

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.021

# 基于速度引导的无人机集群航线飞行技术

陈爽, 李春涛, 许为乐

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106)

**摘要:** 针对大规模无人机集群航线飞行拥挤碰撞问题, 采用一种基于速度信息引导的无人机集群航线飞行控制方法。将无人机集群航线飞行划分为初始集群和航线飞行 2 阶段。根据无人机与其邻居相对位置和速度约束的集群规则设计无人机个体期望速度实现无人机有序集群; 引入虚拟领航机跟踪预设航线并将其嵌入至每架无人机中, 使用一致性算法保证每架虚拟领航机信息一致。同时无人机集群对各自的虚拟领航机进行速度跟踪, 借助建立的航线跟踪误差模型, 调节无人机的期望速度, 并利用序参量、集群跟踪航线误差和离散度差值对其过程进行分析。仿真结果表明: 该无人机能够有效地集群并实现高度精准的航线贴合, 成功完成集群航线飞行。

**关键词:** 无人机集群; 速度协同; 分布式控制; 虚拟领航者; 集群航线飞行

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A

## Flight Technology of UAV Cluster Route Based on Velocity Guidance

Chen Shuang, Li Chuntao, Xu Weile

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to solve the crowded collision problem of large-scale unmanned aerial vehicle (UAV) group flight, a flight control method of UAV group flight based on speed information guidance is proposed. Accord to that method, the flight route of the UAV clust is divided into two stages, namely an initial cluster stage and a flight route stage. An individual expected speed of the unmanned aerial vehicle is designed according to a cluster rule constrained by the relative position and the speed of the unmanned aerial vehicle and a neighbor of the unmanned aerial vehicle to realize orderly cluster of the unmanned aerial vehicle; The virtual leader is introduced to track the preset route and embedded into each UAV, and the consistency algorithm is used to ensure that the information of each virtual leader is consistent. At the same time, the UAV cluster tracks the speed of its own virtual leader, and adjusts the expected speed of the UAV with the help of the established route tracking error model, and analyzes the process by using the order parameter, the cluster tracking route error and the dispersion difference. The simulation results show that the UAV can effectively cluster and achieve highly accurate route fitting, and successfully complete the cluster route flight.

**Keywords:** UAV cluster; speed coordination; distributed control; virtual leader; cluster airline flight

## 0 引言

近年来, 由于无人机应用环境更加复杂, 任务需求更加多元, 无人机的作战方式也从无人单机平台作战向多平台“集群”作战方向转变发展<sup>[1-2]</sup>。无人机集群保持集群沿预先设定航线飞行是完成后续集群作战任务的基础和关键; 因此, 研究无人机集群航线飞行具有重要的意义<sup>[3]</sup>。

目前, 最常见的无人机集群控制方式是分布式控制和集中式控制 2 种。在集中式控制方式中<sup>[4-5]</sup>, 整个集群中的无人机都由一个长机或中心控制节点来决策协调各无人机的运动; 但是, 一旦长机或中心控制节点失效, 整个集群就会瘫痪, 无法继续执行任务。相比之下, 分布式控制方式更加灵活和鲁棒<sup>[6-7]</sup>。在这种控制方式下, 集群中的每个无人机都可以自主决策并执行任务, 每个无人机都能通过对

周围无人机的感知来做出决策。

对于无人机集群系统要求无人机个体通过分布式局部交互自发地聚集成群, 形成有序化的单一群体或集群协同运动。针对这种潜在机制, Reynolds<sup>[8]</sup>受自然界的生物群体运动规律启发, 提出集群模型中的所有单体需要遵循分离、一致运动以及聚集 3 条基本行为规则。此后, 学者根据该集群模型研究集群协同运动, Olfati-Saber<sup>[9]</sup>提出了一个蜂拥集群算法框架, 体现了 Reynolds 的 3 个规则, 使用势函数和一致性分别实现群集内的智能体保持固定间距和速度一致。同时, 在该基础上融入了虚拟领航者的作用来防止分裂, 但每个无人机对同一虚拟领航机的位置跟踪将会出现位置抢占问题。文献[10]考虑了集群中所有无人机位置与虚拟领航机位置可能抢占的问题, 通过在虚拟领航机的位置上加上与集

收稿日期: 2024-12-07; 修回日期: 2025-01-28

第一作者: 陈爽(2000—), 男, 安徽人, 硕士。

群队形相关的位置偏置设计一个虚拟结构框架,用于轨迹的跟踪和航线飞行,保证无人机编队跟踪参考航线同时保持编队队形,但是对于此方法并不适用于大规模集群设计。Mehmood 等<sup>[11]</sup>将集群群体规则以及轨迹跟踪约束设计为代价函数,采用 MPC 算法对无人机期望输出进行优化,顺利将集群问题转化为各单体无人机最优求解问题,给出了仿真结果,但并没有提出理论分析的合理性。文献[12]将航线飞行任务转化为无人机航线路径规划问题。这意味着每个无人机将采用单机航线跟踪方法来遵循预先规划好的合理航线。虽然每个无人机都有自己的航线,但这种方法忽略了无人机之间协同行为的重要性,并没有考虑到集群局部交互涌现的本质特征。

笔者针对大规模无人机集群跟踪航线飞行进行研究,提出一种基于速度引导的无人机集群航线飞行控制方法,解决了多无人机的航线抢占碰撞问题。根据集群规则设计群体中单个无人机期望速度,并将集群跟踪航线飞行转化为集群无人机虚拟领航机引导速度的跟踪,保证无人机群跟踪航线飞行不发生碰撞,同时建立集群航线跟踪误差模型,引入速度反馈减小跟踪误差确保无人机群贴合航线飞行。此外证明了速度引导集群航线飞行方法的可行性,最后进行集群航线飞行数值仿真,验证了所设计方法的有效性。

## 1 问题描述

### 1.1 对象描述

假设集群系统由  $N$  架无人机组成,将该系统作为本文中对象。不考虑无人机内环动态,则其中的单个无人机模型可简化为双积分模型<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{p}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases}, i=1,2,\dots,N. \quad (1)$$

式中:  $p_i(t)$ 、 $v_i(t)$  分别为第  $i$  个无人机的位置和速度向量;  $u_i(t)$  为无人机  $i$  的控制输入向量。

虚拟领航机可对预设航线进行跟踪,也可将虚拟领航机的模型简化为:

$$\begin{cases} \dot{p}_l(t) = v_l(t) \\ \dot{v}_l(t) = u_l(t) \end{cases}. \quad (2)$$

