

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202503003

协同性能约束下四旋翼无人机集群 预设性能优化编队控制

席建祥¹, 刘逸力^{1*}, 李 冰², 王 成¹, 黄 娜³, 高 涛¹

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025;

2. 火箭军装备部驻绵阳地区第一军事代表室, 四川 绵阳 621900;

3. 95865 部队, 北京 102218)

摘 要: 针对切换拓扑通信下的四旋翼无人机集群协同性能约束的优化编队控制问题, 提出了一种面向切换拓扑的分布式四旋翼无人机集群预设性能优化编队设计与分析算法。首先, 构建了包含自反馈项与编队补偿信号的一致性控制协议, 设计编队补偿信号消除不可控模态影响, 解耦了编队误差动态与编队中心动态, 给出了编队中心函数的显式表达式, 揭示了增益矩阵对编队中心运动模态的独立调节机制。然后, 设计了包含编队协同误差的性能指标函数, 通过将性能预设值直接嵌入线性矩阵不等式条件, 建立基于 Lyapunov 稳定性理论的设计判据, 在保证编队误差渐近收敛的同时, 将累积协同误差严格约束于预设阈值。最后, 通过 5 架无人机对所提算法进行预设性能编队控制仿真实验。实验结果验证了本文算法的有效性。

关键词: 四旋翼; 无人机集群; 一致性控制; 预设性能控制; 编队控制; 优化编队

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2025)03-021-11

Optimization Formation Control of Prescribed Performance of Quadrotor UAV Swarms under Cooperative Performance Constraints

XI Jianxiang¹, LIU Yili^{1*}, LI Bing², WANG Cheng¹,

HUANG Na³, GAO Tao¹

(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;

3. Troops No.95865, Beijing 102218, China)

ABSTRACT: To address the challenges of the optimization formation control of quadrotor unmanned aerial vehicle (UAV) swarms under cooperative performance constraints and switching

收稿日期: 2025-04-23

修回日期: 2025-05-21

录用日期: 2025-05-26

基金项目: 国家自然科学基金 (62176263)

第一作者: 席建祥 (1981—), 男, 教授, 主要从事切换系统、群系统和复杂系统控制研究。E-mail: xijx07@mails.tsinghua.edu.cn

***通信作者:** 刘逸力 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事四旋翼无人机集群编队控制研究。E-mail: linsayly@163.com

引用格式: 席建祥, 刘逸力, 李冰, 等. 协同性能约束下四旋翼无人机集群预设性能优化编队控制[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (3): 21-31. XI Jianxiang, LIU Yili, LI Bing, et al. Optimization formation control of prescribed performance of quadrotor UAV swarms under cooperative performance constraints[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (3): 21-31.

communication topologies, a distributed quadrotor UAV swarm-prescribed performance optimization formation design and analysis algorithm for switching topology was proposed. First, a consensus control protocol containing self-feedback terms and formation-compensation signals was constructed. The formation compensation signals were designed to eliminate the influence of uncontrollable modes, decouple formation error dynamics from formation center dynamics, explicitly define the formation center function, and reveal the independent regulation mechanism of the gain matrix on the motion modes of the formation center. Subsequently, a performance index function containing the formation coordination error was designed. A design criterion based on the Lyapunov stability theory was then established by directly embedding the prescribed performance values into linear matrix inequality conditions. This ensured asymptotic convergence of the formation errors and strictly constrained the cumulative cooperative errors within the prescribed thresholds. Finally, the prescribed performance formation control simulation experiments were conducted on five UAVs. The results verified the effectiveness of the proposed algorithm.

KEYWORDS: quadrotor; UAV swarm; consensus control; prescribed performance control; formation control; optimization formation

近年来,无人集群协同控制已在多智能体领域受到广泛关注^[1-4]。四旋翼无人机相对于其他无人机而言,具有结构简单、垂直起降、灵活性较好且维护成本较低等优点,被广泛应用于民事和军事领域^[5-8]。由于单架无人机的作用效能十分有限,因此,多无人机编队控制技术逐渐成为当前无人机研究的热点^[9-10]。多无人机协同编队在扩大侦察范围、提高对抗和任务容错能力、完成复杂任务等方面具有巨大优势^[11-13]。研究与之相关并能推动无人机系统发展的科学问题,具有一定前瞻性和战略性,既能提高国家的军事实力,又有助于发展感知、任务分配、轨迹规划^[14]、通信等多个关键技术,给民事生活带来质的飞跃^[15-16]。

合理的编队控制策略能够提升无人系统控制效能,降低无人系统出现故障或碰撞等恶劣情况的概率,有利于目标搜索与跟踪,增强其任务扩展性^[17]。一致性控制问题是群系统控制研究中的重点和热点,也是许多其他协同控制问题的基础性内容^[18-19],其基本思想是根据相邻主体之间的局部信息交互构建分布式控制协议,控制所关心的状态或输出变量达成一致。Ren^[20]将无人系统一致性控制协议拓展到二阶无人系统的编队控制问题中,并指出基于一致性的编队控制策略可以在一定程度上克服传统编队方法的固有缺陷。随着一致性理论的发展和完善,基于一致性理论的方法已发展成为编队控制的主要方法^[21]。

然而,在复杂多变的战场环境中,无人机集群不仅需要精准地实现编队,还需要保证某些方

面的性能满足特定要求。例如,要求编队控制的收敛速度尽可能快,或者在获得编队一致的控制过程中所消耗的能量尽可能少,以满足无人机编队迅速响应并调整其队形结构的需求。最优控制是解决此类问题的手段之一,现已被广泛应用于各个领域^[22],并由此引出了无人机集群系统的优化编队控制问题。Cao等^[23]研究了一阶多智能体系统的优化一致性控制问题,基于各智能体之间的状态差信息和控制输入构建了性能指标函数,并在要求多智能体系统的作用拓扑图是完全图条件下实现了最优控制。Xie等^[24]在考虑一致性问题的同时,根据系统状态和控制输入构建了一个优化指标函数,通过求解该函数的上界来实现一致性性能与控制能量消耗的平衡。但是,现有研究大多集中于解决具有约束的优化问题,对于提前设置性能上限的编队控制的研究尚不充分。

预设性能控制(prescribed performance control, PPC)最早由希腊学者Bechlioulis等^[25]提出,是指以提高系统的暂态性能和稳态性能为目标,在保证误差收敛到一个预先设定集合的同时,保证误差的收敛速度及超调量满足预先设定的条件。Chen等^[26]解决了领导-跟随结构下的二阶系统的瞬态预设性能控制问题。Dai等^[27]运用预设性能控制设计方法,在构造李雅普诺夫函数时引入了对数型障碍函数,实现了模型不确定和时变外部干扰下的编队跟踪控制问题,且误差满足瞬态预设性能指标。以上研究均为设计性能包络函数来约

束系统的瞬态性能。Chen 等^[28]针对时变执行器故障下的不确定多智能体系统, 提出了一种积分型预设性能的事件触发自适应一致性控制方法。群系统收敛速度、控制误差等协同性能可以反映协同控制质量, 是群系统协同控制方法在实际应用中需要考虑的重要指标。本文通过将协同性能指标与编队控制增益关联起来, 设计了分布式时变编队控制协议, 进而实现预设性能编队的控制策略。

