

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202506004

间歇通信条件下双层编队四旋翼无人机 集群跟踪控制

高久安¹, 李 冰², 席建祥¹, 王 乐¹, 王 成¹

(1. 火箭军工程大学, 西安 710025;

2. 火箭军装备部驻绵阳地区第一军代表室, 绵阳 621900)

摘 要: 针对四旋翼无人机集群编队跟踪控制过程中的复杂通信约束问题, 提出间歇通信条件下多领导者双层编队四旋翼无人机集群跟踪控制方法。首先, 对间歇通信条件进行了数学描述并建立了四旋翼无人机的动力学模型, 给出了四旋翼无人机集群可实现双层时变编队跟踪控制的条件; 其次, 构建了间歇型双层时变编队跟踪控制器, 基于线性矩阵不等式提出间歇通信条件下的双层时变编队设计与分析判据; 最后, 基于一个由 3 架领导者和 6 架跟随者组成的多领导者四旋翼无人机集群系统开展仿真试验。结果表明: 该集群系统可实现间歇通信条件下的双层时变编队跟踪控制, 在多无人机之间的通信连通时, 领导者和跟随者可分别形成各自期望的时变编队队形, 并且跟随者可跟踪到由所有领导者决定的编队中心; 在多无人机之间的通信断开时, 控制器中的自反馈项使无人机受控, 仿真结果展现出较好的编队性能和跟踪性能。

关键词: 四旋翼无人机; 集群控制; 间歇通信; 时变编队; 跟踪控制

中图分类号: TP273.3

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)06-0033-11



听语音
与作者互动
聊科研

Two-Layer Formation Tracking Control of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle Swarms under Intermittent Communication

GAO Juana¹, LI Bing², XI Jianxiang¹, WANG Le¹, WANG Cheng¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. First Military Representative Office of the Rocket Force Equipment Department in Mianyang,
Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: A dual-layer time-varying formation tracking control method for quadrotor unmanned aerial vehicle (UAV) swarms under intermittent communication was proposed to address the challenges posed by complex communication constraints among UAVs. First, the intermittent communication condition was mathematically described, and a quadrotor UAV model was established. The conditions for achieving dual-layer time-varying formation-tracking control in quadro-

收稿日期: 2025-04-11

修回日期: 2025-05-21

录用日期: 2025-06-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金 (U23B2064)

第一作者: 高久安 (1990—), 男, 讲师, 主要从事多智能体协同控制研究。E-mail: gaojuan6@126.com

引用格式: 高久安, 李冰, 席建祥, 等. 间歇通信条件下双层编队四旋翼无人机集群跟踪控制[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (6): 33-43. GAO Juana, LI Bing, XI Jianxiang, et al. Two-layer formation tracking control of quadrotor unmanned aerial vehicle swarms under intermittent communication[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (6): 33-43.

tor UAV swarms were then derived. Subsequently, an intermittent dual-layer time-varying formation-tracking controller was designed, and a design and analysis criterion under intermittent communication was introduced based on linear matrix inequalities. Finally, simulation experiments were conducted using a multi-leader quadrotor UAV swarm system comprising three leaders and six followers. The results demonstrate that the swarm system can achieve a dual-layer time-varying formation-tracking control under intermittent communication. When communication is connected, both leaders and followers can form their desired time-varying formations, with followers tracking the formation center determined by the leaders. When the communication is interrupted, the self-feedback term of the controller ensures that the UAVs remain controllable. The simulation results verify strong formation and tracking performance of the proposed method.

KEYWORDS: quadrotor UAV; swarm control; intermittent communication; time-varying formation; tracking control

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 是一种通过无线电遥控设备或机载程序自主操作的不载人飞行器^[1], 具有一定的感知、计算、通信、决策和执行能力。在面对复杂多样的飞行任务时, 单架无人机的局限性日益凸显, 而多架无人机协同编队可显著提高系统整体性能和任务成功率。对多个无人机按一定策略进行配置和部署, 可以形成具有一定规模和复杂度的无人机集群系统, 使低成本无人机集群的功能和任务执行效率远超单个系统的简单叠加, 即使集群系统中的某架或某些无人机出现故障, 也能通过调整无人机的分工来保证任务顺利遂行。无人机集群在执行任务过程中, 通常会面临复杂的通信环境, 因此保障无人机之间的正常通信是设计人员需要关注的重点内容。例如, 当无人机集群遇到电磁干扰、有限通信带宽和通信异常等情况时, 无人机之间的通信链路可能会出现断开或重连。因此, 研究不同通信约束条件下双层时变编队跟踪控制问题具有一定的理论和工程实践意义。

现有的编队控制方法包括基于刚性图论的方法、基于行为的方法、基于一致性的方法和虚拟结构法等。基于刚性图论的编队控制方法通过对多无人机系统拓扑结构进行分析, 基于系统几何构型和个体之间的距离或角度准则构造刚性图, 从而控制无人机之间的约束关系, 实现集群系统的编队控制^[2-5]; 基于行为的编队控制方法是指系统中无人机的控制输出均由一系列行为生成, 如编队跟踪、协同避障和编队切换等行为, 当每一架无人机的行为达到预期设计目标时, 即可实现期望编队队形跟踪控制^[6-8]; 基于一致性的编队控制方法是指无人机的状态与编队参考之间保持特

定的状态差, 通过协同作用使得无人机与编队参考达到一致, 从而实现编队控制^[9]; 虚拟结构法是将集群系统中的无人机视为刚体, 把期望的编队队形建模成刚性的虚拟几何结构, 然后将虚拟几何结构上的节点与无人机一一对应, 在无人机飞行过程中, 当自身状态跟踪到虚拟几何结构中对应的节点位置时则表明实现了编队控制^[10-12]。针对通信约束问题, 权婉珍等^[13]提出保性能编队跟踪控制方法, 考虑了多无人机系统通信可能断开的情况, 给出了间歇通信条件下的编队追踪设计判据。Wang 等^[14]针对间歇通信和切换拓扑条件下的一般高阶多智能体系统一致性设计与分析问题, 提出间歇型一致性控制协议。Chai 等^[15]对具有多维动力学的多智能体系统时变编队跟踪控制问题进行了研究, 提出连续通信和间歇通信条件下的固定时间事件触发控制方案。Zhang 等^[16]针对多领导者时变编队跟踪控制问题, 设计了一种触发机制, 使得多领导者可间歇地发送信息, 提出针对领导者的节点事件和边缘事件触发自适应控制策略。段朝霞等^[17]提出一种在间歇通信机制下的一致性控制协议, 通过建立网络结构模型和误差系统模型, 将一致性问题等效转化为线性时滞系统的渐近稳定性问题, 并利用 Lyapunov-Krasovskii 泛函分析方法导出了多智能体网络在间歇通信机制下达到一致性的充分条件。

此外, 根据编队中领导者的数量, 可以将编队控制问题进一步划分为单领导者和多领导者编队跟踪控制问题。单领导者编队跟踪是指集群中的某一架无人机引领整个无人机集群运动, 其余无人机可跟踪到此无人机的状态。其中, 引领集群运动的无人机为领导者, 其余无人机为跟随者。

