自动化学报
ACTA AUTOMATICA SINICA

基于社会化协同的无人机集群目标合围控制

彭雅兰 段海滨 范彦铭 李明

Target Enclosing Control of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Based on Socialized Collaboration

PENG Ya-Lan, DUAN Hai-Bin, FAN Yan-Ming, LI Ming

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16383/j.aas.c250415

您可能感兴趣的其他文章

基于深度强化学习的无人机自主感知规划控制策略

Autonomous Perception-Planning-Control Strategy Based on Deep Reinforcement Learning for Unmanned Aerial Vehicles

自动化学报. 2025, 51(6): 1305-1319 https://doi.org/10.16383/j.aas.c240639

无人机使能的无线传感网总能耗优化方法

Optimization of Total Energy Consumption for Unmanned Aerial Vehicle-enabled Wireless Sensor Networks

自动化学报. 2024, 50(11): 2259-2270 https://doi.org/10.16383/j.aas.c220914

无人机/无人艇异构协同固定时间预设性能演化控制

Heterogeneous Cooperative Fixed-time Prescribed Performance Evolution Control for Unmanned Aerial/Surface Vehicle

自动化学报. 2025, 51(5): 1052-1066 https://doi.org/10.16383/j.aas.c240141

基于旋翼无人机近地面空间应急物联网节点动态协同部署

Dynamic Cooperative Deployment of Emergency Internet of Things Near Ground Space Based on Drone

自动化学报. 2021, 47(8): 2002-2015 https://doi.org/10.16383/j.aas.c180146

基于显著图融合的无人机载热红外图像目标检测方法

Object Detection Method Based on Saliency Map Fusion for UAV-borne Thermal Images

自动化学报. 2021, 47(9): 2120-2131 https://doi.org/10.16383/j.aas.c200021

景象匹配无人机视觉定位

Drone-based Scene Matching Visual Geo-localization

自动化学报. 2025, 51(2): 287-311 https://doi.org/10.16383/j.aas.c230778

基于社会化协同的无人机集群目标合围控制

彭雅兰 [1] 段海滨 [1] 范彦铭 [2] 李 明 [2]

摘 要 面向感知、通信受限且存在环境障碍的移动目标合围控制, 提出一种基于社会化协同的控制策略. 首先, 借鉴生物集群社会化行为, 构建协同响应模型与层级交互机制; 在拓扑切换与丢包条件下, 显式建模受限信息流, 以驱动集群实现目标合围. 其次, 提出强引导式任务——避碰并行协同控制, 在优先保障飞行安全的前提下实现鲁棒合围控制. 再次, 设计一致性目标状态观测器, 对目标位置与速度进行稳健估计. 最后, 仿真结果表明, 所提方法在障碍环境以及感知、通信受限条件下能够实现稳定合围, 并表现出较好的鲁棒性.

关键词 无人机; 目标合围; 社会化协同; 层级交互; 感知能力受限

引用格式 彭雅兰, 段海滨, 范彦铭, 李明. 基于社会化协同的无人机集群目标合围控制. 自动化学报, 2026, **52**(2): 284−295

DOI 10.16383/j.aas.c250415 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250415

Target Enclosing Control of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Based on Socialized Collaboration

PENG Ya-Lan[1] DUAN Hai-Bin[1] FAN Yan-Ming[2] LI Ming[2]

Abstract A socialized collaboration-based control strategy is proposed for mobile-target enclosing under perception and communication constraints in the presence of environmental obstacles. First, inspired by socialized behaviors in biological swarms, a cooperative response model and a hierarchical interaction mechanism are established; under topology switching and packet-loss conditions, the constrained information flow is explicitly modeled to drive the swarm to achieve target enclosing. Second, a strongly guided task——Collision-avoidance parallel cooperative control scheme is proposed to realize robust enclosing control while prioritizing flight safety. Third, a consensus-based target-state observer is designed to robustly estimate the target position and velocity. Finally, simulation results demonstrate that the proposed method can achieve stable encirclement in obstacle-laden environments under perception and communication constraints, exhibiting favorable robustness.

Keywords unmanned aerial vehicle; target enclosing; socialized collaboration; hierarchical interaction; limited perception capability

Citation Peng Ya-Lan, Duan Hai-Bin, Fan Yan-Ming, Li Ming. Target enclosing control of unmanned aerial vehicle swarm based on socialized collaboration. *Acta Automatica Sinica*, 2026, **52**(2): 284−295

近年来, 无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 集群编队控制在灾害搜救、海空边境巡护与移动目标布控等任务中展现出显著优势[1−6]. 其中, 圆形编队是一类常用于目标合围与跟踪的典型构型, 此编队构型要求无人机集群以指定的期望距离在目标周围均匀分布[7]. 在此任务背景下, 如何在复杂环境与不完美通信条件下保持稳定的目标合围追踪, 是当前研究的核心问题.

在无人机集群目标合围追踪控制迭代早期研究中, 常将个体运动限制在特定的几何形状内, 从而构成编队控制问题. 文献 [8] 采用循环追踪策略, 以协同方式合围目标, 实现并维持追踪者间的均匀角间距. 文献 [9] 设计向量场生成极限环或周期轨迹, 引导追踪者形成所需的几何编队形状. 然而, 每条运动轨迹都需要单独的向量场生成, 使得该方法难以在多智能体、强动态耦合场景中保持普适性. 针对时效性与收敛效率问题, 文献 [10] 提出一种模型引导的强化学习控制框架, 利用固定时间极坐标控制器保证在时限内到达目标圆, 并结合以抑制干扰与避碰为奖励的补充策略提升收敛速度. 另一方面, 文献 [11] 提出一种领导者引导的控制策略, 使得追

收稿日期 2025-08-28 录用日期 2025-12-09
Manuscript received August 28, 2025; accepted December 9, 2025
国家自然科学基金 (62350048, U2541218, T2121003) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (62350048, U2541218, T2121003)
本文责任编委 曹向辉
Recommended by Associate Editor CAO Xiang-Hui
1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院飞行器一体化控制全国重点实验室 北京 100083 2. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所 沈阳 110035
1. National Key Laboratory of Aircraft Integrated Flight Control, School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083 2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035

踪者可在任意编队构型下完成对目标的合围, 从而提升机动灵活性与编队形态的可塑性.

为降低工程实现难度, 现有研究往往着眼于减少控制律设计中所需的信息维度, 例如仅利用方位角信息或相对距离信息进行控制等[12−16]. 与此同时, 为保障任务过程的安全性, 不少研究工作将避障机制纳入合围控制策略[17−18]. 文献 [19] 设计的目标合围控制策略不仅避免了追踪者之间的碰撞, 还考虑了与静态障碍物的避碰.

上述研究中的多智能体目标合围控制策略多依赖于刚性编队构型与通信状态来维持每个追踪者与目标及多个邻居之间的编队构型约束. 实际应用中, 由于外部干扰因素, 常出现某些个体通信或感知失效引起的整个编队构型崩溃问题. 因此, 严格的通信与编队结构可能并不适用于多智能体集群目标合围控制.

为顺利完成目标合围控制, 无人机需要对目标状态进行估计. 传统的协同状态估计方法主要依赖于分布式卡尔曼滤波 (distributed Kalman filters, DKF)[20−22], 在理想定位条件下可提高估计精度和目标跟踪性能. 然而, 许多场景无法稳定获取全球定位系统 (global positioning system, GPS) 信号. 虽有研究探索无 GPS 条件下的目标状态估计[23−24], 但多聚焦于开放或无障碍物环境, 对存在环境障碍与部分个体感知失效的情况考虑不足. 因此, 在缺失外部定位系统且环境复杂时, 如何实现一致的协同状态估计, 仍面临显著挑战.

自然界中, 小至细菌菌落, 大至人类社会, 广泛存在通过简单局部规则实现全局协作的社会化合作现象[25−28]. 社会力模型以牛顿第二定律为基础, 引入虚拟力来刻画个体间相互作用, 其叠加效应驱动群体呈现宏观有序行为[29]. 为解决无人机集群在通信、感知受限与障碍物环境中的自主控制问题提供新的视角, 利用简单一致的交互规则与层级组织结构, 弥补个体能力缺失, 涌现稳健的群体智能.

基于上述研究, 本文面向通信、感知失效影响下无人机集群目标合围控制问题, 提出一种基于社会化协同控制策略. 通过建立社会化协同响应模型与层级交互机制, 给出一种无人机集群分布式控制律, 以改善集群的合围控制鲁棒性. 本文的主要创新点在于:

1) 基于生物群体智能行为, 提出社会化协同响应模型, 对个体与群体层级行为进行建模;

2) 建立社会化层级交互机制, 使得通信、感知失效无人机仍可通过社会化层级交互快速获取目标关键信息, 并据此实现面向合围任务的分布式控制;

3) 为应对环境障碍, 提出一种强引导式任务——避碰协同控制, 通过设置控制策略优先级, 满足飞行避碰与目标合围任务的协调调度, 保证集群安全飞行.

本文的结构安排如下: 第 1 节为问题描述; 第 2 节介绍社会化协同机制; 第 3 节设计基于社会化协同的无人机集群目标合围控制; 第 4 节为仿真实验验证; 第 5 节给出本文的结论并对未来进行展望.