式中  $p_l(t)$ 、 $v_l(t)$  和  $u_l(t)$  分别为虚拟领航机的位置、速度向量以及控制输入。

考虑实际无人机飞行性能约束,对无人机以及虚拟领航机的速度与加速度向量分别进行条件约束

限幅处理,其速度与控制输入向量可写为  $(\|v_i\|, \|v_i\|) \leq V_{\max}$ ,  $(\|u_i\|, \|u_i\|) \leq U_{\max}$ ;  $V_{\max}$  与  $U_{\max}$  分别表示无人机能够达到的速度和加速度最大值。

为方便描述无人机之间的拓扑交互关系,引入图论概念。多无人机系统可由无向图  $G=(V, E)$  表示,其中  $V$  是节点集  $V=\{1, 2, \dots, N\}$ ,  $E$  为交互边集  $E=\{(i, j)|i, j \in V, i \neq j\}$ 。每个节点都代表一架无人机,边表示无人机之间能够互相获取彼此的运动状态信息。 $N \times N$  维矩阵  $A=(a_{ij})$  和  $L=(l_{ij})$  分别表示无向图中的邻接矩阵和拉普拉斯矩阵。若无人机  $i$  和  $j$  之间存在通信,则  $a_{ij}=1$ , 否则  $a_{ij}=0$ 。拉普拉斯矩阵可以定义为:

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1, k \neq i}^N a_{ik}, & i = j \\ -a_{ij}, & i \neq j \end{cases}. \quad (3)$$

### 1.2 场景描述

如图 1 所示,本文中场景是一组初始状态下散乱无序的无人机群,无人机个体首先通过与邻居的局部交互作用保证无人机群安全无碰撞,聚集有序;对应无人机与邻居之间的速度与位置关系需满足约束<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} (v_i(t) - v_j(t)) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\|p_i(t) - p_j(t)\|) = d \end{cases}, d \in [d_{\min}, d_{\max}]. \quad (4)$$

式中:  $d_{\min}$  为无人机间的安全距离;  $d_{\max}$  为无人机的通信距离。当无人机群满足上述状态时,无人机达到有序集群状态后,进入航线飞行阶段。

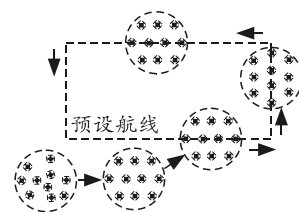


图 1 无人机集群航线飞行全过程

集群跟踪预设航线期望无人机集群中心能够贴合预设航线飞行。通过对无人机与跟踪航线的虚拟领航机之间的速度差值以及无人机群中心与该虚拟领航机的位置差值,间接建立集群跟踪航线误差模型,定义为:

$$\begin{cases} e_v(t) = v_i(t) - v_l(t) \\ e_p(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_i(t)] - p_l(t) \end{cases}. \quad (5)$$

式中  $e_v(t)$ 、 $e_p(t)$  分别为集群航线跟踪的速度误差和位置误差。根据建立的航线误差模型调节无人机运

动，确保无人机群对虚拟领航机以及航线的准确跟踪，最终实现无人机群保持集群状态跟踪预设航线进行飞行。

## 2 集群航线飞行方法设计

### 2.1 集群运动控制

集群航线飞行任务首要确保无人机能够聚集有序成群，无人机集群是集群航线飞行的基础。可通过局部交互作用设计期望速度实现无人机安全有序集群。笔者基于 Reynolds 提出的集群行为规则分析<sup>[8]</sup>，将分离、速度一致和聚集 3 个规则分别对应到个体的 3 个感知区域，由内而外分别为无人机的分离区域(repulsive, REP)、速度对齐区域(aligned, ALI)以及吸引区域(attractor, ATT)，3 个区域互不重叠。假设无人机可感知获取距离  $r_c$  内周围无人机的位置以及速度，则将无人机  $i$  的感知通信区域设为以无人机  $i$  的位置为圆心，感知距离  $r_c$  为半径的圆形区域。在通信区域内将该圆形划分为以  $r_{REP}$ ， $r_{ALI}$ ， $r_{ATT}$  为半径的 3 个圆形域。且区域半径大小满足下式：

$$r_{REP} < r_{ALI} < r_{ATT} = r_c. \quad (6)$$

按照无人机的半径划分不同层次的感知域，无人机可根据自身的感知区域与通信范围内邻居进行交互，位于不同区域的邻居对于无人机个体产生相应的不同作用。由于考虑无人机集群实际通信需要资源，则使用有限区域固定邻居数目通信，选取通信范围内最近的固定数目邻居进行通信交互。

有限区域固定邻居数目通信交互机制下无人机  $i$  的邻居集合表示为：

$$N_i^R(\lambda) = \left\{ j \in N_i \mid j = \arg \min_{\lambda} \|p_j - p_i\| \right\}, \quad \forall i \in V. \quad (7)$$

式中： $\lambda$  为固定邻居个数； $\|\cdot\|$  为欧几里得范数。则通过通信区域内无人机邻居所在位置区域不同划分邻居集合，分别为分离邻居、速度协同邻居与吸引邻居集合。集合表示如下式：

$$\left. \begin{aligned} \Omega_i^{REP}(t) &= \left\{ j \in N_i^R, j \neq i \mid 0 < \|p_j - p_i\| \leq r_{REP} \right\} \\ \Omega_i^{ALI}(t) &= \left\{ j \in N_i^R, j \neq i \mid r_{REP} < \|p_j - p_i\| \leq r_{ALI} \right\} \\ \Omega_i^{ATT}(t) &= \left\{ j \in N_i^R, j \neq i \mid r_{ALI} < \|p_j - p_i\| \leq r_{ATT} \right\} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

无人机与感知通信区域内的邻居无人机进行状态信息交互，根据无人机与邻居之间的相对位置与速度之间的约束作用可设计集群算法，将第  $i$  个无

人机期望速度设计为：

$$v_{i,d}(t) = v_{i,REP}(t) + v_{i,ALI}(t) + v_{i,ATT}(t) + v_{i,nav}(t). \quad (9)$$

