



## 仿鱼群行为的欠驱动水面机器人自组织编队重构控制

何树德 毕发奇 赵志甲 陈首彦 刘屿 时昊天

### Fish-school-behavior-inspired Self-organizing Formation Reconfiguration Control for Underactuated USVs

HE Shu-De, BI Fa-Qi, ZHAO Zhi-Jia, CHEN Shou-Yan, LIU Yu, SHI Hao-Tian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c250534>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 数据驱动的溶解氧浓度在线自组织控制方法

Data-driven Online Self-organizing Control for Dissolved Oxygen Concentration

自动化学报. 2023, 49(12): 2582-2593 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210041>

### 城市固废焚烧过程数据驱动建模与自组织控制

Data-driven Modeling and Self-organizing Control of Municipal Solid Waste Incineration Process

自动化学报. 2023, 49(3): 550-566 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220570>

### 干扰条件下无人艇编队有限时间同步控制

Finite Time Synchronized Formation Control of Unmanned Surface Vehicles With External Disturbances

自动化学报. 2024, 50(5): 1047-1058 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c230550>

### 面向离散地形的欠驱动双足机器人平衡控制方法

Balance Control of Underactuated Biped Robot for Discrete Terrain

自动化学报. 2022, 48(9): 2164-2174 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c211008>

### 仿鸟群自推进机制的无人机集群相变控制

Phase Transition Control of UAV Swarm Based on Bird-inspired Self-propelled Mechanism

自动化学报. 2025, 51(5): 960-971 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240598>

### 嵌套运动饱和和下分布式多移动机器人反振荡安全编队控制

Distributed Multi-mobile Robot Anti-oscillation Safety Formation Control With Nested Motion Saturation

自动化学报. 2025, 51(3): 658-668 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240444>

# 仿鱼群行为的欠驱动水面机器人自组织编队重构控制

何树德<sup>1,2</sup> 毕发奇<sup>1</sup> 赵志甲<sup>1,3</sup> 陈首彦<sup>1,3</sup> 刘屿<sup>4</sup> 时昊天<sup>5</sup>

**摘要** 受鱼群自组织行为启发,提出一种面向欠驱动水面机器人(USV)的自组织编队架构,以解决复杂海洋环境下多 USV 编队重构控制问题.该架构采用分布式策略,支持任意 USV 按需担任临时领导者并重构树状拓扑,使编队构型随环境自适应调整.在此基础上,首先基于鱼群穿越狭窄通道的疏散行为机制,提出一种仿鱼群疏散编队重构算法,将通行优势排序与有限状态机切换结合,实现受限环境中的高效、平滑重构.然后,基于鱼群逃逸行为机制,设计自组织动态分裂-合并编队重构算法,将重构问题建模为多智能体路径规划问题,并结合 Dubins 路径和改进遗传算法优化满足 USV 运动学与安全间距约束的重构轨迹.最后,结合横截函数法设计编队控制律,并基于 Lyapunov 理论证明闭环稳定性.仿真结果表明,所提方法在狭窄通道和大型障碍物场景下具有良好的适应性与重构效果.

**关键词** 仿鱼群行为;自组织;编队重构;欠驱动;水面机器人

**引用格式** 何树德,毕发奇,赵志甲,陈首彦,刘屿,时昊天.仿鱼群行为的欠驱动水面机器人自组织编队重构控制.自动化学报,2026,52(5):1-14

**DOI** 10.16383/j.aas.c250534 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250534

## Fish-school-behavior-inspired Self-organizing Formation Reconfiguration Control for Underactuated USVs

HE Shu-De<sup>1,2</sup> BI Fa-Qi<sup>1</sup> ZHAO Zhi-Jia<sup>1,3</sup> CHEN Shou-Yan<sup>1,3</sup> LIU Yu<sup>4</sup> SHI Hao-Tian<sup>5</sup>

**Abstract** Inspired by the self-organizing behaviors of fish schools, this paper proposes a self-organizing formation architecture for underactuated unmanned surface vehicles (USVs) to address the formation reconfiguration control problem in complex marine environments. The architecture adopts a distributed strategy, allowing any USV to act as a temporary leader when needed and reconstructing a tree-based topology, thereby enabling adaptive formation adjustment in response to environmental changes. Based on the evacuation behavior mechanism of fish schools navigating narrow passages, a formation reconfiguration algorithm is first proposed, which combines sorting of passage advantages with finite-state machine switching to achieve efficient and smooth reconfiguration in constrained environments. Then, based on the escape behavior mechanism of fish schools, a self-organizing dynamic split-merge formation reconfiguration algorithm is designed, where the reconfiguration problem is formulated as a multi-agent path finding problem, and then the Dubins paths and an improved genetic algorithm are combined to optimize reconfiguration trajectories under USV kinematics and safety distance constraints. Finally, a formation control law is designed by using the transverse function method, and closed-loop stability is proved based on Lyapunov theory. Simulation results show that the proposed method achieves good adaptability and reconfiguration performance in narrow-passage and large obstacle scenarios.

**Keywords** fish-school-behavior-inspired; self-organizing; formation reconfiguration; underactuated; unmanned surface vehicles

收稿日期 2025-10-13 录用日期 2026-01-12  
Manuscript received October 13, 2025; accepted January 12, 2026

国家自然科学基金(62403154, 62403155, 62273112, 62433011, 62573144), 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室开放基金(MESTA-2024-A002), 广东省自然科学基金(2025A1515010885, 2023A1515110073, 2024B1515120013, 2023B1515120018, 2023B1515120019), 广州市科技计划(2025A04J3854, 2025A03J3135, 2025A04J5629)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62403154, 62403155, 62273112, 62433011, 62573144), Open Project of Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources (MESTA-2024-A002), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2025A1515010885, 2023A1515110073, 2024B1515120013, 2023B1515120018, 2023B1515120019), and Science and Technology Planning Project of Guangzhou (2025A04J3854, 2025A03J3135, 2025A04J5629)

本文责任编辑 刘志杰

Recommended by Associate Editor LIU Zhi-Jie

1. 广州大学机械与电气工程学院 广州 510006 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室 广州 510300 3. 广东普通高校低空智能无人系统技术重点实验室 广州 510006 4. 华南理工大学自动化科学与工程学院 广州 510640 5. 广州大学电子与通信工程学院 广州 510006

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300 3. Guangdong Key Laboratory of Low-altitude Intelligent Unmanned Systems Technology for General Universities, Guangzhou 510006 4. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640 5. School of Electronics and Communication Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006

**Citation** He Shu-De, Bi Fa-Qi, Zhao Zhi-Jia, Chen Shou-Yan, Liu Yu, Shi Hao-Tian. Fish-school-behavior-inspired self-organizing formation reconfiguration control for underactuated USVs. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(5): 1-14

随着海洋经济的快速发展和海洋强国战略的深入推进,水面机器人(unmanned surface vehicle, USV)作为海洋智能装备的核心组成部分,在海洋环境监测、海上搜救、军事侦察、海洋资源勘探等关键领域发挥着不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>.特别是在复杂海况和危险环境下,水面机器人编队协同作业能够显著提升任务执行效率和系统鲁棒性<sup>[4]</sup>.其中,欠驱动水面机器人凭借其结构简单、成本低廉、能耗较低等独特优势,已成为海洋机器人研究的热点方向<sup>[5]</sup>.然而,水面机器人的欠驱动特性(两个独立控制输入、三个被控自由度)及其作业环境的复杂性使得水面机器人编队控制仍面临诸多挑战.

针对欠驱动水面机器人编队控制问题, Jin<sup>[6]</sup>通过控制跟随者与领导者之间的视线距离和角度来降低被控自由度,从而克服欠驱动特性带来的控制设计困难.基于这种思想, Gu等<sup>[7]</sup>设计一种基于有限时间观测器的分布式控制方案,实现欠驱动水面机器人在协同路径跟踪机动中的碰撞避免与通信连接保持. Dai等<sup>[8]</sup>则通过引入“额外控制输入”来解决欠驱动特性带来的控制设计难题,并利用屏障 Lyapunov 函数实现水面机器人之间的通讯连接保持和碰撞避免.然而,这些研究主要关注开阔水域的编队控制.为解决作业环境中遇到的受阻水道问题, Lu等<sup>[9]</sup>基于方位刚性理论提出可伸缩预定义编队形状的编队控制方法.然而,伸缩编队控制只能改变编队形状的大小而无法进行形状变换,这限制了其在一些特殊场景下的应用.为此, Zhang等<sup>[10-11]</sup>提出“线性编队控制”方法以实现编队形状的大小和样式变换,拓宽了其应用场景.值得指出的是,文献[6-11]都采用预定义的几何构型,其编队形状无法依据动态环境进行灵活变换.因此,复杂环境下欠驱动水面机器人编队控制仍存在以下挑战: 1) 传统编队控制方法多采用预定义的编队构型,在面对狭窄通道、大型障碍物等复杂环境时,依赖预设的控制策略和理想的通信条件,缺乏自主决策和动态调整机制,容易导致任务失败<sup>[12]</sup>; 2) 水面机器人的欠驱动特性使得编队重构过程中的轨迹规划除了要满足安全约束条件之外,还需要满足二阶非完整约束条件.

考虑到现有方法的局限性,本文转向自然界寻求解决方案.生物群体历经亿万年进化,发展出高效的分布式协调机制,能够仅通过局部信息交互实现复杂的集体行为<sup>[13-15]</sup>.班晓娟等<sup>[16]</sup>研究人工鱼群

的自组织行为,揭示了鱼群如何通过简单的局部规则实现群体协调运动.段海滨等<sup>[17]</sup>的无人机集群研究表明,借鉴鸟群的自推进粒子模型能够实现灵活的相态转换. Zhu等<sup>[18]</sup>提出的自组织神经系统能够高效地完成分层控制与任务分配,并在环境变化或部分节点失效时,通过选举新的领导者和重构拓扑,实现快速的结构重组. Larrieu等<sup>[19]</sup>研究鱼群通过狭窄开口时的独特机制,发现个体鱼类通过维持“社交泡泡”——一种动态调整的认知空间,在避免碰撞的同时保持群体凝聚力,实现了无堵塞的有序疏散.此外,生物群在面对捕食者威胁时,会通过快速的信息传播识别威胁,然后分裂成多个子群以降低被捕食风险,待威胁解除后再重新合并<sup>[20-21]</sup>.生物群体所展现的局部信息交互的分布式决策机制,具有高度的鲁棒性和适应性,在面对环境变化和个体失效时展现出优异的自修复能力,为解决大规模智能体系统的协同控制问题提供了新的思路<sup>[22-23]</sup>.