Dong 等^[18]研究了单领导者时变编队跟踪问题, 提出一种典型的时变编队跟踪控制器, 并给出编队跟踪的可行条件。魏志强等^[19]针对存在切换拓扑的高阶异构集群系统, 提出一种基于分布式鲁棒自适应估计技术的合围控制策略。田磊等^[20]考虑了领导者和跟随者之间有向通信拓扑存在切换的情况, 设计了完全分布式的输出时变编队跟踪控制协议, 摆脱了对通信拓扑相关的拉普拉斯矩阵特征值以及时变编队函数等全局信息的依赖。Dong 等^[21]提出一个涉及编队可行条件的跟踪控制器, 并将理论成果应用于 QUAV 编队跟踪实验中。此外, Xu 等^[22]为消除间歇性通信对系统一致性的影响, 提出了一种间歇一致协议; Han 等^[23]为解决多无人机系统编队跟踪控制问题, 引入了一种仅使用相邻无人机之间相对位置信息的时变延迟协议。多领导者编队跟踪是指将集群中的某几架无人机视为领导者, 多领导者引领整个无人机集群运动, 其余无人机作为跟随者跟踪多领导者状态凸组合的平均值, 并与多领导者保持一定的位置和方向。例如, Dong 等^[24]研究了时变编队跟踪问题并提出了一种典型的时变编队跟踪控制器, 其中的多智能体系统具有多个领导者; Jin 等^[25]考虑了系统中存在外部扰动情况, 提出一种基于标识符的鲁棒控制算法; Yu 等^[26]研究了包含多个领导者的多智能体系统的完全自适应时变输出编队跟踪控制问题, 引入自适应模糊逻辑系统来估计不匹配的集成不确定项, 并在动力学中考虑了随机噪声。

目前, 对单领导者编队跟踪控制的研究已相对成熟, 而对多领导者编队跟踪控制问题的研究较少, 尤其是在间歇通信条件下如何分别针对领导层和跟随层构建分布式时变编队跟踪控制器, 使得领导层和跟随层能够同时形成期望时变编队队形, 是一个亟待探索的问题。基于此, 本文利用间歇通信条件下的相对局部信息, 构建间歇型双层时变编队跟踪控制器, 基于编队可行条件确定了期望时变编队集合, 最后提出间歇通信条件下双层时变编队设计判据, 并通过数值仿真验证了本文方法的有效性。

1 间歇通信条件下四旋翼无人机集群编队控制问题描述

无人机在编队飞行过程中, 所有无人机之间

的通信可能会出现中断。假设存在一个一致有界非重叠序列为 $\{[t_0, t_1), [t_1, t_2), \dots, [t_k, t_{k+1}) \mid k \in \mathbb{N}\}$ 。其中, 初始时刻 $t_0 = 0$ 。将 $[t_k, \hat{t}_k)$ 定义为通信连通时段, $[\hat{t}_k, t_{k+1})$ 定义为通信中断时段。同时, 令 $t^* = \min \{t_{k+1} - t_k \mid k \in \mathbb{N}\}$, $t^* = \max \{t_{k+1} - t_k \mid k \in \mathbb{N}\}$ 。

考虑一个由 $M + N$ 架无人机组成的集群, 令跟随者编号集合 $F = \{1, 2, \dots, M\}$, 领导者编号集合 $E = \{M + 1, M + 2, \dots, M + N\}$ 。其中, M 为跟随者无人机的数量, N 为领导者无人机的数量。对于第 i 架无人机, 其动力学模型可以描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_i(t) \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{v}_i(t) \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 分别为第 i 架无人机的位置向量、速度向量和控制输入向量。为便于描述, 令 $n = 1$, 推导出的结论可通过 Kronecker 积运算扩展至 n 维空间。令 $\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) = [\mathbf{x}_i^T(t), \mathbf{v}_i^T(t)]^T$ 表示第 i 架无人机的状态向量, 则

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i(t) = \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2^T \boldsymbol{\varepsilon}_i(t) + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_i(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{B}_1 = [1, 0]^T$; $\mathbf{B}_2 = [0, 1]^T$ 。

在任意时间间隔的通信故障率为 $\sigma_k = (t_{k+1} - \hat{t}_k) / (t_{k+1} - t_k)$, 满足条件 $0 \leq \sigma_k \leq \bar{\sigma} < 1$ 。其中, $\bar{\sigma}$ 为正常数, 表示通信故障率的上界。通信故障率描述了系统通信断开时间在时间间隔 $[t_k, t_{k+1})$ 上的比例。

对于任意有界初始状态, 如果存在一个向量 $\mathbf{c}(t)$, 使得无人机集群满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\boldsymbol{\varepsilon}_l(t) - \mathbf{h}_l(t) - \mathbf{c}(t)) = \mathbf{0} \quad (3)$$

则称四旋翼无人机集群 (2) 中的领导者可实现时变编队控制。其中, $l \in E$, $\mathbf{h}_l(t)$ 为领导者编队向量, 表示领导者需要遵循的约束量; $\mathbf{c}(t)$ 为编队中心参考向量, 用于描述编队中心的运动轨迹。

对于任意有界初始状态, 如果存在一个正常数 $\sigma_{jl} (j \in F, l \in E)$, 且 $\sum_{l=M+1}^{M+N} \sigma_{jl} = 1$, 使得四旋翼无人机集群满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\boldsymbol{\varepsilon}_j(t) - \mathbf{h}_j(t) - \sum_{l=M+1}^{M+N} \sigma_{jl} (\boldsymbol{\varepsilon}_l(t) - \mathbf{h}_l(t)) \right] = \mathbf{0} \quad (4)$$

则称四旋翼无人机集群 (2) 中的跟随者可实现时变编队跟踪控制。其中, $\mathbf{h}_j(t)$ 为跟随者编队向量。

综上所述, 对于任意有界初始状态, 如果存

在一个编队中心参考向量 $\mathbf{c}(t)$ 和一个正常数 $\sigma_{jl}(j \in F, l \in E)$, 且满足 $\sum_{l=M+1}^{M+N} \sigma_{jl} = 1$, 使得公式 (3) 和 (4) 同时成立, 则称四旋翼无人机集群 (2) 可实现双层时变编队跟踪控制。

2 间歇通信条件下四旋翼无人机集群编队跟踪控制器设计

2.1 间歇型双层时变编队跟踪控制器构建

考虑无人机的通信链路可能出现中断与连通交替存在的情况, 构造分段连续的间歇型双层时变编队跟踪控制器。在无人机通信连通阶段, 可利用无人机之间的状态向量和编队向量构建控制器, 而在无人机通信断开时段, 控制器仅存在自反馈。

构建领导层编队控制器为

$$u_i(t) = \begin{cases} \mathbf{K}_0 \mathbf{e}_i(t) + \mathbf{K}_1 \sum_{j=M+1}^{M+N} \{w_{ij} [\mathbf{e}_i(t) - \mathbf{h}_i(t) - (\mathbf{e}_j(t) - \mathbf{h}_j(t))]\} & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ \mathbf{K}_0 \mathbf{e}_i(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i \in E$; w_{ij} 为无人机 i 和 j 之间的通信权重。在通信连通时段内, 需要同时考虑增益矩阵 $\mathbf{K}_0$ 和 $\mathbf{K}_1$ 的影响。其中, $\mathbf{K}_0$ 可形成自反馈使无人机可控, $\mathbf{K}_1$ 可驱动领导者根据编队向量形成期望时变编队队形。但在通信中断时段内, 仅存在增益矩阵 $\mathbf{K}_0$ 使无人机可控。