式中： $v_{i,REP}(t)$ ， $v_{i,ATT}(t)$  分别为分离速度项和吸引速度项，这两者对应集群运动的位置约束，保证无人机与邻居之间的距离不会过于接近发生碰撞，也不会过大而导致无人机个体发生“脱离集群”现象； $v_{i,ALI}(t)$  为速度协同项，对应速度约束确保无人机之间的速度方向大小协同一致，其方向与无人机和其速度协同邻居  $j$  的相对速度向量  $v_{ij}$  一致； $v_{i,nav}(t)$  为速度引导项，保证无人机集群沿着该引导速度方向移动。根据规则可将分离速度项、吸引速度项以及速度协同项设计为<sup>[14]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} v_{i,REP}(t) &= \frac{k_{REP}}{|\Omega_i^{REP}|} \sum_{j \in \Omega_i^{REP}} g(\|p_{ij}\|) \frac{p_{ij}}{\|p_{ij}\|} \\ v_{i,ATT}(t) &= \frac{k_{ATT}}{|\Omega_i^{ATT}|} \sum_{j \in \Omega_i^{ATT}} g(\|p_{ij}\|) \frac{p_{ij}}{\|p_{ij}\|} \\ v_{i,ALI}(t) &= \frac{k_{ALI}}{|\Omega_i^{ALI}|} \sum_{j \in \Omega_i^{ALI}} v_{ij} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

式中： $k_{REP}$ 、 $k_{ATT}$ 、 $k_{ALI}$  分别为无人机间的分离项、聚集项以及速度协同项系数，可调节对应项的权重大小； $g(\|p_{ij}\|)$  为关于无人机间相对位置  $\|p_{ij}\|$  的作用函数，表达式为：

$$g(\|p_{ij}\|) = \begin{cases} \|p_{ij}\| - r_{REP}, & 0 < \|p_{ij}\| \leq r_{REP} \\ 0, & r_{REP} < \|p_{ij}\| \leq r_{ALI} \\ 1, & r_{ALI} < \|p_{ij}\| \leq r_{ATT} \end{cases}. \quad (11)$$

其作用函数如图 2 所示。

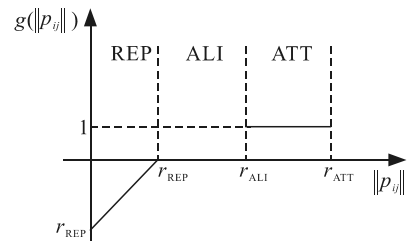


图 2 集群相对位置作用函数

作用函数  $g(\|p_{ij}\|)$  大小取决于无人机间相对距离。若邻居  $j$  在排斥域内时，其分离速度项方向与相对位置向量  $p_{ij} = p_i - p_j$  方向相反，其相对距离越小，作用函数值就越大，分离速度也就越大；若邻居在吸引域内，其吸引速度项方向与相对位置向量  $p_{ij}$  方向相同，促使无人机向邻居靠近；若邻居在速度对齐域时，作用函数为 0，速度协同项与相对位置

无关，其大小取决于无人机间相对速度差，驱使无人机与对齐域的邻居保持速度协同。当无人机飞行速度过大时可通过增加对齐域的范围，保证无人机的协同范围增大，使无人机能够快速集群。

为体现无人机现实响应特性，可将式(1)中的控制输入表示为：

$$\mathbf{u}_i(t) = \frac{1}{\tau_v} (\mathbf{v}_{i,d}(t) - \mathbf{v}_i(t)), \quad \forall i \in V. \quad (12)$$

式中  $\tau_v$  为无人机的速度响应时间，表示在  $\tau_v$  时间内能够实现对期望速度的跟踪，因此无人机个体能够通过对自身速度控制达到集群算法所得期望速度，实现多无人机集群运动，由散乱无序的初始状态到集群有序的稳定状态。

对无人机集群过程运动指标分析时，通常采用序参量来表征无人机群是否有序集群<sup>[15]</sup>。序参量可看作集群中所有无人机的归一化平均速率，含义为无人机群中所有个体运动方向同步程度。

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \left\| \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{v}_i(t)}{\|\mathbf{v}_i(t)\|} \right\|, \quad \phi(t) \in [0,1]. \quad (13)$$

式中： $N$  为群集中个体的数目； $\mathbf{v}_i(t)$  为个体  $i$  在  $t$  时刻的速度； $\|\mathbf{v}_i(t)\|$  为个体的速度大小。序参量值越大，则无人机群的运动同步程度就越高。

### 2.2 速度引导集群航线跟踪

无人机集群航线飞行不同于单机航线飞行，其规模数量变大，控制难度也随之攀升。对于大规模无人机集群时，多架无人机不能同时对于一条航线位置进行跟踪，否则将会造成无人机的位置点抢占，导致无人机航线飞行发生碰撞；因此，为保证无人机群原有协同飞行形态以及避免无人机群在进行航线跟踪飞行时发生机间碰撞，根据上节的集群运动控制，设计基于虚拟领航机速度引导的无人机集群航线跟踪方法。

对于预设航线，设定一架虚拟领航机，采用非线性导引法<sup>[16]</sup>进行单架无人机对预设航线跟踪。非线性导引法具有良好的单机跟踪能力，虚拟领航机在给定路径上不断地选取参考点作为自身的虚拟目标点，通过设计非线性侧向加速度，使得虚拟领航机逐渐收敛到期望路径，设计的非线性侧向加速度可表示为：

$$\|\mathbf{a}_{\text{cmd}}\| = 2v^2 \sin \eta / l. \quad (14)$$

式中： $v$  为虚拟领航机当前实时速度； $\eta$  为虚拟领航机目标点导引方向与速度方向的夹角； $l$  为探测目

标的导引长度。由计算得到的虚拟领航机的侧向加速度  $\vec{a}_{\text{cmd}} = \psi v$ ，得到虚拟领航机的航迹角  $\psi$ ，最后可以实时更新获取虚拟领航机的速度与位置信息。

无人机在初始集群阶段保证无人机间的距离安全以及速度一致完成集群后进入航线飞行阶段。无人机集群跟踪航线飞行如图 3 所示。

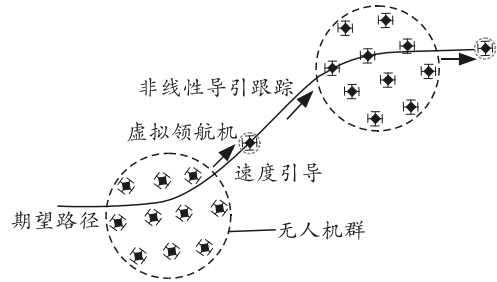


图 3 速度引导下集群航线跟踪

首先，使用虚拟领航机跟踪预设航线，可以将期望航线信息计算转化为虚拟领航机的速度与位置状态信息。再由无人机群跟踪虚拟领航机的速度信息避免多架无人机对同一航线位置抢占，从而将集群航线跟踪问题转化为无人机集群动态速度跟踪问题。当无人机群进入航线飞行时，将上节中期望速度的引导速度项转化为虚拟领航机的速度，则集群航线飞行中第  $i$  架无人机的期望速度可写为：

$$\mathbf{v}_{i,d}(t) = \mathbf{v}_{i,\text{REP}}(t) + \mathbf{v}_{i,\text{ATT}}(t) + \mathbf{v}_{i,\text{ALI}}(t) + \mathbf{v}_l(t). \quad (15)$$