受自组织神经系统的启发,本文提出一种针对欠驱动水面机器人的自组织编队架构(self-organizing unmanned surface vehicle formation architecture, SoUSV-FA),编队中的任何一个水面机器人都能够根据环境变化和任务需求,遵循选举机制动态地成为临时领导者,并围绕自身快速重建一个树状的通信与控制拓扑.在此框架下,领导者的选举是实现编队形状动态重构的关键步骤.为此,本文深入研究鱼群通过狭窄开口时的疏散机制,提出仿鱼群疏散机制的算法,将鱼群的“社交泡泡”机制抽象为有限状态机切换的分布式控制策略,通过选举临时领导者排序跟随者通行优势,并结合事件驱动的状态转换机制,实现无碰撞的动态重构.此外,本文从鱼群的逃逸行为得到启发,提出仿鱼群逃逸行为的编队动态重构算法,通过融合局部感知进行分裂决策和优化合并路径,实现动态结构调整以适应如大型障碍物的复杂环境.本质上,动态合并重构过程是一个多智能体路径规划(multi-agent path finding, MAPF)问题<sup>[24]</sup>.考虑到欠驱动水面机器人的特性,本文采用满足曲率约束的最短可行路径的 Dubins 路径<sup>[25]</sup>作为基本方法.然而,多 USV 的 Dubins 路径协调是一个 NP 难问题.作为一种启发式全局搜索算法,遗传算法对于目标函数与可行性约束紧密耦合的 NP 难组合优化问题,能通过种群进化机制和概率性搜索策略避免这些问题<sup>[26-27]</sup>.为此,本文提出一种新的基于 Dubins 路径和改进遗

传算法的 MAPF 求解器, 通过自适应参数调节、精英保留策略和局部搜索增强, 在保证安全间隔的同时优化合并轨迹。

综上所述, 本文的主要贡献包括:

1) 提出一种面向欠驱动水面机器人的自组织编队架构, 其具备自适应队形重构能力;

2) 设计一种仿鱼群疏散行为的自组织编队重构算法, 在 SoUSV-FA 中基于通行优势排序和状态机切换, 实现编队在狭窄通道中的动态协调通行;

3) 设计一种仿鱼群逃逸行为的自组织编队动态分裂-合并算法, 针对欠驱动水面机器人设计融合 Dubins 路径与改进遗传算法的 MAPF 求解器, 优化整体重构轨迹, 使编队高效通过大型障碍物, 增强系统在复杂环境中的结构适应性。

## 1 问题描述与预备知识

### 1.1 欠驱动水面机器人运动模型

考虑由  $N$  个仅能提供纵荡方向推力以及转向力矩的欠驱动水面机器人组成的编队, 其中第  $i$  个水面机器人的运动学和动力学模型可表示为<sup>[8]</sup>:

$$\dot{\eta}_i = J(\psi_i)\nu_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$M\dot{\nu}_i + C(\nu_i)\nu_i + D(\nu_i)\nu_i = \tau_i + \tau_{w,i} \quad (2)$$

其中,  $\tau_i = [\tau_{ui}, 0, \tau_{ri}]^T$  是控制输入,  $\tau_{ui}$  为纵荡方向推力,  $\tau_{ri}$  为转向力矩;  $\tau_{w,i}$  为未知的时变环境扰动;  $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$  是大地坐标系下的第  $i$  个水面机器人的输出, 包括位置  $(x_i, y_i)$  和艏摇角  $\psi_i$ ;  $J(\psi_i)$  是旋转矩阵;  $\nu_i = [u_i, v_i, r_i]^T$  是体坐标系下的第  $i$  个水面机器人速度向量, 包括纵荡速度、横荡速度和艏摇角速度;  $M = M^T > 0$ ,  $C(\nu_i)$ ,  $D(\nu_i)$  分别是惯性参数矩阵、科里奥利和向心力矩阵以及阻尼参数矩阵, 矩阵形式如下:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$C(\nu_i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v_i - m_{23}r_i \\ 0 & 0 & m_{11}u_i \\ m_{22}v_i + m_{23}r_i & -m_{11}u_i & 0 \end{bmatrix}$$

$$D(\nu_i) = \begin{bmatrix} d_{11}(u_i) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}(v_i, r_i) & d_{23}(v_i, r_i) \\ 0 & d_{32}(v_i, r_i) & d_{33}(v_i, r_i) \end{bmatrix}$$

其中,  $m_{11}$ ,  $m_{22}$  和  $m_{33}$  分别表示纵荡、横荡方向的总质量及绕  $z$  轴的总转动惯量;  $m_{23}$  为横荡-艏摇耦

合惯性项; 对角项  $d_{11}$ ,  $d_{22}$ ,  $d_{33}$  为各自由度主阻尼系数; 非对角项  $d_{23}$ ,  $d_{32}$  为速度耦合产生的阻尼力或力矩. 定义  $d_{w,i} = M^{-1}\tau_{w,i} = [d_{wu,i}, d_{wv,i}, d_{wr,i}]^T$ . 对上述水面机器人运动学模型 (1) 和动力学模型 (2) 展开可得如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = u_i \cos \psi_i - v_i \sin \psi_i \\ \dot{y}_i = u_i \sin \psi_i + v_i \cos \psi_i \\ \dot{\psi}_i = r_i \\ \dot{u}_i = \kappa_{11}v_i r_i + \kappa_{12}r_i^2 + \lambda_1 d_{11}u_i + \gamma_1 \tau_{ui} + d_{wu,i} \\ \dot{v}_i = \kappa_{21}u_i r_i + \kappa_{22}u_i v_i + \lambda_{21}(d_{22}v_i + d_{23}r_i) + \\ \quad \lambda_{22}(d_{32}v_i + d_{33}r_i) + \gamma_2 \tau_{ri} + d_{wv,i} \\ \dot{r}_i = \kappa_{31}u_i r_i + \kappa_{32}u_i v_i + \lambda_{31}(d_{22}v_i + d_{23}r_i) + \\ \quad d_{wr,i} + \lambda_{32}(d_{32}v_i + d_{33}r_i) + \gamma_3 \tau_{ri} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\kappa_{11} = m_{22}/m_{11}$ ;  $\kappa_{12} = m_{23}/m_{11}$ ;  $\kappa_{21} = (-m_{33} \times m_{11} + m_{23}^2)/\Delta$ ;  $\kappa_{22} = m_{23}(m_{22} - m_{11})/\Delta$ ;  $\kappa_{31} = m_{23}(m_{11} - m_{22})/\Delta$ ;  $\kappa_{32} = m_{22}(m_{11} - m_{22})/\Delta$ ;  $\lambda_1 = -1/m_{11}$ ;  $\lambda_{21} = -m_{33}/\Delta$ ;  $\lambda_{22} = m_{23}/\Delta$ ;  $\lambda_{31} = m_{23}/\Delta$ ;  $\lambda_{32} = -m_{22}/\Delta$ ;  $\gamma_1 = 1/m_{11}$ ;  $\gamma_2 = -m_{23}/\Delta$ ;  $\gamma_3 = m_{22}/\Delta$ ;  $\Delta = m_{22}m_{33} - m_{23}^2 > 0$ .

**假设 1.** 外部时变扰动  $\tau_{w,i}$  及其一阶导数有界, 即存在未知正常数  $\bar{\tau}_{w,i}$  和  $\bar{d}_i$  使得  $\|\tau_{w,i}\| \leq \bar{\tau}_{w,i}$  且  $\|\dot{d}_{w,i}\| \leq \bar{d}_i$ .

### 1.2 Dubins 路径

Dubins 路径本质上是求解欧几里得平面  $\mathbf{R}^2$  中满足曲率约束的非完整系统在给定起始位姿与目标位姿之间的最优路径. 定义起始位姿  $\eta_s = [x_s, y_s, \psi_s]^T$  和目标位姿  $\eta_g = [x_g, y_g, \psi_g]^T$ ,  $\Gamma_D$  表示所有满足边界条件  $\gamma(0) = \eta_s$ ,  $\gamma(1) = \eta_g$  且其平面轨迹曲率  $\kappa(s)$  满足  $|\kappa(s)| \leq 1/\rho_{\min}$  ( $\forall s \in [0, 1]$ ) 的可行路径  $\gamma$  的集合, 其中  $\rho_{\min} > 0$  为最小转弯半径. 路径优化问题可形式化为:

$$L_D(\eta_s, \eta_g) = \min_{\gamma \in \Gamma_D} \int_0^1 \|\dot{\gamma}(s)\| ds \quad (4)$$

基于微分几何理论, Dubins 证明了连接任意两个位姿的最短路径最多包含三段基本几何元素<sup>[25]</sup>: 左转圆弧段 (L)、右转圆弧段 (R) 和直线段 (S). 这一结论极大地简化了求解过程, 所有潜在的最优 Dubins 路径可完全划分为六种典型模式: 四种 CSC (圆弧-直线-圆弧) 类型 {LSL, RSR, LSR, RSL}, 两种 CCC (圆弧-圆弧-圆弧) 类型 {LRL, RLR}.

### 1.3 编队控制目标

本文考虑由  $N$  个具有系统模型 (1)、(2) 的欠驱动水面机器人组成的编队. 编队中每个水面机器人的参考轨迹  $\eta_{g,i}(t) = [x_i^*, y_i^*, \psi_i^*]^T$  根据作业任务预先生成. 然而, 当编队遇到障碍物/暗礁或任务变更需要进行编队重构时,  $\eta_{g,i}(t)$  由本文所设计的自组织编队重构算法生成.

**假设 2.** 参考轨迹  $\eta_{g,i}(t)$  有界、二阶可导, 且其一阶和二阶导数满足有界条件:  $B_i = \sup_{t \geq 0} \|\dot{\eta}_{g,i}(t)\|$ ,  $\bar{B}_i = \sup_{t \geq 0} \|\ddot{\eta}_{g,i}(t)\|$ .

在假设 1 和假设 2 满足下, 本文的目标是设计编队重构算法以及编队控制律以实现编队构型的动态重构以及编队跟踪, 其核心原理框图如图 1 所示, 具体的目标如下.

1) 设计编队重构算法, 使得编队在面对狭窄通道或大型障碍物等环境约束时, 能够实现编队拓扑与几何构型的动态自组织重构, 且在整个重构过程中, 任意两个水面机器人  $i$  和  $k$  的位置向量  $p_i(t)$  和  $p_k(t)$  始终满足安全约束:  $\|p_i(t) - p_k(t)\| \geq d_s$ , 其中  $d_s$  为安全距离.

2) 设计编队控制输入  $\tau_i$ , 使得每个水面机器人都能够跟踪其参考轨迹  $\eta_{g,i}(t)$ , 当编队需要重构时,  $\eta_{g,i}(t)$  由编队重构算法生成.

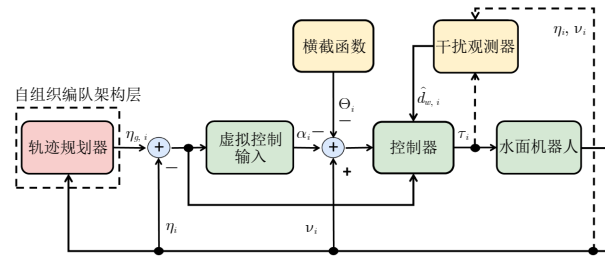


图 1 欠驱动水面机器人编队控制系统框图

Fig.1 Block diagram of the formation control system for underactuated USVs

## 2 自组织水面机器人编队架构构建

由  $N$  个水面机器人组成的编队拓扑结构被建模为一个无环且连通的有向图  $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ . 其中  $\mathcal{V} = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N\}$  表示节点集 (每个节点表示一个水面机器人),  $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$  表示有向边集, 有向边  $(\vartheta_i, \vartheta_j)$  表示从父节点  $\vartheta_i$  到子节点  $\vartheta_j$  的控制指令传递方向. 需要指出的是, 虽然实际的无线通信链路是双向的, 但是图 2 采用有向图建模以准确刻画领导-跟随控制架构中的层级依赖关系. 有向图中的任意两个水面机器人之间仅存在唯一的控制指令传递路径, 形成严格的领导与跟随关系. 然而, 上

述领导者与跟随者之间的关联关系并非固定不变, 而是具有临时性和动态适应性. 由于水面机器人编队常运行于复杂多变的环境 (如狭窄通道或存在大型障碍物的区域), 为保障编队航行的安全, 编队需能实时打破原有领导-跟随关系并重新构建, 即编队的动态重构. 因此, 本文构建自组织水面机器人编队架构以提高水面机器人编队的环境适应性. 在这种架构下, 编队中的任何一个水面机器人都能够根据环境变化和任务需求, 动态地成为临时领导者, 并围绕自身快速重建一个树状的通信与几何拓扑. 这种动态的领导者选举和拓扑重构机制, 使得水面机器人编队在面对复杂环境时具有极高的灵活性和鲁棒性.