1　问题描述

1.1　无人机建模

考虑每架无人机配置空速、航向与航迹三通道自动驾驶仪, 无人机等效二阶动力学模型[30] 可建立为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = V_i\cos\chi_i\cos\gamma_i \\ \dot{y}_i = V_i\sin\chi_i\sin\gamma_i \\ \dot{z}_i = V_i\sin\gamma_i \\ \dot{V}_i = \dfrac{V_i^c - V_i}{\tau_v} \\ \dot{\chi}_i = \dfrac{\chi_i^c - \chi_i}{\tau_\chi} \\ \dot{\gamma}_i = \dfrac{\gamma_i^c - \gamma_i}{\tau_\gamma} \end{cases} \tag{1}$$

考虑真实性约束

$$\begin{cases} V_{\min} \le V_i \le V_{\max} \\ |\dot{\chi}_i| \le \dfrac{n_{\max} g}{V_i} \\ \gamma_{\min} \le \gamma_i \le \gamma_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

其中, $(\dot{x}_i,\ \dot{y}_i,\ \dot{z}_i)$ 为无人机 i 的三个轴向速度; V_i、χ_i 和 γ_i 分别为水平速度、航向角和航迹角; V_i^c、χ_i^c 和 γ_i^c 分别为自动驾驶仪在三个回路上的控制输入量; τ_v、τ_χ 和 τ_γ 分别为自动驾驶仪速度、偏航和升速通道一阶闭环时间常数; $V_{\min}$、$V_{\max}$, $n_{\max}$, $\gamma_{\min}$ 和 $\gamma_{\max}$ 分别为最小、最大水平速度, 最大横向过载, 最小、最大高度变化率; $g = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$ 为重力加速度.

由于无人机运动模型的非线性, 不易直接设计目标合围控制律, 需要设计控制指令转换器, 用于建立非线性运动模型空速、航向、航迹角指令与其等效二阶线性系统指令的转换关系. 对式 (1) 中前三项取二阶微分, 可得

$$\begin{cases} \ddot{x}_i = \dot{V}_i\cos\chi_i\cos\gamma_i - V_i\dot{\chi}_i\sin\chi_i\cos\gamma_i - \\ \qquad V_i\dot{\gamma}_i\cos\chi_i\sin\gamma_i \\ \ddot{y}_i = \dot{V}_i\sin\chi_i\cos\gamma_i + V_i\dot{\chi}_i\cos\chi_i\cos\gamma_i - \\ \qquad V_i\dot{\gamma}_i\sin\chi_i\sin\gamma_i \\ \ddot{z}_i = \dot{V}_i\sin\gamma_i + V_i\dot{\gamma}_i\cos\gamma_i \end{cases} \tag{3}$$

得到第 i 架无人机的等效二阶系统控制输入向

量 $\boldsymbol{u}_i = [u_{ix},\ u_{iy},\ u_{iz}]^{\mathrm{T}}$

$$\begin{bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ u_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\chi_i\cos\gamma_i & -\sin\chi_i\cos\gamma_i & -\cos\chi_i\sin\gamma_i \\ \sin\chi_i\cos\gamma_i & \cos\chi_i\cos\gamma_i & -\sin\chi_i\sin\gamma_i \\ \sin\gamma_i & 0 & \cos\gamma_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ V_i\dot{\chi}_i \\ V_i\dot{\gamma}_i \end{bmatrix} \tag{4}$$

1.2 目标合围控制问题

相对参考系中, 无人机与目标之间的几何关系如图 1 所示. 其中, v_n 为第 n 架无人机的速度, θ_{iT} 与 θ_{jT} 分别表示第 i 架无人机与第 j 架无人机和目标间的角距离.

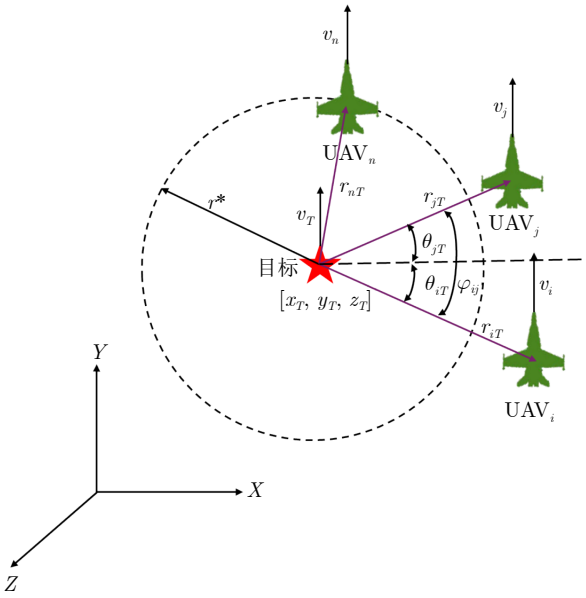


图 1 无人机集群目标合围

Fig. 1 Target enclosing of UAV swarm

定义 1. 给定一组由 n 架无人机和单个目标组成的系统. 无人机集合记为 U, 即 $U = \{u_1,\ u_2,\ \cdots,\ u_n\}$, 合围目标满足运动模型为[31]

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{p}}_T = \boldsymbol{v}_T, \\ \dot{\boldsymbol{v}}_T = \boldsymbol{a}_T, \end{cases} \quad ||\boldsymbol{v}_T|| \le v_{\max},\ ||\boldsymbol{a}_T|| \le a_{\max} \tag{5}$$

其中, $\boldsymbol{p}_T = [x_T,\ y_T,\ z_T]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{v}_T = [v_{Tx},\ v_{Ty},\ v_{Tz}]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{a}_T = [a_{Tx},\ a_{Ty},\ a_{Tz}]^{\mathrm{T}}$ 分别表示目标的三维位置、速度与加速度控制向量; $v_{\max}$ 为目标最大速度; $a_{\max}$ 为目标最大加速度. 假设目标加速度不发生频繁、剧烈的变化, 为形成合围编队, 需设计一种分布式编队控制器使得以下结论成立:

$$\begin{cases} \lim\limits_{t\to\infty} |r_{iT} - r^*| = 0 \\ \lim\limits_{t\to\infty} |\theta_{iT} - \theta_{jT}| = \varphi_{ij} = \varphi_{ij}^* \\ \lim\limits_{t\to\infty} z_i = z_T \\ \lim\limits_{t\to\infty} \boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{v}_T \end{cases} \tag{6}$$

其中, $r_{iT} = \sqrt{(x_i - x_T)^2 + (y_i - y_T)^2}$ 表示第 i 架无人机与目标的间距; x_i、y_i 与 z_i 分别为第 i 架无人机的 x、y、z 轴坐标; $r^* > 0$ 表示无人机的期望合围半径; φ_{ij} 表示相邻无人机 i、j 相对于目标的角距离; φ_{ij}^* 为相邻无人机 i、j 相对于目标的期望角距离.

每架无人机需要与合围目标保持相同高度, 考虑以下高度保持控制器 a_{iz}

$$a_{iz} = K_1\left(z_{iT} - z_i\right) + K_2\left(v_{iTz} - v_i\right) + a_{iTz} \tag{7}$$

其中, z_{iT}、v_{iTz} 与 a_{iTz} 分别表示无人机 i 相对目标的高度、垂向速度与加速度; K_1, $K_2 > 0$ 为高度控制增益常数.

2 社会化协同机制

2.1 社会化协同响应模型

考虑社会由 N 个个体构成, 记为 $S = \{M_1,\ M_2,\ \cdots,\ M_N\}$. 假设每个个体运动状态都符合牛顿第二定理, 整个系统的进化可由以下动力学方程进行描述:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{p}}_i = \boldsymbol{v}_i, \\ \dot{\boldsymbol{v}}_i = \dfrac{\boldsymbol{f}_i}{m_i}, \end{cases} \quad i \in \{1,\ 2,\ \cdots,\ N\} \tag{8}$$

其中, m_i 为个体 i 的质量, $\boldsymbol{p}_i$、$\boldsymbol{v}_i$ 与 $\boldsymbol{f}_i$ 分别为个体 i 的位置向量、速度向量与作用在其上的合力向量.

作用于个体 $i \in \{1,\ 2,\ \cdots,\ N\}$ 的合力 $\boldsymbol{f}_i$ 由邻居协同力 $\boldsymbol{f}_i^{co}$、目标吸引力 $\boldsymbol{f}_i^{T}$、个体偏好力 $\boldsymbol{f}_i^{d}$ 与随机扰动力 $\boldsymbol{f}_i^{w}$ 组成

$$\boldsymbol{f}_i = w_{co}\boldsymbol{f}_i^{co} + w_T\boldsymbol{f}_i^{T} + w_d\boldsymbol{f}_i^{d} + w_w\boldsymbol{f}_i^{w} \tag{9}$$

其中, w_{co}、w_T、w_d 与 w_w 分别为各分力对应的权重系数.

个体 i 的邻居协同力 $\boldsymbol{f}_i^{co}$ 表达式如下:

$$\boldsymbol{f}_i^{co} = \sum_{j\in N_i} \boldsymbol{h}_j \left\| \sum_{j\in N_i} \boldsymbol{h}_j \right\|^{-1} + \sum_{j\in N_i} (\boldsymbol{p}_j - \boldsymbol{p}_i) \left\| \sum_{j\in N_i} (\boldsymbol{p}_j - \boldsymbol{p}_i) \right\|^{-1} \tag{10}$$

其中, N_i 为根据邻居交互模式得到的个体 i 的邻居集合, 具体交互模式在第 2.2 节中给出. $\boldsymbol{h}_j$ 为个体 j

的速度航向. 在邻居协同作用力下, 个体 i 的飞行航向与其邻居趋于一致, 且向着邻居平均位置移动.

