in target allocation among unmanned surface vessels. By designing a global potential function that reflects the total cost of the cluster, self-organization of each unmanned surface vessel is induced, and convergence to a pure-strategy Nash equilibrium is achieved. Second, at the guidance layer, in order to solve the problem of trajectory oscillations caused by the motion coupling characteristics of underactuated systems, a continuously variable weighted guidance strategy with dynamic adjustment based on an S-shaped function is designed, by which a smooth transition from the far-field approach mode to the near-field alignment mode is achieved. Finally, at the control layer, an integral term of the tracking error is introduced into the augmented model, and a nine-dimensional augmented state space is formulated. The docking and collision avoidance requirements are modeled as performance indices and nonlinear potential field constraints. In combination with specific docking requirements, a quadratic cost function is formulated, and the algebraic Riccati equation is solved based on differential game theory and optimal control theory, through which a globally optimal state-feedback control law is obtained. Simulation results verify that the proposed method can successfully accomplish docking tasks in both typical longitudinal and lateral

收稿日期: 2026-01-31 Received Date: 2026-01-31

* 基金项目: 国家自然科学基金 (62303140, 62373237, 52401421) 项目资助

docking scenarios. Disturbances can be effectively suppressed by the integral augmented optimal control structure, the steady-state error can be kept within 0.1 meters, the relative distance among all unmanned surface vessels can be maintained above the safety threshold at all times, the total energy consumption cost can be reduced by approximately 46 percent, and the docking time can be shortened by approximately 20 percent, demonstrating excellent robustness and high efficiency.

Keywords: unmanned surface vehicle; docking planning; game theory; Nash equilibrium; variable weight guidance

0 引言

随着多水面无人船(unmanned surface vehicle, USV)在海洋监测、环境保护、搜救等领域的广泛应用,充分证明了海上集群协同控制所带来的巨大优势^[1-2]。编队控制作为集群协同的重要组成部分是近年来重要研究领域,其中隶属于编队协同范畴的多USV协同对接任务同样会成为未来研究的热点^[3]。对接控制作为系统协同运动的重要环节,其核心任务是通过高精度相对运动控制,为后续的组合态航行奠定基础,这一过程不仅要求系统具备精确的控制能力,更需要实现协同高效的配合^[4]。在动态目标和环境扰动共存的复杂场景下,如何确保集群系统在多任务协同中实现对接过程是当前面临的重要技术挑战。针对多智能体协同控制问题,已有研究成果在任务决策与控制等领域取得了较好的表现,但针对USV协同对接这一特殊场景的适用性仍需深入探讨。

在任务决策层面,现有成果重点在于实现多目标资源的优化分配。Zhou等^[5]基于合同网协议设计了拍卖算法,通过多轮招标机制有效实现了异构任务的指派,但在高动态环境下,通信开销的控制与实时响应的平衡仍具有一定的挑战性。随后,Kim等^[6]引入遗传算法等进化策略,显著提升了系统的全局寻优深度,但在集中式计算架构下,系统的鲁棒性与扩展性往往对中心节点的处理能力及稳定性有较高依赖。近年来,博弈论因其天然的分布式特性受到广泛关注,Long等^[7]将多智能体协同建模为势博弈问题,证明了系统纳什均衡的存在性,为解决多目标竞争提供了新的视角。在此基础上Kalyva等^[8]进一步设计了基于局部交互的分布式学习算法,在编队保持等常规协同场景中验证了博弈策略的收敛有效性。然而,针对协同对接场景,如何在满足对接泊位唯一性约束的前提下,设计驱动系统快速收敛至无冲突均衡解的分布式机制,仍是亟待攻克的难点。

在系统控制层面,核心目标是实现对制导指令的精确响应与抗扰控制。针对对接过程中存在的多约束耦合、模型不确定性与环境扰动等复杂因素,Zhang等^[9]将智能体交互过程建模为微分博弈问题,并指出通过求解耦合的哈密顿雅可比贝尔曼方程(Hamilton Jacobi

Bellman equation, HJB)构造了实现Nash均衡的分布式反馈策略。然而,非线性HJB在高维状态空间下的在线求解复杂度显著增加,使其难以直接满足工程实时闭环需求。鉴于此,Li等^[10]在系统线性化与二次型性能指标设定下,将博弈均衡求解等价转化为代数黎卡提方程,并进一步构造分布式线性二次调节器(linear quadratic regulator, LQR)控制器,从而在显著降低在线计算负担的同时,实现了控制能量消耗与轨迹跟踪性能之间的有效权衡。王利国等^[11]指出,经典LQR通常基于全时域二次型指标进行优化,终端精度往往依赖权重设计来间接影响导致在逼近末段可能出现小幅稳态偏差。因此,面向对接任务所要求的末端高精度与扰动抑制,现有控制策略仍需进一步强化。Nie等^[12]的研究表明,在持续风浪流等低频扰动作用下,引入误差积分环节能够累积并抵消扰动影响,从而改善稳态航向与跟踪表现。Sun^[13]利用局部交互信息实现了博弈策略的分布式收敛,为多USV协同控制提供了可扩展的均衡求解基础。然而,如何保证对接末段快速收敛的同时从机理上减小稳态偏差,仍需进一步探讨。

综上所述,现有研究虽在各子领域取得了显著进展,但面对无人船协同对接任务“决策高效性、制导平滑性、控制精确性”的三重需求,仍缺乏一套系统性的解决方案。鉴于此,本文提出一种集任务决策、连续制导与增广最优控制于一体的分层分布式控制方法。本文主要贡献为:

1) 构建了势博弈驱动的分布式协同USV对接决策框架。针对多目标对接分配中的利益冲突与组合优化难题,构造了反映集群总代价的全局对接势函数,利用局部交互机制驱动各USV自组织收敛至纳什均衡。该方法在突破集中式计算瓶颈的同时,保证了全局对接分配方案的最优一致性,实现了复杂拓扑下的快速决策。

2) 提出了基于积分增广HJB-LQR的USV协同对接最优跟踪控制方法。其创新之处在于将USV传统运动模型转化为包含误差积分项的九维增广状态空间模型,结合微分博弈理论设计了系统对接全局最优状态反馈控制律,实现了控制精度与鲁棒性的双重优化,解决了复杂海况扰动下USV协同对接难以兼顾高精度与强鲁棒性的难题。

论文结构安排为:1) 围绕协同对接任务进行问题描述图论相关基本内容;2) 给出了建立多USV对接动力学

与线性化误差模型,在此基础上构建积分增广状态空间,并进一步给出阶段成本与总体成本函数的定义;3)提出分层分布式协同对接策略:决策层基于势博弈完成分布式对接泊位分配,制导层采用连续变权重策略生成平滑参考指令,控制层基于 HJB-LQR 求解最优状态反馈律以实现高精度抗扰对接;4)总结研究主要成果并对未来研究方向进行了展望。

1 理论分析

1.1 问题描述

针对包含 $N(N \geq 3)$ 艘 USV 的集群系统,本文旨在解决其在非固定(时变/未知)场景下的自主对接控制问题。研究需在满足多船协同约束与动态环境干扰的前提下,设计一种兼顾“智能化”与“绿色化”的控制方案。具体表现为:确保系统内所有 USV 完成精确的自主对接,且以较短的时间实现对接系统能耗最优和鲁棒控制。