构建跟随层编队跟踪控制为

$$u_i(t) = \begin{cases} \mathbf{K}_0 \mathbf{e}_i(t) + \mathbf{K}_2 \sum_{j=1}^{M+N} \{w_{ij} [\mathbf{e}_i(t) - \mathbf{h}_i(t) - (\mathbf{e}_j(t) - \mathbf{h}_j(t))]\} & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ \mathbf{K}_0 \mathbf{e}_i(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i \in F$ 。在通信连通时段内, 需要同时考虑增益矩阵 $\mathbf{K}_0$ 和 $\mathbf{K}_2$ 的影响, $\mathbf{K}_2$ 可以驱动跟随者跟踪由所有领导者共同决定的编队中心, 并形成期望的时变编队队形。

综上所述, 间歇型双层时变编队跟踪控制器具有以下 2 个重要特征。一是控制器是双层的, 即针对领导层无人机和跟随层无人机分别设计编队控制器和编队跟踪控制器。其中, 领导层编队控制器可以驱使领导者根据编队向量形成期望队形,

跟随层编队跟踪控制器可以跟踪多领导者所形成的编队队形, 并驱使跟随者形成期望队形。二是四旋翼无人机之间的通信是间歇的, 即控制器是分段构建的。在通信连通时段, 四旋翼无人机之间的状态向量和编队向量均被用于构造控制器。在通信中断时段, 由于四旋翼无人机之间的通信是断开的, 控制器仅与其自反馈有关。

2.2 间歇通信条件下双层时变编队跟踪设计判据

四旋翼无人机集群 (2) 是一种领导跟随双层编队结构的系统, 其交互作用的拉普拉斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 & \mathbf{L}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{L}_1$ 为跟随者之间的通信作用关系; $\mathbf{L}_2$ 为领导者与跟随者之间的通信作用关系; $\mathbf{L}_3$ 为领导者之间的通信作用关系。

令 $\mathbf{e}_F(t) = [\mathbf{e}_1^T(t), \mathbf{e}_2^T(t), \dots, \mathbf{e}_M^T(t)]^T$, $\mathbf{e}_E(t) = [\mathbf{e}_{M+1}^T(t), \mathbf{e}_{M+2}^T(t), \dots, \mathbf{e}_{M+N}^T(t)]^T$, $\mathbf{h}_F(t) = [\mathbf{h}_1^T(t), \mathbf{h}_2^T(t), \dots, \mathbf{h}_M^T(t)]^T$, $\mathbf{h}_E(t) = [\mathbf{h}_{M+1}^T(t), \mathbf{h}_{M+2}^T(t), \dots, \mathbf{h}_{M+N}^T(t)]^T$ 。在控制器 (5) 和 (6) 的作用下, 领导层四旋翼无人机集群的动力学模型可以表述为

$$\dot{\mathbf{e}}_E(t) = \begin{cases} [\mathbf{I}_N \otimes (\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2^T + \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_0) + \mathbf{L}_3 \otimes \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_1] \cdot \mathbf{e}_E(t) - (\mathbf{L}_3 \otimes \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_1) \mathbf{h}_E(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ [\mathbf{I}_N \otimes (\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2^T + \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_0)] \mathbf{e}_E(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (8)$$

跟随层四旋翼无人机集群的动力学模型可以表述为

$$\dot{\mathbf{e}}_F(t) = \begin{cases} [\mathbf{I}_M \otimes (\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2^T + \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_0) + \mathbf{L}_1 \otimes \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_2] \mathbf{e}_F(t) + (\mathbf{L}_2 \otimes \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_2) \mathbf{e}_E(t) - (\mathbf{L}_1 \otimes \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_2) \mathbf{h}_F(t) - (\mathbf{L}_2 \otimes \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_2) \mathbf{h}_E(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ [\mathbf{I}_M \otimes (\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2^T + \mathbf{B}_2 \mathbf{K}_0)] \mathbf{e}_F(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\otimes$ 表示 Kronecker 积; $\mathbf{I}_N$ 和 $\mathbf{I}_M$ 为单位矩阵。

对于矩阵 $\mathbf{L}_3$, 存在非奇异矩阵 $\mathbf{U}_E = [\tilde{\mathbf{u}}_{M+1}^H, \tilde{\mathbf{u}}_{M+2}^H, \dots, \tilde{\mathbf{u}}_{M+N}^H]^H$, 使得 $\mathbf{U}_E^{-1} \mathbf{L}_3 \mathbf{U}_E = \mathbf{J}_E$ 。其中, $\mathbf{U}_E^{-1} = [\tilde{\mathbf{u}}_{M+1}^H, \tilde{\mathbf{u}}_{M+2}^H, \dots, \tilde{\mathbf{u}}_{M+N}^H]^H$, $\tilde{\mathbf{u}}_i^H$ 和 $\tilde{\mathbf{u}}_i^H$ 分别为矩阵 $\mathbf{L}_3$ 的零特征值子空间与非零特征值子空间。 $\mathbf{J}_E$ 为矩阵 $\mathbf{L}_3$ 的约当标准型, 可表示为 $\mathbf{J}_E = \text{diag}(0, \lambda_{M+2}, \lambda_{M+3}, \dots, \lambda_{M+N})$, λ_i 为矩阵 $\mathbf{L}_3$ 的特征值, $\text{Re}(\lambda_i)$ 为特征值的实部。

令 $\tilde{\mathbf{e}}_i(t) = \mathbf{e}_i(t) - \mathbf{h}_i(t)$, 动力学模型 (8) 和 (9) 可写为

$$\dot{\bar{\mathbf{e}}}_E(t) = \begin{cases} [I_N \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0) + L_3 \otimes B_2 K_1] \bar{\mathbf{e}}_E(t) - \\ (I_N \otimes I_2) \dot{\mathbf{h}}_E(t) + [I_N \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \cdot \\ \mathbf{h}_E(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ [I_N \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \bar{\mathbf{e}}_E(t) - (I_N \otimes I_2) \dot{\mathbf{h}}_E(t) + \\ [I_N \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \mathbf{h}_E(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (10)$$

$$\dot{\bar{\mathbf{e}}}_F(t) = \begin{cases} [I_M \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0) + L_1 \otimes B_2 K_2] \bar{\mathbf{e}}_F(t) + \\ (L_2 \otimes B_2 K_2) \bar{\mathbf{e}}_E(t) - (I_N \otimes I_2) \dot{\mathbf{h}}_F(t) + \\ [I_M \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \mathbf{h}_F(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ [I_M \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \bar{\mathbf{e}}_F(t) - (I_N \otimes I_2) \dot{\mathbf{h}}_F(t) + \\ [I_M \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \dot{\mathbf{h}}_F(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (11)$$

