

# 面向无人自主空战的编队飞行控制方法综述

刘源渊<sup>1</sup>, 周蕾梅<sup>2</sup>, 李昊<sup>3</sup>, 高子义<sup>1</sup>

(1. 上海机电工程研究所, 上海 201109; 2. 桂林航天电子有限公司, 广西 桂林 541002;  
3. 空军某部, 甘肃 酒泉 735018)

**摘要:** 无人机集群在民用和军用领域的应用近年来受到广泛关注, 其中一个关键问题就是无人机编队的飞行控制, 为此本文对该领域内的相关文献进行了梳理。首先, 介绍了无人机编队计算和通信结构的组织方式, 即集中式、分布式和混合式; 其次, 对常用的一些无人机编队飞行控制方法进行了详细介绍, 包括领从法、虚拟结构法、基于行为的方法和人工势场法等; 再次, 从编队生成、队形保持、避障、可实现性、鲁棒性、对计算资源和通信链路的需求等方面对比了这些方法的优缺点, 以期读者在编队控制领域的研究提供便利; 最后, 讨论了一些有待解决的难题和可能的研究方向。

**关键词:** 无人机; 编队飞行; 领从法; 虚拟结构法; 行为法; 人工势场法

**中图分类号:** V 279 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4641(2024)04-0047-12

## Review of Formation Flight Control Methods for Unmanned Autonomous Air Combat

LIU Yuanyuan<sup>1</sup>, ZHOU Leimei<sup>2</sup>, LI Hao<sup>3</sup>, GAO Ziyi<sup>1</sup>

(1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 2. Guilin Aerospace Electronics Co., Ltd., Guilin 541002, Guangxi, China; 3. A Unit of Air Force, Jiuquan 735018, Gansu, China)

**Abstract:** The application of unmanned aerial vehicle (UAV) swarms in both civilian and military fields has received significant attention in recent years, and one of the key issues is the formation flight control. This study reviewed the relevant literature. First, three ways of organizing UAV formation computation and communication structures were introduced, respectively, centralized, distributed, and hybrid schemes. Then, commonly used formation flight control approaches were introduced respectively the leader-follower approach, virtual structure approach, behavior-based approach, and artificial potential field approach. Besides, these approaches were dissected and compared from different perspectives, including formation generation, formation keeping, obstacle avoidance, achievability, robustness, and computing and communication resources requirements, thus providing a convenient reference for interested readers. Finally, key difficult problems and feasible future research directions were discussed.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV); formation flight; leader-follower approach; virtual structure approach; behavior-based approach; artificial potential field approach

## 0 引言

无人驾驶飞机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)既可自主飞行也可远程遥控, 通过携带有效载荷以满足任务需求<sup>[1-2]</sup>, 近年来因其成本低、效率高、无须考虑

飞行员生命安全等众多优点在民用和军用领域都取得了广泛应用。民用领域, 无人机广泛用于交通监控<sup>[3]</sup>、载荷运输<sup>[4]</sup>、智能农业<sup>[5]</sup>、通信中继以及搜索和救援等方面。军用领域, 无人机广泛用于战场监视、

收稿日期: 2024-04-01; 修订日期: 2024-05-28

基金项目: 中国航天科技集团有限公司上海航天科技创新基金(SAST2021-053)

作者简介: 刘源渊(1991—), 男, 博士, 工程师。

通信作者: 高子义(1996—), 男, 硕士, 助理工程师。

侦察及火力支援和打击等方面<sup>[6-7]</sup>。

然而,在实际应用过程中,受自身能力的限制,无人机个体可能无法有效处理如突防、区域搜索这样的复杂任务。相反地,无人机集群在节省时间、降低成本、容错能力等方面具有更多优势<sup>[8-9]</sup>。为此,研究人员对无人机集群相关问题开展了广泛而深入的研究。无人机集群工作时,每个个体通过与邻近个体的合作来完成既定任务,同时还需避免与障碍物或集群中的其他个体发生碰撞。在某些任务中,飞行器可能需要在危险的环境中自主运行,这很容易引发飞行器故障或成员间通信中断,降低任务完成率。为克服这些挑战,研究人员近年来在无人机编队控制方面投入了许多精力,他们希望开发出有效的算法以提高无人机集群的性能。编队控制的目的是在考虑无人机自身动态特性以及环境约束的前提下为编队生成适当的控制信号,进而完成既定的任务。为解决编队控制中的难题,研究人员提出了各种方法,在编队的组织方面包括集中式、分布式以及混合式控制方案,在队形生成、保持和重构方面包括领从法、基于行为的方法、虚拟结构法和人工势场法等。