1.2 图论基础知识

采用图论方法对 USV 间的对接通信网络建模。通信网络用无向图 $G = (V, E, A)$ 表示,其中节点集 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示各 USV,边集 $E \subseteq V \times V$ 表示节点间的双向信息传输关系。当且仅当边 $(j, i) \in E$ 存在时,节点 i 可直接接收节点 j 的信息。

邻接矩阵 $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 表示节点之间的直接通信关系:若 $(j, i) \in E$ 则 $a_{ij} = 1$;否则 $a_{ij} = 0$ 。节点 i 的邻居集合定义为 $N_i = \{j \in V | a_{ij} = 1\}$ 。

进一步定义拉普拉斯矩阵为 $L = D - A$,其中 $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_N)$ 为度矩阵,其对角线元素满足 $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$,表示节点 i 的入度(即向节点 i 发送信息的邻接节点数量)。由于图为无向图,矩阵 A 与 L 均为对称矩阵,且 L 半正定。图的连通性与拉普拉斯矩阵的谱性质密切相关:当且仅当图 G 连通时, L 有唯一零特征值^[14]。

2 USV 对接运动模型设计

2.1 USV 动力学建模与线性化

考虑由 $z_{v,i} = \int_0^t \delta \eta_i d\tau$ 个 USV 组成的对接系统,其动力学表示为:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_i = R(\psi_i) v_i \\ M_i \dot{v}_i = -C_i(v_i) v_i - D_i v_i + \tau_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$ 表示第 i 艘 USV 的位姿(位置和航向角), $\tau_i = [u_{wi}, 0, \tau_{ri}]$ 为控制输入, $C_i(v_i)$ 为科

里奥利力矩阵。 $R(\psi_i)$ 为旋转矩阵, M_i 为惯性矩阵, D_i 为线性阻尼矩阵,定义为:

$$R(\psi_i) = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & -\sin \psi_i & 0 \\ \sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_i = \begin{bmatrix} m_{11}^i & 0 & 0 \\ 0 & m_{22}^i & 0 \\ 0 & 0 & m_{33}^i \end{bmatrix}, D_i = \begin{bmatrix} d_{11}^i & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}^i & 0 \\ 0 & 0 & d_{33}^i \end{bmatrix}。$$

通过为每艘 USV 分配一个固定的目标终端位姿 η^* , 设平衡点为 $(\eta^*, 0)$ 。定义误差变量 $\delta \eta_i = \eta_i - \eta_i^*$, $\delta v_i = v_i - 0 = v_i$, $\delta \tau_i = \tau_i - 0 = \tau_i$, 组合成误差状态向量且满足 $\delta \dot{\eta}_i = R(\psi_i) \delta v_i$, $\delta \dot{v}_i = -M_i^{-1} D_i \delta v_i + M_i^{-1} \delta \tau_i$ 。在平衡点处进行一阶泰勒展开^[15], 得到线性化模型如式(2)所示。

$$\delta \dot{\xi}_i = A_i \delta \xi_i + B_i \delta \tau_i \quad (2)$$

$$\text{其中, } A_i = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & R(\psi_i^*) \\ 0_{3 \times 3} & -M_i^{-1} D_i \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ M_i^{-1} \end{bmatrix}_{6 \times 3}。$$

2.2 积分增广状态空间模型构建

针对协同对接任务中多目标优化的耦合特性,为了实现任务优先级的动态内化与稳态控制精度的提升,本文在基础状态之上引入了 3 个误差积分项: $z_{v,i} = \int_0^t \delta \eta_i d\tau$, 称为跟踪误差积分器; $\dot{z}_{v,i} = \delta \eta_i$; $z_{f,i} = \int_0^t e_{f,i}(\tau) d\tau$, 称为对接误差积分器。其中,对接误差量 $e_{f,i}$ 定义为: $e_{f,i} = \sum_{j \in N_i} \|(\eta_i - \eta_j) - d_{ij}\|$; $z_{a,i} = \int_0^t e^{-\sigma(t-\tau)} e_{a,i}(\tau) d\tau$, 称为安全违规积分器; $\dot{z}_{a,i} = e_{a,i} - \sigma z_{a,i}$, 其中, σ 是常值参数; 安全违规量 $e_{a,i}$ 定义为: $e_{a,i} = \sum_{j \neq i} g_{\text{safe}}(\|\eta_i - \eta_j\|)$, $g_{\text{safe}}(d) = \frac{1}{\gamma} \ln(1 + e^{\gamma(d_{\text{safe}} - d)})$, $\gamma > 0$ 。

为避免安全违规积分器积分累计问题,因此引入了遗忘因子 $(-\sigma z_{a,i})$, 它与当前的积累量成正比且方向相反。当 USV 在避碰安全域内时,输入变为 0,引入的因子会将惩罚项逐渐递减,最终使得 $z_{a,i}$ 趋近于 0,从而使避碰成本函数趋近于 0。且 $z_{v,i} \in \mathbf{R}^3$ 为向量积分项,用于消除多自由度稳态误差; $z_{f,i}, z_{a,i} \in \mathbf{R}$ 为标量积分项,用于量化系统对接精度与安全性能。

所以, $\xi_i^{\text{aug}} = [\delta \eta_i, \delta v_i, z_{v,i}]^T \in \mathbf{R}^9$ 。

故单艘 USV 的扩增系统动力学为:

$$\dot{\xi}_i^{\text{aug}} = A^{\text{aug}} \xi_i^{\text{aug}} + B^{\text{aug}} \tau_i \quad (3)$$

其中, $A^{\text{aug}} \in \mathbf{R}^{9 \times 9}$ 和 $B^{\text{aug}} \in \mathbf{R}^{9 \times 3}$ 为扩增后的系统矩阵与控制矩阵,定义为:

$$\mathbf{A}^{\text{aug}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{R}(\psi_i^*) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{D}_i & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \mathbf{B}^{\text{aug}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{M}_i^{-1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}.$$

2.3 成本函数定义

定义瞬时成本函数为:

$$L_i(\xi_i^{\text{aug}}, \tau_i) = \underbrace{\frac{1}{2} q_{v1} \|\delta \boldsymbol{\eta}_i\|^2 + \frac{1}{2} q_{v2} z_{v,i}^2 + \frac{1}{2} q_{v3} \|\delta \mathbf{v}_i\|^2}_{\text{目标跟踪}}$$

$$+ \underbrace{\frac{1}{2} q_{f1} e_{f,i}^2 + \frac{1}{2} q_{f2} z_{f,i}^2}_{\text{对接保持}} + \underbrace{\frac{1}{2} q_{a1} z_{a,i}^2 + \frac{1}{2} \tau_i^T \mathbf{R} \tau_i}_{\text{避碰安全}} + \underbrace{\frac{1}{2} \tau_i^T \mathbf{R} \tau_i}_{\text{能耗}} \quad (4)$$

简写为:

$$L_i(\xi_i^{\text{aug}}, \tau_i) = \frac{1}{2} (\xi_i^{\text{aug}})^T \mathbf{Q} \xi_i^{\text{aug}} + \frac{1}{2} \tau_i^T \mathbf{R} \tau_i \quad (5)$$