式中  $\mathbf{v}_l(t)$  为虚拟领航机对预设航线进行跟踪时的实时速度矢量信息，可保证集群对虚拟领航机的速度跟踪进行集群航线飞行。

由于仅仅依靠对虚拟领航机速度项的跟踪无法达到对航线的准确跟踪，所以需要进一步考虑位置约束。式(5)中的航线位置误差  $e_p(t)$  量化表征无人机群在航线飞行过程中无人机集群中心与虚拟领航机的矢量位置差，也就是与航线跟踪的准确度。通过将集群航线误差位置指标模型引入集群航线速度跟踪算法中，把集群航线跟踪位置误差转化成速度反馈，可实现无人机群中心贴合航线，无人机集群均匀分布在目标航线上协同跟踪航线飞行。加入误差速度反馈项后的期望速度为：

$$\mathbf{v}_{i,d}(t) = \mathbf{v}_{i,\text{REP}}(t) + \mathbf{v}_{i,\text{ATT}}(t) + \mathbf{v}_{i,\text{ALI}}(t) + \mathbf{v}_l(t) - k_{\text{nav}} e_p(t). \quad (16)$$

式中  $k_{\text{nav}} > 0$  为速度反馈项增益系数，调节集群位置与航线的误差收敛快慢。

为考虑无人机集群系统的整体分布式架构，不能简单地将一个虚拟领航机跟踪航线的计算任务放置在地面站或者集群中的某一架无人机中进行；因

此，笔者将虚拟领航机跟踪航线任务备份嵌入到每架无人机系统内部。这样，每架无人机都可以直接获取自身内部虚拟领航机跟踪航线任务的状态信息，如图 4 所示。

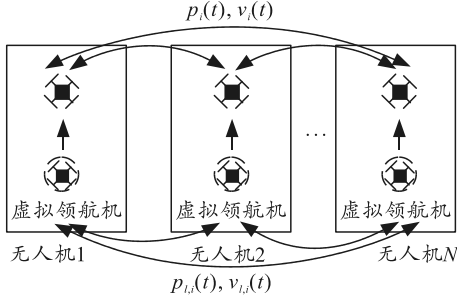


图 4 分布式无人机集群系统信息交互

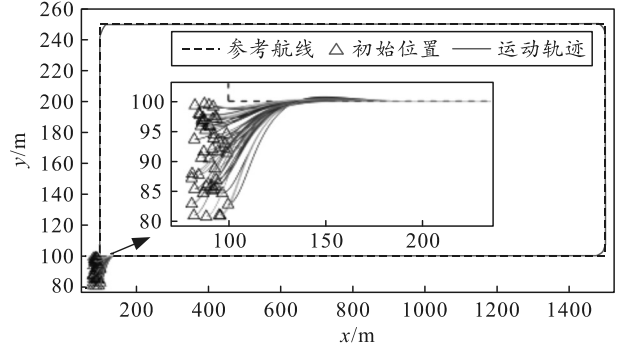
为保证无人机集群航线飞行时对于预设航线跟踪的一致性，就需要确保各架无人机内部计算的虚拟领航机状态信息相同<sup>[17]</sup>。通过在初始化阶段对虚拟领航机外部条件同步设置保证信息一致，但是由于无人机硬件性能受限，无人机系统虚拟领航机执行跟踪航线任务时内部计算进程会有所差异，得到的状态信息也会不同。为实现所有虚拟领航机的位置以及速度状态信息一致，无人机与其邻居之间不仅需要交互自身状态信息保证无人机集群，而且还要将自身计算得到的虚拟领航机状态信息相互传递。无人机获取到邻居无人机的虚拟领航机状态信息后，再通过分布式一致性算法使所有的虚拟领航机的状态信息趋于一致。第  $i$  架无人机内部的虚拟领航机模型如式(2)，其控制输入可设计为：

$$\mathbf{u}_{l,i}(t) = \mathbf{u}_{l,rou}(t) + \sum_{j \in N_i^R} \left[ k_{lp}(\mathbf{p}_{l,j}(t) - \mathbf{p}_{l,i}(t)) + k_{lv}(\mathbf{v}_{l,j}(t) - \mathbf{v}_{l,i}(t)) \right]. \quad (17)$$

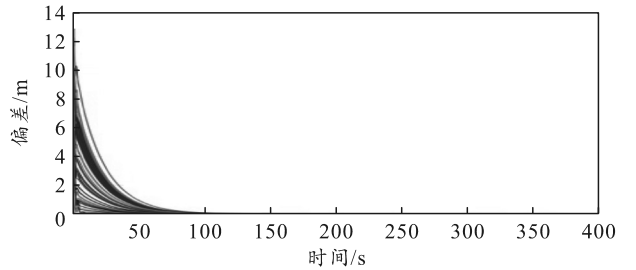
式中： $\mathbf{u}_{l,rou}(t)$  为第  $i$  架无人机内部虚拟领航机自身跟踪预设航线所计算的控制输入； $\mathbf{p}_{l,j}(t)$ 、 $\mathbf{v}_{l,j}(t)$  分别为邻居无人机  $j$  上虚拟领航机的位置与速度信息； $k_{lp}$ 、 $k_{lv}$  分别为位置项和速度项的可调节增益确保位置与速度的一致。通过一致性算法保证集群中每架无人机获取到的虚拟领航机位置与速度信息的一致。

设置虚拟领航机初始位置随机生成在  $[80, 100] \times [80, 100]$  范围内，初始速度为 25 m/s，跟踪预设矩形航线，验证虚拟领航机状态一致性。为衡量群体中所有虚拟领航机的位置与速度状态信息同一致性，参照滑模控制中的滑模面设计定义虚拟领航机状态偏差量  $\sigma = c_1 \delta_x + \delta_v$ ， $\delta_x$ 、 $\delta_v$  为虚拟领航机与其邻居的位置差之和以及速度差之和，虚拟领航机

状态偏差量越小，代表虚拟领航机之间的状态信息越一致。为保证误差指标可以收敛到 0，要求 Hurwitz 多项式的特征值为负值，则  $c_1$  取值范围应大于 0，取  $c_1=1$ 。虚拟领航机运动轨迹以及虚拟领航机状态偏差量如图 5 所示。