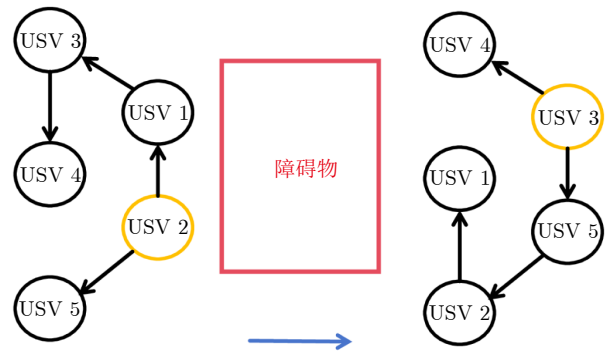


图 2 自组织水面机器人编队架构树结构重构示例

Fig.2 Example of self-organizing USV formation architecture tree structure reconstruction

图 2 展示了自组织编队拓扑重构的全过程, 该树状结构中形成层级化的领导-跟随结构. 图中橙色根节点代表系统当前的临时领导者, 负责全局任务的协调与规划, 并通过层级结构分配任务, 而其他节点作为子节点, 在不同时间段根据任务需求和编队状态变化, 接收父节点传递的指令并执行相应任务; 蓝色箭头方向为编队机动方向, 随着环境变化, 每个水面机器人都可以自主地调整其在编队中的角色, 包括领导者的重新选举和通信拓扑的重构, 进而实现编队的动态重构. 针对水面机器人作业环境中的狭窄通道或者大型障碍物场景, 本文在所构建的自组织水面机器人编队架构下, 分别设计仿鱼群疏散行为算法和仿鱼群逃逸行为的动态分裂-合并算法, 以阐明领导者的选举策略, 从而实现编队队形的动态重构.

### 2.1 仿鱼群疏散行为算法设计

自然界中的鱼群在通过狭窄通道时会形成“认知泡泡”这一独特的空间感知, 每条鱼都能精确维持与邻近个体的“认知距离”, 从而实现无碰撞的有

序疏散. 基于上述集群行为, 本文提出一种仿鱼群疏散行为的水面机器人编队动态重构算法. 该算法模拟鱼群的自组织疏散行为模式, 将“社交泡泡”机制抽象为有限状态机切换的分布式控制策略. 该策略基于排序通行优势选举临时领导者以及事件驱动的状态转换机制, 从而达到贯序通过狭窄通道的目的, 最终实现无碰撞的编队动态重构. 算法的具体设计如下.

首先, 当前领导者融合全体传感器信息, 评估障碍物的规模, 若判断现有编队队形无法整体绕行或分裂绕行, 将触发仿鱼群动态重构机制. 在初始阶段, 系统记录当前队形和编队中心的相对位置  $p^{\text{orig}} = [p_1^{\text{orig}}, p_2^{\text{orig}}, \dots, p_N^{\text{orig}}]^T$ , 其中  $p_i^{\text{orig}} = (x_i^{\text{orig}}, y_i^{\text{orig}})$ , 为后续编队恢复重构提供基准. 为确定通行顺序, 定义前进优势  $S_i$  为:

$$S_i = w_x \phi_x(x_i) + w_y \phi_y(y_i) \quad (5)$$

式中,  $\phi_x(x_i) = x_i / \max_{1 \leq j \leq N} x_j$ ;  $\phi_y(y_i) = 1 - |y_i - y_c| / \Delta y$ ,  $y_c = (y_u + y_l) / 2$ ,  $y_u$  和  $y_l$  分别为障碍物通道的上/下边界,  $\Delta y = \max(|y_u - y_c|, |y_l - y_c|)$  为通道半宽;  $x_i$  和  $y_i$  表示第  $i$  个水面机器人的位置;  $w_x$  表示纵向位置优势权重系数, 反映机器人在前进方向上的领先程度;  $w_y$  为横向居中优势权重系数, 反映机器人在通道中的居中程度. 当前领导者根据各个水面机器人的前进优势  $S_i$  降序排列制定通过序列  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N\}$ .

研究发现, 鱼群会表现出一种“短时抑制”现象, 即, 每条鱼在观察到前方个体开始通过后, 会主动等待一个最小安全时间间隔, 实现避碰并保持鱼群疏散的流畅性. 鉴于此, 本文引入三态有限状态机  $h_i$ , 分别表示水面机器人处于等待通过状态、正在通过状态和通过重组状态:

$$h_i = \begin{bmatrix} h_{i1} \\ h_{i2} \\ h_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1_{\{x_i < x_{\text{obs}} + L_{\text{obs}}\}} (1 - \mathcal{A}_{\pi_k}) \\ 1_{\{x_i < x_{\text{obs}} + L_{\text{obs}}\}} \mathcal{A}_{\pi_k} \\ 1_{\{x_i \geq x_{\text{obs}} + L_{\text{obs}} + \delta_p\}} \end{bmatrix}$$

其中,  $\pi_k$  是根据前进优势得到的通过序列;  $x_{\text{obs}}$  为监测的障碍物起始位置横坐标;  $L_{\text{obs}}$  为监测的障碍物长度;  $\delta_p$  为监测 USV 通过障碍后的安全余量;  $1_{\{\cdot\}}$  为指示函数, 当  $\{\cdot\}$  的条件满足时,  $1_{\{\cdot\}} = 1$ , 否则为 0;  $\mathcal{A}_{\pi_k} \in \{0, 1\}$  为激活指示量, 其定义为

$$\mathcal{A}_{\pi_k} = \begin{cases} 1, & k = 1 \\ 1_{\{x_{\pi_k} - x_{\pi_{k-1}} \geq d_{\text{act}}\}} \mathcal{A}_{\pi_{k-1}}, & k \geq 2 \end{cases}$$

式中,  $d_{\text{act}}$  为激活距离. 根据状态机  $h_i$ , 可设计动态参考轨迹  $\eta_{g, i}(t)$  如下

$$\eta_{g, i} = h_{i1} \eta_{g, i}^{(1)} + h_{i2} \eta_{g, i}^{(2)} + h_{i3} \eta_{g, i}^{(3)} \quad (6)$$

其中,  $\eta_{g, i}^{(1)} = [x_i + \ell_x^{(1)}, y_i + \bar{k}_1(y_c - y_i), \psi_i^{(1)}]^T$  表示等待状态下缓慢向通道中心收敛;  $\eta_{g, i}^{(2)} = [x_i + \ell_x^{(2)}, y_i + \bar{k}_2(y_c - y_i), \psi_i^{(2)}]^T$  表示正在通过状态下加速穿越通道;  $\eta_{g, i}^{(3)} = [x_i + \ell_x^{(3)}, y_i + \bar{k}_3(y_t - y_i), \psi_i^{(3)}]^T$  表示通过重组状态下恢复起始编队队形. 上式中,  $y_t = y_{\text{base}} + y_i^{\text{orig}}$  为纵向目标位置,  $(x_{\text{base}}, y_{\text{base}})$  为通过障碍物后设定的编队中心;  $\ell_x^{(j)}$ ,  $j = 1, 2, 3$  为前进步长;  $\bar{k}_j$ ,  $j = 1, 2, 3$  为横向收敛系数.

为使 USV 平滑地朝向期望方向航行, 艏摇角  $\psi_i^{(l)}$ ,  $l = 1, 2$  和  $\psi_i^{(3)}$  设计为当前位置指向虚拟目标点的方向角. 具体地, 对于等待状态和通过状态, 虚拟目标点定义为  $P_i^{(l)*} = [x_i^{(l)*}, y_i^{(l)*}]^T = [x_i + \ell_x^{(l)}, y_i + \bar{k}_l(y_c - y_i)]^T$ ; 对于重组状态, 虚拟目标点定义为  $P_i^{(3)*} = [x_i^{(3)*}, y_i^{(3)*}]^T = [x_i + \ell_x^{(3)}, y_i + \bar{k}_3(y_t - y_i)]^T$ . 由此, 期望艏摇角可表示为

$$\psi_i^{(l)} = \begin{cases} \text{atan2}(y_i^{(l)*} - y_i, x_i^{(l)*} - x_i), & |y_c - y_i| > \epsilon_t \\ 0, & |y_c - y_i| \leq \epsilon_t \end{cases}$$

$$\psi_i^{(3)} = \begin{cases} \text{atan2}(y_i^{(3)*} - y_i, x_i^{(3)*} - x_i), & |y_t - y_i| > \epsilon_t \\ 0, & |y_t - y_i| \leq \epsilon_t \end{cases}$$

其中,  $\epsilon_t$  为横向位置容差阈值; 函数  $\text{atan2}(y, x)$  返回  $y$  和  $x$  的四象限反正切值<sup>[24]</sup>. 将虚拟目标点坐标代入上式并化简, 可得  $\psi_i^{(l)} = \text{atan2}(\bar{k}_l(y_c - y_i), \ell_x^{(l)})$ ,  $\psi_i^{(3)} = \text{atan2}(\bar{k}_3(y_t - y_i), \ell_x^{(3)})$ .

## 2.2 仿鱼群逃逸行为的动态分裂-合并算法设计

当编队遭遇大型障碍物时, 原有的编队队形难以通过整体路径规划实现有效绕行. 而传统的编队重构方法即使能够完成局部规避, 也可能因为超出通信距离而导致控制策略无法有效实施. 自然界中, 鱼群逃逸行为本质上是一种基于局部交互规则的动态拓扑重构, 个体无需全局信息即可通过感知邻近伙伴实现群体的自组织分裂与合并, 从而躲避捕猎者. 受此机制启发, 本文将大型障碍物视为捕猎者, 提出一种仿鱼群逃逸行为的水面机器人编队动态分裂-合并算法. 该算法主要由三个步骤组成.

### 步骤 1. 编队感知与分裂决策

首先, 当水面机器人检测到障碍物时, 各子节点向父节点汇报传感器数据. 然后, 当前领导者融合全体传感器信息, 评估障碍物的规模, 并计算其凸包面积或投影宽度是否超过预设阈值. 若判断现有编队队形无法整体绕行, 则领导者向下广播分裂

指令。根据障碍物位置定义  $m$  个虚拟质心  $\{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ , 其中, 第  $k$  个质心表示为  $U_k = [x_{\text{obs}} + \delta_c, y_{\text{obs}} + (2k - m - 1)\delta_c]$ ,  $\delta_c$  为质心安全余量。当前编队  $\mathcal{F}$  分裂成  $m$  个子编队  $\{\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_m\}$ , 且每个子编队满足条件  $\mathcal{F}_k = \{i \in \mathcal{F} \mid \|P_i - U_k\|^2 \leq \|P_i - U_j\|^2, \forall j, k \in \{1, \dots, m\}\}$ ,  $\mathcal{F}_i \cap \mathcal{F}_k = \emptyset$  和  $\bigcup_{k=1}^m \mathcal{F}_k = \mathcal{F}$ . 每个新编队  $\mathcal{F}_k$  根据当前编队内各 USV 的能量状态, 选取剩余能量状态高的 USV 作为领导者, 该领导者继承原始任务参数, 同时把绕行目标位姿规划为  $\eta_{g,i} = [x_i + \ell_x, y_i \pm \ell_y, \psi_i^*]^T$ . 上式中,  $\ell_x$  和  $\ell_y$  为绕行前进步长, 根据监测到的障碍物位置动态调整大小, 而航向角设计为  $\psi_i^* = \text{atan2}(\pm \ell_y, \ell_x)$ .