令 $\chi_E(t) = (\tilde{\mathbf{u}}_{M+1} \otimes I_2) \bar{\mathbf{e}}_E(t)$ 和 $\zeta_E(t) = (\tilde{\mathbf{U}}_{M+1} \otimes I_2) \bar{\mathbf{e}}_E(t)$ 。其中, $\tilde{\mathbf{u}}_{M+1}$ 为 $\mathbf{U}_E^{-1}$ 的第一行, 对应零特征值, 即系统运动过程的一致部分; $\tilde{\mathbf{U}}_{M+1}$ 为 $\mathbf{U}_E^{-1}$ 的剩余行, 对应非零特征值, 即系统运动过程的不一致部分。由此可得

$$\dot{\chi}_E(t) = (B_1 B_2^T + B_2 K_0) \chi_E(t) - (\tilde{\mathbf{U}}_{M+1} \otimes I_2) \cdot \dot{\mathbf{h}}_E(t) + [\tilde{\mathbf{u}}_{M+1} \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \mathbf{h}_E(t) \quad (12)$$

$$\dot{\zeta}_E(t) = \begin{cases} [I_{N-1} \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0) + \bar{\mathbf{J}}_E \otimes B_2 K_1] \zeta_E(t) + \\ [\tilde{\mathbf{U}}_{M+1} \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \mathbf{h}_E(t) - (\tilde{\mathbf{U}}_{M+1} \otimes I_2) \cdot \\ \dot{\mathbf{h}}_E(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ [I_{N-1} \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)] \zeta_E(t) - (\tilde{\mathbf{U}}_{M+1} \otimes I_2) \cdot \\ \dot{\mathbf{h}}_E(t) + (\tilde{\mathbf{U}}_{M+1} \otimes (B_1 B_2^T + B_2 K_0)) \cdot \\ \mathbf{h}_E(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\bar{\mathbf{J}}_E = \text{diag}(\lambda_{M+2}, \lambda_{M+3}, \dots, \lambda_{M+N})$ 。子系统 $\chi_E(t)$ 和 $\zeta_E(t)$ 分别表示无人机集群编队运动过程中的一致部分和不一致部分。其中, 编队一致部分描述了集群系统的宏观编队运动, 可用于确定编队中心函数。

定理 当满足以下 2 个条件时, 集群 (2) 可以在控制器的作用下实现双层时变编队跟踪控制。

(a) 对于第 i 架无人机, 期望编队轨迹满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\bar{\mathbf{A}} \mathbf{h}_i(t) - \dot{\mathbf{h}}_i(t)) = \mathbf{0}$, 其中 $\bar{\mathbf{A}} = B_1 B_2^T + B_2 K_0$,

$i = 1, 2, \dots, M+N$ 。

(b) 给定标准收敛速率 $\alpha > 0$, 最大发散速率 $\beta > 0$, $\alpha(1 - \bar{\sigma}) > \beta \bar{\sigma}$ 。设计控制器增益矩阵 $K_1 = -\lambda_a^{-1} B_2^T \hat{P}^{-1}$, $K_2 = -\lambda_b^{-1} B_2^T \hat{P}^{-1}$ 。其中, $0 < \lambda_a \leq \text{Re}(\lambda_{M+2})$, $0 < \lambda_b \leq \text{Re}(\lambda_1)$, $\lambda_{\max} = \min \text{Re}(\lambda_i)$ 且矩阵 $\hat{P} = \hat{P}^T > \mathbf{0}$ 满足

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}} \hat{P} + \hat{P} \bar{\mathbf{A}}^T + \alpha \hat{P} - 2B_1 B_2^T & \hat{P} \\ \hat{P} & -\lambda_{\max}^{-1} Q^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (14)$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}} \hat{P} + \hat{P} \bar{\mathbf{A}}^T - \beta \hat{P} & \hat{P} \\ \hat{P} & -\lambda_{\max}^{-1} Q^{-1} \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (15)$$

证明: 当条件 (a) 成立时, 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [(I_N \otimes \bar{\mathbf{A}}) \mathbf{h}_E(t) - \dot{\mathbf{h}}_E(t)] = \mathbf{0} \quad (16)$$

考虑如下子系统 $\dot{\zeta}_i(t)$ 为

$$\dot{\zeta}_i(t) = \begin{cases} (\bar{\mathbf{A}} + \lambda_i B_2 K_1) \zeta_i(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ \bar{\mathbf{A}} \zeta_i(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\zeta_i(t) = \mathbf{e}_i(t) - \mathbf{e}_i^*(t)$ 表示领导层的状态误差。其中, $\mathbf{e}_i^*(t)$ 为期望编队状态, $i = M+1, M+2, \dots, M+N$ 。

同时, 考虑第 i 个特征值对应的子系统, 构建 Lyapunov 候选函数为

$$\mathbf{V}_i(t) = \zeta_i^T(t) \hat{P} \zeta_i(t) \quad (18)$$

当 $t \in [t_k, \hat{t}_k)$ 时, 根据子系统 (17), 对 $\mathbf{V}_i(t)$ 求导可得

$$\dot{\mathbf{V}}_i(t) = \zeta_i^T(t) [\hat{P} \bar{\mathbf{A}} + \text{Re}(\lambda_i) (B_2 K_1)^T \hat{P} + \lambda_i \hat{P} B_2 K_1 + \bar{\mathbf{A}}^T \hat{P}] \zeta_i(t) \quad (19)$$

整理得

$$\dot{\mathbf{V}}_i(t) + \alpha \mathbf{V}_i(t) \leq \sum_{i=M+2}^{M+N} \zeta_i^T(t) (\bar{\mathbf{A}} \hat{P} + \hat{P} \bar{\mathbf{A}}^T + \alpha \hat{P} - 2B_2 B_2^T) \zeta_i(t) \quad (20)$$

如果 $\bar{\mathbf{A}} \hat{P} + \hat{P} \bar{\mathbf{A}}^T + \alpha \hat{P} - 2B_2 B_2^T < \mathbf{0}$, 则有 $\dot{\mathbf{V}}_i(t) + \alpha \mathbf{V}_i(t) < \mathbf{0}$ 。

当 $t \in [\hat{t}_k, t_{k+1})$ 时, 根据子系统 (17), 对 $\mathbf{V}_i(t)$ 求导可得

$$\dot{\mathbf{V}}_i(t) - \beta \mathbf{V}_i(t) \leq \sum_{i=M+2}^{M+N} \zeta_i^T(t) (\bar{\mathbf{A}} \hat{P} + \hat{P} \bar{\mathbf{A}}^T - \beta \hat{P}) \zeta_i(t) \quad (21)$$

如果 $\bar{\mathbf{A}} \hat{P} + \hat{P} \bar{\mathbf{A}}^T - \beta \hat{P} < \mathbf{0}$, 则有 $\dot{\mathbf{V}}_i(t) - \beta \mathbf{V}_i(t) < \mathbf{0}$ 。

在这种情况下, 如果 $k=0$, 即 $t \in [t_0, t_1]$, 由式 (21) 可得

$$V_i(t_1) < e^{\beta \hat{t}_{1,0}} V_i(\hat{t}_0) < e^{-\mu_0} V_i(0) \quad (22)$$

式中: $\mu_0 = [\alpha - (\alpha + \beta) \sigma_0] t_{1,0}$, $t_{1,0} = t_1 - t_0$, $\hat{t}_{1,0} = t_1 - \hat{t}_0$ 。由于 $\beta > 0$, $\alpha(1 - \bar{\sigma}) > \beta \bar{\sigma}$, $\sigma_0 > 0$, 可得 $\mu_0 > 0$ 。进而对任意的 $k > 0$, 有

$$V(t_{k+1}) < V(0) e^{-\sum_{i=1}^m \mu_k} \quad (23)$$

式中: $\mu_k = [\alpha - (\alpha + \beta) \sigma_k] t_{k+1,k}$, $t_{k+1,k} = t_{k+1} - t_k$; m 表示通信中断的次数。

对于任意的 $t > 0$, 存在一个正整数 $k \geq 1$, 使得 $t_k < t < t_{k+1}$, 则

$$V(t) \leq e^{\beta t} V(0) e^{\frac{[\alpha - (\alpha + \beta) \bar{\sigma}] t_k}{t}} \quad (24)$$

当 $t \leq (k+1) t^*$ 时, 有

$$V(t) \leq e^{\beta t^* - [(\alpha + \beta) \bar{\sigma} - \alpha] t_k} V(0) e^{\frac{[(\alpha + \beta) \bar{\sigma} - \alpha] t_k}{t^*}} \quad (25)$$