本文旨在对现有无人机编队控制方法进行梳理。首先,根据计算和通信结构将控制方案分为集中式、分布式以及混合式3类;其次,对常见的几种编队控制方法进行详细讨论;再次,对比各种方法的优势和局限性,这有助于研究人员针对具体问题选择合适的方法;最后,总结当前存在的一些挑战,并讨论未来发展的一些潜在方向。

## 1 编队控制方案

信息共享和计算机制是编队控制设计的一个核心问题,它必须将容错能力、能效等诸多因素考虑在内。本节介绍3种主要的编队控制方案,包括集中式、分布式以及混合式方案,并给出每种方案的优缺点。

### 1.1 集中式方案

集中式方案中存在一个中心处理单元,它可以是位于地面的基站,也可以是编队中计算能力较强的个体,如图1所示。中心处理单元根据从所有个体收集到的信息来协调整个集群,以达到完成全局任务的目的。所有个体必须保持与中心处理单元的连接。集中式方案存在一些缺点,如鲁棒性差、能效低等。由于中心处理单元在整个集群运行过程中起关键作用,它的故障将导致整个编队的故障。此外,它没有充分利用每个个体的计算能力,并且中心处理单元与其他

成员之间所需的连接链路也给通信资源带来额外的负担。



图1 多无人机的集中式控制方案<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Centralized control scheme for multiple UAVs<sup>[10]</sup>

### 1.2 分布式方案

在分布式或去中心化方案中,编队无须通过中心处理单元来组织。编队中的每个个体均可以与其他成员进行通信并共享信息,如图2所示。编队中的每个个体都有自己的处理单元,并可以根据其局部观测做出决策。分布式方案克服了集中式方案在计算和通信方面的瓶颈,具有更好的鲁棒性以及可扩展性,但实现起来要困难得多。

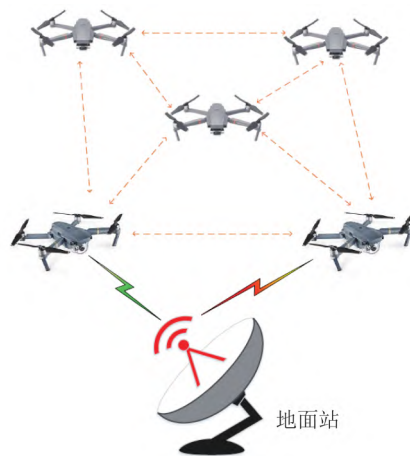


图2 多无人机的分布式控制方案<sup>[10]</sup>

Fig. 2 Distributed control scheme for multiple UAVs<sup>[10]</sup>

### 1.3 混合式方案

对于大规模无人机集群编队问题,无论是集中式方案还是分布式方案,实现起来都比较困难,在这种情况下混合式方案提供了一个更好的解决思路,它充分结合了集中式和分布式方案的优点。在混合式方案中,整个无人机集群被分成若干个小集群,小集群内通过分布式方案来组织,小集群之间通过集中式方案来组织,如图3所示。混合式方案既克服了集中式