综上所述, 本文提出了切换拓扑下的四旋翼集群系统预设性能优化编队分析与设计方法。在实现对群系统分布式时变编队控制的同时, 能够将编队控制过程中产生的累积协同误差限制在性能预设值的约束范围内。主要工作包括: 1) 实现了切换拓扑下四旋翼集群系统的分布式预设协同性能优化编队控制, 同时将编队控制过程中产生的累积协同误差限制在性能预设值范围内; 2) 给出了可实现预设性能优化编队控制的充分条件; 3) 扩展了时变编队函数可构造范围, 构建了可调节的编队中心运动模式。

1 四旋翼集群预设性能编队控制问题描述

1.1 集群系统与通信拓扑的联系

考虑由 N 个主体组成的四旋翼无人机集群, 其通讯拓扑可以描述为一个无向连通图 $G(V, E)$, 其中 $V = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N\}$ 为顶点集, 每个顶点 $\varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 代表一架四旋翼无人机。 $E = \{(\varepsilon_i, \varepsilon_j) | \varepsilon_i, \varepsilon_j \in V\}$ 为图 G 中的边集, 边 $(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ 意味着无人机 j 可以接受到无人机 i 的信息。若主体 i 和 j 之间同时存在边 $(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ 和 $(\varepsilon_j, \varepsilon_i)$, 则称主体 i 和 j 之间存在一条无向边。若图 G 中仅存在无向边, 则称 G 为无向拓扑图, 否则为有向拓扑图。令 w_{ij} 表示从主体 j 到 i 的通信权重, 当无人机 i 和无人机 j 有通信时, $w_{ij} = 1$, 否则 $w_{ij} = 0$ 。图 G 中的 Laplace 矩阵记为 $L = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$, 当 $i \neq j$ 时, $l_{ij} = -w_{ij}$; 当 $i = j$ 时, $l_{ij} = \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij}$ 。

此外, 群系统的通信拓扑可能在某些时刻发生切换, 令 $\kappa(t) = \varphi$, 表示群系统的通信拓扑切换信号。其中, φ 为切换集, 且切换集中的通信拓扑均是无向连通的。任意相邻的 2 个切换时刻满足 $t_r - t_{r-1} \geq T_d (\forall r \geq 1, r = 1, 2, \dots, N)$, 其中, $T_d >$

0 表示最小驻留时间。

1.2 四旋翼无人机集群动力学模型

针对四旋翼无人机集群进行编队, 首先, 对四旋翼无人机集群的动力学模型进行分析。四旋翼无人机控制系统的动力学模型可以用二阶积分器描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = g\mathbf{e}_z - \frac{F_i(t)}{m_i} \mathbf{R}_i(t) \mathbf{e}_z \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$; $\mathbf{p}_i = [\mathbf{p}_{ix}(t), \mathbf{p}_{iy}(t), \mathbf{p}_{iz}(t)]^T$ 和 $\mathbf{v}_i(t) = [\mathbf{v}_{ix}(t), \mathbf{v}_{iy}(t), \mathbf{v}_{iz}(t)]^T$ 分别表示第 i 架无人机的位置和速度; $\mathbf{e}_z = [0, 0, 1]^T$ 为 z 轴方向的方向向量; g 为重力加速度常数; m_i 为无人机质量; $F_i(t)$ 为机体坐标系下的升力; $\mathbf{R}_i(t)$ 为从无人机的机体坐标系到地理坐标系的旋转矩阵, 具体表达式为

$$\mathbf{R}_i(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i(t) \cos \psi_i(t) \\ \cos \theta_i(t) \sin \psi_i(t) \\ -\sin \theta_i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_i(t) \cos \psi_i(t) \sin \omega_i(t) - \sin \psi_i(t) \sin \omega_i(t) \\ \sin \theta_i(t) \sin \psi_i(t) \sin \omega_i(t) - \cos \psi_i(t) \cos \omega_i(t) \\ \cos \theta_i(t) \sin \omega_i(t) \\ \sin \theta_i(t) \cos \psi_i(t) \cos \omega_i(t) + \sin \psi_i(t) \sin \omega_i(t) \\ \sin \theta_i(t) \sin \psi_i(t) \cos \omega_i(t) - \cos \psi_i(t) \sin \omega_i(t) \\ \cos \theta_i(t) \cos \omega_i(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\omega_i(t)$ 、 $\theta_i(t)$ 、 $\psi_i(t)$ 分别为地理坐标系下的横滚角、俯仰角和偏航角。由式 (1) 和式 (2) 可得

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{v}}_{ix}(t) = -\frac{F_i(t)}{m_i} [\sin \theta_i(t) \cos \psi_i(t) \cos \omega_i(t) + \sin \psi_i(t) \sin \omega_i(t)] \\ \dot{\mathbf{v}}_{iy}(t) = -\frac{F_i(t)}{m_i} [\sin \theta_i(t) \sin \psi_i(t) \cos \omega_i(t) + \sin \psi_i(t) \sin \omega_i(t)] \\ \dot{\mathbf{v}}_{iz}(t) = -\frac{1}{m_i} [F_i(t) \cos \theta_i(t) \cos \omega_i(t) - m_i g] \end{cases} \quad (3)$$

式中: 下标 x 、 y 、 z 分别表示地理坐标系北、东、地 3 个方向的坐标轴。令 $\mathbf{u}_i(t) = [\mathbf{u}_{ix}(t), \mathbf{u}_{iy}(t), \mathbf{u}_{iz}(t)]^T$ 作为控制输入, 由式 (1)、(3) 可得

$$\begin{cases} u_{ix}(t) = -\frac{F_i(t)}{m_i} [\sin \theta_i(t) \cos \psi_i(t) \cos \omega_i(t) + \\ \sin \psi_i(t) \sin \omega_i(t)] \\ u_{iy}(t) = -\frac{F_i(t)}{m_i} [\sin \theta_i(t) \sin \psi_i(t) \cos \omega_i(t) + \\ \sin \psi_i(t) \sin \omega_i(t)] \\ u_{iz}(t) = -\frac{1}{m_i} [F_i(t) \cos \theta_i(t) \cos \omega_i(t) - m_i g] \end{cases} \quad (4)$$

四旋翼无人机的飞行控制可解耦为内环控制和外环控制, 内环控制驱动无人机姿态变化, 并为外环控制提供期望加速度, 外环控制驱动无人机位置变化。本研究主要关注外环的编队控制, 进而实现四旋翼集群预设性能优化编队。假设姿态控制的精度满足要求, 并为外环控制提供期望的控制输入, 此时无人机外环控制可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

考虑含有 N 架四旋翼无人机组成的集群系统, 编号依次为 1 至 N , 假设集群通信拓扑图为无向连通的, 对应的拉普拉斯矩阵为 $\mathbf{L}$ 。令 $\mathbf{x}_i(t) = [\mathbf{p}_i^T(t), \mathbf{v}_i^T(t)]^T \in \mathbb{R}^6$ 表示集群内第 i 架四旋翼无人机的状态, 无人机动力学模型可以转换为矩阵形式表示为

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}_i(t) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ 分别表示系统矩阵和输入矩阵, 且

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_3, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_3 \quad (7)$$