可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{\xi}_E(t) = 0$, 表明子系统 (17) 是指数收敛的, 即系统是渐近稳定的。结合编队可行条件, 可以得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi_E(t) = 0$ 。

$\bar{\varepsilon}_{EC}(t) = 1 \otimes \chi_E(t)$, $\bar{\varepsilon}_{EC}(t) = \bar{\varepsilon}_E(t) - \bar{\varepsilon}_{EC}(t)$, e_1 表示第一个元素为 1, 其他元素为 0 的列向量, $[\chi_E^T(t), 0]^T = e_1 \otimes \chi_E(t)$, $U_E e_1 = 1$ 。由此可得

$$\bar{\varepsilon}_{EC}(t) = (U_E \otimes I) [0, \xi_E^T(t)]^T \quad (26)$$

因为 $U_E \otimes I$ 是非奇异的, 可以得到 $\bar{\varepsilon}_{EC}(t)$ 和 $\bar{\varepsilon}_{EC}(t)$ 是线性无关的, 即 $\bar{\varepsilon}_E(t) = \bar{\varepsilon}_{EC}(t) + \bar{\varepsilon}_{EC}(t)$ 。当且仅当 $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{\varepsilon}_{EC}(t) = 0$ 时, $\lim_{t \rightarrow \infty} (\varepsilon_i(t) - h_i(t) - \chi_E(t)) = 0$ 成立, 表明领导者无人机集群形成了期望的时变编队队形。

令 $s_F(t) = [s_1^T(t), s_2^T(t), \dots, s_M^T(t)]^T$, $s_i(t) = \sum_{j=1}^M w_{ij} (\bar{\varepsilon}_i(t) - \bar{\varepsilon}_j(t)) + \sum_{l=M+1}^{M+N} w_{il} (\bar{\varepsilon}_i(t) - \bar{\varepsilon}_l(t))$ 。由此可得

$$s_F(t) = (L_1 \otimes I_2) \bar{\varepsilon}_F(t) + (L_2 \otimes I_2) \bar{\varepsilon}_E(t) \quad (27)$$

整理得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\varepsilon_j(t) - h_j(t) - \sum_{l=M+1}^{M+N} \sigma_{jl} (\varepsilon_l(t) - h_l(t)) \right] = 0 \quad (28)$$

因此, 当 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_F(t) = 0$ 时, 具有领导跟随双层编队结构的四旋翼无人机集群 (13) 在控制器的作用下可实现间歇通信条件下的双层时变编队跟踪控制。

由公式 (27) 可得

$$\bar{\varepsilon}_F(t) = (L_1^{-1} \otimes I_N) s_F(t) - (L_1^{-1} L_2 \otimes I_N) \bar{\varepsilon}_E(t) \quad (29)$$

求导整理可得

$$\dot{s}_F(t) = \begin{cases} (I_M \otimes \bar{A} + L_1 \otimes B_2 K_2) s_F(t) + (L_1 \otimes \bar{A}) h_F(t) + \\ (L_2 L_3 \otimes B_2 K_2) (1 \otimes \chi_E(t)) + (L_2 \otimes \bar{A}) h_E(t) - \\ (L_2 \otimes I_2) \dot{h}_E(t) - (L_1 \otimes I_2) \dot{h}_F(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ (I_M \otimes \bar{A}) s_F(t) + (L_1 \otimes \bar{A}) h_F(t) + \\ (L_2 \otimes \bar{A}) h_E(t) - (L_2 \otimes I_2) \dot{h}_E(t) - \\ (L_1 \otimes I_2) \dot{h}_F(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (30)$$

矩阵 L_3 的特征值 $\lambda_{M+1} = 0$ 对应的特征向量为 $\bar{\mu}_{M+1} = 1$, 即 $L_3 \cdot 1 = 0$ 。令 $\bar{s}_F(t) = (U_F^{-1} \otimes I_M) \cdot s_F(t)$, 则将式 (30) 整理可得

$$\dot{\bar{s}}_F(t) = \begin{cases} (I_M \otimes \bar{A} + J_F \otimes B_2 K_2) \bar{s}_F(t) + (U_F^{-1} L_1 \otimes I_2) \cdot \\ h_F(t) - (U_F^{-1} L_1 \otimes I_2) \dot{h}_F(t) - (U_F^{-1} L_2 \otimes I_2) \cdot \\ h_E(t) + (U_F^{-1} L_2 \otimes \bar{A}) h_E(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ (I_M \otimes \bar{A}) \bar{s}_F(t) + (U_F^{-1} L_1 \otimes I_2) h_F(t) - \\ (U_F^{-1} L_1 \otimes I_2) \dot{h}_F(t) - (U_F^{-1} L_2 \otimes I_2) \dot{h}_E(t) + \\ (U_F^{-1} L_2 \otimes \bar{A}) h_E(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (31)$$

式中: U_F^{-1} 为相似变换矩阵的逆; J_F 为矩阵 L_3 的约当标准型, 可表示为 $J_F = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ 。其中, λ_i 为矩阵 L_3 的特征值, $\text{Re}(\lambda_i)$ 为特征值的实部。

当条件 (a) 成立时, 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} ((U_F^{-1} L_1 \otimes \bar{A}) h_F(t) - (U_F^{-1} L_1 \otimes I_2) \dot{h}_F(t) - (U_F^{-1} L_2 \otimes I_2) \dot{h}_E(t) + (U_F^{-1} L_2 \otimes \bar{A}) h_E(t)) = 0 \quad (32)$$

考虑如下子系统 $\dot{\bar{s}}_j(t)$ 为

$$\dot{\bar{s}}_j(t) = \begin{cases} (\bar{A} + \lambda_j B_2 K_2) \bar{s}_j(t) & t \in [t_k, \hat{t}_k) \\ \bar{A} \bar{s}_j(t) & t \in [\hat{t}_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (33)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, M$ 。

构建如下 Lyapunov 候选函数为

$$V_j(t) = \bar{s}_j^T(t) \hat{P} \bar{s}_j(t) \quad (34)$$

当 $t \in [t_k, \hat{t}_k)$ 时, 根据子系统 (33), 对 $V_j(t)$ 求导可得

$$\dot{V}_j(t) = \bar{s}_j^T(t) (\hat{P} \bar{A} + \text{Re}(\lambda_j) (B_2 K_2)^T \hat{P} + \lambda_j \hat{P} B_2 K_2 + \bar{A}^T \hat{P}) \bar{s}_j(t) \quad (35)$$

整理得

$$\dot{V}_j(t) + \alpha V_j(t) \leq \sum_{j=1}^M \bar{s}_j^T(t) (\bar{A} \hat{P} + \hat{P} \bar{A}^T + \alpha \hat{P} -$$

$$2B_2B_2^T) \bar{s}_j(t) \quad (36)$$

如果 $\bar{A}\hat{P} + \hat{P}\bar{A}^T + \alpha\hat{P} - 2B_2B_2^T < 0$, 则有 $\dot{V}_j(t) + \alpha V_j(t) < 0$ 。

当 $t \in [\hat{t}_k, t_{k+1})$ 时, 根据子系统 (33), 对 $V_j(t)$ 求导, 可得

$$\dot{V}_j(t) - \beta V_j(t) \leq \sum_{j=1}^M \bar{s}_j^T(t) (\bar{A}\hat{P} + \hat{P}\bar{A}^T - \beta\hat{P}) \bar{s}_j(t) \quad (37)$$