(a) 虚拟领航机运动轨迹



(b) 虚拟领航机状态偏差量

图 5 分布式虚拟领航机状态信息一致仿真

观察到虚拟领航机的位置轨迹收敛到了一致，虚拟领航机状态偏差量最终也逐渐趋近收敛至 0。本文中航线飞行任务是假设无人机群在散乱状态转化为有序集群状态后，进入航线飞行阶段实现集群航线跟踪飞行，需要进一步设计无人机集群航线飞行切换策略。由于初始集群阶段不需要无人机群沿航线飞行，因此在初始有序集群过程中并不需要引入虚拟领航机的作用，无人机集群运动同步一致后，再将其引入以保证无人机群顺利稳定转换到航线跟踪阶段。根据式(9)中的序参量指标可设计无人机群切入航线跟踪阶段的条件：

$$\bar{\phi}_s = \frac{1}{\Delta T} \sum_{t_s}^{t_s + \Delta T} \phi(t) \geq \phi_s^{\text{nav}}. \quad (18)$$

式中： $\bar{\phi}_s$  为稳态序参量，表示在某时间段内序参量的平均值； $t_s = \min_{\phi_s \geq 0.99} t$ ，表示序参量第 1 次达到 0.99 的时间； $\Delta T$  为观测时间； $\phi_s^{\text{nav}}$  为临界序参量，表示无人机群切入航线飞行时所保证有序的序参量最小值。若稳态序参量满足条件，则表示无人机群已经有序稳定，能够切入航线飞行。

在满足切换条件后，无人机群切换进入集群航

线飞行阶段。此时将虚拟领航机引入并对所有虚拟领航机位置进行初始化, 为确保跟踪航线时虚拟领航机位置状态信息始终保持一致, 以及集群航线飞行时无人机群中心可以与虚拟领航机重合贴合航线飞行, 将所有虚拟领航机的初始位置统一设定为无人机群中心位置, 保证虚拟领航机的初始位置的统一, 则:

$$p_{l,i}(t_0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i(t_s + \Delta T). \quad (19)$$

式中  $p_{l,i}$  为第  $i$  架无人机上虚拟领航机的位置矢量。

基于速度引导的集群航线飞行方法具体流程:

1) 系统初始化, 开始将虚拟领航机和预设航线备份到每架无人机中, 随后随机初始化无人机群内个体的位置和速度。

2) 对于每架无人机, 根据式(8)确定通信范围内不同区域的交互邻居。同时通过式(9)计算出每架无人机的期望速度以及控制输入, 更新运动状态。

3) 根据式(18)判断无人机群运动的一致性程度, 若集群的稳态序参量达到要求, 表明无人机群已经运动有序达到集群状态, 则切入集群航线跟踪任务执行步骤 4)。

4) 进入航线跟踪阶段后, 根据式(19)同步初始化每架无人机内部虚拟领航机的位置, 由式(14)使用非线性导引法跟踪航线更新各个虚拟领航机的运动状态, 再通过式(17)保证虚拟领航机信息一致。最后使用式(16)实现无人机群对航线的跟踪运动状态更新。

### 2.3 速度引导方法证明

对速度引导的无人机集群航线跟踪方法进行系统稳定性分析。

为便于证明, 根据势函数定义, 式(10)中的分离项和吸引项可写成势函数对无人机间距  $\|p_{ij}\|$  的导数, 则分离项和吸引项可写成:

$$\left. \begin{aligned} v_{i, \text{REP}} &= - \sum_{j \in \Omega^{\text{REP}}} \nabla_{p_j} \Phi_1(\|p_{ij}\|) \\ v_{i, \text{ATT}} &= - \sum_{j \in \Omega^{\text{ATT}}} \nabla_{p_j} \Phi_2(\|p_{ij}\|) \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

式中  $\Phi_1(\|p_{ij}\|)$ 、 $\Phi_2(\|p_{ij}\|)$  为分离项和吸引项的势函数。将系统中的分离项与吸引项的势函数和为系统总势能  $\Phi(\|p_{ij}\|) = \Phi_1(\|p_{ij}\|) + \Phi_2(\|p_{ij}\|)$ 。对于式(5)的航线位置误差函数可改写为:

$$e_p(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i(t) - p_{l,i}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i(t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{l,i}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_i(t) - p_{l,i}(t)]. \quad (21)$$

假设集群系统能量由无人机间的位置相对势能与其虚拟领航机速度的相对动能组成<sup>[18]</sup>。集群航线飞行时, 记无人机  $i$  相对于虚拟领航机的位置  $\hat{p}_i = p_i - p_{l,i}$ , 相对于虚拟领航机的速度为  $\hat{v}_i = v_i - v_{l,i}$ , 则所有个体相对于虚拟领航机的速度为  $\hat{v} = [\hat{v}_1^T, \hat{v}_2^T, \dots, \hat{v}_N^T]$ 。无人机个体  $i$  和  $j$  相对于虚拟领航机的速度之差为  $\hat{v}_{ij} = \hat{v}_i - \hat{v}_j = \hat{v}_{ij}$ 。本文中集群系统的能量函数即可构造为:

$$Q(\hat{p}, \hat{v}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [U_i(\hat{p}) + E_i(\hat{v})]. \quad (22)$$

式中  $U_i(\hat{p})$ 、 $E_i(\hat{v})$  分别为无人机  $i$  相对于虚拟领航无人机的势能和动能, 二者可分别表示为:

$$\left. \begin{aligned} U_i(\hat{p}) &= \Phi(\|\hat{p}_{ij}\|) + \frac{k_{\text{nav}}}{N} (\hat{p}_i^T \hat{p}_i) \\ E_i(\hat{v}) &= (\hat{v}_i - \hat{v}_{l,i})^T (\hat{v}_i - \hat{v}_{l,i}) = \hat{v}_i^T \hat{v}_i \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

考虑由  $N$  架无人机组成的集群系统, 无人机的运动模型由式(1)给出, 并且采用式(19)计算期望速度跟踪集群航线引导速度。设集群系统初始能量为  $Q_0 = Q(p(0), v(0))$  有界, 则集群航线飞行阶段, 结论成立:

1) 最终集群内所有无人机个体的速度都能收敛于虚拟领航机速度;