其中, $\mathbf{Q} = \text{diag}(q_{v1} \mathbf{I}_3, q_{v3} \mathbf{I}_3, q_{v2} \mathbf{I}_3)$, 故总成本为:

$$J_i = \underbrace{\frac{1}{2} (\xi_i^{\text{aug}}(T))^T \mathbf{S} \xi_i^{\text{aug}}(T)}_{\text{终端代价} \phi_i} +$$

$$\int_0^T \left[\underbrace{\frac{1}{2} (\xi_i^{\text{aug}})^T \mathbf{Q} \xi_i^{\text{aug}} + \frac{1}{2} \tau_i^T \mathbf{R} \tau_i}_{\text{运行成本}} + \underbrace{\frac{1}{2} q_{f1} e_{f,i}^2 + \frac{1}{2} q_{f2} z_{f,i}^2 + \frac{1}{2} q_{a1} z_{a,i}^2}_{\text{对接保持}} + \underbrace{\frac{1}{2} q_{a1} z_{a,i}^2}_{\text{避碰安全}} \right] dt \quad (6)$$

3 分层分布式协同对接控制策略设计

本文提出了一种分层分布式控制架构。该架构由上至下包含3个核心层级:1)决策层利用势博弈机制解决多USV与多对接泊位之间的最优匹配问题;2)制导层采用连续变权重策略生成平滑的参考航向指令;3)控制层基于积分增广LQR实现对制导指令的精确跟踪与扰动抑制。

3.1 决策层-基于势博弈的分布式目标分配

设USV集群集合为 $N = \{1, 2, \dots, N\}$, 目标对接泊位集合为 $M = \{1, 2, \dots, M\}$ (且 $M \geq N$)。定义分配策略向量 $\mathbf{k} = [k_1, k_2, \dots, k_N]^T$, 其中 $k_i \in M$ 表示第 i 艘USV选择的对接泊位编号。基于欧几里得距离的USV航行代价函数定义如式(7)所示。

$$C_i(k_i) = (\mathbf{p}_i^0 - \mathbf{p}_{k_i})^T \mathbf{W} (\mathbf{p}_i^0 - \mathbf{p}_{k_i}) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{p}_i^0 \in \mathbf{R}^2$ 表示第 i 艘USV的初始位置坐标; $\mathbf{p}_{k_i} \in \mathbf{R}^2$ 表示第 k_i 号目标对接泊位的位置坐标; $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ 为正定权重矩阵, 用于调节不同坐标轴方向的权重分配及控制距离惩罚的强度。

考虑对接泊位互斥约束, 引入克罗内克函数 δ_{k_i, k_j} (当 $k_i = k_j$ 时取1, 否则取0), 全局优化目标定义为:

$$\min_k \sum_{i=1}^N C_i(k_i) \text{ s. t. } \delta_{k_i, k_j} = 0, \forall i \neq j \quad (8)$$

为了以分布式方式求解上述全局静态分配优化问题, 将上述问题建模为势博弈模型 $\Gamma = (N, M, \{U_i\})$:

1) 参与者: N 艘USV;

2) 策略集: 每艘USV的可选策略集为对接泊位集合 M ;

3) 效用函数定义: 定义第 i 艘USV选择目标 k_i 的效用 $U_i(k_i)$ 为其航行代价的负值, 即:

$$U_i(k_i) = -C_i(k_i) - \lambda \sum_{j \neq i} \delta_{k_i, k_j} - (\mathbf{p}_i^0 - \mathbf{p}_{k_i})^T \mathbf{W} (\mathbf{p}_i^0 - \mathbf{p}_{k_i}) - \lambda \sum_{j \neq i} \delta_{k_i, k_j} \quad (9)$$

故系统总势函数:

$$\phi(k) = - \sum_{i=1}^N (\mathbf{p}_i^0 - \mathbf{p}_{k_i})^T \mathbf{W} (\mathbf{p}_i^0 - \mathbf{p}_{k_i}) - \lambda \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \delta_{k_i, k_j} \quad (10)$$

因此, 对于任意个体策略的改变, 均有 $\Delta U_i \triangleq \Delta \Phi$, 故 Γ 为完全势博弈^[16]。

采用空间自适应演化算法进行分布式寻优。在离散时刻 t , 随机激活个体 i 并根据 Gibbs 分布更新策略:

$$\mathbf{p}_i(k_i = a) = \frac{e^{\left(\frac{1}{\beta} U_i(a, k_{-i})\right)}}{\sum_{b \in M} e^{\left(\frac{1}{\beta} U_i(b, k_{-i})\right)}} \quad (11)$$

其中, β 为探索参数。由于 Γ 是有限势博弈, 其纯策略纳什均衡必然存在。当 $\beta \rightarrow 0$ 时, 马尔可夫链的概率质量将逐步向势函数 $\phi(k)$ 的全局极大化解集集中。由于全局势函数在构造上与集群总代价互为负值, 故势函数最大化过程在物理上等价于受约束条件下的总代价最小化。综上, 系统能够通过自主协同演化, 自组织地收敛至满足对接泊位唯一性约束的全局最优任务分配方案。

3.2 制导层-连续变权重制导策略

制导层旨在将决策层输出的目标泊位坐标 $\mathbf{p}_k$ 映射为底层控制所需的实时参考航向指令 $\psi_d(t)$ 和航速指令 $u_d(t)$ 。定义第 i 艘USV当前位置 $\mathbf{p}_i(t)$ 与目标对接泊位 $\mathbf{p}_{k_i}$ 之间的欧氏距离误差为 $e_d(t) = \|\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_{k_i}\|$ 。为实现多阶段制导逻辑的软切换, 引入基于 Sigmoid 函数的自适应权重因子 $\sigma(e_d) \in (0, 1)$ ^[17]:

$$\sigma(e_d) = 1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{\mu(e_d - d)}{\mu(e_d - d)}}} \quad (12)$$

其中, $\mu > 0$ 为权重演化速率因子, 决定了模态切换的敏锐度; d 为模态切换的临界距离阈值。

该权重函数构建了一个归一化的主导权空间: 当 $e_d \gg d$ 时, $\sigma(e_d) \rightarrow 1$, 制导系统由位置误差主导, 优先执行快速趋近, $e_d \rightarrow 0$ 时, $\sigma(e_d)$ 以指数速率平滑衰减至0, 制导系统逐渐转由终端姿态约束主导, 优先保证对接角度的精确性。

基于权重因子 $\sigma(e_d)$ 构造参考航向指令 $\psi_d(t)$ 为趋近航向与对准航向的组合:

$$\psi_d(t) = \sigma(e_d)\psi_i(t) + (1 - \sigma(e_d))\psi \quad (13)$$

其中, $\psi_i(t) = \arctan(y_{ki} - y_i, x_{ki} - x_i)$ 表示瞬时视线角。

虽然 $\psi_i(t)$ 在 $e_d \rightarrow 0$ 时存在数学定义的奇异性,但由于权重函数 $\sigma(e_d)$ 在原点处具有更高阶的收敛速度,使得合成指令满足极限存在条件:

$$\lim_{e_d \rightarrow 0} \psi_d(t) = \lim_{e_d \rightarrow 0} (\sigma(e_d)\psi_i(t)) + \lim_{e_d \rightarrow 0} ((1 - \sigma(e_d))\psi) = \psi \quad (14)$$

为配合航向机动并确保安全停泊,速度 $u_d(t)$ 设计为关于距离误差 e_d 的饱和单调函数:

$$u_d(t) = u_{\max} \tanh(\kappa e_d(t)) \quad (15)$$

其中, $u_{\max}$ 为巡航速度上限, κ 为减速增益。

该速度可以保证 USV 在对接过程中远距离时全速航行,而在抵近对接泊位时自动平滑减速,最终满足终端速度 $u_d \rightarrow 0$ 的对接停泊条件。

关于临界距离阈值 d 的选取。在本文设计中, d 的取值严格基于 CyberShip II 船模的载体尺寸及其动力学约束^[18]。由于 USV 具有典型的欠驱动特性,在抵近泊位前需要充足的物理空间进行姿态调整以克服运动耦合影响。因此,本文将制导模态的切换过渡区设定在 5~10 m。