如果 $\bar{A}\hat{P} + \hat{P}\bar{A}^T - \beta\hat{P} < 0$, 则有 $\dot{V}_j(t) - \beta V_j(t) < 0$ 。

在这种情况下, 如果 $k=0$, 即 $t \in [t_0, t_1]$, 由式 (36) 可得

$$V_j(t_1) < e^{\beta \hat{t}_{1,0}} V_j(\hat{t}_0) < e^{-\phi_0} V_j(0) \quad (38)$$

式中: $\phi_0 = [\alpha - (\alpha + \beta)\sigma_0] t_{1,0}$, $t_{1,0} = t_1 - t_0$, $\hat{t}_{1,0} = t_1 - \hat{t}_0$ 。由于 $\beta > 0$, $\alpha(1 - \bar{\sigma}) > \beta\bar{\sigma}$, $\sigma_0 > 0$, 可得 $\phi_0 > 0$ 。进而对任意的 $k > 0$, 有

$$V(t_{k+1}) < V(0) e^{-\sum_{k=1}^m \phi_k} \quad (39)$$

对于任意的 $t > 0$, 存在一个正整数 $k \geq 1$, 使得 $t_k < t < t_{k+1}$, 则

$$V(t) \leq e^{\beta t} V(0) e^{\frac{[(\alpha + \beta)\bar{\sigma} - \alpha]t_k}{t^*}} \quad (40)$$

当 $t \leq (k+1)t^*$ 时, 有

$$V(t) \leq e^{\beta t} V(0) e^{\frac{[(\alpha + \beta)\bar{\sigma} - \alpha]t_k}{t^*}} \quad (41)$$

由此可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{e}_k(t) = 0$, 表明子系统 (33) 是指数收敛的, 即系统是渐近稳定的。进一步可以得出, 跟随者无人机形成了期望的时变编队队形, 并且跟踪到了编队中心, 此编队中心由所有领导者共同决定。

本文引入标准收敛速率 α 和最大发散速率 β 用于处理间歇通信对系统的影响。其中, α 是为了确保 Lyapunov 函数在四旋翼无人机正常通信时段内以高于 α 的速率收敛, β 是为了确保 Lyapunov 函数在四旋翼无人机通信中断时段内的发散速率低于 β 。若通信故障率等于 0, 则可以通过设计增益矩阵 K_1 和 K_2 , 使不受间歇通信约束的四旋翼无人机集群以快于 α 的速度收敛。

3 数值仿真及结果分析

实验假定一个由 3 架领导者和 6 架跟随者组成的无人机集群系统在二维平面上运动, 领导者的编号为 7~9, 跟随者的编号为 1~6, 无人机之间

的通信拓扑如图 1 所示。

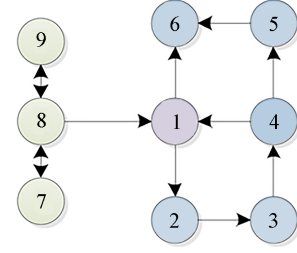


图 1 无人机集群系统的通信拓扑

Fig. 1 Communication topology diagram of a UAV swarm system

编队误差 $e_E(t) = \varepsilon_E(t) - h_E(t) - 1 \otimes \chi_E(t)$, 编队跟踪误差 $e_F(t) = \varepsilon_F(t) - h_F(t) + (L_1^{-1} L_2 \otimes I_2) \cdot (\varepsilon_E(t) - h_E(t))$, $\|e_E(t)\| = \sqrt{e_E^T(t) e_E(t)}$, $\|e_F(t)\| = \sqrt{e_F^T(t) e_F(t)}$ 。

领导者无人机的初始状态为

$$\varepsilon_7(0) = [0, 2, 0, 0]^T, \varepsilon_8(0) = [1, 1, 0, 0]^T, \varepsilon_9(0) = [-1, -3, 0, 0]^T$$

跟随者无人机的初始状态为

$$\varepsilon_1(0) = [-4, 4, 0, 0]^T, \varepsilon_2(0) = [-3, -3, 0, 0]^T, \varepsilon_3(0) = [3, -3, 0, 0]^T, \varepsilon_4(0) = [5, 0, 0, 0]^T, \varepsilon_5(0) = [1, 2, 0, 0]^T, \varepsilon_6(0) = [0, 5, 0, 0]^T$$

领导者时变编队向量函数为

$$h_i(t) = \begin{bmatrix} -4 \sin(0.375t + 2\pi i/3) \\ -4 \cos(0.375t + 2\pi i/3) \\ -1.5 \cos(0.375t + 2\pi i/3) \\ 1.5 \sin(0.375t + 2\pi i/3) \end{bmatrix} \quad i = 7, 8, 9$$

跟随者时变编队向量函数为

$$h_i(t) = \begin{bmatrix} -8 \sin(0.375t + \pi i/3) \\ -8 \cos(0.375t + \pi i/3) \\ -3 \cos(0.375t + \pi i/3) \\ 3 \sin(0.375t + \pi i/3) \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

可求出控制器相关参数如表 1 所示, 仿真结果如图 2~5 所示。

表 1 间歇通信条件下的控制器相关参数

Table 1 Controller-related parameters under intermittent communication

参数	本文数据集	参数	本文数据集
K_0	$I_2 \otimes [-0.14, 0]$	α	4
K_1	$I_2 \otimes [-2.4, -1.69]$	β	2
K_2	$I_2 \otimes [-6.40, -4.51]$	λ_a^{-1}	0.3
$\bar{\sigma}$	0.2	λ_b^{-1}	0.8

图2展示了不同时刻下无人机集群的位置分布。图中,五角星符号代表3架领导者无人机,其余6种不同颜色与形状的组合分别对应6架跟随者无人机。由图2可以看出,从初始时刻的散乱状态至 $t=20\text{ s}$ 时,系统已初步呈现出预期的双层编队队形,即领导者形成了稳定的三角形编队,而跟随者则逐步构成六边形包围结构。随着时间推进,在 $t=40\text{ s}$ 与 $t=50\text{ s}$ 时,整个编队不仅能够保持稳定,还可以围绕由领导者共同决定的编队中心进行持续的盘旋运动。结果表明:在间歇通信条件

下,领导层与跟随层无人机集群能够通过本文所设计的间歇通信控制器来实现各自期望的时变编队队形,同时能完成对编队中心的协同跟踪。

图3与图4分别展示了领导者与跟随者在 x 与 y 方向上的速度变化曲线。从图中可以看出,各领导者的速度在经过初始调整后逐渐趋于一致,并呈现出规律的周期性波动,与其盘旋运动模式相符,表明领导层在形成三角形编队的同时实现了速度同步。跟随者的速度曲线虽然在初始阶段存在明显差异,但随着时间的推移,也逐渐收敛并