### 步骤 2. 子编队独立绕行与通信重联

各子编队按照规划绕行轨迹机动, 同时对障碍物进行实时监测以动态调整绕行轨迹. 完全通过障碍物的 USV 进行局部通信搜索, 主动与邻近的节点重建通信链路, 聚拢绕行至逐步恢复树状拓扑结构. 当所有 USV 均安全通过障碍区域, 并且整体通信恢复至一个连通的全域网络状态时, 编队将依据所有 USV 的能量状态来重新选举新的领导者. 新的领导者负责整合当前所有水面机器人的位姿信息, 并规划编队合并的目标位姿.

### 步骤 3. 最优编队合并重构

新领导者根据当前时刻  $t_p$  的编队位姿向量集  $\mathcal{Z}_s = \{\eta_i^s = [x_i^s(t_p), y_i^s(t_p), \psi_i^s(t_p)]^T\}_{i=1}^N$  和目标编队构型 (编队中水面机器人之间的理想相对位姿, 所有水面机器人之间的理想相对位姿可构成集合  $\mathcal{Z}_f = \{\eta_k^f = [x_k^f, y_k^f, \psi_k^f]^T\}_{k=1}^N$ ), 设定目标编队位姿  $\eta_k^g = [\max_{i=1}^N x_i^s(t_p) + x_k^f, y_k^f, \psi_k^f]^T$  及其对应编号  $k$ , 则可得目标编队位姿集  $\mathcal{Z}_g = \{\eta_k^g\}_{k=1}^N$ . 根据当前编队位姿和目标编队位姿, 可把编队合并重构问题转化为多智能体路径规划问题. 为解决这个问题, 首先利用式 (4) 计算所有起止编号对  $(i, k)$  的 Dubins 最短长度  $L_{ik}$  及其对应路径集  $\gamma_{ik}^* = \{\gamma_{ik}(s) \mid \gamma_{ik}(0) = \eta_i^s, \gamma_{ik}(1) = \eta_k^g, |\kappa(s)| \leq 1/\rho_{\min}, \forall s \in [0, 1]\}$ . 接着, 构建合并重构模型对 Dubins 路径集进行全局优化:

$$\begin{aligned} \min_{Q \in \Pi_N} J(Q) &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N L_{ik} Q_{ik} \\ \text{s.t. } \|p_i(Q, t) - p_k(Q, t)\| &\geq d_s, \forall i \neq k, \\ &\forall t \in [t_p, t_q] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 目标函数  $J(Q)$  表示在分配方案  $Q$  下, 编队中所有水面机器人从当前位姿  $\eta_i^s$  到目标位姿  $\eta_k^g$  的 Dubins 路径总长度;  $\Pi_N := \{Q \in \{0, 1\}^{N \times N} \mid Q \mathbf{1}_N =$

$\mathbf{1}_N, Q^T \mathbf{1}_N = \mathbf{1}_N\}$  为分配矩阵集合, 分配矩阵  $Q$  的元素  $Q_{ik} = 1$  时表示编号对  $(i, k)$  存在, 而  $Q_{ik} = 0$  时表示不存在这样的编号对,  $\mathbf{1}_N$  是  $N$  维列向量且其元素全为 1;  $\eta_{g,i}(Q, t) = [p_i^T(Q, t), \psi(Q, t)]^T$  为时间参数化后的轨迹;  $t_q$  为到达目标位姿的时间.

针对优化模型 (7), 首先设计算法 1 筛选出可行的路径组合; 随后基于改进遗传算法设计算法 2, 并利用该算法求解出整体路径最优的合并方案, 该方案输出最优的 Dubins 路径集合  $\{\gamma_{ik}^*\}_{Q_{ik}^*=1}$ , 同时输出时间参数化轨迹  $\{\eta_{g,i}(Q^*, t)\}_{i=1}^N$ ; 最后, 领导者向下广播合并指令, 各 USV 按照规划的参考轨迹  $\eta_{g,i}(Q^*, t)$  运动至目标位姿, 完成编队的合并重构.

### 算法 1. 安全间隔验证

**输入.** 初始位姿集  $\mathcal{Z}_s$ , 目标位姿集  $\mathcal{Z}_g$ , 分配矩阵  $Q$ , 几何轨迹集  $\gamma_{ik}^*$ , 安全距离  $d_s$ , 安全余量  $\delta$ , 预测速度  $v_{ik}(s)$ .

**输出.** 可行性标志  $\text{feasible} \in \{\text{true}, \text{false}\}$ .

1. 对所有  $Q_{ik} = 1$  的起止对, 根据预测速度  $v_{ik}(s)$  将 Dubins 路径  $\gamma_{ik}^*(s)$  重参数化为时间函数  $\eta_{ik}(t)$ , 并计算历时  $T_{ik}$ :

$$t_{ik}(s) = \int_0^s \frac{1}{v_{ik}(\sigma)} d\sigma, \quad s_{ik}(t) = t_{ik}^{-1}(s)$$

$$\eta_{ik}(t) = [x_{ik}^*(s_{ik}(t)), y_{ik}^*(s_{ik}(t)), \psi_{ik}^*(s_{ik}(t))]^T$$

$$T_{ik} = t_{ik}(L_{ik})$$

其中,  $t_{ik}(s)$  表示从起点沿着轨迹  $s$  运动所需的时间;  $s_{ik}(t)$  为  $t_{ik}(s)$  的反函数, 表示时间  $t$  到轨迹  $s$  的映射.

2. 定义统一时间轨迹  $\eta_{g,i}(Q, t)$ : 若  $t \geq T_{ik}$ , 则  $\eta_{g,i}(Q, t) = \eta_{ik}(T_{ik})$ , 否则  $\eta_{g,i}(Q, t) = \eta_{ik}(t)$ .
3. 设  $t_q \leftarrow \max T_{ik}$  为整体任务完成时间.
4. 设时间步长  $\Delta t$ , 生成采样集合  $\mathcal{T} \leftarrow \{t_p, t_p + \Delta t, t_p + 2\Delta t, \dots, t_q\}$ .
5. **for** 每个  $t_m \in \mathcal{T}$  **do**
6.   **for** 每个编号对  $(i, k)$  且  $i < k$  **do**
7.     **if**  $\|p_i(Q, t_m) - p_k(Q, t_m)\| < d_s + \delta$  **then**
8.       **return false**
9.     **end if**
10. **end for**
11. **end for**
12. **return true**

### 算法 2. MAPF 求解器

**输入.** 由 Dubins 路径长度  $L_{ik}$  构成的矩阵  $L \in \mathbf{R}^{N \times N}$ , 分配矩阵  $Q$ , 遗传算法的种群规模  $\mu$ , 精英数  $\lambda < \mu$ , 选择率  $p_t \in (0, 1]$ , 交叉率  $p_c \in (0, 1]$ , 变异率  $p_m \in (0, 1]$ , 最大代数  $G_{\max}$ , 停滞代数阈值  $k_s$  和改进阈值  $\epsilon > 0$ .

**输出.** 最优分配方案  $w^* = [w_1^*, w_2^*, \dots, w_N^*]$ .

1. 染色体编码: 采用排列编码方式对分配矩阵  $Q$  进行编码, 码位由  $\{1, 2, \dots, N\}$  构成. 按照矩阵  $Q$  的行序数从 1 到  $N$  的变化, 取出矩阵  $Q$  中元素值为 1 的列序数, 以组成向量  $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]$ . 该向量的每个元素表示一个目标编号, 而其在向量中的位序则表示源编号. 因此, 每个不同的向量  $w$  表示不同的排列方式, 即不同的种群个体.
2. 种群初始化: 生成  $\lambda$  个贪心初始解和  $\mu - \lambda$  个随机排列, 调用算法 1 验证可行性, 对不可行解执行局部搜索修复, 形成初始种群  $\mathcal{P}$ .
3. 适应度计算: 个体  $w$  的适应度为

$$J(Q(w)) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N L_{ik} Q_{ik} = \sum_{k=1}^N L_{w_k k}$$

4. 初始评估: 计算种群适应度, 记录最优个体  $w^* \leftarrow \arg \min_{w \in \mathcal{P}} J(Q(w))$  及  $J^* \leftarrow J(Q(w^*))$ .
5. 初始化停滞计数  $\zeta \leftarrow 0$ .
6. **for**  $g = 1$  **to**  $G_{\max}$  **do**
7. 选择: 以概率  $p_t$  使用锦标赛选择, 剩余使用基于排名的轮盘赌选择, 从种群中选择  $\mu - \lambda$  对父代.
8. 交叉: 对父代配对以概率  $p_c$  执行部分映射交叉 (partially mapped crossover, PMX), 保证子代为有效排列.
9. 变异: 对每个子代以概率  $p_m$  执行交换变异、插入变异或逆序变异, 保持排列有效性.
10. 路径可行性修复: 调用算法 1 验证子代路径, 对冲突编码对  $(i, j)$  尝试交换其目标分配, 丢弃不可行解, 记可行子代集为  $\mathcal{Y}$ .
11. 环境选择: 保留当前种群  $\mathcal{P}$  中前  $\lambda$  个最优个体, 从可行子代集  $\mathcal{Y}$  中选取最优的  $\min(|\mathcal{Y}|, \mu - \lambda)$  个, 若不足则从  $\mathcal{P}$  中剩余个体补充, 组成规模为  $\mu$  的新种群.
12. 更新最优解: 若  $\min_{w \in \mathcal{P}} J(Q(w)) < J^* - \epsilon$ , 更新  $w^*$  和  $J^*$ , 并重置  $\zeta \leftarrow 0$ ; 否则  $\zeta \leftarrow \zeta + 1$ .
13. **if**  $|\mathcal{P}| < 2$  或  $\max_{w \in \mathcal{P}} J(Q(w)) - \min_{w \in \mathcal{P}} J(Q(w)) < \epsilon$  或  $\zeta > k_s$  **then**
14.     **break** {种群退化、收敛或停滞}
15. **end if**
16. **end for**
17. **if**  $|\mathcal{P}| \geq 1$  **then**
18. 解码映射: 最优分配方案  $w^*$  解码为分配矩阵  $Q^*$ , 其中当且仅当  $w_k^* = i$  时  $Q_{ik}^* = 1$ , 否则  $Q_{ik}^* = 0$ .
19. **return** 最优分配方案  $w^*$ , 对应分配矩阵  $Q^*$  为模型 (7) 的解.
20. **else**
21. **return** 求解失败 {种群中已不存在可行个体, 返回无解标志}.
22. **end if**

**注 1.** 本文所设计的算法 2 是一个基于改进遗传算法的启发式求解器. 该算法采用  $\lambda$  个贪心初始解和  $\mu - \lambda$  个随机解相结合的方式, 确保种群在初始阶段就包含较高质量的基因. 同时, 该算法集成“路径可行性修复”环节, 在进化过程中调用算法 1 进行检测, 对不可行解尝试进行局部调整, 从而提高找到可行解的概率. 因此, 只要所求问题存在可行性解, 就能通过算法 2 求解. 如果环境过于狭窄或障碍物布局导致物理上不存在满足安全距离  $d_s$  约束的解, 则任何算法都无法找到解. 在此情况下, 算法 2 会返回失败标识. 若算法 2 反馈无解, 则 USV 将减速原地等待, 而编队的领导者则从上层任务规划角度调整安全距离或重新设计重构策略.