目标吸引力 $\boldsymbol{f}_i^T$ 使得个体 i 趋近目标, 目标吸引力的表达式为:

$$\boldsymbol{f}_i^T=\begin{cases}m_i\dfrac{||\boldsymbol{v}_i||^2}{r_T}\mathrm{sgn}\left(\mathrm{dot}\left(\boldsymbol{h}_i^{\triangle},\ \dfrac{\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_T}{||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_T||}\right)\right)\boldsymbol{h}_i^{\triangle}, \\ \qquad\qquad ||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_T||<r_e \\ [0,\ 0]^{\mathrm{T}},\ ||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_T||\geq r_e\end{cases} \tag{11}$$

其中, r_T 为个体的目标吸引转向半径, r_e 为个体的目标感知半径, $\mathrm{dot}(\boldsymbol{a},\ \boldsymbol{b})=\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}$ 为向量 $\boldsymbol{a}$ 与向量 $\boldsymbol{b}$ 的点乘, $\boldsymbol{h}_i^{\triangle}$ 为个体 i 的航向单位正交向量.

为避免个体过多学习邻居知识带来的行为偏移, 引入个体偏好力 $\boldsymbol{f}_i^d$, 当个体飞行速度偏离偏好飞行速度越大时, 个体偏好力也越大:

$$\boldsymbol{f}_i^d=m_i\left(||\boldsymbol{v}_i||^*-||\boldsymbol{v}_i||\right) \tag{12}$$

其中, $||\boldsymbol{v}_i||^*$ 为个体 i 的偏好飞行速度.

由于现实中无法完美获取或响应信息, 所以认为每个个体都受到一个随机扰动力 $\boldsymbol{f}_i^w$ 的作用, 定义为:

$$\boldsymbol{f}_i^w=\rho_i\boldsymbol{h}_i^{\triangle} \tag{13}$$

其中, ρ_i 为服从正弦分布的随机标量.

2.2　社会化层级交互模式

假设某一时刻社会中若干个体获取到某些环境信息 I_s, 为将该信息快速传递至整个社会, 其他个体需通过与周围个体进行交互以获取信息, 则整个社会的信息演化动力学模型可定义为:

$$\begin{cases}\dot{\hat{I}}_s=k_s\displaystyle\sum_{j\in S_u}a_{ij}\left(\hat{I}_j-\hat{I}_i\right)+ \\ \qquad k_s\displaystyle\sum_{j\in S_s}a_{ij}\left(\hat{I}_j-\hat{I}_i\right),\ i\in S_u \\ \hat{I}_i=I_i,\qquad\qquad\qquad i\in S_s\end{cases} \tag{14}$$

其中, S_s 为当前时刻社会中已感知环境信息个体的集合, S_u 为社会中未感知环境信息个体的集合, k_s 为环境信息共识系数, $\hat{I}_i$ 表示个体 i 对环境信息 I_i 的估计值, a_{ij} 为个体 i 与个体 j 的交互强度, 带有符号“ ˆ ”的向量表示无人机 i 对目标相应状态的估计. 且有

$$\begin{cases}S=S_s\cup S_u \\ S_s\cap S_u=\emptyset\end{cases} \tag{15}$$

给定未知信息个体交互拓扑 G_u, 其摄动拉普拉斯矩阵为 $\boldsymbol{L}_u$, 设计层级邻居选择准则:

$$\left[\tau_1\left(\boldsymbol{L}_u\right)\right]_{ij}>1 \tag{16}$$

其中, τ_1 为拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}_u$ 的最小特征值.

该策略使每个个体在其邻居集合 N_i 中挑选更可信且贡献更高的邻居个体构成层级团体, 保证优先采纳收敛更快、代价更低的邻居, 从而组成新的邻居集合 N_i^{new}, 表示为

$$N_i^{new}=\left\{j\in\{N_i\backslash S_s\}:\left[\tau_1\left(\boldsymbol{L}_u\right)\right]_{ij}>1\right\} \tag{17}$$

因此, 信息演化动力学方程可写为:

$$\begin{cases}\dot{\hat{I}}_s=k_s\displaystyle\sum_{j\in N_i^{new}}a_{ij}\left(\hat{I}_j-\hat{I}_i\right)+ \\ \qquad k_s\displaystyle\sum_{j\in S_s}a_{ij}\left(\hat{I}_j-\hat{I}_i\right),\ i\in S_u \\ \hat{I}_i=I_i,\qquad\qquad\qquad i\in S_s\end{cases} \tag{18}$$

3　基于社会化协同的无人机集群目标合围控制

3.1　一致性目标状态观测器

考虑以下分布式目标观测器

$$\begin{cases}\hat{X}_{T,\,i}=X_T, & r_{iT}\leq r_d \\ \hat{X}_{T,\,i}=\alpha\displaystyle\sum_{j\in N_i}a_{ij}\left(\boldsymbol{p}\right)\left(\hat{X}_{T,\,j}-\hat{X}_{T,\,i}\right), & \text{其他}\end{cases} \tag{19}$$

其中, X_T 与 $\hat{X}_{T,\,i}$ 分别表示目标真实状态与第 i 架无人机对目标的观测状态, X_T 可指代合围目标的三维位置、速度或加速度向量; r_d 为相邻无人机间期望距离; α 为收敛系数, 其值越大, 目标观测器收敛速度越快.

建立感知模型与约束, 第 i 架无人机对于目标状态的观测为:

$$y_i\left(t\right)=s\left(\boldsymbol{p}_i\left(t\right),\ \boldsymbol{p}_T\left(t\right)\right)+w_i\left(t\right) \tag{20}$$

其中, $s(\cdot,\ \cdot)$ 为传感映射; $w_i(t)$为有界噪声, $||w_i(t)||\leq\overline{w}$, $\overline{w}>0$ 为噪声上界. 感知触发受量程、视场与遮挡限制, 当且仅当满足以下条件时目标可见

$$\begin{cases}||\boldsymbol{p}_i\left(t\right)-\boldsymbol{p}_T\left(t\right)||\leq r_e \\ r_{iT}\in FOV_i \\ r_{iT}\cap O=\emptyset\end{cases} \tag{21}$$

其中, r_e 为无人机的感知半径, FOV_i 为视场角域, O 为障碍集合.

建立通信模型与受限条件, 无人机集群通信图为时变图 $G_\sigma(t)=(NOD,\ E_\sigma(t))$, NOD 为时变图

节点集, $E_\sigma(t)$ 表示时变图连通边集合; 邻接矩阵与拉普拉斯矩阵分别为 $\boldsymbol{A}_\sigma(t)$ 与 $\boldsymbol{L}_\sigma(t)$. 每条通信链路的时延 $\tau_{ij}(t) \leq \tau_{\max}$, 连续失联时长 $\Delta \leq \Delta_{\max}$. 假设平均连通 T_w 与驻留时间 τ_d 存在 $T_w > 0$、$\tau_d > 0$, 使得任意窗口 $[t,\, t+T_w]$ 的联合图连通, 且拓扑切换驻留时间不小于 τ_d.

定义无人机集群中感知、通信能力受限的无人机集合为 $\boldsymbol{\Xi}_f$, 对于上述一致性目标状态观测器, 有以下结论.

引理 1. 对于任务无人机节点 $i \in \boldsymbol{\Xi}_f$, 若以下条件成立, 则目标状态观测器误差有界.

1) 在每个时刻, 受限子图连通, 且每个受限子图内至少一个节点被有效节点锚定;

2) 权重存在且有下界: $a_{ij}(t) \geq a_{\min} > 0$, a_{ij} 为个体 i 与个体 j 间的交互强度, $a_{\min}$ 为集群个体间交互强度最小值;

3) 移动目标速度有界: $|\dot{X}_T(t)| < \infty$.

证明. 由于每个时刻, 均存在一条由感知失效无人机到感知有效无人机的信息连通路径, 因此, 可将当前时刻通信拓扑分解为若干个彼此独立的拓扑子图, 且每个拓扑子图中至少包含一架通信有效无人机. 设 N_f 与 N_f^k 分别为通信失效无人机数量与第 k 个拓扑子图中的通信失效无人机数量. 设 $1, \cdots, N_f^1$ 为拓扑子图 1 中的通信失效无人机编号; $N_f^{k-1}+1, \cdots, N_f^k$ 为拓扑子图 k 中失效无人机编号. 定义所有通信失效节点按照编号索引排序的堆叠状态估计向量为 $\hat{\boldsymbol{X}}_f = \left\{\hat{X}_{T,\,i} | i \in \boldsymbol{\Xi}_f\right\}$, 则对于式 (19), 有

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\boldsymbol{X}}}_f =& \alpha \begin{pmatrix} \tilde{\boldsymbol{L}}_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \tilde{\boldsymbol{L}}_{N_L} \end{pmatrix} \hat{\boldsymbol{X}}_f + \\ & \alpha \begin{pmatrix} \tilde{d}_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \tilde{d}_{N_f} \end{pmatrix} \left(X_T \boldsymbol{1}_{N_f} - \hat{\boldsymbol{X}}_f\right) \end{aligned} \tag{22}$$