3.3 控制层-基于积分增广状态的抗扰 LQR 控制

制导层输出的参考指令 $[\psi_d, u_d]^T$ 构成了底层控制系统的实时跟踪基准。承接 2.2 节已建立的积分增广状态模型与二次型性能指标,本节旨在利用 HJB 理论框架求解最优控制问题,从而推导出系统最优状态反馈增益矩阵^[19]。

定义值函数:

$$V_i(\xi_i^{\text{aug}}, t) = \min_{\tau_i} \left\{ \phi_i(\xi_i^{\text{aug}}(T)) + \int_t^T L_i(\xi_i^{\text{aug}}(\tau), \tau_i(\tau)) d\tau \right\} \quad (16)$$

其满足 HJB 方程:

$$-\frac{\partial V_i}{\partial t} = \min_{\tau_i} \left\{ L_i + \left(\frac{\partial V_i}{\partial \xi_i^{\text{aug}}} \right)^T (A^{\text{aug}} \xi_i^{\text{aug}} + B^{\text{aug}} \tau_i) \right\} \quad (17)$$

边界条件为:

$$V_i(\xi_i^{\text{aug}}, T) = \phi_i(\xi_i^{\text{aug}}(T)) \quad (18)$$

对右边关于 τ_i 求极小值:

$$\frac{\partial}{\partial \tau_i} [\cdot] = R \tau_i + (B^{\text{aug}})^T \frac{\partial V_i}{\partial \xi_i^{\text{aug}}} = 0 \Rightarrow \tau_i^* = -R^{-1}(B^{\text{aug}})^T \frac{\partial V_i}{\partial \xi_i^{\text{aug}}} \quad (19)$$

假设值函数具有二次型形式:

$$V_i(\xi_i^{\text{aug}}, t) = \frac{1}{2} (\xi_i^{\text{aug}})^T P(t) \xi_i^{\text{aug}} \quad (20)$$

其中, $P(t)$ 为对称正定矩阵。 $\frac{\partial V_i}{\partial \xi_i^{\text{aug}}} = P(t) \xi_i^{\text{aug}}, \frac{\partial V_i}{\partial t} =$

$\frac{1}{2} (\xi_i^{\text{aug}})^T \dot{P}(t) \xi_i^{\text{aug}}$ 。则关于 $P(t)$ 的微分黎卡提方程:

$$-\dot{P}(t) = P(t)A^{\text{aug}} + (A^{\text{aug}})^T P(t) - P(t)B^{\text{aug}}R^{-1}(B^{\text{aug}})^T P(t) + Q \quad (21)$$

解得最优控制律为:

$$\tau_i^*(t) = -R^{-1}(B^{\text{aug}})^T P(t) \xi_i^{\text{aug}}(t) \quad (22)$$

4 仿真结果与分析

通过数值仿真,系统验证所提出的基于势博弈决策与积分增广 HJB-LQR 控制的多 USV 分层协同对接算法的有效性与鲁棒性。

4.1 实验场景定义与参数配置

仿真对象为 5 艘同构欠驱动 USV。为了验证决策层对不同任务需求的适应性,定义以下两组目标泊位。纵向直线队形:队形中心坐标 $(X_c, Y_c) = (50, 80)$, 纵向对接间距目标位置沿 $X = 50$ 基准线分布,纵向对接间距 $G_y = 5$ m; 横向直线队形:队形中心坐标 $(X_c, Y_c) = (40, 120)$, 横向对接间距 $G_x = 5$ m, 期望艏向均锁定为 $\psi_d = \frac{\pi}{2}$ 。

动力学中惯性矩阵与线性阻尼矩阵分别设定为 $M = \text{diag}([25.8, 33.8, 2.76])$ 和 $D = \text{diag}([12, 17, 0.5])$, 在安全约束与成本函数设定上,取遗忘因子 $\sigma = 0.3$, 设定状态惩罚矩阵 Q 中目标跟踪权重 $q_{v1} = 80, q_{v2} = 8, q_{v3} = 10$; 为了评估系统综合性能及配置势场强度,设定队形保持权重 $q_{\eta} = 5, q_{\eta} = 1$ 以及避碰安全惩罚权重 $q_a = 3 \times 10^5$ 。

4.2 分层协同控制架构的基础可行性验证

本实验旨在验证所提 3 层控制架构在理想无扰动环境下的基础有效性。实验选用经典纵向和横向直线队形的构型为测试场景,重点考察系统从决策分配、轨迹生成到底层跟踪的闭环协同性能。

仿真过程,5 艘初始位置随机散开的 USV 通过决策层的势博弈算法进行分布式协商纵向对接如图 1 所示。队形以 $X=50$ 为基准线,严格满足 $G_y=5$ m 的间距约束。

在相同的环境模型下,横向队形的对接轨迹如图 2 所示。该队形严格遵循 $G_x=5$ m 的横向间距约束,且所有 USV 的期望艏向均统一锁定为 $\psi_d = \frac{\pi}{2}$ 。最终,所有 USV 稳态误差渐近收敛至 0.1 m 并完成锁定。

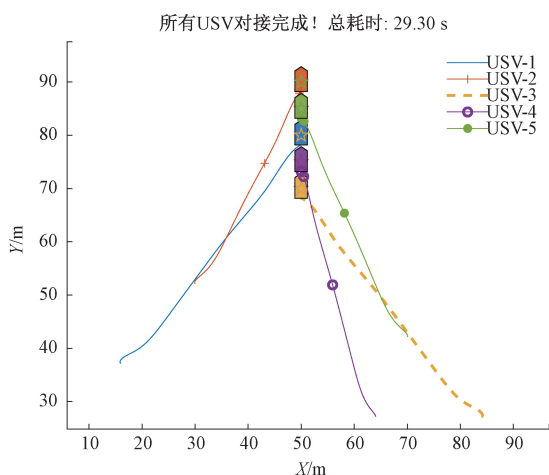


图1 基础状态的无扰动纵向队形对接轨迹

Fig. 1 Longitudinal formation docking trajectory without disturbances based on the baseline state model

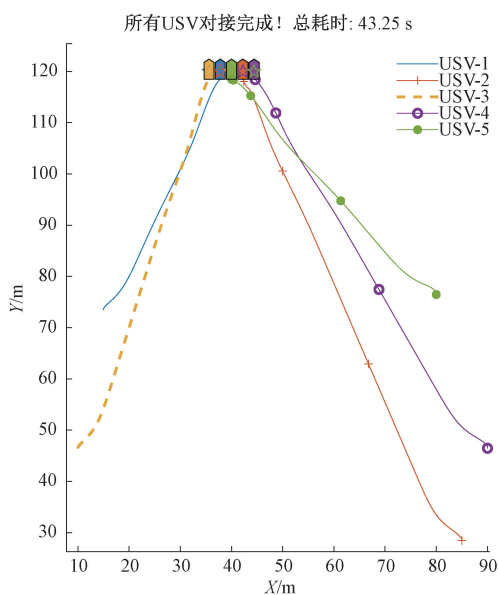


图2 基础状态的无扰动横向队形对接轨迹

Fig. 2 Lateral formation docking trajectory without disturbances based on the baseline state model