### 3 自组织水面机器人编队控制设计

针对欠驱动水面机器人系统 (3), 结合自组织编队重构生成的动态参考轨迹  $\eta_{g,i}(t)$ , 采用反步法为第  $i$  个水面机器人设计编队控制器  $\tau_i$ . 首先, 定义位姿跟踪误差为:

$$\begin{cases} z_{1x,i} = x_i - x_i^* \\ z_{1y,i} = y_i - y_i^* \\ z_{1\psi,i} = \psi_i - \psi_i^* \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\psi_i^* \in (-\pi, \pi]$  是期望航向角, 并且满足  $\psi_i^* = \text{atan2}(-z_{1y,i}, -z_{1x,i})$ .

如式 (3) 所示, 欠驱动水面机器人系统的非对角惯性矩阵导致转向角力矩  $\tau_{ri}$  同时作用于横荡速度动态与艏摇角速度动态, 从而显著增加同时镇定这两个系统动态的控制设计难度. 为克服由非对角惯性矩阵及系统欠驱动特性所带来的控制设计挑战, 本文采用横截函数方法<sup>[9]</sup>, 定义如下速度跟踪误差:

$$\begin{cases} z_{2u,i} = u_i - \alpha_{ui} \\ z_{2v,i} = v_i - \alpha_{vi} - \phi_1(\sigma_i) \\ z_{2r,i} = r_i - \alpha_{ri} - \phi_2(\sigma_i) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\alpha_i = [\alpha_{ui}, \alpha_{vi}, \alpha_{ri}]^T$  为虚拟控制输入;  $\Theta_i = [0, \phi_1(\sigma_i), \phi_2(\sigma_i)]^T$  为横截函数, 满足以下条件: 1)  $\forall \sigma_i \in \mathbf{R}$ ,  $\phi_l(\sigma_i) \in L_\infty$ ,  $l = 1, 2$ ; 2)  $\forall \sigma_i \in \mathbf{R}$ ,  $\frac{\partial \phi_l}{\partial \sigma_i} \in L_\infty$ ; 3)  $\forall \sigma_i \in \mathbf{R}$ ,  $\det(G_i) \neq 0$ , 其中

$$G_i = \begin{bmatrix} \gamma_2 & -\frac{\partial \phi_1}{\partial \sigma_i} \\ \gamma_3 & -\frac{\partial \phi_2}{\partial \sigma_i} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$L_\infty$  表示一致有界, 即函数  $f(\sigma)$  满足  $\sup_{\sigma \in \mathbf{R}} |f(\sigma)| < \infty$ ;  $\gamma_2$  和  $\gamma_3$  的定义见式 (3). 根据上述条件, 横截函数可设计为:

$$\begin{cases} \phi_1(\sigma_i) = \frac{\theta_1}{2m_{22}}(\chi_0 - \sin \chi_0 \cos \chi_0) \\ \phi_2(\sigma_i) = \frac{\theta_1}{2m_{23}}(\chi_0 + \sin \chi_0 \cos \chi_0) \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\chi_0 = \theta_2 \arctan(\sigma_i)$ ;  $\theta_1 > 0$  和  $\theta_2 > 0$  为设计参数. 把式 (11) 代入式 (10) 可得  $G_i$  的行列式:

$$\det(G_i) = \frac{\theta_1 \theta_2}{\Delta(1 + \sigma_i^2)} > 0 \quad (12)$$

其中,  $\Delta$  的定义见式 (3). 结合式 (10) ~ (12), 可得  $G_i$  的逆矩阵为:

$$G_i^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta(\cos \chi_0)^2}{m_{23}} & \frac{\Delta(\sin \chi_0)^2}{m_{22}} \\ -\frac{m_{22}(1 + \sigma_i^2)}{\theta_1 \theta_2} & -\frac{m_{23}(1 + \sigma_i^2)}{\theta_1 \theta_2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

对式 (8) 两边同时求导并代入式 (3), 可得

$$\begin{cases} \dot{z}_{1x,i} = u_i \cos \psi_i - v_i \sin \psi_i - \dot{x}_i^* \\ \dot{z}_{1y,i} = u_i \sin \psi_i + v_i \cos \psi_i - \dot{y}_i^* \\ \dot{z}_{1\psi,i} = r_i - \dot{\psi}_i^* \end{cases} \quad (14)$$

把式 (9) 代入式 (14), 可设计如下的虚拟控制律

$$\begin{cases} \alpha_{ui} = (-k_{1,i} z_{1x,i} + \dot{x}_i^*) \cos \psi_i + \\ \quad (-k_{1,i} z_{1y,i} + \dot{y}_i^*) \sin \psi_i \\ \alpha_{vi} = (k_{1,i} z_{1x,i} - \dot{x}_i^*) \sin \psi_i + \\ \quad (-k_{1,i} z_{1y,i} + \dot{y}_i^*) \cos \psi_i \\ \alpha_{ri} = -k_{1,i} z_{1\psi,i} + \dot{\psi}_i^* \end{cases} \quad (15)$$

其中, 设计参数  $k_{1,i} > 0$ . 将式 (15) 代入式 (14), 得到闭环误差动态方程:

$$\begin{cases} \dot{z}_{1x,i} = -k_{1,i} z_{1x,i} + z_{2u,i} \cos \psi_i - \\ \quad (z_{2v,i} + \phi_1(\sigma_i)) \sin \psi_i \\ \dot{z}_{1y,i} = -k_{1,i} z_{1y,i} + z_{2u,i} \sin \psi_i + \\ \quad (z_{2v,i} + \phi_1(\sigma_i)) \cos \psi_i \\ \dot{z}_{1\psi,i} = -k_{1,i} z_{1\psi,i} + z_{2r,i} + \phi_2(\sigma_i) \end{cases} \quad (16)$$

考虑如下 Lyapunov 候选函数

$$V_1 = \frac{1}{2}(z_{1x,i}^2 + z_{1y,i}^2 + z_{1\psi,i}^2) \quad (17)$$

结合式 (3) 和式 (16), 对  $V_1$  求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & z_{2u,i}(z_{1x,i} \cos \psi_i + z_{1y,i} \sin \psi_i) + \\ & z_{2v,i}(-z_{1x,i} \sin \psi_i + z_{1y,i} \cos \psi_i) + \\ & \phi_1(\sigma_i)(-z_{1x,i} \sin \psi_i + z_{1y,i} \cos \psi_i) - \\ & k_{1,i} z_{1x,i}^2 - k_{1,i} z_{1y,i}^2 - k_{1,i} z_{1\psi,i}^2 + \\ & z_{2r,i} z_{1\psi,i} + \phi_2(\sigma_i) z_{1\psi,i} \end{aligned} \quad (18)$$

对式 (9) 求导并代入系统 (3) 可得

$$\begin{cases} \dot{z}_{2u,i} = \kappa_{11} v_i r_i + \kappa_{12} r_i^2 + \lambda_1 d_{11} u_i + \gamma_1 \tau_{ui} + \\ \quad d_{wu,i} - \dot{\alpha}_{ui} \\ \dot{z}_{2v,i} = \kappa_{21} u_i r_i + \kappa_{22} u_i v_i + \lambda_2 (d_{22} v_i + d_{23} r_i) + \\ \quad \lambda_{22} (d_{32} v_i + d_{33} r_i) + \gamma_2 \tau_{ri} + d_{wv,i} - \\ \quad \dot{\alpha}_{vi} - \frac{\partial \phi_1}{\partial \sigma_i} \dot{\sigma}_i \\ \dot{z}_{2r,i} = \kappa_{31} u_i r_i + \kappa_{32} u_i v_i + \lambda_3 (d_{22} v_i + d_{23} r_i) + \\ \quad \lambda_{32} (d_{32} v_i + d_{33} r_i) + \gamma_3 \tau_{ri} + d_{wr,i} - \dot{\alpha}_{ri} - \\ \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial \sigma_i} \dot{\sigma}_i \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $\dot{\sigma}_i$  表示辅助控制律. 为估计误差系统 (19) 中的未知扰动  $d_{w,i}$ , 设计如下的扰动观测器:

$$\begin{cases} \hat{d}_{w,i} = \xi_i + k_{\xi,i} z_{2,i} \\ \dot{\xi}_i = z_{2,i} - k_{\xi,i} (\hat{d}_{w,i} - M^{-1}(C(\nu_i)\nu_i + D(\nu_i)\nu_i - \\ \quad \tau_i) - \dot{\alpha}_i - \dot{\Theta}_i) \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $z_{2,i} = [z_{2u,i}, z_{2v,i}, z_{2r,i}]^T$ ;  $\dot{\alpha}_i = [\dot{\alpha}_{ui}, \dot{\alpha}_{vi}, \dot{\alpha}_{ri}]^T$ ;  $\dot{\Theta}_i = [0, \frac{\partial \phi_1}{\partial \sigma_i} \dot{\sigma}_i, \frac{\partial \phi_2}{\partial \sigma_i} \dot{\sigma}_i]^T$ ;  $k_{\xi,i} = \text{diag}\{k_{\xi u,i}, k_{\xi v,i}, k_{\xi r,i}\} > 0$  为观测器增益对角矩阵;  $\hat{d}_{w,i} = [\hat{d}_{wu,i}, \hat{d}_{wv,i}, \hat{d}_{wr,i}]^T$  为扰动估计值;  $\xi_i \in \mathbf{R}^3$  为观测器辅助状态变量. 定义观测误差  $\tilde{d}_{w,i} = \hat{d}_{w,i} - d_{w,i}$ , 可得误差动态:

$$\dot{\tilde{d}}_{w,i} = z_{2,i} - k_{\xi,i} \tilde{d}_{w,i} - \dot{d}_{w,i} \quad (21)$$

为便于控制器设计, 将式 (19) 中  $\dot{z}_{2v,i}$  和  $\dot{z}_{2r,i}$  的动态方程写成如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{2v,i} \\ \dot{z}_{2r,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{v,i} \\ \Phi_{r,i} \end{bmatrix} + G_i \begin{bmatrix} \tau_{ri} \\ \dot{\sigma}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{wv,i} \\ d_{wr,i} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中,

$$\begin{cases} \Phi_{v,i} = \kappa_{21} u_i r_i + \kappa_{22} u_i v_i + \lambda_2 (d_{22} v_i + d_{23} r_i) + \\ \quad \lambda_{22} (d_{32} v_i + d_{33} r_i) - \dot{\alpha}_{vi} \\ \Phi_{r,i} = \kappa_{31} u_i r_i + \kappa_{32} u_i v_i + \lambda_3 (d_{22} v_i + d_{23} r_i) + \\ \quad \lambda_{32} (d_{32} v_i + d_{33} r_i) - \dot{\alpha}_{ri} \end{cases} \quad (23)$$

结合式 (22) 并利用扰动观测器 (20), 可设计如下的实际控制律  $\tau_{ui}$  和  $\tau_{ri}$ , 以及辅助控制律  $\dot{\sigma}_i$ :

$$\begin{aligned} \tau_{ui} = & \frac{1}{\gamma_1} (\dot{\alpha}_{ui} - \kappa_{11} v_i r_i - \kappa_{12} r_i^2 - \lambda_1 d_{11} u_i - \\ & k_{2,i} z_{2u,i} - z_{1x,i} \cos \psi_i - z_{1y,i} \sin \psi_i - \hat{d}_{wu,i}) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{ri} \\ \dot{\sigma}_i \end{bmatrix} = G_i^{-1} \begin{bmatrix} \Upsilon_{v,i} \\ \Upsilon_{r,i} \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中, 设计参数  $k_{2,i} > 0$ , 且  $\Upsilon_{v,i}$  与  $\Upsilon_{r,i}$  定义为

$$\begin{cases} \Upsilon_{v,i} = -k_{2,i}z_{2v,i} + z_{1x,i} \sin \psi_i - \\ \quad z_{1y,i} \cos \psi_i - \Phi_{v,i} - \hat{d}_{wu,i} \\ \Upsilon_{r,i} = -k_{2,i}z_{2r,i} - z_{1\psi,i} - \Phi_{r,i} - \hat{d}_{wu,i} \end{cases} \quad (26)$$