其中, $\tilde{\boldsymbol{L}}_k$ 表示拓扑子图 k 中前 M_k 架通信失效无人机连通子图的拉普拉斯矩阵; $\boldsymbol{1}_{N_f}$ 表示长度为 N_f 的全 1 向量, 对任意拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L} \in \mathbf{R}^{n\times n}$, 有 $\boldsymbol{L}\boldsymbol{1}_n = \boldsymbol{0}$. 矩阵元素 $\tilde{d}_k$ 为

$$\tilde{d}_k = \sum_{j\in N_k,\, j\notin N_f} a_{kj}(\boldsymbol{p}) \tag{23}$$

令 $\tilde{\boldsymbol{L}} = \mathrm{diag}\{\tilde{\boldsymbol{L}}_k\}$, $\tilde{\boldsymbol{D}} = \mathrm{diag}\{\tilde{d}_i\}$, 则式 (22) 等效为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{X}}}_f = \alpha\left(\tilde{\boldsymbol{L}} + \tilde{\boldsymbol{D}}\right)\left(X_T \boldsymbol{1}_{N_f} - \hat{\boldsymbol{X}}_f\right) \tag{24}$$

定义误差向量 $\tilde{\boldsymbol{X}}_f = \hat{\boldsymbol{X}}_f - X_T \boldsymbol{1}_{N_f}$, 则

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{X}}}_f = -\alpha\left(\tilde{\boldsymbol{L}} + \tilde{\boldsymbol{D}}\right)\tilde{\boldsymbol{X}}_f - \dot{X}_T \boldsymbol{1}_{N_f} \tag{25}$$

对于第 k 个受限子图的拉普拉斯矩阵 $\tilde{\boldsymbol{L}}_k$ 和任意非零 $z \in \mathbf{R}^{N_f^k}$, 对 z 作分解 $z = a\boldsymbol{1} + z_\perp$, a 为常数且 $z_\perp^{\mathrm{T}}\boldsymbol{1} = 0$, 则 $z^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{L}}_k z = z_\perp^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{L}}_k z \geq \lambda_2(\tilde{\boldsymbol{L}}_k)||z_\perp||^2$, 其中, $\lambda_2(\cdot)$ 为拉普拉斯矩阵的代数连通度. 又 $z^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{D}}z \geq d_{\min}a^2||\boldsymbol{1}||^2 = d_{\min}a^2 N_f^k$, $d_{\min}$ 为集群中最小相邻距离. 合并得

$$\begin{aligned} & z^{\mathrm{T}}\left(\tilde{\boldsymbol{L}}_k + \tilde{\boldsymbol{D}}_k\right) z \geq \\ & \quad \min\left\{\lambda_2\left(\tilde{\boldsymbol{L}}_k\right),\, d_{\min}\right\}\left(||z_\perp||^2 + a^2 N_f^k\right) = \\ & \quad \underline{\lambda}_k ||z||^2 \end{aligned} \tag{26}$$

其中, $\underline{\lambda}_k = \min\{\lambda_2(\tilde{\boldsymbol{L}}_k),\, d_{\min}\}$.

从而 $\tilde{\boldsymbol{L}}_k + \tilde{\boldsymbol{D}}_k$ 是对称正定的, 且有

$$\begin{aligned} & \lambda_{\min}\left(\tilde{\boldsymbol{L}}_k + \tilde{\boldsymbol{D}}_k\right) \geq \\ & \quad \min\left\{\lambda_2\left(\tilde{\boldsymbol{L}}_k\right),\, d_{\min}\right\} = \underline{\lambda}_k > 0 \end{aligned} \tag{27}$$

设 $V = (1/2)\left\|\tilde{\boldsymbol{X}}_f\right\|^2$, 结合式 (25) 得

$$\begin{aligned} \dot{V} =& -\alpha\tilde{\boldsymbol{X}}_f^{\mathrm{T}}\left(\tilde{\boldsymbol{L}} + \tilde{\boldsymbol{D}}\right)\tilde{\boldsymbol{X}}_f - \dot{X}_T\tilde{\boldsymbol{X}}_f^{\mathrm{T}}\boldsymbol{1}_{N_f} \leq \\ & -2\alpha\underline{\lambda}V + \left|\dot{X}_T\right|\left\|\tilde{\boldsymbol{X}}_f\right\|\left|\left|\boldsymbol{1}_{N_f}\right|\right| \end{aligned} \tag{28}$$

$$\dot{V} \leq -2\alpha\underline{\lambda}V + \frac{\overline{s}^2 N_f}{4\alpha\underline{\lambda}} \tag{29}$$

解微分不等式得

$$V(t) \leq \mathrm{e}^{-2\alpha\underline{\lambda}t}V(0) + \frac{\overline{s}^2 N_f}{8\alpha\underline{\lambda}}(1 - \mathrm{e}^{-2\alpha\underline{\lambda}t}) \tag{30}$$

$$\left\|\tilde{\boldsymbol{X}}_f\right\| \leq \mathrm{e}^{-\alpha\underline{\lambda}t}\left\|\tilde{\boldsymbol{X}}_f(0)\right\| + \frac{\overline{s}}{\alpha\underline{\lambda}} \tag{31}$$

式 (19) 误差有界且误差半径为 $\overline{s}/(\alpha\underline{\lambda})$.

为确保一致性目标状态观测器稳态误差小于 ε (具体任务与场景容许的最大一致性目标状态观测器稳态误差), 需设置收敛参数 $\alpha \geq \overline{s}/(\varepsilon\underline{\lambda})$. 若短时间内受限子图与有效节点完全断联, 误差至多漂移 $\Delta\overline{s}$, 恢复连接后按 $\mathrm{e}^{-\alpha\underline{\lambda}}$ 指数收敛. □

3.2 社会化协同合围控制

基于第 2 节社会化协同行为的研究, 设计由社会化协同势函数和无人机−目标交互势函数构成的合围势函数. 其中, 社会化协同势函数 Ψ_{sc} 描述了社会化协同过程中成员间的交互, 其表达式为

$$\Psi_{sc}(v)=\int_{||r_d||_\sigma}^{v}\left(f(x\,||k_l r_d||_\sigma^{-1},\,\varepsilon)(x-||r_d||_\sigma)\times\left(\sqrt{1+(x-||r_d||_\sigma)}\right)^{-1}\right)\mathrm{d}x \tag{32}$$

其中, r_d 为相邻无人机间期望距离; k_l 为根据具体任务待制定的常数, $k_l\in(1,\,r_c r_d^{-1})$, r_c 为集群个体间通讯半径; $||x||_\sigma$ 为 σ 范数; $f(\cdot,\,\cdot)$ 为生成平滑的距离交互强度系数, 其表达式为:

$$f(x,\,\varepsilon)=\begin{cases}1, & x\in[0,\,\varepsilon)\\ 1+\dfrac{1}{2}\cos\left(\dfrac{x-\varepsilon}{1-\varepsilon}\pi\right), & x\in[\varepsilon,\,1]\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{33}$$

$||x||_\sigma=(\sqrt{1+\mu||x||^2}-1)/\mu$, μ 为固定参数, 其梯度函数为

$$\sigma_e(x)=\frac{x}{\sqrt{1+\mu||x||^2}} \tag{34}$$

为描述无人机个体与目标间的交互强度, 设计无人机−目标交互势函数 Ψ_{Tar}

$$\Psi_{Tar}(v)=\int_{||r_e||}^{v}(x-||r^*||)\,\mathrm{d}x \tag{35}$$

其中, r^* 为无人机与目标间期望距离, 即期望的合围半径. 由此可得如下无人机集群自组织目标合围控制

$$\begin{aligned}\boldsymbol{u}_i=&-\gamma_1\sum_{j\in N_i}\nabla_{\boldsymbol{p}_i}\Psi_{sc}(||\boldsymbol{p}_j-\boldsymbol{p}_i||)+\\ &\gamma_2\sum_{j\in N_i}f\left(||\boldsymbol{p}_j-\boldsymbol{p}_i||\,||k_l r_d||^{-1},\,\varepsilon\right)(\boldsymbol{v}_j-\boldsymbol{v}_i)-\\ &\gamma_3\sum_{j\in N_i}\nabla_{\boldsymbol{p}_i}\Psi_{Tar}(||\hat{\boldsymbol{p}}_i-\boldsymbol{p}_i||)+\\ &\hat{\boldsymbol{u}}_i+\gamma_4(\hat{\boldsymbol{v}}_i-\boldsymbol{v}_i)\end{aligned} \tag{36}$$

其中, 控制增益 γ_1、γ_2、γ_3 与 γ_4 均为正数.

本文在控制器设计基础上, 得到以下定理 1, 并给出证明.

定理 1. 假设所有无人机的初始位置通信拓扑是连通的, 给定一个由通讯有效无人机与通信失效无人机组成的集群, 但在社会化协同目标合围控制协议 (36) 与一致性目标观测器 (19) 作用下, 无人机集群将形成一个满足以下约束的目标合围构型:

$$\begin{cases}\lim\limits_{t\to\infty}||\hat{\boldsymbol{p}}_i-\boldsymbol{p}_i||\to r_d,\ \forall i\in\boldsymbol{\Xi}\\ \lim\limits_{t\to\infty}||\boldsymbol{p}_j-\boldsymbol{p}_i||\to r_d,\ \forall i\in\boldsymbol{\Xi},\ j\in N_i\\ \lim\limits_{t\to\infty}\boldsymbol{v}_i-\hat{\boldsymbol{v}}_i\to 0,\qquad \forall i\in\boldsymbol{\Xi}\end{cases} \tag{37}$$

其中, $\boldsymbol{\Xi}$ 为合围无人机集合.