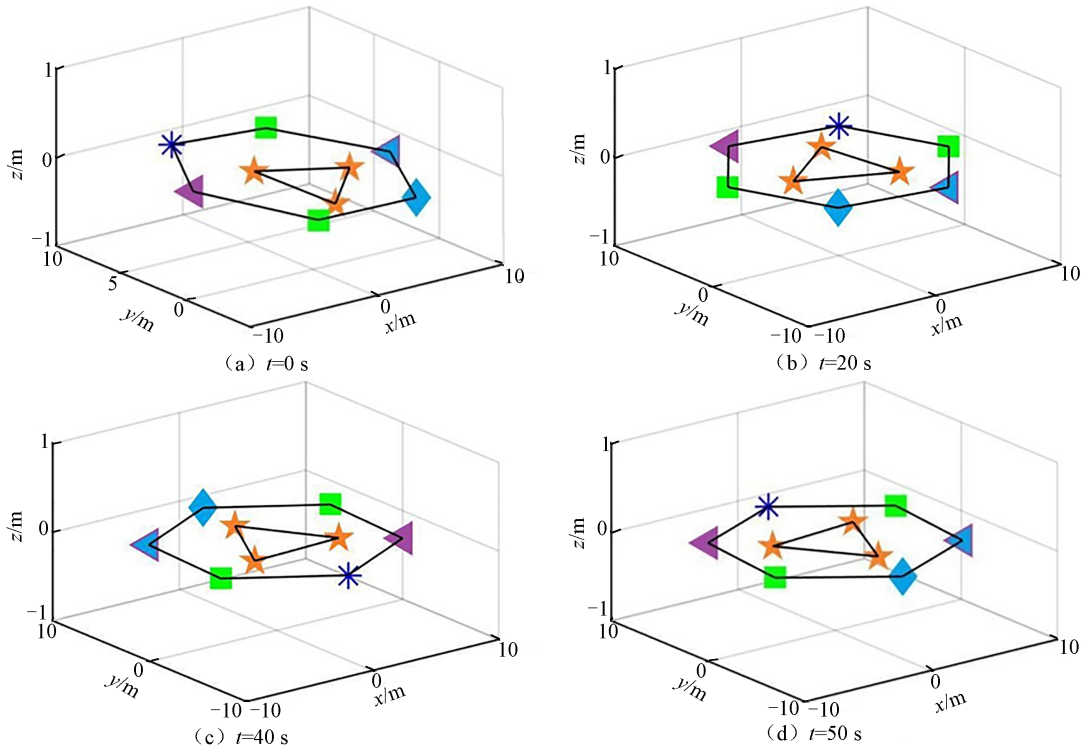


图2 不同时刻无人机位置

Fig. 2 UAV positions at different instants

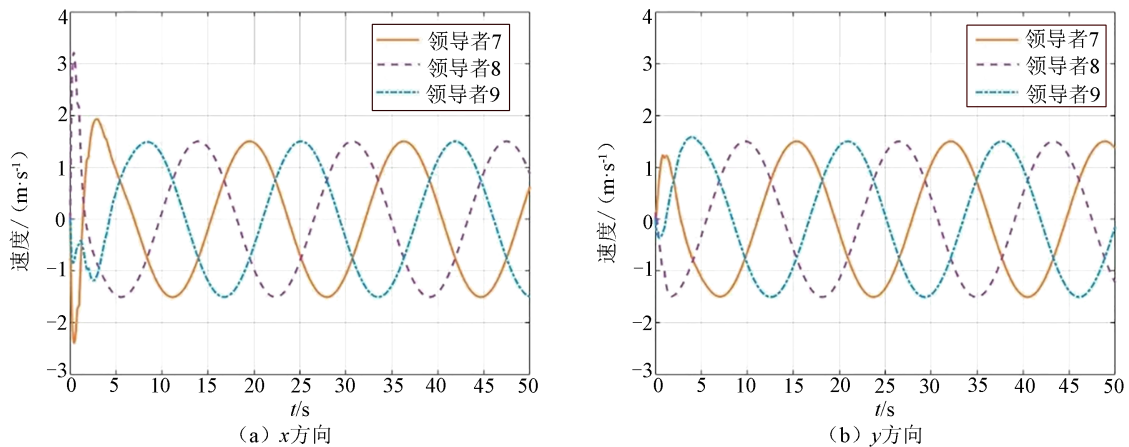


图3 领导者无人机在 x 和 y 方向速度

Fig. 3 Velocities of leader UAVs in x and y directions

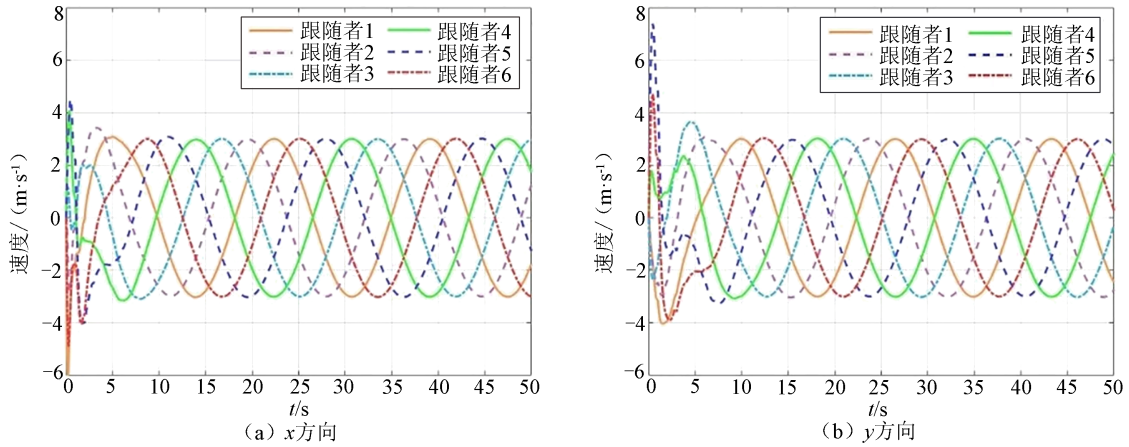
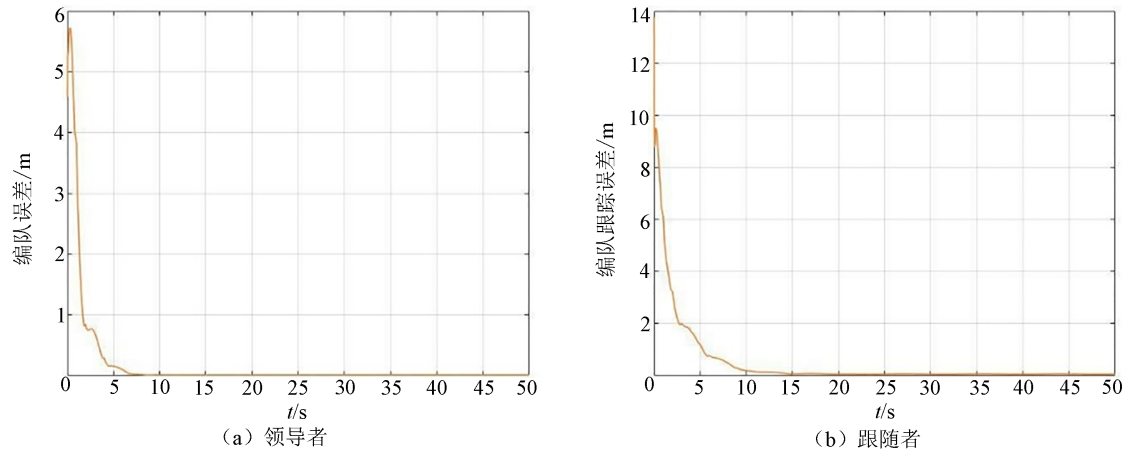
图4 跟随者无人机在 x 和 y 方向速度Fig. 4 Velocities of follower UAVs in x and y directions