结合式 (13), 控制律 (25) 可展开为:

$$\begin{cases} \tau_{ri} = -\frac{\Delta(\cos \chi_0)^2}{m_{23}} \Upsilon_{v,i} + \frac{\Delta(\sin \chi_0)^2}{m_{22}} \Upsilon_{r,i} \\ \dot{\sigma}_i = -\frac{m_{22}(1 + \sigma_i^2)}{\theta_1 \theta_2} \Upsilon_{v,i} - \frac{m_{23}(1 + \sigma_i^2)}{\theta_1 \theta_2} \Upsilon_{r,i} \end{cases} \quad (27)$$

将式 (24) 和式 (25) 代入式 (19), 可得

$$\begin{cases} \dot{z}_{2u,i} = -k_{2,i}z_{2u,i} - z_{1x,i} \cos \psi_i - \\ \quad z_{1y,i} \sin \psi_i - \tilde{d}_{wu,i} \\ \dot{z}_{2v,i} = -k_{2,i}z_{2v,i} + z_{1x,i} \sin \psi_i - \\ \quad z_{1y,i} \cos \psi_i - \tilde{d}_{wv,i} \\ \dot{z}_{2r,i} = -k_{2,i}z_{2r,i} - z_{1\psi,i} - \tilde{d}_{wr,i} \end{cases} \quad (28)$$

考虑如下 Lyapunov 候选函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}(z_{2u,i}^2 + z_{2v,i}^2 + z_{2r,i}^2) + \frac{1}{2}\tilde{d}_{w,i}^T \tilde{d}_{w,i} \quad (29)$$

对上式求导, 并利用式 (18)、式 (21)、式 (28) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_{1,i}(z_{1x,i}^2 + z_{1y,i}^2 + z_{1\psi,i}^2) - k_{2,i}(z_{2u,i}^2 + \\ & z_{2v,i}^2 + z_{2r,i}^2) + \phi_1(\sigma_i)(-z_{1x,i} \sin \psi_i + \\ & z_{1y,i} \cos \psi_i) + \phi_2(\sigma_i)z_{1\psi,i} - \tilde{d}_{w,i}^T k_{\xi,i} \tilde{d}_{w,i} - \\ & \tilde{d}_{w,i}^T \dot{\tilde{d}}_{w,i} \end{aligned} \quad (30)$$

**定理 1.** 在满足假设 1 和假设 2 的条件下, 本文针对具有系统动态 (3) 的欠驱动水面机器人集群, 所设计的编队控制律 (24) 和 (25) 可实现编队中每个水面机器人的闭环系统信号是一致最终有界的。

**证明.** 由式 (11) 中给定的横截函数可知, 存在正常数  $\bar{\phi}_1$  和  $\bar{\phi}_2$  使得以下不等式满足:

$$|\phi_1(\sigma_i)| \leq \bar{\phi}_1, \quad |\phi_2(\sigma_i)| \leq \bar{\phi}_2 \quad (31)$$

结合假设 1, 应用三角不等式处理耦合项:

$$\begin{cases} |\phi_1(\sigma_i)(-z_{1x,i} \sin \psi_i + z_{1y,i} \cos \psi_i)| \leq \bar{\phi}_1 \times \\ \quad \sqrt{z_{1x,i}^2 + z_{1y,i}^2} \leq \frac{\mu_1}{2}(z_{1x,i}^2 + z_{1y,i}^2) + \frac{\bar{\phi}_1^2}{2\mu_1} \\ |\phi_2(\sigma_i)z_{1\psi,i}| \leq \frac{\mu_2}{2}z_{1\psi,i}^2 + \frac{\bar{\phi}_2^2}{2\mu_2} \\ \tilde{d}_{w,i}^T \dot{\tilde{d}}_{w,i} \leq \frac{1}{2}\|\tilde{d}_{w,i}\|^2 + \frac{1}{2}\bar{d}_i^2 \end{cases} \quad (32)$$

其中,  $\mu_1 > 0$  和  $\mu_2 > 0$  为任意正常数. 将式 (32) 代入式 (30) 得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -\left(k_{1,i} - \frac{\mu_1}{2}\right)(z_{1x,i}^2 + z_{1y,i}^2) - \left(k_{1,i} - \right. \\ & \left. \frac{\mu_2}{2}\right)z_{1\psi,i}^2 - k_{2,i}(z_{2u,i}^2 + z_{2v,i}^2 + z_{2r,i}^2) - \\ & \left(\lambda_{\min}(k_{\xi,i}) - \frac{1}{2}\right)\|\tilde{d}_{w,i}\|^2 + \frac{\bar{\phi}_1^2}{2\mu_1} + \frac{\bar{\phi}_2^2}{2\mu_2} + \frac{1}{2}\bar{d}_i^2 \end{aligned} \quad (33)$$

其中,  $\lambda_{\min}(\cdot)$  表示矩阵的最小特征值. 选择控制增益满足:  $k_{1,i} > \max(\mu_1/2, \mu_2/2)$ ,  $k_{2,i} > 0$ ,  $\lambda_{\min}(k_{\xi,i}) > 1/2$ , 则不等式 (33) 可写成

$$\dot{V}_2 \leq -\rho_i V_2 + \beta_i \quad (34)$$

其中,

$$\begin{aligned} \rho_i = & \min(2k_{1,i} - \mu_1, 2k_{1,i} - \mu_2, 2k_{2,i}, \\ & 2\lambda_{\min}(k_{\xi,i}) - 1) \\ \beta_i = & \frac{\bar{\phi}_1^2}{2\mu_1} + \frac{\bar{\phi}_2^2}{2\mu_2} + \frac{1}{2}\bar{d}_i^2 \end{aligned}$$

由不等式 (34) 可进一步得到

$$V_2(t) \leq (V_2(0) - \varrho_i) \exp(-\rho_i t) + \varrho_i, \quad \forall t \geq 0 \quad (35)$$

其中,  $\varrho_i = \beta_i/\rho_i$ . 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $V_2(t) \leq \varrho_i$ , 表明编队跟踪误差  $z_{1x,i}$ ,  $z_{1y,i}$ ,  $z_{1\psi,i}$ ,  $z_{2u,i}$ ,  $z_{2v,i}$  和  $z_{2r,i}$  均有界且收敛至 0 的邻域范围内. 同时, 邻域半径可通过调整设计参数  $k_{1,i}$ ,  $k_{2,i}$  和  $k_{\xi,i}$  实现任意小, 进而实现高精度编队跟踪控制. 此外, 结合假设 2 和式 (8) 可知: 1) 水面机器人系统的输出  $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$  是一致最终有界的; 2) 式 (15) 中的虚拟控制器  $\alpha_{ui}$ ,  $\alpha_{vi}$  和  $\alpha_{ri}$  也是一致最终有界的. 在此基础上, 结合式 (9) 和式 (31) 可知, 系统的速度  $v_i = [u_i, v_i, r_i]^T$  也是一致最终有界的, 进一步保证了编队控制器 (24) 和 (25) 的有界性. 因此, 闭环系统所有信号是一致最终有界的.  $\square$

## 4 仿真研究

为验证所提出的仿鱼群行为自组织编队重构控制方法的有效性, 对由 9 个欠驱动水面机器人组成的编队进行数值仿真, 重点验证大型障碍物与狭窄通道场景下编队构型动态重构的有效性, 并展示编队跟踪性能. 此外, 为验证所设计的改进遗传算法的优势, 本节进一步与标准的遗传算法进行比较. 水面机器人系统参数与文献 [8] 一致, 具体参数如下:  $m_{11} = 25.8$  kg,  $m_{22} = 33.8$  kg,  $m_{23} = 1.904$  8 kg,  $m_{33} = 2.76$  kg;  $d_{11}(u_i) = 0.722$  5 +  $1.327$  4  $|u_i|$  +  $5.866$  4  $u_i^2$ ,  $d_{22}(v_i, r_i) = 0.861$  2 +  $36.282$  3  $|v_i|$  +

$0.805 |r_i|$ ,  $d_{23}(v_i, r_i) = -0.1079 + 0.845 |v_i| + 3.45 |r_i|$ ,  $d_{32}(v_i, r_i) = -0.1052 - 5.0437 |v_i| - 0.13 |r_i|$ ,  $d_{33}(v_i, r_i) = 1.9 - 0.08 |v_i| + 0.75 |r_i|$ . 未知时变环境扰动取为  $\tau_{w,i} = [1.5 + \sin(0.1t), \cos(0.1t), \sin(0.1t)]^T$ . 编队初始采用  $3 \times 3$  矩阵构型, 起始位姿分别为:  $\eta_1(0) = [-8, 8, 0]^T$ ,  $\eta_2(0) = [-8, 0, 0]^T$ ,  $\eta_3(0) = [-8, -8, 0]^T$ ,  $\eta_4(0) = [0, 8, 0]^T$ ,  $\eta_5(0) = [0, 0, 0]^T$ ,  $\eta_6(0) = [0, -8, 0]^T$ ,  $\eta_7(0) = [8, 8, 0]^T$ ,  $\eta_8(0) = [8, 0, 0]^T$ ,  $\eta_9(0) = [8, -8, 0]^T$ . 所有水面机器人初始速度为  $v_i(0) = [0, 0, 0]^T$ . 控制增益为  $k_{1,i} = k_{2,i} = 2$ ,  $k_{\xi,i} = [1, 1, 2]^T$ . 横截函数系数选取为  $\theta_1 = 15$  和  $\theta_2 = 10$ , 它们分别影响横截函数的幅值与变化率. 每个水面机器人的理想参考轨迹是由各自的初始位置以  $1.5 \text{ m/s}$  的速度沿着  $x$  轴直线行进产生.

仿真场景中设计了两组障碍物用以验证所设计编队重构算法的有效性. 第一组障碍物为中心位于  $(30, 0)$  的  $20 \text{ m} \times 16 \text{ m}$  的矩形障碍物, 用于验证动态分裂-合并算法的有效性. 第二组障碍物由两个中心位于  $(120, \pm 10)$  并旋转  $\pm 15^\circ$  的  $25 \text{ m} \times 8 \text{ m}$  的矩形障碍物构成的狭窄通道, 用于验证仿鱼群疏散行为算法的有效性. 根据水面机器人的模型参数, 设计水面机器人相关参数如下: 安全距离  $d_s = 4 \text{ m}$ ; 安全余量  $\delta = 0.5 \text{ m}$ ; 通信距离  $d_{\text{com}} = 10 \text{ m}$ ; 探测距离  $d_{\text{det}} = 10 \text{ m}$ ; 激活距离  $d_{\text{act}} = 3 \text{ m}$ ; 最小转弯半径  $\rho_{\text{min}} = 5$ ; 标称预测速度  $v_{ik} = 1.5 \text{ m/s}$ , 其选取需权衡重构精度与任务效率, 过大会导致安全间隔验证产生误判, 过小则会延长重构耗时并增大搜索空间. 仿鱼群疏散行为算法参数设计为: 前进步长  $\ell_x^{(1)} = 0.3$ ,  $\ell_x^{(2)} = 1.8$ ,  $\ell_x^{(3)} = 1.5$ ; 横向收敛系数  $\bar{k}_1 = 0.3$ ,  $\bar{k}_2 = 0.6$ ,  $\bar{k}_3 = 0.3$ ; 权重系数  $w_x = 0.7$  和  $w_y = 0.3$ , 前者突出前进方向位置优势, 后者体现距通道中心的距离优势, 二者比例可根据通道几何特征调节. 仿鱼群逃逸行为算法参数设计为:  $\ell_x = 0.2$ ,  $\ell_y = 1.5$ ; 算法 2 中遗传算法参数选取如下: 种群规模  $\mu = 150$  以平衡种群多样性与计算开销; 精英数  $\lambda = 40$  以确保优良个体保留; 选择率  $p_t = 0.5$  以控制锦标赛选择比例; 交叉率  $p_c = 0.8$  以增强解空间搜索能力; 变异率  $p_m = 0.2$  以维持算法稳定性; 最大代数  $G_{\text{max}} = 200$  以保证充分收敛; 停滞代数阈值  $k_s = 80$  以提前终止无效迭代; 改进阈值  $\epsilon = 15$ .