由于系统可控且矩阵 $\mathbf{B}$ 列满秩, 那么存在一个非奇异矩阵 $\bar{\mathbf{B}} = [\mathbf{B}_1^T, \mathbf{B}_2^T]^T$ 满足 $\mathbf{B}_1\mathbf{B} = \mathbf{I}_6$ 且 $\mathbf{B}_1\mathbf{B} = \mathbf{0}$, 其中 $\mathbf{B}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$, $\mathbf{B}_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ 。

四旋翼集群系统期望形成的时变编队记为 $\mathbf{f}(t) = [f_1^T(t), f_2^T(t), \dots, f_N^T(t)]^T \in \mathbb{R}^{6N}$, 其中 $f_i(t) (i = 1, 2, \dots, N)$ 分段连续可微。令 $\mathbf{F}_i(t) = \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{f}_i(t)$, $\mathbf{F}_{ij}(t) = \mathbf{F}_i(t) - \mathbf{F}_j(t) (i, j = 1, 2, \dots, N)$ 。为实现预设性能分布式时变编队控制, 提出基于局部信息交互的编队控制协议为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i(t) = \mathbf{K}_u \sum_{j=1}^N w_{ij} \mathbf{F}_{ij}(t) + \mathbf{K}_c \mathbf{F}_i(t) + \mathbf{s}_i(t) \\ J_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \int_0^{+\infty} \mathbf{F}_{ij}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{F}_{ij}(t) dt \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{K}_u, \mathbf{K}_c \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ 为需要设计的增益矩阵; $\mathbf{s}_i(t) \in \mathbb{R}^3$ 为第 i 架四旋翼无人机可自由配置的编

队补偿信号; J_p 为性能指标函数, $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 为性能指标权重矩阵, 且 $\mathbf{Q} > \mathbf{0}$ 。协议中所给出的 $\mathbf{u}_i(t)$ 包含 3 项, 其作用各不相同。第一项包含增益矩阵 $\mathbf{K}_u$, 用于驱动集群系统的各个四旋翼实现期望编队; 第二项包含增益矩阵 $\mathbf{K}_c$, 用于配置编队中心的运动模式; 第三项 $\mathbf{s}_i(t)$ 为编队补偿信号, 可用于扩展编队函数 $\mathbf{f}_i(t)$ 的可构造的范围。 $\mathbf{K}_c$ 和 $\mathbf{s}_i(t)$ 对于集群系统实现某些编队而言不是必须的。

令 J_p^* 表示性能预设值, 则集群在编队控制协议作用下的实际性能指标函数值应当满足 $J_p \leq J_p^*$ 。四旋翼集群系统预设性能优化编队控制的定义如下。

定义 1: 对于任意给定的性能预设值 $J_p^* > 0$ 和有界是初始状态 $\mathbf{x}_i(0) - \mathbf{f}_i(0) (i = 1, 2, \dots, N)$, 如果存在矩阵 $\mathbf{K}_u$ 和 $\mathbf{K}_c$ 使得式 (9) 成立, 且性能指标函数能够满足 $J_p \leq J_p^*$, 则称四旋翼集群系统实现了预设性能优化编队。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{f}_i(t) - \mathbf{x}_c(t)) = \mathbf{0}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

2 预设性能优化编队控制算法分析与设计

通过非奇异变换, 将集群系统在编队协议作用下的动态方程分解为编队中心动态方程和编队误差动态方程, 然后利用线性矩阵不等式方法提出预设性能优化编队控制的分析与设计判据, 同时给出编队中心函数 $\mathbf{x}_c(t)$ 的表达式。

2.1 动态方程分解

令 $\mathbf{F}(t) = [\mathbf{F}_1^T(t), \mathbf{F}_2^T(t), \dots, \mathbf{F}_N^T(t)]$, $\mathbf{s}(t) = [\mathbf{s}_1^T(t), \mathbf{s}_2^T(t), \dots, \mathbf{s}_N^T(t)]^T$, 则集群在编队协议作用下的闭环动态方程可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{F}}(t) &= (\mathbf{I}_N \otimes (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_c) - \mathbf{L}_{\kappa(t)} \otimes \mathbf{B}\mathbf{K}_u) \mathbf{F}(t) + \\ &(\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{A}) \mathbf{f}(t) - (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_6) \dot{\mathbf{f}}(t) + \\ &(\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{B}) \mathbf{s}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

由于通信拓扑是无向连通的, 所以 $\mathbf{L}_{\kappa(t)}$ 是对称半正定的, 且其所有特征值由一个零特征值和 $N-1$ 个正实数特征值构成, 其中零特征值对应的特征向量是 $\mathbf{1}$ 。基于此, 可构建正交矩阵 $\mathbf{U}_{\kappa(t)} = [\mathbf{1}/\sqrt{N}, \bar{\mathbf{U}}_{\kappa(t)}]$, 使得 $\mathbf{U}_{\kappa(t)}^T \mathbf{L}_{\kappa(t)} \mathbf{U}_{\kappa(t)} = \text{diag}\{0, \bar{\mathbf{U}}_{\kappa(t)}^T \mathbf{L}_{\kappa(t)} \bar{\mathbf{U}}_{\kappa(t)}\}$, 其中 $\bar{\mathbf{U}}_{\kappa(t)} \in \mathbb{R}^{N \times (N-1)}$ 是一个分段连续矩阵, 在任意相邻的 2 个切换时刻之间是常数矩阵, 且有

$$\bar{\mathbf{U}}_{\kappa(t)}^T \mathbf{L}_{\kappa(t)} \bar{\mathbf{U}}_{\kappa(t)} = \text{diag}\{\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N\} \quad (11)$$

式中: $0 < \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N$ 。令 $\delta(t) = (\mathbf{U}_{\kappa(t)}^T \otimes \mathbf{I}_6) \cdot \mathbf{F}(t) = [\delta^T(t), \zeta^T(t)]^T$, 闭环控制系统可以转换

为以下 2 个子系统。

$$\dot{\delta}_1(t) = (A + BK_c) \delta_1(t) + \frac{1}{\sqrt{N}} [(1^T \otimes A) f(t) - (1^T \otimes I_6) \dot{f}(t) + (1^T \otimes B) s(t)] \quad (12)$$

$$\dot{\zeta}(t) = (I_{N-1} \otimes (A + BK_c) - (\bar{U}_{\kappa(t)}^T L_{\kappa(t)} \bar{U}_{\kappa(t)} \otimes BK_u) \cdot \zeta(t) + (\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes A) f(t) - (\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes I_6) \cdot \dot{f}(t) + (\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes B) s(t) \quad (13)$$

式中: $\zeta(t) = [\delta_2^T(t), \delta_3^T(t), \dots, \delta_N^T(t)]^T$ 。定义

$$\delta_c(t) \triangleq \sum_{i=2}^N U_{\kappa(t)} \otimes \delta_i(t) \quad (14)$$

$$\delta_e(t) \triangleq U_{\kappa(t)} \otimes \delta_1(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{1} \otimes \delta_1(t) \quad (15)$$

式中: $e_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 表示一个 N 维列向量, 其第 i 个元素为 1, 剩余 $N - 1$ 个元素均为 0。因为

$$\sum_{i=2}^N e_i \otimes \delta_i(t) = [\mathbf{0}^T, \zeta^T(t)]^T \quad (16)$$