方案在计算和通信方面的瓶颈,又具备一定的可扩展性,相比于分布式方案也更容易实现,是大规模无人机编队的首选方案。

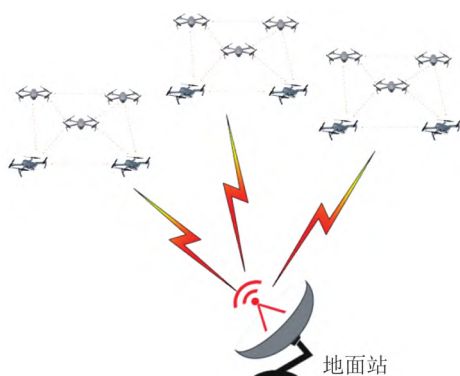


图3 多无人机的混合式控制方案

Fig. 3 Hybrid control scheme for multiple UAVs

## 2 编队控制方法

编队控制需要考虑3个问题<sup>[10]</sup>。一是编队生成,其目标是使处于随机状态下的个体形成期望的编队拓扑。二是队形保持,其目标是确保集群在执行任务的同时保持所需的编队形状。三是编队重构。集群在现实环境中作业时可能遭遇不同类型的问题,如遇到障碍物、通信中断等,编队重构的目的是在遇到这些问题时,对编队拓扑进行重构以适应新的条件。为解决这些问题,学者们提出了各种各样的策略,下面对其中的一些方法展开详细讨论。

### 2.1 领从法

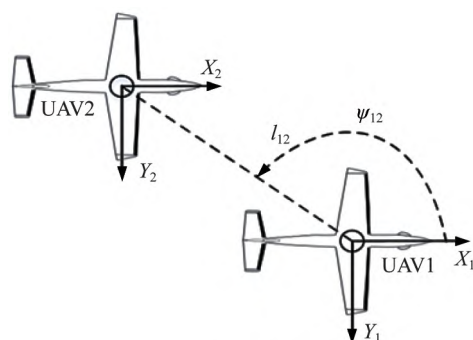
领从法因其结构简单、可扩展性强,逐步成为编队控制中最常用的方法<sup>[11]</sup>,基于此方法可以很容易实现编队生成和队形保持等目标。在领从法中,集群中的一名成员被指定为领导者,其他成员则被视为追随者,如图4所示。领导者可以访问全局信息,其轨迹是其他成员的参考。所有追随者都能感知自己相对于领导者的距离,并且其局部控制策略便是保持这些相对距离。



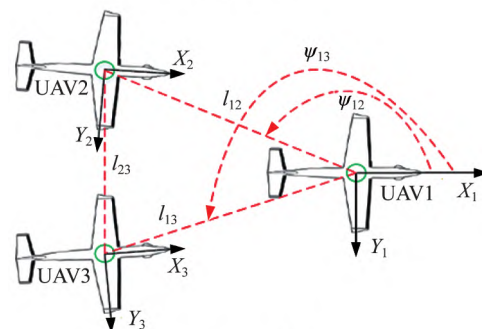
图4 领从法构型<sup>[10]</sup>

Fig. 4 Leader-Follower configuration<sup>[10]</sup>

领从法中存在2种不同类型的反馈控制器,它们分别是 $l-l$ 控制器和 $l-\psi$ 控制器<sup>[12]</sup>。如图5(a)所示, $l-\psi$ 控制器的目标是保持2架无人机的质心距离 $l_{12}^d$ 和相对角度 $\psi_{12}^d$ 为期望值; $l-\psi$ 控制器可以通过输入/输出反馈线性化方法来设计,设计得到的控制器可以将 $l_{12}^d$ 和 $\psi_{12}^d$ 驱动到期望的位置; $l-l$ 控制器则主要处理领导者 and 追随者之间的相互位置,如图5(b)所示,图中 $l_{ij}(1 \leq i < j \leq 3)$ 为无人机 $(i,j)$ 的质心距离, $\psi_{1i}(i=2,3)$ 为无人机1和无人机 $i$ 的质心连线与无人机1的航向形成的相对角度; $l-l$ 控制器同样可以通过输入/输出反馈线性化方法来设计。



(a)  $l-\psi$ 控制器



(b)  $l-l$ 控制器

图5 领从法常用的反馈控制<sup>[10]</sup>

Fig. 5 Common feedback controller used in Leader-Follower method<sup>[10]</sup>

#### 2.1.1 领从法编队控制架构

在采用领从法进行无人机编队控制时,可以采用如图6所示的控制架构。其中,外环控制器根据编队规范生成编队控制指令 $v_f$ 和 $\omega_f$ ;避碰机制根据无人机当前位置 $(x,y)$ 以及障碍物和其他无人机位置生成避碰指令 $v_v$ 和 $\omega_v$ ;内环控制器将编队指令和避碰指令综合起来生成实际的控制输出。内环控制器的设计与常规无人机相同,这里不作介绍。以下着重介绍外环编队控制器和避碰机制的设计。