仿真结果如图 3~8 以及表 1 和表 2 所示. 图 3 展示了 9 个水面机器人在  $x$ - $y$  平面上的完整轨迹, 验证了水面机器人集群在面对不同场景时的自组织编队重构能力. 在初始阶段, 编队保持  $3 \times 3$  矩阵构型向第一组障碍物前进, 当检测到障碍物时, 编队

系统判断无法整体绕行, 利用仿鱼群逃逸行为算法自组织分裂-合并动态重构编队以通过大型障碍物. 图 4 展示了分裂及合并过程中的部分重要时刻各水面机器人的位姿. 从图 4(a) 和图 4(b) 中可以看出, 编队分裂为两个子编队, 分别从障碍物两侧绕行, 接着图 4(c) 中两个子编队成功通过障碍物后汇合并进行合并重构, 最后在图 4(d) 中编队完成重构, 恢复初始队形. 表 1 给出了改进遗传算法在合并重构优化过程中的关键性能指标, 而表 2 给出了标准遗传算法在合并重构优化过程中的关键性能指标. 由于采用随机初始化且缺乏局部搜索引导和精英保留, 标准遗传算法难以跳出局部极小值, 且优良解在迭代中反复丢失, 最终未能找到无碰撞的可行路径. 相比之下, 改进遗传算法通过以下机制显著提高了求解可靠性: 1) 采用  $\lambda$  个贪心初始解与  $\mu - \lambda$  个随机解相结合的种群初始化策略, 确保初始种群包含高质量基因; 2) 精英保留策略避免优良解在迭代中丢失; 3) 路径可行性修复环节对不可行解进行局部调整. 得益于上述机制, 改进遗传算法能稳定收敛于满足所有运动学与安全约束的全局最优解, 凸显了算法在多约束 MAPF 问题中的快速、高效求解能力. 当编队继续行进遇到狭窄障碍物时, 编队系统判断无法整体绕行或分裂绕行, 利用仿鱼群疏散行为算法自组织动态重构编队以通过狭窄通道. 图 5 展示了疏散过程中的部分重要时刻各水面机器人的位姿. 从图 5(a) 至图 5(c) 中可以看出, 水面机器人保持安全距离贯序通过狭窄通道, 并在图 5(d) 中接近完成编队重构, 恢复初始队形. 图 6 展示了所有水面机器人的编队跟踪误差  $z_{1x,i}(t)$ ,  $z_{1y,i}(t)$  和  $z_{1\psi,i}(t)$  的响应曲线, 其表明所有编队跟踪误差最终收敛到零的小邻域内. 由图 7 可知, 欠驱动水面机器人的控制输入  $\tau_{ui}$  和  $\tau_{ri}$  均为有界的. 图 8 展示了仿真过程中水面机器人之间的最小距离, 其表明所有水面机器人之间的相对距离始终大于安全阈值.

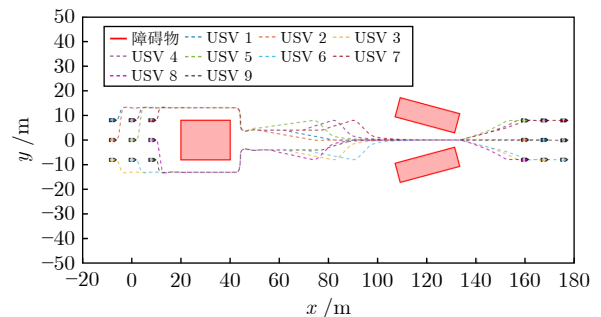


图 3 水面机器人的  $x$ - $y$  相平面轨迹

Fig. 3 Position trajectory of the USVs in the horizontal  $x$ - $y$  plane

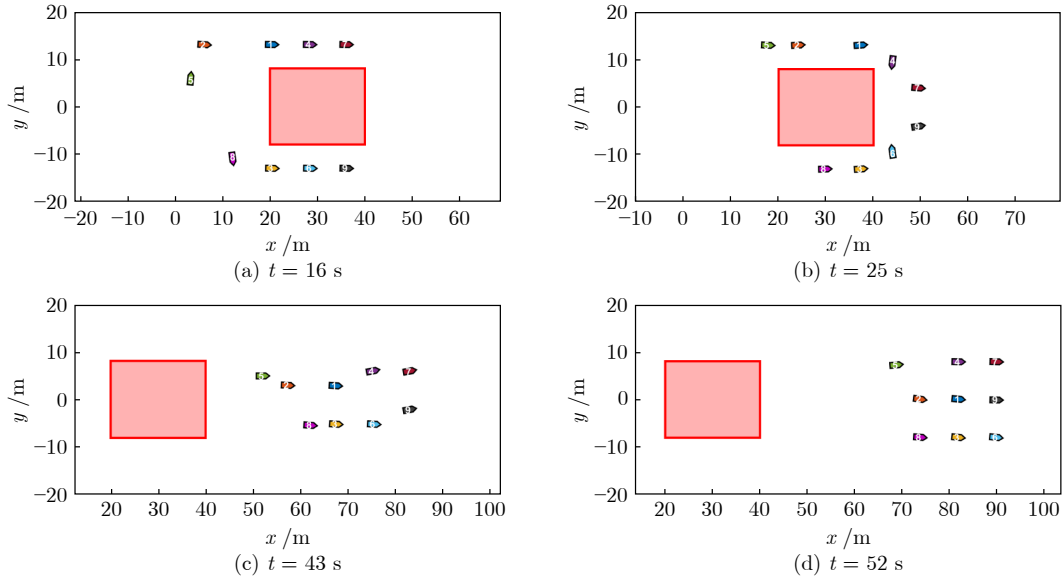


图 4 仿鱼群逃逸行为动态分裂-合并重构中部分时刻水面机器人的位姿

Fig. 4 Poses of the USVs at selected time instants during dynamic splitting-merging reconfiguration driven by a fish-school-escape-behavior-inspired algorithm

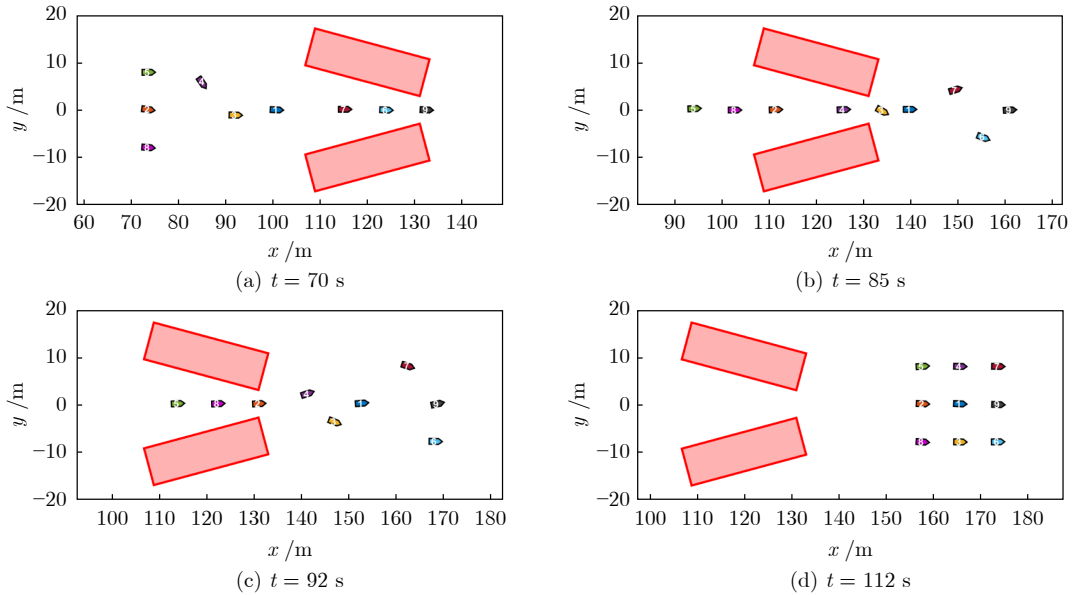


图 5 仿鱼群疏散行为动态重构中部分时刻水面机器人的位姿

Fig. 5 Poses of the USVs at selected time instants during dynamic reconfiguration driven by a bio-inspired algorithm emulating fish-school evacuation behavior

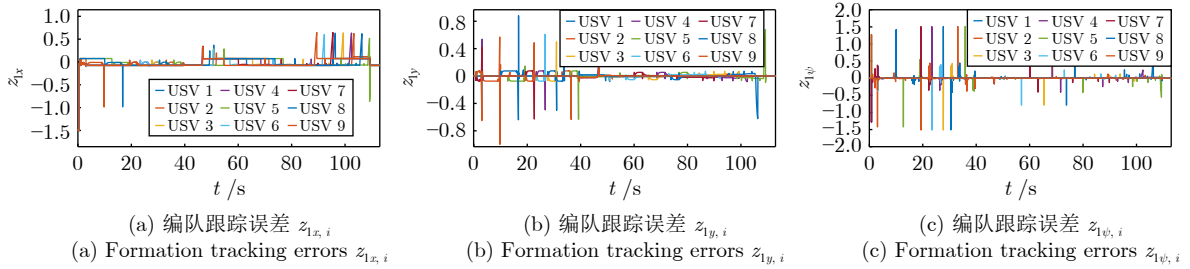


图 6 水面机器人编队跟踪误差

Fig. 6 Formation tracking errors of the USVs

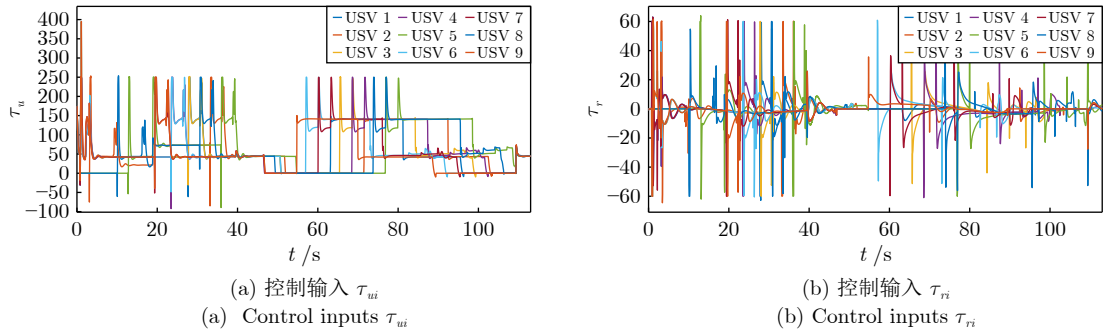


图 7 水面机器人编队控制输入

Fig.7 Formation control input of the USVs

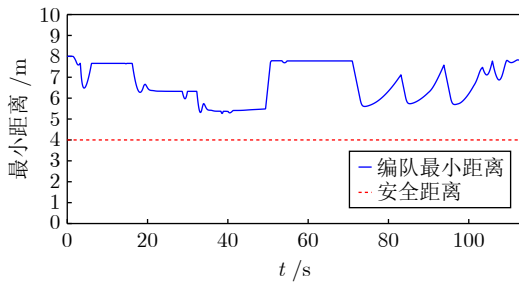


图 8 水面机器人之间的最小距离

Fig.8 Minimum distance between the USVs

表 1 改进遗传算法优化迭代过程中的性能指标

Table 1 Performance metrics of the improved genetic algorithm during the optimization iteration process