4.3 增广状态下的协同对接性能验证

为验证基于积分增广状态反馈的闭环系统在纵向和横向两个经典对接场景下的收敛性与稳定性。实验设置5艘USV初始处于横向散开的随机分布状态,目标任务为构建纵向直线编队并完成对指定对接泊位的精准停泊。5艘USV依次完成纵/横向对接任务由图3和4所示。

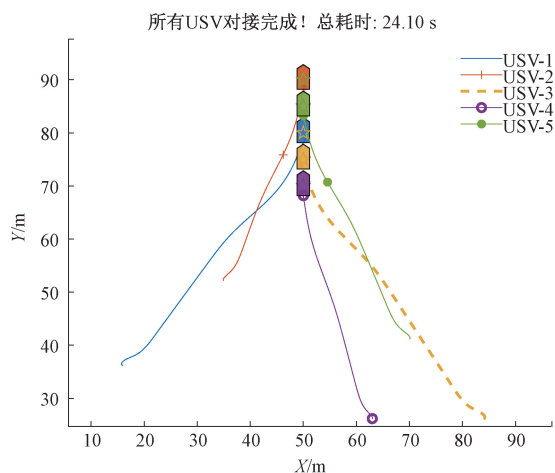


图3 增广状态的无扰动纵向对接轨迹

Fig. 3 Longitudinal docking trajectory without disturbances based on the augmented state model

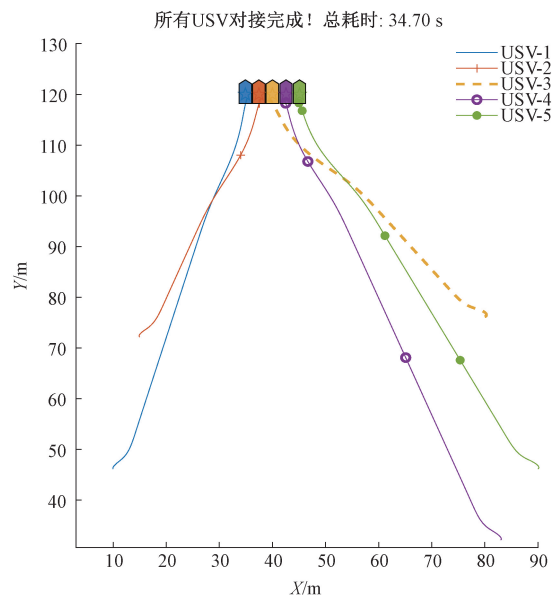


图4 增广状态的无扰动横向对接轨迹

Fig. 4 Lateral docking trajectory without disturbances based on the augmented state model

基于势博弈的任务分配算法在0.2 s内完成纳什均衡寻优,自动生成无碰撞风险的最优目标序列。在HJB-LQR控制律驱动下,各USV迅速消除位置偏差,稳态误差渐近收敛至0.1 m以下,验证了算法在纵/横向维度上的精准定位能力。

4.4 控制层的抗扰鲁棒性对比与机理分析

为评估积分增广状态的控制架构在持续外部干扰下的终端稳态精度与鲁棒性,在仿真全过程中引入常值环境扰动向量。基础状态下的纵向对接如图5所示,横向对接如图6所示。可见在基础控制架构下,由于缺少积

分环节,导致 USV 在出现收敛受阻,仿真界面提示“已完成:0/5”,表明存在 USV 因误差超过锁定阈值而导致任务失败。

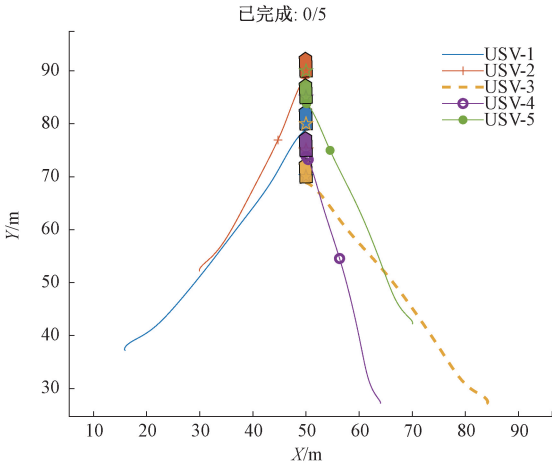


图 5 常值干扰下基础状态模型的纵向对接轨迹
Fig. 5 Longitudinal docking trajectory of the baseline state model under constant disturbances

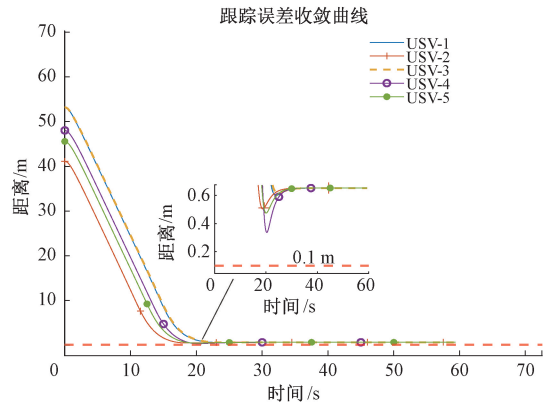


图 7 常值干扰下基础状态模型的纵向对接位置误差
Fig. 7 Longitudinal docking error of the baseline model under constant disturbances

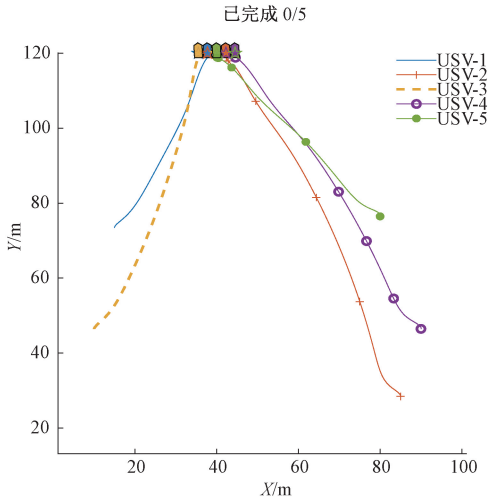


图 6 常值干扰下基础状态模型的横向对接轨迹
Fig. 6 Lateral docking trajectory of the baseline state model under constant disturbances

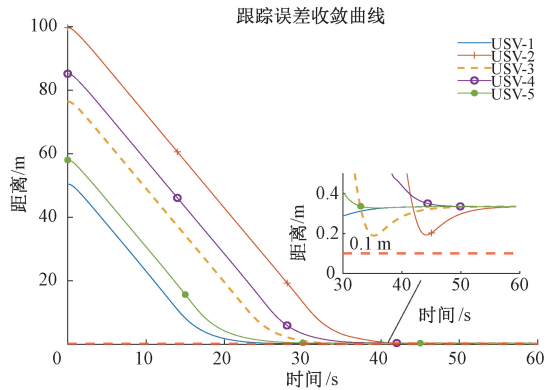


图 8 常值干扰下基础状态模型的横向对接位置误差
Fig. 8 Lateral docking position error of the baseline state model under constant disturbances

为了定量分析控制精度,进一步提取了位置误差数据:如图 7(纵向)和 8(横向)所示,在常值干扰作用下,基础模型的误差曲线虽能快速下降,但最终分别停滞在 0.3 和 0.6 m 区间震荡,始终无法穿过 0.1 m 的设定阈值边界线。