所以由式 (14) 可以得到

$$\delta_c(t) = (U_{\kappa(t)} \otimes I_6) [\mathbf{0}^T, \zeta^T(t)]^T \quad (17)$$

同时, 由式 (15) 可得

$$\delta_e(t) = (U_{\kappa(t)} \otimes I_6) [\delta_1^T(t), \mathbf{0}^T]^T \quad (18)$$

由于 $U_{\kappa(t)} \otimes I_6$ 是非奇异的, 所以从式 (17)、(18) 可以看出 $\delta_c(t)$ 和 $\delta_e(t)$ 线性无关。又因为 $(U_{\kappa(t)}^T \otimes I_6) \Gamma(t) = [\delta_1^T(t), \zeta^T(t)]^T$, 所以有

$$\Gamma(t) = \delta_c(t) + \delta_e(t) \quad (19)$$

结合式 (14) ~ (18) 可以看出, 集群系统实现时变编队 $f(t)$ 当且仅当 $\lim_{t \rightarrow \infty} \zeta(t) = \mathbf{0}$, 即子系统描述了集群系统的编队误差动态。同时, 由式 (15) 可以看出, 若 $\lim_{t \rightarrow \infty} \zeta(t) = \mathbf{0}$, 则式 $\delta_1(t) / \sqrt{N}$ 能够描述编队中心的运动轨迹。

2.2 编队中心函数

基于以上结论, 结合式 (12), 定理 1 给出编队中心函数的表达式。

定理 1: 如果集群系统实现了时变编队, 那么编队中心函数 $x_c(t)$ 满足

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (x_c(t) - c_\delta(t)) = \mathbf{0} \quad (20)$$

其中

$$c_\delta(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [e^{(A+BK_c)t} x_i(0) - f_i(t) - \int_0^t e^{(A+BK_c)(t-\tau)} B (K_c f_i(\tau) - s_i(\tau)) d\tau] \quad (21)$$

证明: 从式 (12) 能够看出, $\delta_1(t)$ 的微分方程共包含 4 项。受第一项激励时, $\delta_1(t)$ 的动态响应为

$$\delta_{1,1}(t) = \sum_{i=1}^N e^{(A+BK_c)t} \delta_i(0) =$$

$$\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N e^{(A+BK_c)t} (x_i(0) - f_i(0)) \quad (22)$$

在 $f(t)$ 和 $s(t)$ 项激励下, 动态响应分别为

$$\delta_{1,f}(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \int_0^t e^{(A+BK_c)(t-\tau)} A f_i(\tau) d\tau \quad (23)$$

$$\delta_{1,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \int_0^t e^{(A+BK_c)(t-\tau)} B s_i(\tau) d\tau \quad (24)$$

在 $\dot{f}(t)$ 项激励下, 动态响应为

$$\begin{aligned} \delta_{1,\dot{f}}(t) = & -\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \int_0^t e^{(A+BK_c)(t-\tau)} \dot{f}_i(\tau) d\tau = \\ & \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N (e^{(A+BK_c)t} f_i(0) - f_i(t) - \\ & \int_0^t e^{(A+BK_c)(t-\tau)} (A + BK_c) f_i(\tau) d\tau) \end{aligned} \quad (25)$$

结合式 (22) ~ (25) 可得

$$\begin{aligned} c_\delta(t) = & \frac{1}{\sqrt{N}} (\delta_{1,1}(t) + \delta_{1,f}(t) + \delta_{1,s}(t) + \delta_{1,\dot{f}}(t)) = \\ & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e^{(A+BK_c)t} x_i(0) - f_i(t) - \int_0^t e^{(A+BK_c)(t-\tau)} \cdot \\ & B (K_c f_i(\tau) - s_i(\tau)) d\tau) \end{aligned} \quad (26)$$

证毕。

2.3 预设性能编队控制的充分条件

从定理 1 可以看出, 增益矩阵 K_c 可以影响编队中心的运动轨迹。事实上, 若 (A, B) 可控, 那么通过设计 K_c 可将矩阵 $A + BK_c$ 的特征值调整到复平面中任意所需位置。 K_c 的取值可依据实际编队任务对群系统宏观运动的要求来选取。此外, 编队中心函数与切换拓扑及增益矩阵 K_u 无关。若 K_c 已经根据编队中心运动模态的配置要求进行了选取, 则通过定理 2 可以设计增益矩阵 K_u , 并给出编队补偿信号 $s_i(t)$ 的具体表达式。

定理 2: 对于任意给定的性能预设 $J_p^* > 0$ 和任意有界初始编队误差 $\zeta(0) \neq \mathbf{0}$, 如果编队函数 $f(t)$ 满足可行条件 (27), 且存在一个正定矩阵 R 满足线性矩阵不等式 (28)

$$B_2 A f_i(t) - B_2 \dot{f}_i(t) = \mathbf{0} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} (A + BK_c) R + R & R & 0 \\ (A + BK_c)^T - 2BB^T & -2Q^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & I_6 - \alpha_r^{-1} J_p^* R \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (28)$$

则集群系统在控制协议的作用下可实现预设性能优化编队控制。其中, $\alpha_r = \Gamma^T(0) ((I_N - N^{-1} \mathbf{1} \mathbf{1}^T) \otimes I_6) \Gamma(0)$ 。此时, 增益矩阵 K_u 设计为

$K_u = \lambda_{\min}^{-1} B^T R^{-1}$, $\lambda_{\min}^i$ 为第 i 个通信拓扑的 Laplacian 矩阵的最小非零特征值, 并令 $\lambda_{\min} = \min\{\lambda_{\min}^i, \forall i \in \varphi\}$ 。编队补偿信号设计为 $s_i(t) = B_1 \dot{f}_i(t) - B_1 A f_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

证明: 首先证明在给定条件下, 集群系统能够实现时变编队, 然后证明 $J_p \leq J_p^*$ 。构建候选 Lyapunov 函数为

$$V(t) = \zeta^T(t) (I_{N-1} \otimes P) \zeta(t) \quad (29)$$

式中: $P > 0$ 。令 $A_K = A + BK_c$, 对 $V(t)$ 关于时间 t 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \zeta^T(t) (I_{N-1} \otimes (PA_K + A_K^T P)) - \\ & (\bar{U}_{\kappa(t)}^T L_{\kappa(t)} \bar{U}_{\kappa(t)}) \otimes (PBK_u + K_u^T B^T P) \zeta(t) + \\ & 2\zeta^T(t) ((\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes PA) f(t) - (\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes P) \dot{f}(t) + \\ & (\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes PB) s(t)) \end{aligned} \quad (30)$$

由于编队补偿信号 $s_i(t)$ 可自由配置, 所以总能给出合适的函数 $s_i(t)$, 使式 (31) 成立。

$$B_1 A f_i(t) - B_1 \dot{f}_i(t) + s_i(t) = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (31)$$

因为 $B_2 B = 0$, 所以条件 (27) 等价于

$$\bar{B} A f_i(t) - \bar{B} \dot{f}_i(t) = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (32)$$