证明. 令 $\tilde{\boldsymbol{p}}_i=\hat{\boldsymbol{p}}_i-\boldsymbol{p}_i$ 和 $\tilde{\boldsymbol{v}}_i=\hat{\boldsymbol{v}}_i-\boldsymbol{v}_i$ 分别为无人机 i 与合围目标的位置误差和速度误差, $\tilde{\boldsymbol{p}}=[\tilde{\boldsymbol{p}}_1,\,\tilde{\boldsymbol{p}}_2,\,\cdots,\,\tilde{\boldsymbol{p}}_N]\in\mathbf{R}^{3N}$ 和 $\tilde{\boldsymbol{v}}=[\tilde{\boldsymbol{v}}_1,\,\tilde{\boldsymbol{v}}_2,\,\cdots,\,\tilde{\boldsymbol{v}}_N]\in\mathbf{R}^{3N}$ 分别为整个集群的位置误差与速度误差向量, 定义整个无人机集群的 Lyapunov 函数为:

$$\begin{aligned}Q=&\gamma_1\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\sum_{j\in N_i}\Psi_{sc}\left(||\boldsymbol{p}_j-\boldsymbol{p}_i||_\sigma\right)+\\ &2\gamma_3\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\Psi_{Tar}\left(||\hat{\boldsymbol{p}}_i-\boldsymbol{p}_i||_\sigma\right)+\\ &\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\left(\tilde{\boldsymbol{v}}_i^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{v}}_i+\tilde{\boldsymbol{s}}_i^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{s}}_i\right)=\\ &\gamma_1\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\sum_{j\in N_i}\Psi_{sc}\left(||\tilde{\boldsymbol{p}}_j-\tilde{\boldsymbol{p}}_i||_\sigma\right)+\\ &2\gamma_3\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\Psi_{Tar}\left(||\tilde{\boldsymbol{p}}_i||_\sigma\right)+\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\left(\tilde{\boldsymbol{v}}_i^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{v}}_i+\tilde{\boldsymbol{s}}_i^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{s}}_i\right)\end{aligned} \tag{38}$$

其中, $\tilde{\boldsymbol{s}}_i$ 为无人机 i 的目标状态估计误差.

Q 的一阶导数为:

$$\begin{aligned}\dot{Q}=&\gamma_1\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\sum_{j\in N_i}\Big(\dot{\tilde{\boldsymbol{p}}}_i^{\ \mathrm{T}}\nabla_{\boldsymbol{p}_i}\Psi_{sc}\left(||\tilde{\boldsymbol{p}}_j-\tilde{\boldsymbol{p}}_i||_\sigma\right)+\\ &\dot{\tilde{\boldsymbol{p}}}_j^{\ \mathrm{T}}\nabla_{\boldsymbol{p}_j}\Psi_{sc}\left(||\tilde{\boldsymbol{p}}_j-\tilde{\boldsymbol{p}}_i||_\sigma\right)\Big)+\\ &2\gamma_3\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\Big(\dot{\tilde{\boldsymbol{p}}}_i^{\ \mathrm{T}}\nabla_{\boldsymbol{p}_i}\Psi_{Tar}\left(||\tilde{\boldsymbol{p}}_i||_\sigma\right)\Big)+\\ &2\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\tilde{\boldsymbol{v}}_i^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{\boldsymbol{v}}}+2\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\tilde{\boldsymbol{s}}_i^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{\boldsymbol{s}}}_i=\\ &2\gamma_1\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\sum_{j\in N_i}\dot{\tilde{\boldsymbol{p}}}_i^{\ \mathrm{T}}\nabla_{\boldsymbol{p}_i}\Psi_{sc}\left(||\tilde{\boldsymbol{p}}_j-\tilde{\boldsymbol{p}}_i||_\sigma\right)+\\ &2\gamma_3\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\Big(\dot{\tilde{\boldsymbol{p}}}_i^{\ \mathrm{T}}\nabla_{\boldsymbol{p}_i}\Psi_{Tar}\left(||\tilde{\boldsymbol{p}}_i||_\sigma\right)\Big)+\\ &2\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\tilde{\boldsymbol{v}}_i^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{\boldsymbol{v}}}+\tilde{\boldsymbol{s}}_f^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{\boldsymbol{s}}}_f\end{aligned} \tag{39}$$

将控制协议式 (36) 和式 (39) 代入可得:

$$\begin{aligned}\dot{Q}=&2\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\tilde{\boldsymbol{v}}_i^{\mathrm{T}}\Bigg(-\gamma_2\sum_{j\in N_i}\theta_{ij}(\tilde{\boldsymbol{v}}_i-\tilde{\boldsymbol{v}}_j)-\\ &\gamma_4\tilde{\boldsymbol{v}}_i\Bigg)-\tilde{\boldsymbol{s}}_f^{\mathrm{T}}\left(\overline{\boldsymbol{L}}_F\otimes\boldsymbol{I}_c\right)\tilde{\boldsymbol{s}}_f=\\ &-\gamma_2\tilde{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{L}_\theta\otimes\boldsymbol{I}_3\right)\tilde{\boldsymbol{v}}-2\gamma_4\sum_{i\in\boldsymbol{\Xi}}\tilde{\boldsymbol{v}}_i^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{v}}-\\ &\tilde{\boldsymbol{s}}_f^{\mathrm{T}}\left(\overline{\boldsymbol{L}}_F\otimes\boldsymbol{I}_c\right)\tilde{\boldsymbol{s}}_f\end{aligned} \tag{40}$$

其中, $\overline{\boldsymbol{L}}_F$ 为不知情无人机交互拓扑的摄动拉普拉

斯矩阵; $\boldsymbol{L}_\theta$ 为半正定矩阵, 可表示为:

$$\begin{cases}[\boldsymbol{L}_\theta]_{ii}=\displaystyle\sum_{j\in N_i}\theta_{ij},\ \forall i\in\boldsymbol{\Xi}\\ [\boldsymbol{L}_\theta]_{ij}=\begin{cases}-\theta_{ij},\ \forall i\in\boldsymbol{\Xi},\ j\in N_i\\ 0,\quad \text{其他}\end{cases}\end{cases}\tag{41}$$

由式 (39)~ (41) 可知, $\dot{Q}\le 0$, 即 $Q(t)\le Q(0)$, $\forall t\ge 0$. 根据 LaSalle 不变集定理可得从集合 $\{[\tilde{\boldsymbol{p}}^{\mathrm{T}},\ \tilde{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}|Q(t)\le Q(0)\}$ 出发的所有无人机轨迹都可收敛于不变集 $\{[\tilde{\boldsymbol{p}}^{\mathrm{T}},\ \tilde{\boldsymbol{v}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}|\dot{Q}=0\}$, $\dot{Q}=0$ 意味着 $\tilde{\boldsymbol{v}}_i=0$ 和 $\tilde{\boldsymbol{s}}_i=0$, $\forall i\in\boldsymbol{\Xi}$, 因此 $\forall i\in\boldsymbol{\Xi}$, $j\in N_i$ 有

$$\begin{cases}\lim\limits_{t\to\infty}\tilde{\boldsymbol{s}}_f=0\\ \lim\limits_{t\to\infty}||\tilde{\boldsymbol{p}}_i||=r_e\\ \lim\limits_{t\to\infty}\tilde{\boldsymbol{v}}_i=0\\ \lim\limits_{t\to\infty}||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_j||=r_d\end{cases}\tag{42}$$

□

3.3 强引导式任务——避碰协同控制

为保障无人机集群安全飞行, 形成稳定目标合围编队构型的同时, 需要考虑机间避碰与环境障碍因素, 设计一种强引导式任务——避碰协同控制. 通过设置协同控制优先级, 在保证飞行安全的前提下, 尽可能有效实施目标合围.

定义第 i 架无人机避碰控制指令 $\boldsymbol{u}_i^a$, $\boldsymbol{J}_i^a$ 为避碰任务雅可比矩阵

$$\boldsymbol{J}_i^a=\frac{\partial\left(||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_a||-d_s\right)}{\partial\boldsymbol{p}_i}=\left[\frac{x_i-x_a}{||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_a||},\ \frac{y_i-y_a}{||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_a||},\ \frac{z_i-z_a}{||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_a||}\right]\tag{43}$$

其中, $\boldsymbol{p}_a=[x_a,\ y_a,\ z_a]^{\mathrm{T}}$ 与 $\boldsymbol{p}_i=[x_i,\ y_i,\ z_i]^{\mathrm{T}}$ 分别表示环境威胁与无人机 i 的三维坐标, 无人机与障碍物间期望安全距离 d_s, 无人机集群总控制输出 $\boldsymbol{u}_i^c$ 由其目标合围任务控制指令 $\boldsymbol{u}_i$ 与避碰控制指令 $\boldsymbol{u}_i^a$ 组合而成

$$\boldsymbol{u}_i^c=\underbrace{\boldsymbol{u}_i^a}_{\text{高优先级}}+\left(\boldsymbol{I}_3-\boldsymbol{J}_i^{a\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{J}_i^a\boldsymbol{J}_i^{a\mathrm{T}}\right)^{-1}\boldsymbol{J}_i^a\right)\underbrace{\boldsymbol{u}_i}_{\text{低优先级}}\tag{44}$$

由于集群首先要保证飞行安全性, 再进一步考虑执行目标合围任务, 所以避碰控制指令优先级更高. 将低优先级的任务控制质量投影到高优先级的避碰控制指令上, 优先执行避碰动作, 同时兼顾目标合围任务, 实现并行控制.