相比之下,积分增广 HJB-LQR 策略通过积分补偿机制有效解决了这一问题。纵向对接效果如图 9 所示,横向对接效果如图 10 所示,说明增广状态 ξ^{aug} 能够利用累积误差自动生成补偿抵消外部扰动,纵向横向对接对应的误差

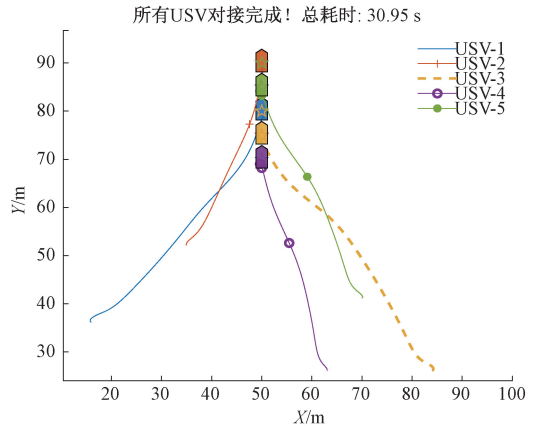


图 9 常值干扰下增广状态模型的纵向对接轨迹
Fig. 9 Longitudinal docking trajectory of the augmented state model under constant disturbances

曲线如图 11~12 所示,在经历短暂过渡后,迅速平滑地收敛至 0.1 m 阈值以下,实现了真正意义的精确对接。

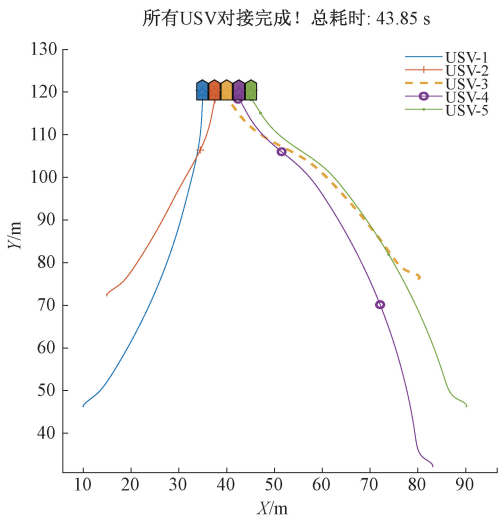


图 10 常值干扰下增广状态模型的横向对接轨迹
Fig. 10 Lateral docking trajectory of the augmented state model under constant disturbances

为进一步从性能指标角度评估闭环系统的动态优化过程,提取式(5)定义的跟踪成本、队形成本、避碰安全成本、能耗成本以及系统总成本随时间的演化曲线(图 13),以及全过程速度变化(图 14)。

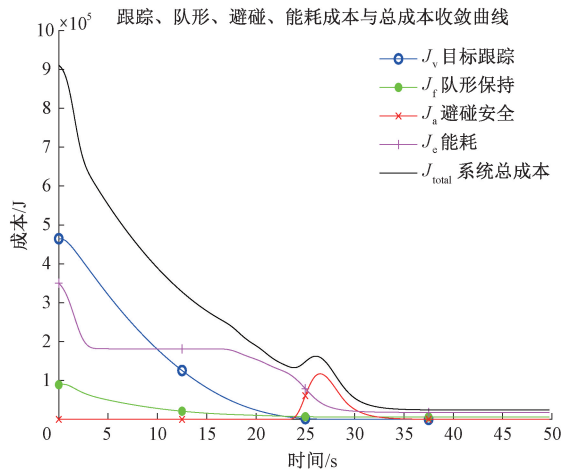


图 13 跟踪/队形/避碰安全/能耗及系统总成本曲线
Fig. 13 Tracking, formation, collision-avoidance, energy, and overall system cost curves

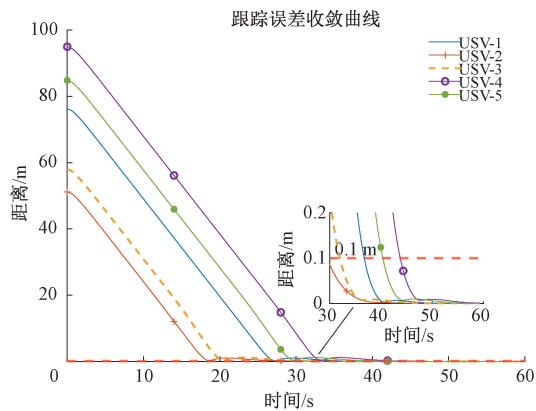


图 11 常值干扰下增广状态模型横向对接位置误差
Fig. 11 Lateral docking position error of the augmented state model with constant disturbances

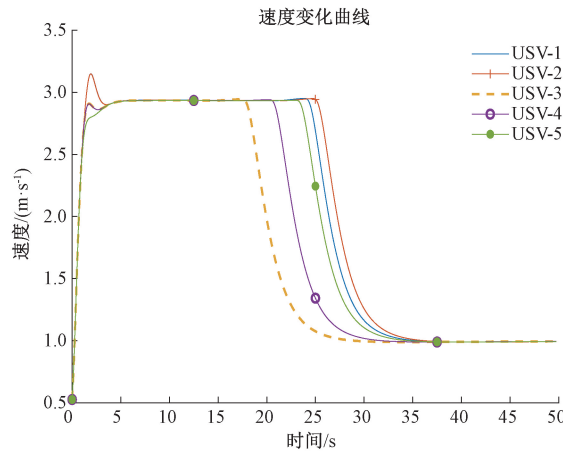


图 14 各无人船速度响应与收敛曲线
Fig. 14 Speed response and convergence profiles of individual USVs

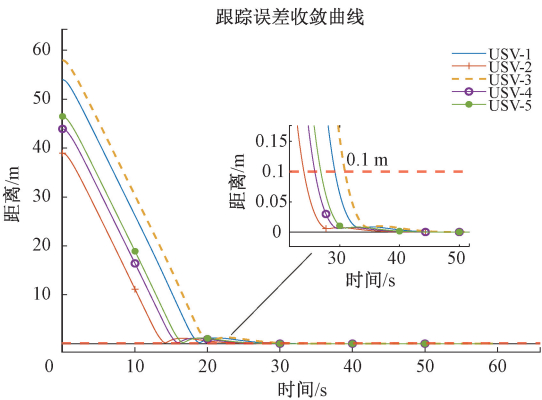


图 12 常值干扰下增广状态模型的纵向对接位置误差
Fig. 12 Longitudinal docking position error of the augmented state model under constant disturbances

可以看出,各分项成本在初始阶段较大,随后随 USV 逼近对接泊位并完成队形调整而快速下降;中后期由于对接过程中避碰成本的变化导致了总成本出现较大的波动,但随着 USV 速度调节作用确保对接过程始终处于安全域内,碰撞成本随之下降,最终系统总成本随各分项成本同步逐渐收敛。经实验数据分析,相较于基础状态控制架构,引入积分增广项后系统的总能耗成本显著降低了约 46%,这进一步表明所设计控制策略能够有效降低系统运行代价并实现安全高效对接。

同时,为直观且严谨地验证多 USV 对接过程的安全性,本文提取并计算了全过程中任意两船间的相对欧氏距离,其随时间变化的相对距离曲线如图 15 所示。图 15 中最下方粗虚线代表系统设定的底层绝对避障安全阈值,细虚线代表势博弈框架下的软性惩罚阈值。通过图 15 中的局部放大图可以清晰观察到,即使在系统收敛、轨迹交汇最密集的阶段,各船只间的实际距离也始终严格保持在安全阈值以内。