结合式 (31) 和 (32), 可得

$$\bar{B} A f_i(t) - \bar{B} \dot{f}_i(t) + \bar{B} B s_i(t) = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (33)$$

又因为 $\bar{B}$ 可逆, 所以式 (33) 等价于

$$A f_i(t) - \dot{f}_i(t) + B s_i(t) = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (34)$$

进而可以得到

$$\begin{aligned} & (\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes A) f(t) - (\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes I_n) \dot{f}(t) + \\ & (\bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes B) s(t) = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

由此, 式 (30) 可以简化为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \zeta^T(t) (I_{N-1} \otimes (PA_K + A_K^T P)) - \\ & (\bar{U}_{\kappa(t)}^T L_{\kappa(t)} \bar{U}_{\kappa(t)}) \otimes (PBK_u + K_u^T B^T P) \zeta(t) \end{aligned} \quad (36)$$

由于 $\bar{U}_{\kappa(t)}^T L_{\kappa(t)} \bar{U}_{\kappa(t)}$ 是一个对角阵, 且对角元素为矩阵 $L_{\kappa(t)}$ 的非零特征值, 结合式 (36) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=2}^N \delta_i^T(t) (PA_K + A_K^T P - \lambda_i (PBK_u + \\ & K_u^T B^T P)) \delta_i(t) \end{aligned} \quad (37)$$

令 $P = R^{-1}$, 并将 $K_u = \lambda_{\min}^{-1} B^T R^{-1}$ 代入式 (37) 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=2}^N \delta_i^T(t) (R^{-1} A_K + A_K^T R^{-1} - 2\lambda_{\min}^{-1} \lambda_i R^{-1} \cdot \\ & BB^T R^{-1}) \delta_i(t) \leq \sum_{i=2}^N \delta_i^T(t) (R^{-1} A_K + \\ & A_K^T R^{-1} - 2R^{-1} BB^T R^{-1}) \delta_i(t) \end{aligned} \quad (38)$$

根据式 (28) 并结合 Schur 引理可知

$$A_K R + R A_K^T - 2BB^T + 2RQR < 0$$

$$\Rightarrow R^{-1} A_K + A_K^T R^{-1} - 2R^{-1} BB^T R^{-1} + 2Q < 0 \quad (39)$$

$$\Rightarrow R^{-1} A_K + A_K^T R^{-1} - 2R^{-1} BB^T R^{-1} < -2Q < 0$$

从而由式 (38) 可得 $\dot{V}(t) \leq 0$, 并且 $\dot{V}(t) \equiv 0$ 当且仅当 $\zeta(t) \equiv 0$ 。由此可知, 子系统是渐近稳定的, 即集群系统在控制协议的作用下能够实现编队 $f(t)$ 。

接下来, 讨论性能指标函数 J_p 是否被限制在性能预设值 J_p^* 的范围内。结合控制协议可得

$$\begin{aligned} J_p = & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \int_0^{+\infty} F_{ij}^T(t) Q F_{ij}(t) dt = \\ & 2 \int_0^{+\infty} F^T(t) (L_N \otimes Q) F(t) dt \end{aligned} \quad (40)$$

式中: L_N 为一个所有边权重均为 $1/N$ 的完全图的拉普拉斯矩阵。因为

$$\bar{U}_{\kappa(t)} \bar{U}_{\kappa(t)}^T = U_{\kappa(t)} U_{\kappa(t)}^T - \frac{1}{N} \mathbf{1}\mathbf{1}^T = I_N - \frac{1}{N} \mathbf{1}\mathbf{1}^T = L_N \quad (41)$$

所以

$$\begin{aligned} & F^T(t) (L_N \otimes Q) F(t) = \\ & F^T(t) (\bar{U}_{\kappa(t)} \bar{U}_{\kappa(t)}^T \otimes Q) F(t) = \\ & \zeta^T(t) (I_{N-1} \otimes Q) \zeta(t) = \sum_{i=2}^N \delta_i^T(t) Q \delta_i(t) \end{aligned} \quad (42)$$

任取一个实数 $h \geq 0$, 定义

$$\begin{aligned} J_p^h \triangleq & \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \int_0^h F_{ij}^T(t) Q F_{ij}(t) dt = \\ & 2 \sum_{i=2}^N \int_0^h \delta_i^T(t) Q \delta_i(t) dt \end{aligned} \quad (43)$$

由于 $R^{-1} A_K + A_K^T R^{-1} - 2R^{-1} BB^T R^{-1} + 2Q < 0$, 结合式 (38) 可得

$$J_p^h = \sum_{i=2}^N \int_0^h 2 \delta_i^T(t) Q \delta_i(t) dt + \quad (44)$$

$$\int_0^h \dot{V}(t) dt - V(h) + V(0) \leq V(0) - V(h)$$

令 $h \rightarrow +\infty$, 可得

$$\begin{aligned} J_p \leq & V(0) = \zeta^T(0) (I_{N-1} \otimes P) \zeta(0) = \\ & \zeta^T(0) (I_{N-1} \otimes R^{-1}) \zeta(0) \end{aligned} \quad (45)$$

因为 $\zeta(t) = [0, I_{(N-1)}] (U_{\kappa(t)}^T \otimes I_6) F(t)$ 且 $\bar{U}_{\kappa(t)} \bar{U}_{\kappa(t)}^T = I_N - N^{-1} \mathbf{1}\mathbf{1}^T$, 所以

$$\begin{aligned} & \zeta^T(0) (I_{N-1} \otimes R^{-1}) \zeta(0) = \\ & F^T(0) \left((I_N - \frac{1}{N} \mathbf{1}\mathbf{1}^T) \otimes R^{-1} \right) F(0) \end{aligned} \quad (46)$$

根据条件有 $I_6 - \alpha_r^{-1} J_p^* R < 0$, 即 $R^{-1} < \alpha_r^{-1} J_p^* I_6$ 。

结合式 (45) 和式 (46), 可知

$$J_p < J_p^* \alpha_r^{-1} F^T(0) \left((I_N - \frac{1}{N} \mathbf{1}\mathbf{1}^T) \otimes I_6 \right) F(0) = J_p^* \quad (47)$$

由此可得定理2的结论。

然而, 当给定的性能预设值 J_p^* 很小时, 定理2给出的线性矩阵不等式条件可能没有可行解, 基于此给出存在可行解的充分条件。

推论1: 对于以下最优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \gamma \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \begin{bmatrix} (A + BK_c)R + R(A + BK_c)^T - 2BB^T & R \\ R & -Q^2 \end{bmatrix} < 0 \\ I_6 - \gamma R < 0 \\ R > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (48)$$

如果存在最优解 $\gamma_{\min}$ 以及与之对应的正定矩阵 R , 使得式 (48) 中的线性矩阵不等式成立, 那么当 $J_p^* \geq \gamma_{\min} \alpha_r$ 时, 条件必然有解。最优化问题可借助 LMI 工具箱中的 GEVP 求解器来求解。此外, 由于 (A, B) 是可控的, 所以 $(A + BK_c, B)$ 也是可控的。可以看出, 式 (48) 中的第一个约束条件能够转化为关于矩阵对 $(A + BK_c, B)$ 的黎卡提不等式。因此, 当 $(A + BK_c, B)$ 可控时, 必然存在一个正定矩阵 R 满足该约束条件; 另一方面, 当 γ 足够大时, 式 (48) 中的第二个约束条件显然也成立。因此, 如果 (A, B) 可控, 那么推论1中的优化问题必然有解。