2) 集群中心位置与虚拟领航机位置差值最终收敛于 0。

对本文中集群系统能量函数的势能部分时间进行求导:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [\dot{U}_i(\hat{p})] &= \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j \in \Omega^{\text{REP}}} \nabla_{\hat{p}_i} \Phi_1(\|\hat{p}_{ij}\|)^T \dot{\hat{p}}_i \right] + \\ & \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j \in \Omega^{\text{ATT}}} \nabla_{\hat{p}_i} \Phi_2(\|\hat{p}_{ij}\|)^T \dot{\hat{p}}_i + \frac{k_{\text{nav}}}{N} (\hat{p}_i^T \dot{\hat{p}}_i) \right] = \\ & \sum_{i=1}^N \hat{v}_i^T \left[ \sum_{j \in \Omega^{\text{REP}}} \nabla_{\hat{p}_i} \Phi_1(\|\hat{p}_{ij}\|) + \sum_{j \in \Omega^{\text{ATT}}} \nabla_{\hat{p}_i} \Phi_2(\|\hat{p}_{ij}\|) \right] + \\ & \sum_{i=1}^N \hat{v}_i^T \left[ \frac{k_{\text{nav}}}{N} (\hat{p}_i) \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

对系统能量函数的相对虚拟领航机动能部分进行求导:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [\dot{E}(\hat{\mathbf{v}})] &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j \in N_i^R} \hat{\mathbf{v}}_i^T \hat{\mathbf{v}}_j + \right. \\ &\left. \sum_{j \in N_i^R} \hat{\mathbf{v}}_i^T \hat{\mathbf{v}}_j \right] = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i^R} \hat{\mathbf{v}}_i^T \mathbf{u}_i. \end{aligned} \quad (25)$$

则可将式(8)和(11)代入上式, 即可得到:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [\dot{E}(\hat{\mathbf{v}})] &= \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i^R} \hat{\mathbf{v}}_i^T [\hat{\mathbf{v}}_{i,\text{rep}}(t) + \hat{\mathbf{v}}_{i,\text{ATT}}(t) + \\ &\hat{\mathbf{v}}_{i,\text{ALI}}(t) + \hat{\mathbf{v}}_{\text{rou}}(t)] - \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i^R} \hat{\mathbf{v}}_i^T [k_{\text{nav}} e_p(t) + \hat{\mathbf{v}}_i(t)] = \\ &\sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{v}}_i^T \left[ - \sum_{j \in \Omega_{\text{REP}}^R} \nabla_{\hat{\rho}_i} \Phi_1(\|\hat{\rho}_{ij}\|) - \sum_{j \in \Omega_{\text{TT}}^R} \nabla_{\hat{\rho}_i} \Phi_2(\|\hat{\rho}_{ij}\|) \right] + \\ &\sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j \in \Omega_{\text{ALI}}^R} \hat{\mathbf{v}}_{ij} + \hat{\mathbf{v}}_i^T \hat{\mathbf{v}}_i - k_{\text{nav}} e_p(t) \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

最后对系统能量函数求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [\dot{U}(\hat{\rho}) + \dot{E}(\hat{\mathbf{v}})] = \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{v}}_i^T \left[ \sum_{j \in \Omega_{\text{REP}}^R} \nabla_{\hat{\rho}_i} \Phi_1 \right. \\ &\left. (\|\hat{\rho}_{ij}\|) + \sum_{j \in \Omega_{\text{TT}}^R} \nabla_{\hat{\rho}_i} \Phi_2(\|\hat{\rho}_{ij}\|) + \frac{k_{\text{nav}}}{N} (\hat{\rho}_i) \right] + \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{v}}_i^T \\ &\left[ - \sum_{j \in \Omega_{\text{REP}}^R} \nabla_{\hat{\rho}_i} \Phi_1(\|\hat{\rho}_{ij}\|) - \sum_{j \in \Omega_{\text{TT}}^R} \nabla_{\hat{\rho}_i} \Phi_2(\|\hat{\rho}_{ij}\|) + \right. \\ &\left. \sum_{j \in \Omega_{\text{ALI}}^R} \hat{\mathbf{v}}_{ij} \right] - \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{v}}_i^T \left[ \hat{\mathbf{v}}_i + \frac{k_{\text{nav}}}{N} (\hat{\rho}_i) \right] = \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{v}}_i^T \\ &\left( \sum_{j \in \Omega_{\text{ALI}}^R} \hat{\mathbf{v}}_{ij} - \hat{\mathbf{v}}_i \right) = -\hat{\mathbf{v}}_i^T [(L^*(t)+1) \otimes I_n] \hat{\mathbf{v}}_i. \end{aligned} \quad (27)$$

式中  $L^*(t)$  为系统在时刻  $t$  的拉普拉斯矩阵, 是半正定矩阵, 则可得  $\dot{Q} \leq 0$ , 为负半定矩阵, 说明系统能量函数  $Q$  随时间变化而衰减, 系统能量函数能够收敛且  $Q \leq Q_0$ 。根据式(16)可知, 对于任意无人机个体  $i$  满足  $\hat{\mathbf{v}}_i^T \hat{\mathbf{v}}_i \leq 2Q_0$ , 所以无人机  $i$  与虚拟领航机的速度误差最大不超过  $\sqrt{2Q_0}$ 。又根据 LaSalle 不变集原理<sup>[19]</sup>, 始于有限集每个无人机最终都会收敛到区域内最大的不变集, 此时  $\dot{Q} = 0$ , 所有无人机个体的移动速度也均会收敛到系统的最大速度不变量。则根据式(27)可以得到:

$$\dot{Q} = -\hat{\mathbf{v}}_i^T [(L^*(t)+1) \otimes I_n] \hat{\mathbf{v}}_i = 0. \quad (28)$$

可以计算出  $\hat{\mathbf{v}}_1 = \hat{\mathbf{v}}_2 = \dots = \hat{\mathbf{v}}_N = 0$ , 由于虚拟领航机一致性算法可保证虚拟领航机的速度与位置状态信息一致相等<sup>[20]</sup>, 最终得到  $\mathbf{v}_1 = \dots = \mathbf{v}_N = \mathbf{v}_{l,1} = \dots = \mathbf{v}_{l,n}$ 。证明所有无人机的速度最终都会收敛到虚拟领航机的引导速度, 结论 1) 得证。

对于结论 1) 中无人机达到稳定状态集群内所有

个体的速度与虚拟领航机的速度相等, 即无人机个体的加速度为 0。则可得:

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{u}_i(t) = \frac{1}{\tau_v} \left( \sum_{i=1}^N \mathbf{v}_{i,d}(t) - \sum_{i=1}^N \mathbf{v}_i(t) \right) = 0. \quad (29)$$

且根据最终能量函数最低时, 个体的邻居均在速度对齐域内, 则将期望速度项带入并化简计算可得:

$$\sum_{i=1}^N [-k_{\text{nav}} e_p(t)] = 0. \quad (30)$$

最终说明在集群航线飞行阶段, 集群航线位置误差最终能够收敛到 0, 结论 2) 得证。

### 3 仿真实验

为验证基于速度引导的集群航线飞行方法的有效性, 本实验在 Windows10, 64 位系统, Intel(R) Core(TM) i7-3632QM @2.20 GHz 处理器的 PC 机硬件平台以及 Matlab R2021b 仿真软件平台上进行。