对避碰控制, 当且仅当无人机与障碍物间距离小于最大安全距离时触发, 采用以下排斥力函数

$$\boldsymbol{u}_i^a=\left[\frac{\rho_a\left(x_i-x_a\right)d_s}{r_{ia}},\ \frac{\rho_a\left(y_i-y_a\right)d_s}{r_{ia}},\ \frac{\rho_a\left(z_i-z_a\right)d_s}{r_{ia}}\right]^{\mathrm{T}}\tag{45}$$

其中, ρ_a 为排斥力系数, $r_{ia}=||\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_a||$ 为无人机 i 与障碍物间距离.

$$\boldsymbol{J}_i^a=\frac{\partial\boldsymbol{u}_i^a}{\partial\boldsymbol{p}_i}=\rho_a d_s\left(\frac{1}{r_{ia}}\boldsymbol{I}_3-\frac{1}{r_{ia}^3}\left(\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_a\right)\left(\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_a\right)^{\mathrm{T}}\right)\tag{46}$$

令

$$\boldsymbol{r}_{ia}=\boldsymbol{p}_i-\boldsymbol{p}_a=[\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z]^{\mathrm{T}}$$
$$r=\sqrt{\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2}$$

则

$$\boldsymbol{J}_i^a=\rho_a d_s\begin{bmatrix}\dfrac{1}{r}-\dfrac{\Delta x^2}{r^3} & -\dfrac{\Delta x\Delta y}{r^3} & -\dfrac{\Delta x\Delta z}{r^3}\\ -\dfrac{\Delta y\Delta x}{r^3} & \dfrac{1}{r}-\dfrac{\Delta y^2}{r^3} & -\dfrac{\Delta y\Delta z}{r^3}\\ -\dfrac{\Delta z\Delta x}{r^3} & -\dfrac{\Delta z\Delta y}{r^3} & \dfrac{1}{r}-\dfrac{\Delta z^2}{r^3}\end{bmatrix}\tag{47}$$

其中, $\Delta x=x_i-x_a$, $\Delta y=y_i-y_a$, $\Delta z=z_i-z_a$.

4 仿真分析

针对由 7 架无人机组成的无人机集群系统, 仿真验证了本文提出的基于社会化协同的目标合围控制算法的有效性.

4.1 参数设置

本文对控制增益、权重、交互半径、安全距离等关键参数采用可行域约束、稳定性与误差上界与试验设计 (design of experiments, DoE) 三步标定流程.

1) 可行域约束

设期望合围半径 $r^*=100$ m, 为保证二阶邻居可达, 有效交互半径 $R_{int}=\min(r_e,\ r_c)$ 应满足

$$R_{int}\ge 2r^*\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)\approx 86.7\tag{48}$$

安全距离下界由最大速度 $V_{\max}$、最大过载 $n_{\max}$ 与机体、障碍物等效半径 r_{uav}、r_{obs} 估计

$$d_s\ge\frac{V_{\max}^2}{2n_{\max}g}+r_{uav}+r_{obs}\tag{49}$$

2) 稳定性与误差上界驱动的解析下界

对于一致性目标观测器收敛系数 α 的误差上界设定 $\bar{s}/(\varepsilon\underline{\lambda})$, 以保证稳态估计误差小于 ε. 对于目标合围控制增益参数, 由式 (36) 及 Lyapunov 函

数与其导数可对协同任务势能项的耗散率给出充分下界, 先满足解析下界, 再在可行域内小范围微调.

3) 试验设计优选

基于上述两步骤的可行域, 以拉丁超立方采样生成 60 组候选, 每组在不同随机种子下重复 20 次, 以收敛时间、合围半径误差、能量消耗等多目标评分, 最终取 Pareto 前沿最优解为最终目标. 具体各参数数值设置如表 1 所示.

表 1　仿真参数设置

Table 1　Settings of simulation parameters

类别	符号	数值
无人机集群规模	N	7
速度上下界	$(V_{\min},\ V_{\max})$	(10, 80) m/s
最大过载	$n_{\max}$	6
最大航迹角	$\gamma_{\max}$	$\pi/4$
自动驾驶仪时间常数	$\tau_v,\ \tau_\chi,\ \tau_\gamma$	2.5 s, 2.5 s, 2.5 s
高度控制增益常数	$k_1,\ k_2$	2, 2
感知半径	r_d	200 m
通信距离	r_c	200 m
期望合围半径	r^*	100 m
期望角间距	φ_{iT}^*	$-\pi$
观测器收敛系数	α	2
排斥力系数	ρ_a	2
安全距离	d_s	150 m
控制增益	$\gamma_1,\ \gamma_2,\ \gamma_3,\ \gamma_4$	5, 1, 5, 8
社会力权重系数	$w_{co},\ w_T,\ w_d,\ w_w$	0.40, 0.40, 0.15, 0.05

4.2　仿真实例

为验证本文所提基于社会化协同机制的目标合围控制方法的有效性与鲁棒性, 构建由 7 架无人机组成的仿真系统并进行测试. 各无人机动力学模型、控制律及参数设定一致, 具体增益、权重及约束条件如表 1 所示. 每架无人机初始位置在区间 $[0,\ 100]\times[0,\ 100]\times[60,\ 100]$ 内随机生成, 初始速度及航向在区间 $[0,\ 10]$ 与 $[0,\ 2\pi]$ 内随机分布, 初始俯仰角设为 0°.

在仿真时间 $t=5$ s 时, 设置 4 号无人机发生感知能力失效, 6 号无人机发生通信阻断, 用于检验算法在局部节点失效条件下的稳定性. 环境中设置 5 个半球形障碍物, 其位置及范围参数如表 2 所示.

表 2　障碍物参数设置

Table 2　Settings of obstacle parameters

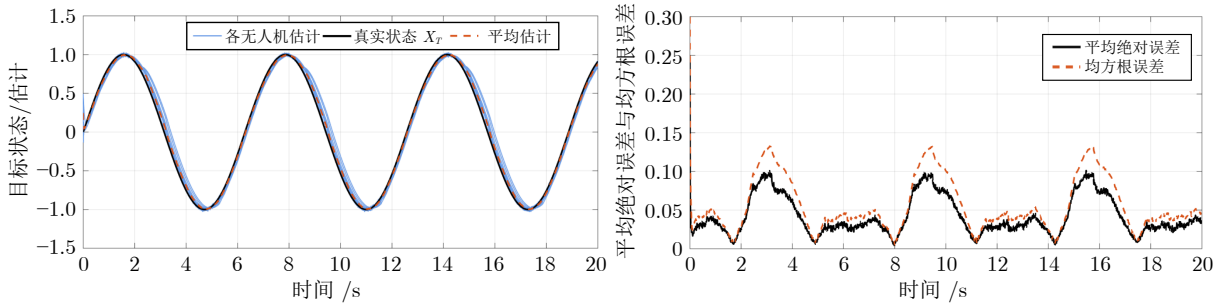
障碍物标号	中心点坐标	范围半径
1	(400, 280)	150 m
2	(800, −280)	50 m
3	(1200, 150)	150 m
4	(1600, −150)	50 m
5	(2300, 150)	150 m

为验证一致性目标观测器在噪声与通信受限情况下的状态估计性能, 设计动态目标跟踪仿真. 目标按照正弦规律运动, 7 架无人机通过局部观测与邻居通信实现目标状态估计.

图 2(a) 给出了目标真实状态与各无人机估计状态的动态响应曲线. 图中黑线表示目标真实状态, 红色虚线为平均估计轨迹, 浅蓝色线为各无人机独立估计轨迹. 可见在初始阶段各无人机估计值存在明显分散, 但在有限时间内迅速收敛并与目标保持同步波动, 表明观测器能够通过邻居信息交互实现全局一致的状态估计.

图 2(b) 展示了集群平均绝对误差与均方根误差随时间的变化过程. 可见误差迅速下降并趋于稳定, 全过程集群均方根估计误差 $RMSE$ 为

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N\cdot T}\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{X}_{T,\,i}\left(t_k\right)-X_T\left(t_k\right)\right)^2} \tag{50}$$



(a) 目标状态与估计对比

(a) Comparison of target state and estimates

(b) 平均绝对误差与均方根误差

(b) Mean absolute error and root mean square error

图 2　目标观测器性能分析图

Fig. 2　Target observer performance analysis diagram

其中, K 为采样步数. 仿真结果 $RMSE$ 为 0.065 5, 表明估计误差在短时间内衰减至较低水平, 集群整体的观测精度和一致性得到保证. 结果表明, 该观测器在噪声和局部通信受限条件下仍具备快速收敛与稳态低误差特性, 可为后续协同控制提供可靠的目标状态估计支撑.

图 3 ~ 4 分别给出了无人机集群在三维与二维平面中的合围飞行轨迹. 黄色半球形体表示障碍物位置, 半透明区域为安全距离范围. 可以看出, 7 架无人机从初始位置出发, 逐步调整至以目标为中心的期望合围构型, 形成稳定的环形编队. 任务过程中, 无人机实现对障碍物的有效绕避, 并在避碰后快速恢复至期望合围半径, 维持稳定环形编队.

图 5 ~ 6 分别给出了无人机与障碍物、无人机与目标之间的相对距离变化曲线. 结果显示, 所有无人机均未与障碍物发生碰撞, 且在避障后重新趋于稳定合围距离, 证明强引导式任务——避碰协同控制策略能够有效兼顾局部安全与全局编队一致性. 对于发生感知失效与通信阻断的 4 号与 6 号无人机, 其轨迹波动略大但仍能在邻居协同作用下保持编队位置稳定, 验证了社会化层级交互机制在信息缺失情况下的补偿与稳定作用.