3 算法步骤

增益矩阵 K_c 和 K_u 求取的具体算法步骤如下。

Step1 结合编队任务要求选定正定矩阵 Q , 同时确定性能预设值 J_p^* ;

Step2 结合群系统编队中心运动需求, 设计适合的 K_c , 将矩阵 $A + BK_c$ 的特征值配置到复平面的期望位置;

Step3 根据系统矩阵 B 计算可逆矩阵 $\bar{B} = [B_1^T, B_2^T]^T$ 。检验定理2的编队可行条件, 如果成立, 进入下一步。否则, 进入 Step6;

Step4 利用 LMI 工具箱中的 GEVP 求解器计算最优化问题的最优解 $\gamma_{\min}$, 判断 $J_p^* \geq \gamma_{\min} \alpha_r$ 是否成立。如果成立, 进入下一步。否则, 进入 Step6;

Step5 根据线性矩阵不等式条件得到矩阵 R , 设计增益矩阵 $K_u = \lambda_{\min}^{-1} B^T R^{-1}$ 和编队补偿信号 $s_i(t) = B_1 \dot{f}_i(t) - B_1(A + BK_c)f_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 算法结束;

Step6 集群系统在控制协议的作用下不能实现预设性能优化编队控制, 算法终止。

4 仿真验证

考虑由5个四旋翼无人机组成的集群系统, 其通信拓扑在图1所示的拓扑集中随机切换。若无人机 i 可以收到无人机 j 的信息, 则通信权重 $w_{ij} = 1$, 否则, $w_{ij} = 0$ 。

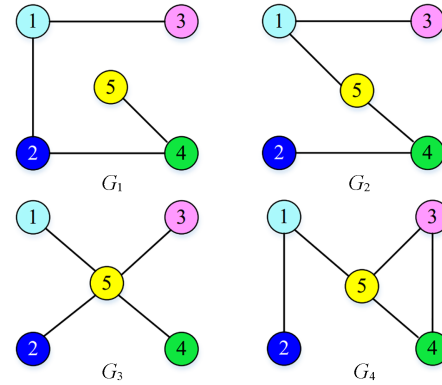


图1 四旋翼无人机集群优化编队控制通信拓扑切换集

Fig. 1 Communication topology switching set of optimization formation control of quadrotor UAV swarm

每个主体动态由式 (6) 描述, 各个主体的编队函数设计如下。

$$\begin{aligned} f_i(t) = & \begin{bmatrix} -4\sqrt{2} \sin \left(kt + \frac{(2i-1)\pi}{N} \right), \\ \left(kt + \frac{(2i-1)\pi}{N} \right), \\ 8\cos \left(kt + \frac{(2i-1)\pi}{N} \right), \\ -4k\sqrt{2} \cos \left(kt + \frac{(2i-1)\pi}{N} \right), \\ 4k\sqrt{2} \cos \left(kt + \frac{(2i-1)\pi}{N} \right), \\ -8k\sin \left(kt + \frac{(2i-1)\pi}{N} \right) \end{bmatrix} \quad (49) \end{aligned}$$

式中: k 为角速度, 大小为 1 rad/s 。编队函数 $f_i(t)$ 设计为一个绕几何中心旋转的五边形。各主体初始状态设为

$$\begin{cases} x_1(0) = [-7.0447, 3.9924, -0.9045, 0, 0, 0]^T \\ x_2(0) = [-1.4545, -1.2086, -1.5634, 0, 0, 0]^T \\ x_3(0) = [-0.3504, -1.5651, 0.5591, 0, 0, 0]^T \\ x_4(0) = [-0.7946, -1.7721, -1.2803, 0, 0, 0]^T \\ x_5(0) = [-0.7482, -1.8510, 0.7081, 0.8344, -0.5274, -0.5322]^T \end{cases} \quad (50)$$

通信拓扑 $G_{\kappa(t)}$ 在 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 中每 0.5 s 切换 1 次, 切换信号 $\kappa(t)$ 的变化情况如图 2 所示。

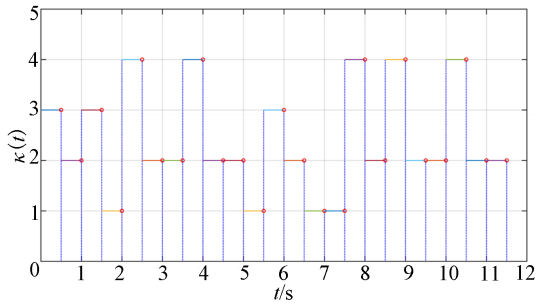


图 2 四旋翼无人机集群预设性能优化编队通信拓扑切换信号

Fig. 2 Communication topology switching signal of prescribed performance optimization formation of quadrotor UAV swarm

性能预设值 $J_p^* = 1.8 \times 10^4$, 并选取性能指标的权重矩阵为 $Q = I_6$ 。假设需要将矩阵 $A + BK_c$ 的 3 个特征值调整为 $i, -i, i, -i, -0.1, -0.3$, 则根据极点配置法可求得

$$K_c = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & -0.03 & 0 & 0 & -0.4 \end{bmatrix} \quad (51)$$

由于系统矩阵 B 列满秩, 可选取可逆矩阵

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

此时, 编队可行条件 (27) 成立, 根据线性不等式条件 (28) 求得正定矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} 0.7988 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7988 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1036 \\ -0.3043 & 0 & 0 \\ 0 & -0.3043 & 0 \\ 0 & 0 & -0.6701 \\ -0.3043 & 0 & 0 \\ 0 & -0.3043 & 0 \\ 0 & 0 & -0.6701 \\ 1.1025 & 0 & 0 \\ 0 & 1.1025 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1025 \end{bmatrix} \quad (53)$$

同时, 由图 1 给出的切换拓扑集合, 可以得到 $\lambda_{\min} = 0.3820$, 从而得到增益矩阵为

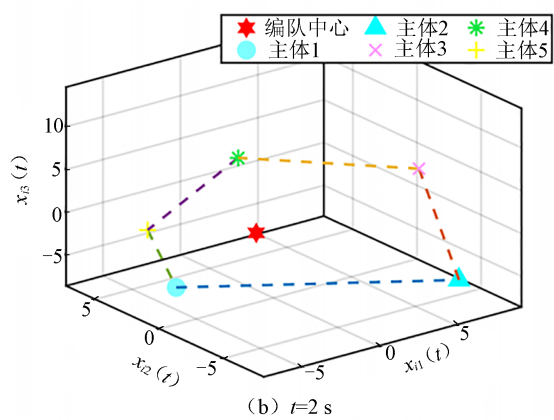
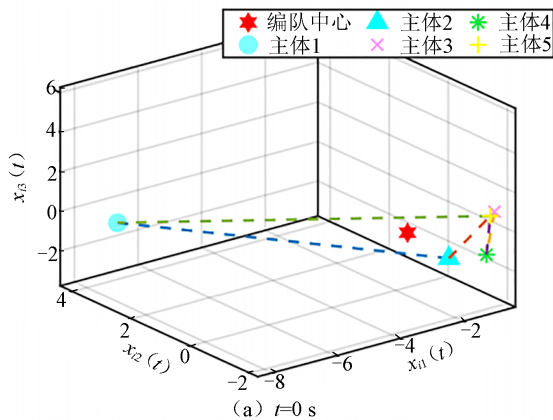
$$K_u = \begin{bmatrix} 1.5165 & 0 & 0 & 3.9806 & 0 & 0 \\ 0 & 1.5165 & 0 & 0 & 3.9806 & 0 \\ 0 & 0 & 2.5904 & 0 & 0 & 4.2659 \end{bmatrix} \quad (54)$$