代数	函数评估次数	最佳罚值	平均罚值	停滞代数
1	300	257.9	265.4	0
10	1650	257.9	282.5	9
20	3150	257.9	258.2	19
30	4650	257.9	258.2	29
40	6150	257.9	258.2	39
50	7650	257.9	258.2	49
60	9150	257.9	258.2	59
70	10650	257.9	258.2	69
81	12300	257.9	258.9	80

表 2 标准遗传算法优化迭代过程中的性能指标

Table 2 Performance metrics of the standard genetic algorithm during the optimization iteration process

代数	函数评估次数	最佳罚值	平均罚值	停滞代数
1	300	0.9564	5.130	0
2	450	0.8701	4.845	0
3	600	1.4260	4.517	1
4	750	1.0800	4.332	0
5	900	0.9937	4.329	0
6	1050	1.2190	4.431	1
7	1200	0.8871	4.146	0
8	1350	0.9384	4.085	1
9	1500	1.3450	3.984	2
10	1650	0.7427	3.712	0
11	1800	0.6511	4.119	0
12	1950	0.8492	4.148	1
13	2100	0.6066	4.229	0
14	2250	0.5653	4.149	0
15	2400	0.5653	3.815	1
16	2550	0.7285	3.997	2
		⋮		
191	28800	0.8211	3.280	1
192	28950	0.7955	3.426	0
193	29100	0.5670	3.618	0
194	29250	0.5110	3.902	0
195	29400	0.6757	3.553	1
196	29550	0.8724	3.636	2
197	29700	0.8178	3.365	0
198	29850	0.8169	3.253	0
199	30000	0.7084	3.437	0
200	30150	0.8232	3.568	1

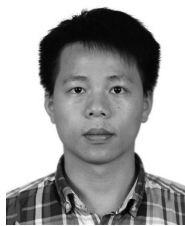
## 5 结束语

本文围绕水面机器人编队重构问题, 提出一种受鱼群自组织行为启发的欠驱动水面机器人自组织编队重构控制方法. 其中, 重构算法包括仿鱼群疏散行为为重构算法与仿鱼群逃逸行为动态分裂-合并重构算法, 用于在编队遭遇障碍物、礁石或任务变更等情况下生成可行的参考轨迹; 编队控制律则负责驱动编队中各水面机器人以足够小的跟踪误差准确跟踪所生成的轨迹. 本文所提方法能够实现编队根据环境变化自适应调整队形, 并在保持良好跟踪

性能的同时, 有效抑制欠驱动特性对系统的影响. 目前, 所提方法主要针对静态障碍物场景, 未来研究将进一步探索动态障碍物环境下的编队重构问题, 从而提升算法在复杂动态环境中的适应能力.

## 参考文献

- 1 Peng Z H, Wang J, Wang D, Han Q L. An overview of recent advances in coordinated control of multiple autonomous surface vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, **17**(2): 732–745
- 2 Cao L, Qin Y, Pan Y N, Liang H J. Prescribed performance-based optimal formation control for USVs with position constraints and yaw angle time-varying partial constraints. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, **26**(3): 4109–4121
- 3 Li L L, Yu Z L, Li T S, Jiang B, Guo Q J. Rate-based output regulation for switched IT2 fuzzy systems with application to ship formation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, **32**(8): 4570–4582
- 4 Wang Duan-Song, Li Dong-Yu, Liang Xiao-Ling. Finite-time synchronized formation control of unmanned surface vehicles with external disturbances. *Acta Automatica Sinica*, 2024, **50**(5): 1047–1058  
(王端松, 李东禹, 梁晓玲. 干扰条件下无人艇编队有限时间同步控制. *自动化学报*, 2024, **50**(5): 1047–1058)
- 5 Zhang Wei-Dong, Liu Xiao-Cheng, Han Peng. Progress and challenges of overwater unmanned systems. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(5): 847–857  
(张卫东, 刘笑成, 韩鹏. 水上无人系统研究进展及其面临的挑战. *自动化学报*, 2020, **46**(5): 847–857)
- 6 Jin X. Fault tolerant finite-time leader-follower formation control for autonomous surface vessels with LOS range and angle constraints. *Automatica*, 2016, **68**: 228–236
- 7 Gu N, Wang D, Peng Z H, Liu L. Observer-based finite-time control for distributed path maneuvering of underactuated unmanned surface vehicles with collision avoidance and connectivity preservation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, **51**(8): 5105–5115
- 8 Dai S L, He S D, Cai H, Yang C G. Adaptive leader-follower formation control of underactuated surface vehicles with guaranteed performance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(3): 1997–2008
- 9 Lu Y, Wen C Y, Shen T L, Zhang W D. Bearing-based adaptive neural formation scaling control for autonomous surface vehicles with uncertainties and input saturation. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, **32**(10): 4653–4664
- 10 Zhang X Z, Yang Q K, Zeng X L, Fang H, Chen J. Cooperative shape-translation estimation and control for time-varying linear formation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2025, **70**(8): 5206–5221
- 11 Zhang X Z, Yang Q K, Xiao F, Fang H, Chen J. Linear formation control of multi-agent systems. *Automatica*, 2025, **171**: Article No. 111935
- 12 Do H T, Hua H T, Nguyen M T, Nguyen C V, Nguyen H T T, Nguyen H T, et al. Formation control algorithms for multiple-UAVs: A comprehensive survey. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 2021, **8**(27): Article No. e3
- 13 Li J F, Xu Z, Zhu D J, Dong K, Yan T, Zeng Z, et al. Bio-inspired intelligence with applications to robotics: A survey. *Intelligence & Robotics*, 2021, **1**(1): 58–83
- 14 Ma J, Han Z J, Li M G, Liu Z J, He W, Ge S S. Conductive hydrogels-based self-sensing soft robot state perception and trajectory tracking. *Journal of Field Robotics*, 2025, **42**(2): 510–524
- 15 Duan H B, Huo M Z, Fan Y M. From animal collective behaviors to swarm robotic cooperation. *National Science Review*, 2023, **10**(5): Article No. nwad040
- 16 Ban Xiao-Juan, Ning Shu-Rong, Tu Xu-Yan. Research on advanced self-organization behavior for artificial fish school. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **534**(10): 1327–1332  
(班晓娟, 宁淑荣, 涂序彦. 人工鱼群高级自组织行为研究. *自动化学报*, 2008, **534**(10): 1327–1332)
- 17 Duan Hai-Bin, You Ling-Chen, Fan Yan-Ming, Li Ming. Phase transition control of UAV swarm based on bird-inspired self-propelled mechanism. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(5): 960–971  
(段海滨, 尤灵辰, 范彦铭, 李明. 仿鸟群自推进机制的无人机集群相变控制. *自动化学报*, 2025, **51**(5): 960–971)
- 18 Zhu W X, Oguz S, Heinrich M K, Allwright M, Wahby M, Christensen A L, et al. Self-organizing nervous systems for robot swarms. *Science Robotics*, 2024, **9**(96): Article No. eadl5161
- 19 Larrieu R, Moreau P, Graff C, Peyla P, Dupont A. Fish evacuate smoothly respecting a social bubble. *Scientific Reports*, 2023, **13**(1): Article No. 10414
- 20 Sankey D W E, Storms R F, Musters R J, Russell T W, Hemelrijk C K, Portugal S J. Absence of “selfish herd” dynamics in bird flocks under threat. *Current Biology*, 2021, **31**(14): 3192–3198
- 21 Poel W, Daniels B C, Sosna M M G, Twomey C R, Leblanc S P, Couzin I D, et al. Subcritical escape waves in schooling fish. *Science Advances*, 2022, **8**(25): Article No. eabm6385
- 22 Yuan C Z, He H B, Wang C. Cooperative deterministic learning-based formation control for a group of nonlinear uncertain mechanical systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(1): 319–333
- 23 Marshall J A R, Reina A. On aims and methods of collective animal behaviour. *Animal Behaviour*, 2024, **210**: 189–197
- 24 Standley T S. Finding optimal solutions to cooperative pathfinding problems. In: Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Atlanta, USA: AAAI, 2010. 173–178
- 25 Dubins L E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 1957, **79**(3): 497–516
- 26 Bac F Q, Perov V L. New evolutionary genetic algorithms for NP-complete combinatorial optimization problems. *Biological Cybernetics*, 1993, **69**(3): 229–234
- 27 Ab Wahab M N, Nazir A, Khalil A, Ho W J, Akbar M F, Noor M H M, et al. Improved genetic algorithm for mobile robot path planning in static environments. *Expert Systems With Applications*, 2024, **249**: Article No. 123762



何树德 广州大学机械与电气工程学院副教授。主要研究方向为协同控制, 学习控制和自主机器人。

E-mail: [shude\\_he@gzhu.edu.cn](mailto:shude_he@gzhu.edu.cn)

(HE Shu-De Associate professor at the School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University. His research interests include coordinated control, cooperative learning, and autonomous unmanned vehicles.)

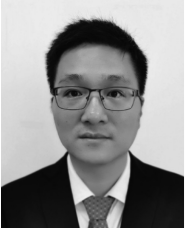


毕发奇 广州大学机械与电气工程学院硕士研究生。主要研究方向为无人艇编队控制。

E-mail: [bfq@e.gzhu.edu.cn](mailto:bfq@e.gzhu.edu.cn)

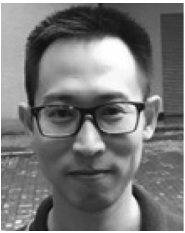
(BI Fa-Qi Master student at the School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University.

His main research interest is formation control of unmanned surface vehicles.)



**赵志甲** 广州大学机械与电气工程学院教授. 主要研究方向为自适应控制, 学习控制, 柔性机械系统和机器人技术. E-mail: [zhaozj@gzhu.edu.cn](mailto:zhaozj@gzhu.edu.cn)  
(**ZHAO Zhi-Jia** Professor at the School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University.)

His research interests include adaptive control, learning control, flexible mechanical systems, and robot technology.)



**陈首彦** 广州大学机械与电气工程学院副教授. 主要研究方向为机器人, 人机交互和智能控制.  
E-mail: [maxcsy@gzhu.edu.cn](mailto:maxcsy@gzhu.edu.cn)  
(**CHEN Shou-Yan** Associate professor at the School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou

University. His research interests include robotics, human-robot interaction, and intelligent control.)



**刘 屿** 华南理工大学自动化科学与工程学院教授. 主要研究方向为机器人, 智能控制系统和机器视觉.  
E-mail: [auylau@scut.edu.cn](mailto:auylau@scut.edu.cn)

(**LIU Yu** Professor at the School of Automation Science and Engineering, South China University of

Technology. His research interests include robotics, intelligent control system, and machine vision.)



**时昊天** 广州大学电子与通信工程学院讲师. 主要研究方向为自适应神经网络控制, 学习控制和多智能体系统. 本文通信作者.

E-mail: [shihaotian@gzhu.edu.cn](mailto:shihaotian@gzhu.edu.cn)

(**SHI Hao-Tian** Lecturer at the School of Electronics and Commu-

nication Engineering, Guangzhou University. His research interests include adaptive neural control, neural learning, and multi-agent systems. Corresponding author of this paper.)