图5 领导者编队误差和跟随者编队跟踪误差

Fig. 5 Formation errors of leaders and formation tracking errors of followers

呈现出与领导者速度变化相协调的趋势, 表明跟随者不仅可以在空间上跟踪由多个领导者所形成的编队中心, 还能在运动状态上实现同步, 从而验证了控制器在速度层面具有较好的协同效果。

图5进一步给出了领导者编队误差与跟随者编队跟踪误差的收敛曲线。编队误差是指无人机实际位置与期望位置之间的偏差。其中, 跟随者的编队跟踪误差还包含其实际位置与由领导者所决定的时变编队中心之间的相对误差。从图5可以看出, 两类误差曲线均在仿真初期存在一定的波动, 但随着系统运行, 二者均快速下降并最终趋近于零。这一收敛过程表明, 在间歇通信发生的情况下, 本文所设计的自反馈机制与控制策略仍能有效抑制误差积累, 确保系统在有限时间内达到并维持预期的编队跟踪性能。此外, 误差的稳定收敛证实了控制器在间歇通信条件下的有效性与鲁棒性。

4 结论

本文针对间歇通信条件下的双层时变编队跟踪控制问题展开深入探究, 主要结论如下。

1) 成功构建了间歇型双层时变编队跟踪控制器。该控制器基于间歇相对局部信息设计而成, 在通信连通时段可充分利用无人机间的状态向量与编队向量来构建控制机制, 而在通信中断时段可以仅依赖无人机的自反馈进行控制。

2) 确立了间歇通信条件下双层时变编队设计与分析判据。通过理论分析与数学推导, 引入间歇通信条件, 确保了双层时变编队跟踪的稳定性, 并依据编队可行条件确定了期望时变编队集合。

3) 数值仿真结果验证了所提控制器的有效性。仿真场景的结果表明, 领导者和跟随者能够同时形成期望的编队队形, 且跟随者可精准跟踪到由所有领导者共同决定的编队中心。

在实际应用过程中, 无人机集群可能还会面临通信延迟、更为复杂的通信约束以及能量限制等问题。后续研究将着重拓展和深化相关工作, 将通信延迟等因素纳入模型, 进一步优化控制器设计, 使无人机集群编队控制策略更具鲁棒性和适应性, 以更好地满足实际任务需求, 拓展无人机集群在复杂环境下的应用范围和任务执行能力。

参考文献

- [1] 刘成功. 无人机仿生紧密编队飞行控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 1-2.
LIU C G. Research on biomimetic close formation flight control of UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 1-2.
- [2] BAYEZIT I, FIDAN B. Distributed cohesive motion control of flight vehicle formations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5763-5772.
- [3] PHAM V H, TRINH M H, AHN H S. Formation control of rigid graphs with flex edges[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(6): 2543-2559.
- [4] ZHANG P P, DE QUEIROZ M, CAI X Y. Three-dimensional dynamic formation control of multi-agent systems using rigid graphs[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2015, 137(11): 111006.
- [5] RAMAZANI S, SELMIC R, DE QUEIROZ M. Rigidity-based multiagent layered formation control[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(8): 1902-1913.
- [6] KOWNACKI C. Multi-UAV flight using virtual structure combined with behavioral approach[J]. Acta Mechanica et Automatica, 2016, 10(2): 92-99.
- [7] ZHANG T J. Unmanned aerial vehicle formation inspired by bird flocking and foraging behavior[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(4): 402-416.
- [8] SHIN J, KIM S, SUK J. Development of robust flocking control law for multiple UAVs using behavioral decentralized method[J]. Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 2015, 43(10): 859-867.
- [9] 董希旺. 高阶线性群系统编队合围控制[D]. 北京: 清华大学, 2014: 36-38.
DONG X W. Formation and containment control for high-order linear swarm systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 36-38.
- [10] ABBASI Y, MOOSAVIAN S A A, NOVINZADEH A B. Formation control of aerial robots using virtual structure and new fuzzy-based self-tuning synchronization[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2017, 39(12): 1906-1919.
- [11] QIN Q, LI T S, LIU C, et al. Virtual structure formation control via sliding mode control and neural networks[C]//CONG F, LEUNG A, WEI Q L. Advances in Neural Networks-ISNN 2017. Cham: Springer International Publishing, 2017: 101-108.
- [12] OGUNBODEDE O T, HUIJBERTS H. Control of unmanned aerial vehicle formations using virtual structural approach and trajectory linearisation control method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(13): 2409-2424.
- [13] 权婉珍, 罗哲, 杨小冈, 等. 间歇通信条件下多无人机保性能编队追踪控制[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3288-3294.
QUAN W Z, LUO Z, YANG X G, et al. Guaranteed-performance formation tracking control for multi-UAVs with intermittent communication[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(11): 3288-3294.
- [14] WANG L, XI J X, HOU B, et al. Limited-budget consensus design and analysis for multiagent systems with switching topologies and intermittent communications[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(10): 1724-1736.
- [15] CHAI X F, LIU J, YU Y, et al. Practical fixed-time event-triggered time-varying formation tracking control for disturbed multi-agent systems with continuous communication free[J]. Unmanned Systems, 2021, 9(1): 23-34.
- [16] ZHANG J, ZHANG H G, SUN S X, et al. Adaptive time-varying formation tracking control for multiagent systems with nonzero leader input by intermittent communications[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(9): 5706-5715.
- [17] 段朝霞, 戴君, 邵振, 等. 间歇通信下具有双层拓扑结构的多智能体系统一致性研究[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(7): 13-18.
DUAN Z X, DAI J, SHAO Z, et al. Research on consensus of multi-agent systems with two-layer hierarchical topology under intermittent communication[J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(7): 13-18.
- [18] DONG X W, XIANG J, HAN L, et al. Distrib-

- uted time-varying formation tracking analysis and design for second-order multi-agent systems[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 86(2): 277-289.
- [19] 魏志强, 翁哲鸣, 化永朝, 等. 切换拓扑下异构无人集群编队-合围跟踪控制[J]. *航空学报*, 2023, 44(2): 258-273.
- WEI Z Q, WENG Z M, HUA Y Z, et al. Formation-containment tracking control for heterogeneous unmanned swarm systems with switching topologies[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(2): 258-273.
- [20] 田磊, 董希旺, 赵启伦, 等. 异构集群系统分布式自适应输出时变编队跟踪控制[J]. *自动化学报*, 2021, 47(10): 2386-2401.
- TIAN L, DONG X W, ZHAO Q L, et al. Distributed adaptive time-varying output formation tracking for heterogeneous swarm systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(10): 2386-2401.
- [21] DONG X W, LI Y F, LU C, et al. Time-varying formation tracking for UAV swarm systems with switching directed topologies[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, 30(12): 3674-3685.
- [22] XU C J, XU H C, SU H S, et al. Disturbance-observer based consensus of linear multi-agent systems with exogenous disturbance under intermittent communication[J]. *Neurocomputing*, 2020, 404: 26-33.
- [23] HAN L, DONG X W, LI Q D, et al. Formation tracking control for time-delayed multi-agent systems with second-order dynamics[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(1): 348-357.
- [24] DONG X W, HU G Q. Time-varying formation tracking for linear multiagent systems with multiple leaders[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(7): 3658-3664.
- [25] JIN T, LIU Z W, ZHOU H, et al. Robust average formation tracking for multi-agent systems with multiple leaders[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 2427-2432.
- [26] YU J L, DONG X W, LI Q D, et al. Fully adaptive practical time-varying output formation tracking for high-order nonlinear stochastic multiagent system with multiple leaders[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(4): 2265-2277.

(编辑: 刘建民)