利用 MATLAB 软件对集群系统在控制协议作用下的运动过程进行仿真。

图 3 给出了在 0、2、10、12 s 时, 各无人机以及编队中心在状态空间中的相对位置。图 3 (a) ~ (c) 显示了 10 个主体从初始的无序状态到正五边形编队形成的过程。从图 3 (c)、(d) 可以看出, 集群所形成的编队围绕编队中心旋转。

集群中各无人机相对于编队中心的编队误差如图 4 所示。可以看出, 约在 $t = 10$ s 时, 各主体的编队误差均收敛到 0。预设性能 J_p^* 和性能指标 J_p 的对比如图 5 所示, 可以看出 J_p 最终可以收敛至一个小于 J_p^* 的值。

$x_i(t) - f_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) 和编队中心函数



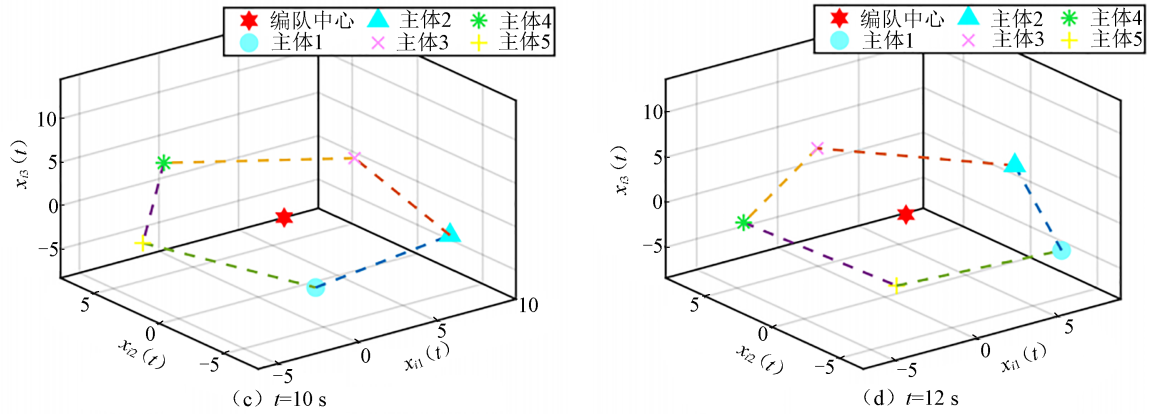


图3 四旋翼无人机集群各主体在状态空间中不同时刻的位置

Fig. 3 Positions of each individual in the quadrotor UAV swarm at different times in the state space

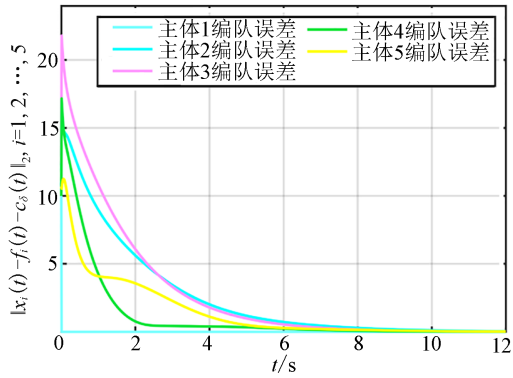


图4 四旋翼无人机集群各主体的编队误差

Fig. 4 Formation errors of each individual of the quadrotor UAV swarm

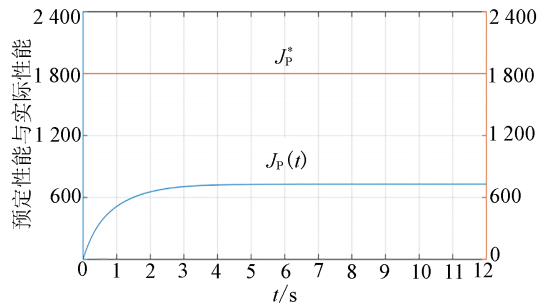
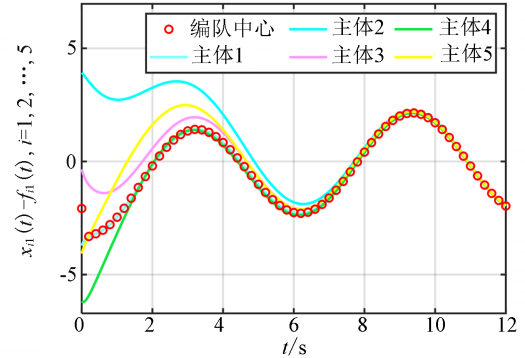
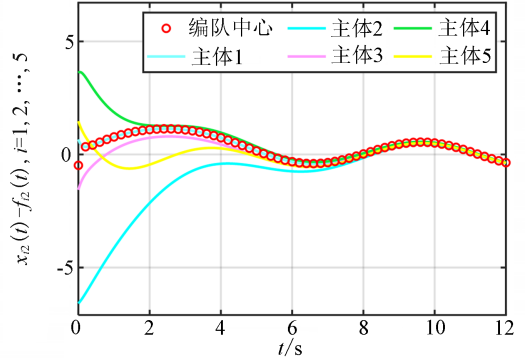
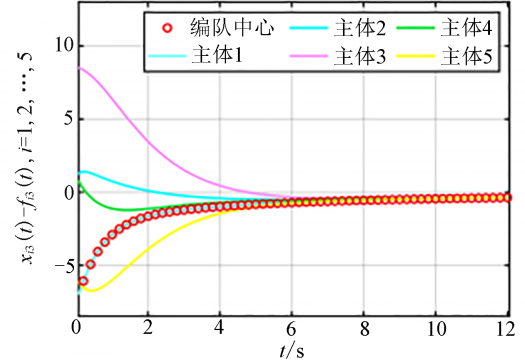


图5 预设性能与实际性能对比

Fig. 5 Comparison between prescribed performance and actual performance

$x_c(t)$ 的3个状态量随时间变化的轨迹曲线如图6所示。其中, 编队中心的轨迹曲线由定理1确定, 各条实线为无人机状态与编队函数之差的轨迹曲线。可以看出, 编队误差能够逐渐收敛到0, 表明由定理1所给出的编队中心函数有效。

结合图3~图6可知, 系统在控制协议作用下能够实现预设性能优化编队控制, 从而验证了定理2的有效性。

(a) 编队中心函数 $x_{c1}(t)$ 和变量 $x_{i1}(t) - f_{i1}(t)$ 的轨迹曲线(b) 编队中心函数 $x_{c2}(t)$ 和变量 $x_{i2}(t) - f_{i2}(t)$ 的轨迹曲线(c) 编队中心函数 $x_{c3}(t)$ 和变量 $x_{i3}(t) - f_{i3}(t)$ 的轨迹曲线图6 编队中心函数和变量 $x_i(t) - f_i(t)$ 的轨迹曲线Fig. 6 Trajectory curves of the formation center functions and $x_i(t) - f_i(t)$