为进一步验证本文方法的性能优势, 选取基于向量场的极限环合围控制法 (vector field method, VFM)[9] 与基于刚性编队的目标合围控制法 (rigid formation method, RFM)[8] 两种典型算法进行对比. 三种方法均采用相同动力学模型, 仅控制律不同. 性能指标选取收敛到预期半径 ±5% 所需合围

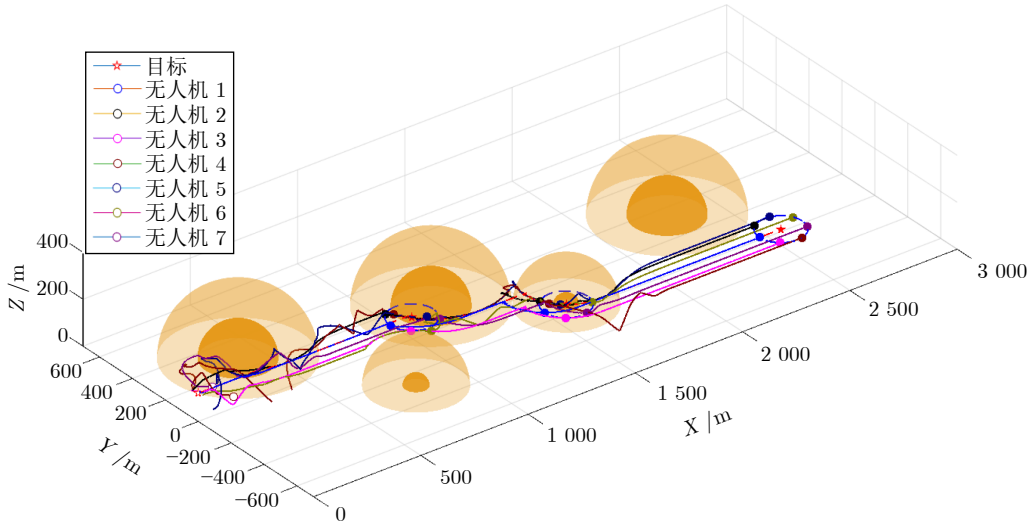


图 3 无人机集群目标合围飞行三维轨迹

Fig. 3 3D flight paths of UAV swarm target enclosing control

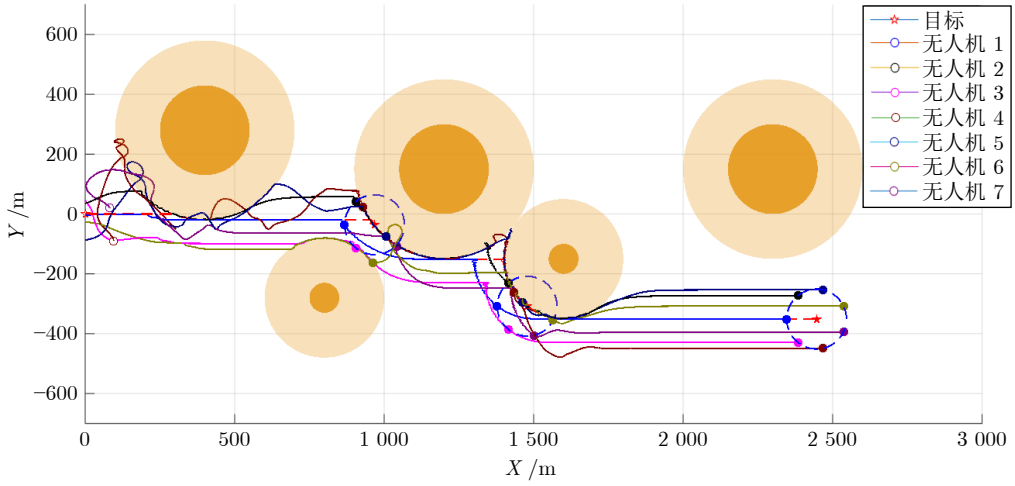


图 4 无人机集群目标合围飞行二维轨迹

Fig. 4 2D flight paths of UAV swarm target enclosing control

时间 T_c、稳态半径均方误差 E_r、无人机间及障碍避碰成功率 P_c 与目标状态估计均方根误差 $RMSE$. 每种算法在不同随机种子下重复运行 30 次, 统计结果如表 3 (平均值 ± 标准差).

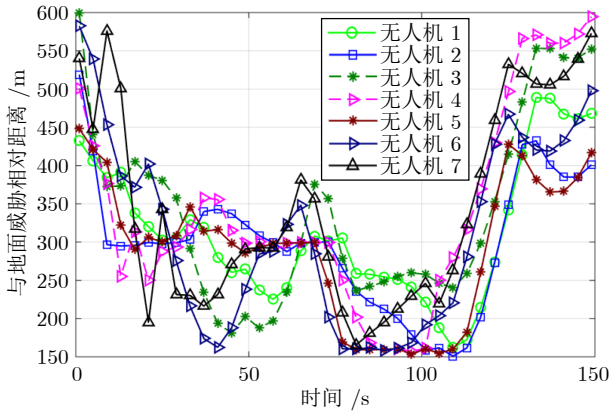


图 5　无人机与障碍物相对距离
Fig. 5　Relative distance between UAV and obstacles

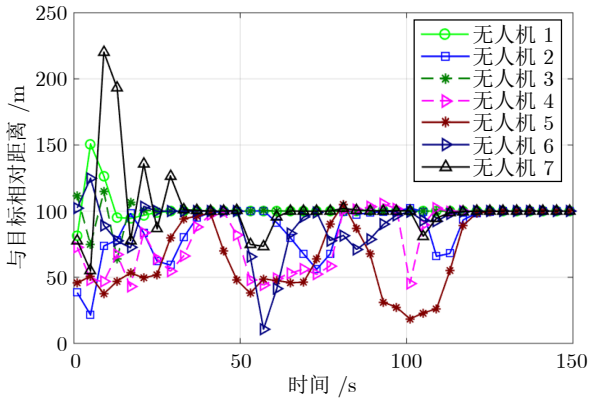


图 6　无人机与合围目标相对距离
Fig. 6　Relative distance between UAV and the enclosing target

表 3　三种算法对比仿真统计结果
Table 3　Simulation statistics results for three algorithms comparison

指标	VFM	RFM	**本文**
合围时间 T_c (s)	82.4 ± 6.8	95.7 ± 9.3	**59.3 ± 5.4**
稳态半径均方误差 E_r (m)	5.1 ± 1.7	6.8 ± 2.1	**3.2 ± 1.0**
避碰成功率 P_c (%)	71.2 ± 4.9	65.5 ± 6.3	**93.8 ± 3.1**
RMSE	3.5 ± 0.8	4.1 ± 1.0	**2.4 ± 0.7**

由表 3 可得, 本文提出的社会化协同控制方法在综合性能上优于 VFM 与 RFM, 在合围时间方面, 本文方法的平均合围时间分别较 VFM 与 RFM 缩短 28.0% 与 38.0%; 在误差指标方面, 均方误差降低 37.3% 与 52.9%, 目标状态估计均方根误差降低 31.4% 与 41.5%; 在安全性方面, 避碰成功率提升 22.6% 与 28.3%. 上述结果表明, 所提方法能够在缩短合围时间的同时显著改善跟踪精度并提高避碰可靠性. 性能提升主要得益于社会化层级交互机制增强了失效节点的信息恢复能力, 强引导式任务——避碰协同控制保证了局部安全与全局编队的一致性, 一致性目标观测器在通信受限下仍可维持状态估计的同步性.

为进一步验证本文所提基于社会化协同机制控制方法在不同感知、通信失效比例下的鲁棒性与容错性能, 开展了基于不同失效比例的仿真研究, 结果如图 7 ~ 8 所示.

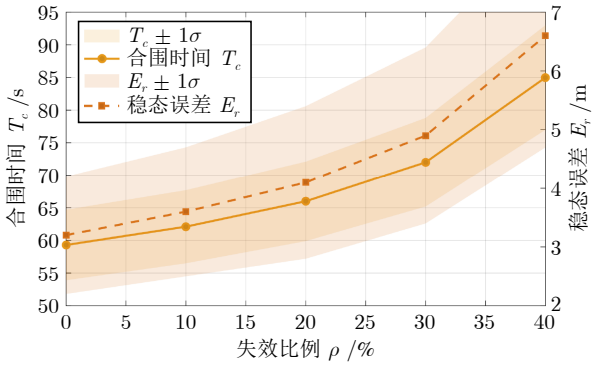


图 7　失效比例对集群性能指标影响
Fig. 7　Influence of failure ratio on swarm performance indicators

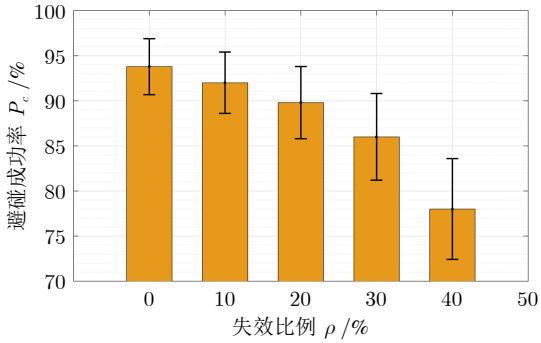


图 8　不同失效比例下的避碰成功率
Fig. 8　Collision-avoidance success rate under different failure ratios

图 7 展示了失效比例对集群性能指标的影响, 其中横轴为失效比例 (0% ~ 40%), 左纵轴为合围时间 T_c, 右纵轴为稳态误差 E_r. 随着失效比例的增加, 合围时间呈近似线性上升, 稳态误差逐渐增大. 当失效比例为 30% 时, 系统仍能在有限时间内收敛至稳定合围构型; 当失效比例达到 40% 时, 收敛速

度与精度明显下降. 结果表明, 本文方法在节点失效比例不超过 30% 时仍可保持较好的控制性能与一致性, 具备较高的失效容忍度.