假设无人机群内有 50 架四旋翼无人机均在同一水平高度飞行, 设置仿真时长为  $T=530$  s, 仿真采样时间间隔为  $\Delta T=0.05$  s。对于无人机特性设置其最大速率为 35 m/s, 最大偏航角速率为 0.25 rad/s, 速度时间响应常数为  $\tau_v=3$ 。集群具体仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置 m

序号	参数	数值
1	$r_c$	100
2	$r_s$	40
3	$(r_{\text{REP}}, r_{\text{ALI}}, r_{\text{ATT}})$	(50, 80, 100)
4	$\lambda$	4
5	$(k_{\text{REP}}, k_{\text{ALI}}, k_{\text{ATT}})$	(3, 1, 2)
6	$K_{\text{nav}}$	0.5

表 1 中, 无人机的初始位置随机分布在  $[0, 300] \times [0, 300]$  区域内, 初始速度状态随机生成在  $[-3, 3] \times [-3, 3]$  内, 初始引导速度为  $[6, 6]$ 。在无人机完成集群实现有序运动后, 无人机集群进入航线飞行任务。设定集群稳态序参量观测时间  $\Delta T=30$  s, 临界序参量  $\phi_s^{\text{nav}} = 0.99$ 。当稳态序参量满足判断条件时调用提前嵌入的虚拟领航机, 设置虚拟领航机速度为 25 m/s, 导引长度为 80 m。预设航线的具体航点信息如表 2 所示。

表 2 无人机集群航线航点 m

航点序号	X	Y	航点序号	X	Y
1	600	600	4	600	3 000
2	4 000	600	5	600	600
3	4 000	3 000			

### 3.1 初始集群阶段

无人机初始集群阶段保证无人机从初始时刻散乱无序的状态变化到集群一致状态。图 6 和 7 展示了无人机群的初始散乱状态以及无人机群初始集群阶段的运动轨迹。

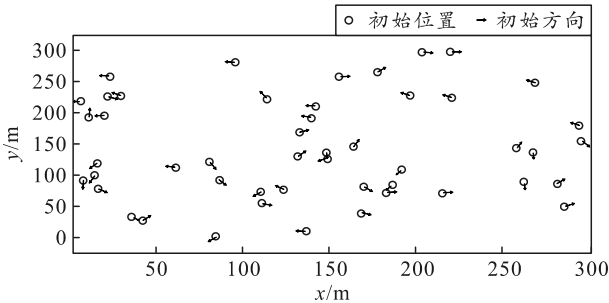


图 6 无人机集群初始位置状态

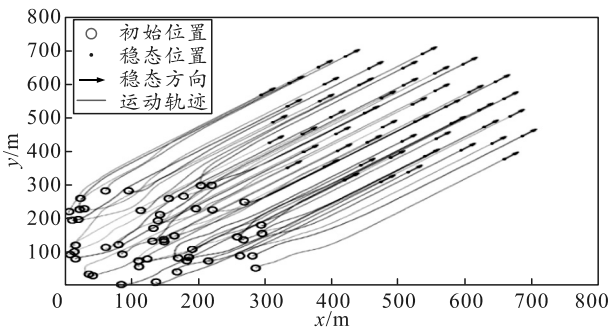


图 7 无人机初始集群轨迹

由图 6—7 可以看出：初始状态下无人机群散乱无序，在初始集群协同算法的作用下，无人机群运动逐渐有序，速度方向一致且无人机间距离存在一定安全空间。图 8 为无人机初始集群阶段序参量变化。

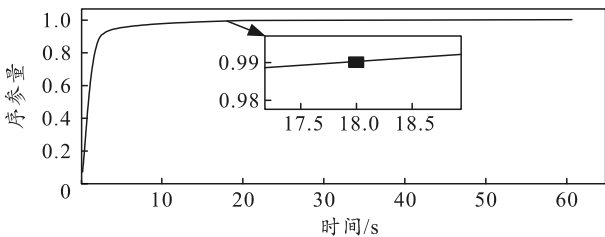


图 8 无人机初始集群阶段序参量变化

从图 8 中可知：由于在初始化时，无人机个体初始速度状态随机生成，集群有序程度较低。在初始引导速度下，无人机的初始速度方向初步统一后序参量迅速增大，但无人机的邻居还在排斥区域内，此时分离速度项起作用，在无人机之间的间距大于排斥半径后，无人机个体在协同项的作用下保证速度的大小与方向一致，序参量也不断增大达到了临界序参量 0.99。在观测时间 30 s 后，无人机集群稳态序参量满足条件，无人机顺利进入航线飞行任务。

### 3.2 航线飞行阶段

在进入航线飞行阶段后，将虚拟领航机引入航线飞行任务中。为衡量评价无人机集群跟踪航线的好坏定义无人机集群跟踪航线指标。分别定义无人机集群中心航线误差  $\delta_D$  和离散度差值  $V$ 。

无人机集群中心航线误差  $\delta_D$  为集群中心位置与最近航线段的垂直距离，来描述集群跟踪航线的准确度。又将集群中的无人机按照其与航线的相对位置分为左右两侧，无人机位于航线左侧时设置其与航线的垂直距离符号为正，位于右侧设置其符号为负。则将左右两侧的无人机与航线垂直距离分别求标准差，并将两侧标准差的差值绝对值定义为离散度差值  $V$ ：

$$V = \left| \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (D_{li} - \bar{D})^2} - \sqrt{\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} (D_{ri} - \bar{D})^2} \right| \quad (31)$$

式中： $m$  为在航线左侧的无人机个数； $\bar{D}$  为无人机与航线垂直距离的平均值； $D_{li}$ 、 $D_{ri}$  分别为位于航线左右两侧的无人机与航线之间的垂直距离。离散度差值描述在航线飞行时集群无人机位置的均匀分布，当航线两侧的离散度差值越小时表示无人机群在航线两侧分布越均匀。由于无人机集群对于无人机之间的间距无精确的固定距离约束，则无人机之间的离散度差值也只会约束在较小的值并不会收敛于 0。