5 结论

针对切换拓扑通信下四旋翼无人机集群预设编队控制问题,提出了协同性能约束下的集群系统优化编队分析与设计方法,在实现对系统分布式时变编队控制的同时,能够将编队控制过程中产生的累积协同误差限制在性能预设值的约束范围内。通过设计编队补偿信号,扩展了时变编队函数可构造的范围,并给出了集群系统编队可行条件的一般形式。基于线性矩阵不等式工具提出了群系统可实现预设性能优化编队控制的充分条件,并利用最优化方法给出了线性矩阵不等式存在可行解时,性能预设值需要满足的条件。此外,通过在编队控制协议中增加自反馈项,可以调节自反馈项的增益矩阵配置编队中心的运动模式。未来研究不仅可拓展研究对象至异构主体构成的群系统,解决不同动力学特性主体间的协同控制问题,同时探索时变编队函数的更灵活构造方法,以适应动态任务需求。还可以结合强化学习等智能算法,实现增益矩阵的自适应调节,提升控制策略的实时性。

参考文献

- [1] 吕金虎, 于江龙, 董希旺. 飞行器集群协同制导新进展[J]. 自动化学报, 2025, 51(4): 727-743.
LYU J H, YU J L, DONG X W. New progress in cooperative guidance for aircraft swarm system[J]. Acta Automatica Sinica, 2025, 51(4): 727-743.
- [2] 刘洋, 吴昊天, 王林晟, 等. 基于神经动力学优化的无人系统研究综述[J]. 控制与决策, 2025, 40(7): 2049-2069.
LIU Y, WU H T, WANG L S, et al. A review of unmanned systems research based on neurodynamic optimization[J]. Control and Decision, 2025, 40(7): 2049-2069.
- [3] 郭兴, 李擎, 姚其家, 等. 异构无人系统协同控制研究进展[J]. 工程科学学报, 2025, 47(1): 66-78.
GUO X, LI Q, YAO Q J, et al. Research progress for cooperative control of heterogeneous unmanned systems[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(1): 66-78.
- [4] 何明, 陈浩天, 韩伟, 等. 无人机仿鸟群协同控制发展现状及关键技术[J]. 航空学报, 2024, 45(20): 190-212.
HE M, CHEN H T, HAN W, et al. Development status and key technologies of cooperative control of bird-inspired UAV swarms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(20): 190-212.
- [5] ALOQAILY M, BOUACHIR O, AL RIDHAWI I, et al. An adaptive UAV positioning model for sustainable smart transportation[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 78: 103617.
- [6] FENG Y T, SHI C B B, DU J R, et al. Variable admittance interaction control of UAVs via deep reinforcement learning[C]//2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 1291-1297.
- [7] WANG S J, JIANG F, ZHANG B, et al. Development of UAV-based target tracking and recognition systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(8): 3409-3422.
- [8] LOPEZ-SANCHEZ I, MORENO-VALENZUELA J. PID control of quadrotor UAVs: a survey[J]. Annual Reviews in Control, 2023, 56: 100900.
- [9] PETERSEN K H, NAPP N, STUART-SMITH R, et al. A review of collective robotic construction[J]. Science Robotics, 2019, 4(28): eaau8479.
- [10] 马宝全, 冯笛恩, 胡博, 等. 无人机集群协同控制方法现状与展望[J]. 导航与控制, 2024, 23(2): 30-40, 107.
MA B Q, FENG D E, HU B, et al. Status and prospect of UAV cluster cooperative control methods[J]. Navigation and Control, 2024, 23(2): 30-40, 107.
- [11] FU J Y, SUN G H, YAO W R, et al. On trajectory homotopy to explore and penetrate dynamically of multi-UAV[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 24008-24019.
- [12] HUNG H, HSU H H, CHENG T H. Image-based multi-UAV tracking system in a cluttered environment[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2022, 9(4): 1863-1874.
- [13] ZHANG X Z, ZHANG F, HUANG P F, et al. Self-triggered based coordinate control with low communication for tethered multi-UAV collaborative transportation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(2): 1559-1566.
- [14] 鲜勇, 郭靖, 任乐亮, 等. 无人机航迹规划智能算法研究综述[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(1): 106-121.

- XIAN Y, GUO J, REN L L, et al. Review of intelligent algorithms for unmanned aerial vehicle trajectory planning[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2025, 39(1): 106-121.
- [15] LI G R, GE R D, LOIANNO G. Cooperative transportation of cable suspended payloads with MAVs using monocular vision and inertial sensing [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(3): 5316-5323.
- [16] 樊琼剑, 杨忠, 方挺, 等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. *航空学报*, 2009, 30(4): 683-691.
- FAN Q J, YANG Z, FANG T, et al. Research status of coordinated formation flight control for multi-UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(4): 683-691.
- [17] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(3): 1-14.
- ZONG Q, WANG D D, SHAO S K, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(3): 1-14.
- [18] YU Y J, GUO J, XIANG Z R. Distributed fuzzy consensus control of uncertain nonlinear multiagent systems with actuator and sensor failures[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(3): 3480-3487.
- [19] LI L Y, SHI P, AHN C K. Distributed iterative FIR consensus filter for multiagent systems over sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(6): 4647-4660.
- [20] REN W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(2): 505-512.
- [21] 胡树欣, 张安, 孙嫚忆, 等. 基于一致性理论和S-MPC的四旋翼编队协同避障[J]. *系统工程与电子技术*, 2024, 46(2): 658-667.
- HU S X, ZHANG A, SUN M Y, et al. Obstacles avoidance for quadrotor formation based on consensus theory and S-MPC[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024, 46(2): 658-667.
- [22] 吴凡, 周永涛, 李博文. 装备备件库存管理动态建模与决策研究[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(3): 88-93.
- WU F, ZHOU Y T, LI B W. Dynamic modeling and decision-making method for equipment spare parts inventory management[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2024, 38(3): 88-93.
- [23] CAO Y C, REN W. Optimal linear-consensus algorithms: an LQR perspective[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, Cybernetics*, 2010, 40(3): 819-830.
- [24] XIE C H, YANG G H. Cooperative guaranteed cost fault-tolerant control for multi-agent systems with time-varying actuator faults[J]. *Neurocomputing*, 2016, 214: 382-390.
- [25] BECHLIOULIS C P, ROVITHAKIS G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2090-2099.
- [26] CHEN F, DIMAROGONAS D V. Leader-follower formation control with prescribed performance guarantees[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2021, 8(1): 450-461.
- [27] DAI S L, HE S D, WANG M, et al. Adaptive neural control of underactuated surface vessels with prescribed performance guarantees[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, 30(12): 3686-3698.
- [28] CHEN K R, GU Y X, LIN H, et al. Guaranteed performance event-triggered adaptive consensus control for multiagent systems under time-varying actuator faults[J]. *Mathematics*, 2024, 12(10): 1528.

(编辑: 于福兴)