图 8 给出了不同失效比例下集群避碰成功率 P_c. 可以看出, 随着失效比例的上升, 避碰成功率由约 94% 降低至 78%, 但在失效比例小于 30% 时避碰成功率仍保持在 85% 以上. 该结果说明, 所提出的避碰控制策略在部分感知或通信节点失效的情况下仍能有效保持集群安全, 验证了算法的鲁棒性和容错能力.

综上, 本文方法在有限失效比例下可同时维持较高的合围精度与避碰成功率, 表明其在复杂通信受限与感知受扰环境中具有较强的稳定性与工程适应性.

5 结束语

本文面向感知、通信受限且存在环境障碍的移动目标合围任务, 提出基于社会化协同机制的无人机集群控制方法. 该方法以社会化协同响应模型与层级交互机制为核心, 在仅依赖局部信息的条件下实现协同互助与信息扩散, 并通过强引导式任务——避碰协同控制策略在保障集群安全飞行的前提下有序推进目标合围, 实现了局部避碰与全局一致性的动态平衡. 本文引入一致性目标观测器, 实现了在通信受限条件下的状态估计同步, 为集群协同提供可靠的感知支撑.

仿真结果表明, 本文所提方法在存在感知、通信失效与障碍环境的条件下仍能保持良好的合围稳定性与避碰性能. 与现有方法相比, 在合围时间、稳态误差及避碰成功率等指标上均有提升. 进一步的失效比例分析表明, 当节点失效比例不超过 30% 时, 系统仍能维持较高的合围精度与安全性, 验证了算法的鲁棒性与容错能力.

未来将进一步考虑多目标合围与异构集群协同控制, 以验证方法在更复杂任务场景中的可扩展性.

参考文献

1 Chung S J, Paranjape A A, Dames P, Shen S J, Kumar V. A survey on aerial swarm robotics. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, **34**(4): 837−855

2 Mei Z W, Shao X L, Xia Y, Liu J. Enhanced fixed-time collision-free elliptical circumnavigation coordination for UAVs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, **60**(4): 4257−4270

3 Zhang Q R, Liu H H T. Robust nonlinear close formation control of multiple fixed-wing aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, **44**(3): 572−586

4 Raja G, Baskar Y, Dhanasekaran P, Nawaz R, Yu K P. An efficient formation control mechanism for multi-UAV navigation in remote surveillance. In: Proceedings of IEEE Globecom Workshops. Madrid, Spain: IEEE, 2021. 1−6

5 Ranjan P K, Sinha A, Cao Y C, Tran D, Casbeer D, Weintraub I. Energy-efficient ring formation control with constrained inputs. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2023, **46**(7): 1397−1407

6 Krátký V, Alcántara A, Capitán J, Štěpán P, Saska M, Ollero A. Autonomous aerial filming with distributed lighting by a team of unmanned aerial vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, **6**(4): 7580−7587

7 Sinha A, Cao Y C. 3-D nonlinear guidance law for target circumnavigation. *IEEE Control Systems Letters*, 2023, **7**: 655−660

8 Kim T H, Sugie T. Cooperative control for target-capturing task based on a cyclic pursuit strategy. *Automatica*, 2007, **43**(8): 1426−1431

9 Pothen A A, Ratnoo A. Curvature-constrained Lyapunov vector field for standoff target tracking. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, **40**(10): 2729−2736

10 Shao X L, Xia Y, Mei Z W, Zhang W D. Model-guided reinforcement learning enclosing for UAVs with collision-free and reinforced tracking capability. *Aerospace Science and Technology*, 2023, **142**: Article No. 108609

11 Sinha A, Cao Y C. Three-dimensional guidance law for target enclosing within arbitrary smooth shapes. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2023, **46**(11): 2224−2234

12 Dong F, You K Y, Song S J. Target encirclement with any smooth pattern using range-based measurements. *Automatica*, 2020, **116**: Article No. 108932

13 Dong F, You K Y, Xie L H, Hu Q L. Coordinate-free circumnavigation of a moving target via a PD-like controller. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, **58**(3): 2012−2025

14 Jain P, Peterson C K, Beard R W. Encirclement of moving targets using noisy range and bearing measurements. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022, **45**(8): 1399−1414

15 Ranjan P K, Sinha A, Cao Y C. Robust UAV guidance law for safe target circumnavigation with limited information and autopilot lag considerations. In: Proceedings of AIAA SCITECH Forum. Orlando, USA: AIAA, 2024. Article No. 0124

16 Ju S, Wang J, Dou L Y. Enclosing control for multiagent systems with a moving target of unknown bounded velocity. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **52**(11): 11561−11570

17 Jiang Y, Peng Z H, Liu L, Wang D, Zhang F M. Safety-critical cooperative target enclosing control of autonomous surface vehicles based on finite-time fuzzy predictors and input-to-state safe high-order control barrier functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, **32**(3): 816−830

18 Dou L Y, Yu X, Liu L, Wang X F, Feng G. Moving-target enclosing control for mobile agents with collision avoidance. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2021, **8**(4): 1669−1679

19 Lu K, Dai S L, Jin X. Cooperative constrained enclosing control of multirobot systems in obstacle environments. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2024, **11**(2): 718−730

20 Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(9): 1520−1533

21 Lian B S, Wan Y, Zhang Y, Liu M S, Lewis F L, Chai T Y. Distributed Kalman consensus filter for estimation with moving targets. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, **52**(6): 5242−5254

22 Li Y H, Li S Y. Self-localization for distributed systems based on the relative measurement information. In: Proceedings of the 41st Chinese Control Conference. Hefei, China: IEEE, 2022. 4778−4783

23 Liu F, Guo C P, Meng W, Su R, Li H Y. Moving-target circumnavigation using adaptive neural anti-synchronization control via distance-only measurements. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, **54**(1): 308−318

24 Li H L, Cai Y W, Hong J C, Xu P, Cheng H, Zhu X M, et al. VG-Swarm: A vision-based gene regulation network for UAVs swarm behavior emergence. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, **8**(3): 1175−1182

25 Mirzaeinia A, Heppner F, Hassanalian M. An analytical study on leader and follower switching in V-shaped Canada goose flocks for energy management purposes. *Swarm Intelligence*, 2020, **14**(2): 117−141

26 Pennisi E. How did cooperative behavior evolve? *Science*, 2005, **309**(5731): 93

27 Shanghai Jiao Tong University. *125 Questions: Exploration and Discovery*. Science/AAAS Custom Publishing Office, 2021.

28 Pu Zhi-Qiang, Yi Jian-Qiang, Liu Zhen, Qiu Teng-Hai, Sun Jin-Lin, Li Fei-Mo. Knowledge-based and data-driven integrating methodologies for collective intelligence decision making: A survey. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(3): 627−643
(蒲志强, 易建强, 刘振, 丘腾海, 孙金林, 李非墨. 知识和数据协同驱动的群体智能决策方法研究综述. 自动化学报, 2022, **48**(3): 627−643)

29 Mogilner A, Edelstein-Keshet L, Bent L, Spiros A. Mutual interactions, potentials, and individual distance in a social aggregation. *Journal of Mathematical Biology*, 2003, **47**(4): 353−389

30 Chen Bo, Zhang Hui, Jiang Yi-Ming, Zhong Hang, Wang Yao-Nan. A hierarchical bio-inspired neural network based multi-robot cooperative area search algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(4): 890−902
(陈波, 张辉, 江一鸣, 钟杭, 王耀南. 基于分层仿生神经网络的多机器人协同区域搜索算法. 自动化学报, 2025, **51**(4): 890−902)

31 Miao Z Q, Wang Y N, Fierro R. Cooperative circumnavigation of a moving target with multiple nonholonomic robots using backstepping design. *Systems & Control Letters*, 2017, **103**: 58−65

彭雅兰 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院博士研究生. 主要研究方向为仿生集群自主飞行控制.
E-mail: ylpeng@buaa.edu.cn
(**PENG Ya-Lan** Ph.D. candidate at the School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. Her main research interest is biologically swarm autonomous flight control.)

段海滨 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授. 主要研究方向为无人机集群仿生自主飞行控制. 本文通信作者.
E-mail: hbduan@buaa.edu.cn
(**DUAN Hai-Bin** Professor at the School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. His main research interest is biologically autonomous flight control of unmanned aerial vehicle swarms. Corresponding author of this paper.)

范彦铭 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所首席专家. 主要研究方向为先进飞行控制技术研究与系统研制.
E-mail: michaelfan@yeah.net
(**FAN Yan-Ming** Chief expert at Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China. His main research interest is the study and system development of advanced flight control technology.)

李 明 中国工程院院士. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所首席专家. 主要研究方向为飞机自动化, 无人机自主飞行控制.
E-mail: mingli@mail.sy.ln.cn
(**LI Ming** Academician of the Chinese Academy of Engineering. Chief expert at Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China. His research interests include aircraft automation and autonomous flight control of unmanned aerial vehicles.)