图 9 是集群跟踪预设航线时各无人机的轨迹。

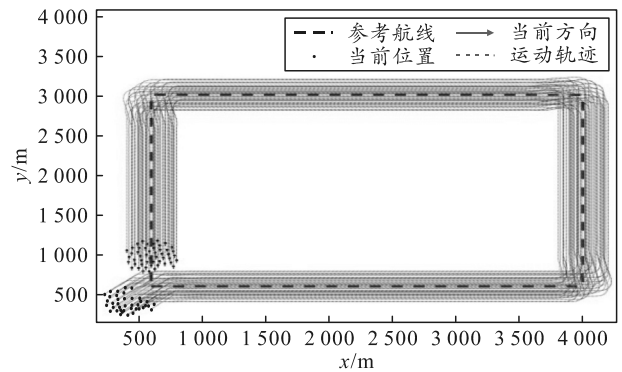
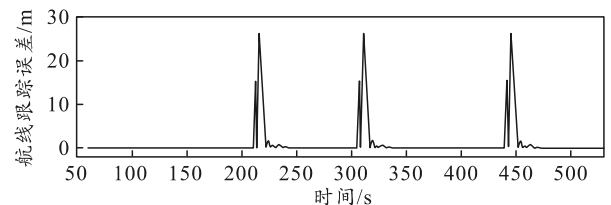
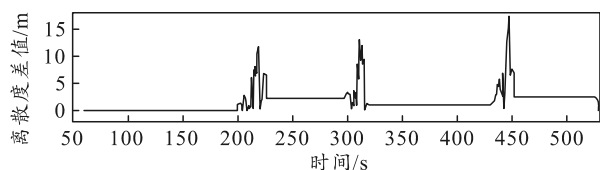


图 9 集群跟踪航线飞行轨迹

图 10 为无人机集群中心航线跟踪误差和离散度差值。



(a) 无人机集群中心航线误差



(b) 航线两侧离散度差值

图 10 无人机集群跟踪航线指标

从图 9 和 10 中的离散度差值能看出：无人机集群航线飞行轨迹光滑，离散度差值总体低于 5 以下，表征集群中个体无人机在航线飞行时能够均匀分布在预设航线的周围。在航线切换处由于集群转弯，集群内个体之间的距离发生变化，集群算法会优先保证集群内个体距离安全，则集群位置会出现短暂偏离航线的情况。在转弯结束后，无人机群通过航线误差反馈项继续调节集群中无人机个体位置，使无人机集群中心贴合航线飞行。从图 10 中的航线跟踪误差图可以看出：集群中心航线误差总体趋于稳定在 0 附近，出现的短暂波动就是由于集群在转弯时产生集群中心位置与航线偏离造成的，在转弯结束后，集群航线误差会再次趋于 0，并不影响集群稳定性。

无人机个体与其最近邻居之间的距离如图 11 所示。

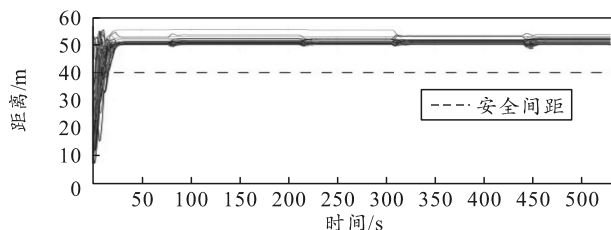


图 11 集群无人机间最小间距

从图 11 可以看出：初始状态下无人机个体间距离较小，由于分离项的作用个体间最小距离不断增大趋于稳定并一直大于安全距离，表明在整个集群飞行过程中无人机之间没有发生过碰撞。

图 12 是无人机航线飞行阶段的序参量变化。

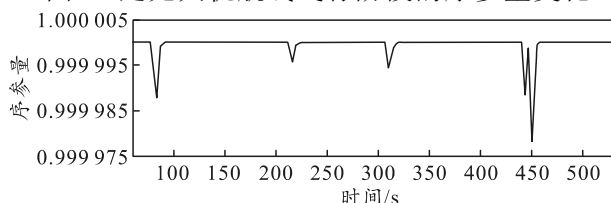


图 12 无人机集群航线飞行阶段序参量变化

从图 12 中可以看到：在进入集群航线阶段后，集群序参量虽然由于拐弯处有波动，但数值一直大于 0.99，表明在航线飞行过程中无人机集群始终保持速度方向一致有序的状态。

图 13 和 14 为无人机个体的速度以及航向角的变化图。

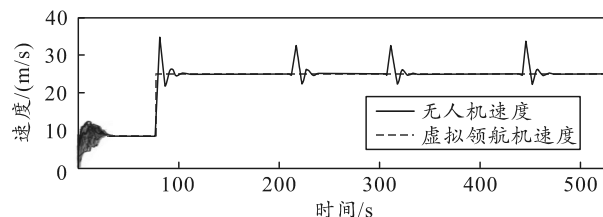


图 13 无人机群速度变化

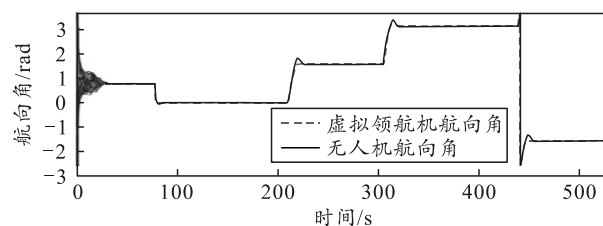


图 14 无人机群航向角变化

从图中可以看出：无人机个体的速度与航向角能在短时间内收敛到引导速度，并在航线飞行转弯后依然能够保持一致，表明无人机在航线飞行过程中对虚拟领航机速度跟踪的有效。基于此，能够证明所设计的速度引导无人机集群航线跟踪方法可实现对预设航线的稳定跟踪。

## 4 结束语

笔者基于速度协同一致集群算法，设计无人机集群航线飞行方法，将无人机集群航线跟踪问题转化为无人机群对于虚拟领航机的实时速度跟踪问题，避免多无人机对航线的抢占，建立了集群航线误差模型并将其转换成速度反馈引入到算法中。仿真结果表明：所设计的基于速度引导的无人机集群航线飞行方法能够实现无人机群保持集群状态贴合跟踪预设航线飞行，不需要为每架无人机提前设计跟踪航线，大大简化了无人机集群航线飞行控制难度，此外，该方法具有可扩展性，适用于大规模无人机集群航线飞行。

未来，笔者将针对只有少数无人机知晓航线信息时，如何有效稳定控制无人机群保持集群形态跟踪航线飞行进行研究。

## 参考文献：

- [1] 张旭东, 李少波, 李传江, 等. 无人机集群综述: 技术、挑战与未来[J]. 无线电工程, 2023, 53(7): 1487-1501.
- [2] 马培蓓, 隋江波, 纪军, 等. 智能无人集群系统协同控制关键问题分析[J]. 战术导弹技术, 2022(4): 124-131.