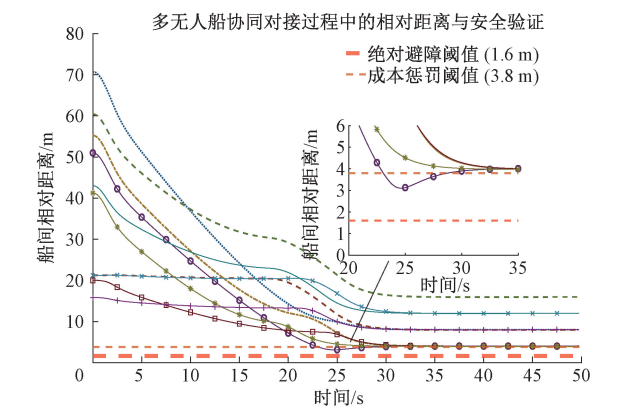


图 15 多 USV 协同对接过程中两两相对距离曲线

Fig. 15 Relative distance curves between each pair of USVs during the collaborative docking process

4.5 时效分析

为了排除初始位置随机性对实验结论的影响,本研究设计了 32 组不同的初始位置场景,并对每组场景在完全相同的初始条件下进行了 4 次重复对比仿真,如表 1 所示。

表 1 5 艘 USV 协同对接任务耗时统计表

Table 1 Statistics table for mission duration of five USVs in coordinated docking

对接场景	控制架构	环境条件	平均总耗时/s	标准差/s	对接成功率/%
纵向对接	基础状态模型	无扰动	31.52	1.24	100
		常值扰动	—	—	0
	积分增广模型	无扰动	22.85	0.95	100
		常值扰动	34.12	1.58	100
横向对接	基础状态模型	无扰动	35.80	1.42	100
		常值扰动	—	—	0
	积分增广模型	无扰动	28.45	1.10	100
		常值扰动	36.20	1.85	100

注:0 代表任务失败

实验统计表明,在 32 组不同场景的均值对比中,积

分增广模型展现出显著的效率优势。在理想环境下,增广模型较基础状态模型的平均对接耗时缩短了约 20%。由于每组实验的初始位置严格一致,这一结果确凿地证明了增广状态优化了系统的动态响应过程。

标准差分析进一步验证了算法的稳定性。实验结果显示,在相同的初始位置下,4 次重复实验的耗时偏差几乎为 0;而在全部 32 组不同场景间,增广模型的总耗时标准差均保持在 2.0 s 以内。这说明该算法具有极高的确定性响应特征。

干扰性对比揭示了控制架构对任务成败的决定性影响。在持续常值扰动作用下,32 组实验中的基础模型均表现出不同程度的稳态偏离,由于其缺乏对环境载荷的在线补偿能力,无法收敛至 0.1 m 的锁定阈值内,对接成功率 0。与之形成鲜明对比的是,积分增广模型在所有 32 组重复实验中均实现了 100% 的精准对接。进一步证明了增广状态 ξ^{aug} 能够利用累积误差自动生成补偿抵消外部扰动。

为了验证所提基于博弈框架的多无人船协同对接控制方法的实际有效性,本文在湖试基地开展了实船试验。图 16 展示了实船试验的现场环境与实验过程。



图 16 多无人船协同对接实船实验现场

Fig. 16 Field experiment scene of multi-USV cooperative docking

试验分别设置了两组不同的场景(纵向/横向对接),图 17 和 18 分别给出了在这两组场景下多无人船协同对接的实际运行轨迹。

试验过程:各无人船由不同的初始位置起航,上位机监控系统的实时遥测数据显示,各船在驶向目标水域的过程中,能够自主进行相对位置与航向的动态调整,实现了有序收拢与接近。上述试验结果表明,所提方法能够较好地满足多无人船协同对接任务中位姿协同与安全间距保持的要求,确保了各船协同对接运动控制稳定性。这不仅为后续的大集群对接提供了可靠的实验依据,也充分验证了该方法在实际水面作业场景中的工程可行性。

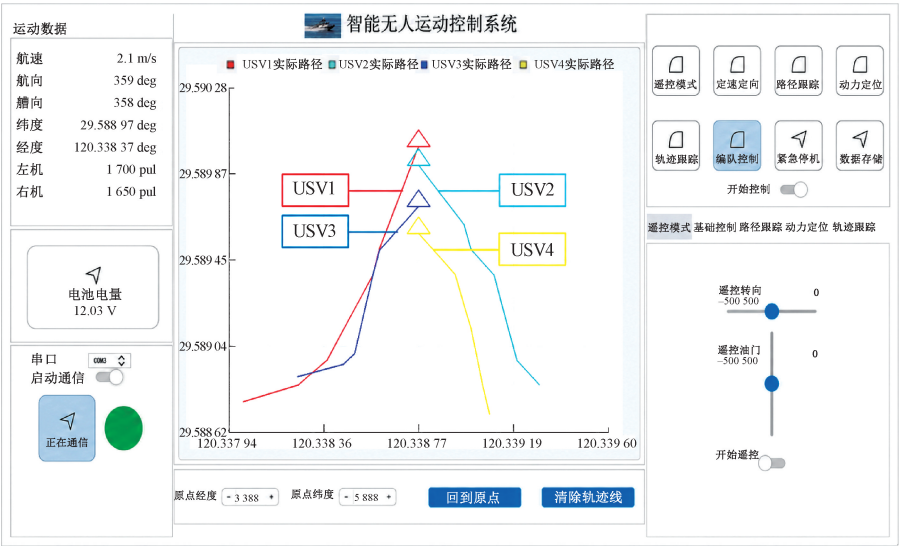


图 17 多无人船纵向协同对接实船实验轨迹

Fig. 17 Field experimental trajectories of multi-USV longitudinal cooperative docking

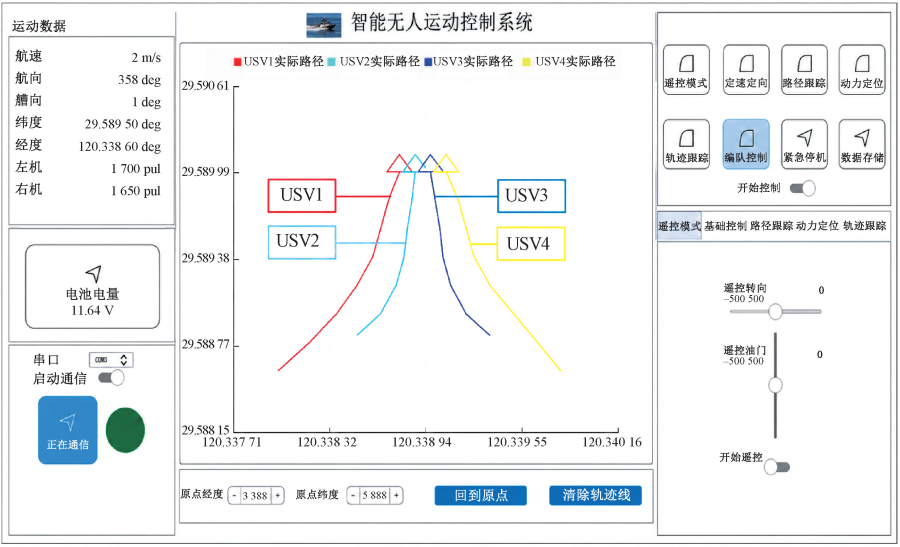


图 18 多无人船横向协同对接实船实验轨迹

Fig. 18 Field experimental trajectories of multi-USV lateral cooperative docking

5 结 论

本研究提出了一种集势博弈任务决策、连续变权重视线制导与积分增广最优控制于一体的分层分布式协同控制框架。该框架通过分布式协商机制驱动集群收敛至纳什均衡点,在最小化全局航行代价的同时,有效调和了个体利益与集群效能之间的冲突。在制导层面,设计的连续变权重制导策略利用 S 型函数动态映射趋近与对准任务的优先级,实现了运动模态的平滑过渡。在控制层

面,基于 HJB-LQR 的增广控制架构将跟踪误差、队形偏差及安全约束违规量以积分项形式引入系统模型,同时通过构建增广状态空间将外部补偿权重转化为状态空间的设计参数,进而在常值扰动下有效抑制稳态误差并实现无人船精准对接。仿真结果验证了增广状态系统相较于基础模型展现出显著更快的动态收敛速度、卓越的鲁棒性与系统能耗平衡能力,且在横/纵向实船对接试验场景中都展现了良好的实用性。未来的研究将进一步探讨通信受限环境下的可行性,以期推动该方案在实船实验中的工程应用。

参考文献

- [1] 于豪, 崔奕山. 改进 IRRT 算法的水面船艇多目标动态路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 17-27.
- YU H, CUI Y SH. Multi-objective dynamic path planning for surface craft based on an improved IRRT algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 17-27.
- [2] 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 for surface craft by fusing A* and DWA algorithms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 301-310.
- [3] 孙明晓, 张允曦, 栾添添, 等. 基于局部地图复杂度动态势场引导的无人船路径规划算法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 321-329.
- SUN M X, ZHANG Y X, LUAN T T, et al. Path planning algorithm for unmanned surface vehicles based on local map complexity adaptive potential field[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(8): 321-329.
- [4] 刘金科, 梁作鹏, 蒲泽森, 等. 基于改进黏菌算法的无人船全局路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(9): 111-125.
- LIU J K, LIANG Z P, PU Z S, et al. Global path planning for unmanned surface vehicles based on an improved slime mold algorithm[J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(9): 111-125.
- [5] ZHOU Z Y, LI M Y, HAO Y. A novel region-construction method for multi-USV cooperative target allocation in air-ocean integrated environments[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(7): 1369.
- [6] KIM H, KIM S H, JEON M, et al. A study on path optimization method of an unmanned surface vehicle under environmental loads using genetic algorithm[J]. Ocean Engineering, 2017, 142: 616-624.
- [7] LONG H, DUAN H B. Cooperative mission planning based on game theory for UAVs and USVs heterogeneous system in dynamic scenario[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2024, 96(9): 1128-1138.
- [8] KALYVA D, PSILLAKIS H E. Distributed control of a mobile robot multi-agent system for Nash equilibrium seeking with sampled neighbor information[J]. Automatica, 2024, 166: 111712.
- [9] ZHANG Z Y, LI Y, ZHU B X, et al. Distributed event-triggered control for multiplayer USV pursuit-evasion games under stochastic switching topologies and input delays[J]. Ocean Engineering, 2026, 357: 125435.
- [10] LI Y F, GE M F, CHEN Q, et al. Hierarchical Nash equilibrium seeking for optimal fault-tolerant formation control of networked MSVs in aggregative games[J]. Ocean Engineering, 2024, 304: 117894.
- [11] 王利国, 矫永康. 基于鲁棒伺服 LQR 的无人机横航向自动着陆控制律设计[J]. 海军航空大学学报, 2020, 35(1): 155-160.
- WANG L G, JIAO Y K. Design of lateral autoland control law for UAV based on robust servo LQR[J]. Journal of Naval Aeronautical University, 2020, 35(1): 155-160.
- [12] NIE J, LIN X G. Improved adaptive integral line-of-sight guidance law and adaptive fuzzy path following control for underactuated MSV[J]. ISA Transactions, 2019, 94: 151-163.
- [13] SUN J R. Linear quadratic optimal control problems with fixed terminal states and integral quadratic constraints[J]. Applied Mathematics and Optimization, 2021, 83(1): 251-276.
- [14] CHEN G D, YAO D Y, ZHOU Q, et al. distributed event-triggered formation control of USVs with prescribed performance[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2022, 35(3): 820-838.
- [15] 刘超, 李淑青, 沈跃, 等. 基于平滑迭代 ESKF 的无人船位姿估计算法[J/OL]. 电子测量技术, 1-11 [2026-02-11].
- LIU CH, LI SH Q, SHEN Y, et al. Pose estimation algorithm for unmanned surface vehicles based on smoothed iterative ESKF[J/OL]. Electronic Measurement Technology, 1-11 [2026-02-11].
- [16] HU X X, LIU SH ZH, XU J W, et al. Integral reinforcement learning based dynamic stackelberg pursuit-evasion game for unmanned surface vehicles[J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 108: 428-435.

[17] WU G X, LUO W J, GUO J M, et al. A sigmoid-plane adaptive control algorithm for unmanned surface vessel considering marine environment interference[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022,44(10): 2076-2090.

[18] 刘超, 叶华生, 沈跃, 等. 基于时延估计与终端滑模的无人船跟踪控制[J]. 电子测量技术, 2025,48(4): 91-100.

LIU CH, YE H SH, SHEN Y, et al. Tracking control of unmanned surface vehicles based on delay estimation and terminal sliding mode [J]. Electronic Measurement Technology, 2025,48(4): 91-100.

[19] TANG D CH, PANG N, WANG X, et al. Zero-sum game-based formation control for multi-USVs under hybrid irregular output constraints [J]. Nonlinear Dynamics, 2025,113(16): 21531-21545.

作者简介



王海滨,2021 年于哈尔滨工程学院获得博士学位,现为哈尔滨理工大学副教授,主要研究方向为智能船舶运动控制和无人系统集群控制。

E-mail:wanghb@hrbust.edu.cn

Wang Haibin received his Ph.D. degree from Harbin Engineering University in 2021. He is currently an associate professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include intelligent ship motion control and swarm control of unmanned systems.



李亚妹,2023 年于石家庄学院获得学士学位,现为哈尔滨理工大学硕士研究生。主要研究方向为基于博弈论的无人船对接决策与控制。

E-mail:a246256181@163.com

Li Yamei received her B. Sc. degree from Shijiazhuang University in 2023. She is currently a master's student at Harbin University of Science and Technology. Her main research interests include decision-making and control for unmanned surface vehicle docking based on game theory.



谢文博(通信作者),2013 年于哈尔滨工程学院获得博士学位,现为上海大学研究员。主要研究方向为无人系统自主规划、控制与智能控制理论。

E-mail:xiewenbo@shu.edu.cn

Xie Wenbo (Corresponding author) received his Ph.D. degree from Harbin Engineering University in 2013. He is currently a researcher at Shanghai University. His main research interests include autonomous planning and control of unmanned systems, and intelligent control theory.



李鸣阳,2018 年于哈尔滨工程大学获得博士学位,现为哈尔滨理工大学副教授,主要研究方向为船舶运动控制和非线性系统容错控制。

E-mail:limingyang@hrbust.edu.cn

Li Mingyang received his Ph.D. degree from Harbin Engineering University in 2018. He is currently an associate professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include ship motion control and fault-tolerant control of nonlinear systems.