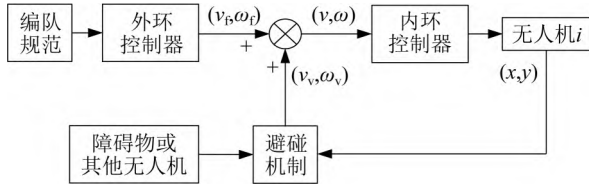


图6 无人机编队控制架构

Fig. 6 UAV formation flight control scheme

### 2.1.2 无人机外环运动学模型

以  $l-\phi$  控制器为例,考虑如图5(a)所示的无人机系统, $l-\phi$  控制器的目标是稳定追随者到领导者的前向和横向距离。无人机  $i$  的运动学方程如下:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i &= v_i \sin \theta_i \\ \dot{\theta}_i &= \omega_i\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $i=1,2$ ;  $x_i$  和  $y_i$  为无人机  $i$  的质心位置坐标;  $v_i$  为无人机  $i$  的速度;  $\theta_i$  为无人机  $i$  的速度方向;  $\omega_i$  为无人机  $i$  的偏航角速度。

设  $(x_L, y_L)$  为领导者的实际位置。则无人机  $i$  和领导者的前向距离  $d_{fi}$  和横向距离  $d_{li}$  可以表示为

$$\begin{aligned}d_{fi} &= (x_i - x_L) \cos \theta_i + (y_i - y_L) \sin \theta_i + \\ &\quad D \cos(\theta_i - \theta_L) \\ d_{li} &= (x_i - x_L) \sin \theta_i + (y_i - y_L) \cos \theta_i - \\ &\quad D \sin(\theta_i - \theta_L)\end{aligned}\quad (2)$$

式中:  $D$  为无人机  $i$  质心到领导者质心的距离。

定义  $e_{fi} = d_{fi} - d_{fi}^d$  和  $e_{li} = d_{li} - d_{li}^d$  为实际前向距离和横向距离与期望前向距离和横向距离的偏差,则它们关于时间的导数为

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{fi} \\ \dot{e}_{li} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_L - d_{li}\omega_L \\ d_{fi}\omega_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta_i - \theta_L) & -D \sin(\theta_i - \theta_L) \\ -\sin(\theta_i - \theta_L) & -D \cos(\theta_i - \theta_L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}\quad (3)$$

### 2.1.3 外环控制器设计

为保证航迹跟踪性能,同时消除稳态航迹跟踪误差,外环控制器可以采用PI控制器。假设分配给内环的控制指令为  $v_i^*$  和  $\omega_i^*$ ,则外环控制器定义为

$$\begin{bmatrix} v_i^* \\ \omega_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos e_\theta & -\sin e_\theta \\ -\frac{1}{D} \sin e_\theta & -\frac{1}{D} \cos e_\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -(k_{1P}e_{fi} + k_{1I}\int e_{fi}dt) + v_L + d_{li}\omega_L \\ -(k_{2P}e_{li} + k_{2I}\int e_{li}dt) - d_{fi}\omega_L \end{bmatrix}\quad (4)$$

式中:  $e_\theta = \theta_i - \theta_L$ ;  $k_{1P}, k_{1I}, k_{2P}, k_{2I} > 0$ , 为反馈增益。

### 2.1.4 避碰机制

为了实现避碰和避障的目标,实际分配给内环的控制指令  $v_i$  和  $\omega_i$  由两部分构成,即

$$\begin{aligned}v_i &= v_i^* + v_{vi} \\ \omega_i &= \omega_i^* + \omega_{vi}\end{aligned}\quad (5)$$

式中:  $v_i^*$  和  $\omega_i^*$  为外环控制器生成的指令;  $v_{vi}$  和  $\omega_{vi}$  为避碰机制生成的指令,它们是无人机对障碍物和编队中其他无人机的反应。限于篇幅,  $v_{vi}$  和  $\omega_{vi}$  的设计这里不作详细介绍,具体的设计方法见文献[13]。

### 2.1.5 试验验证

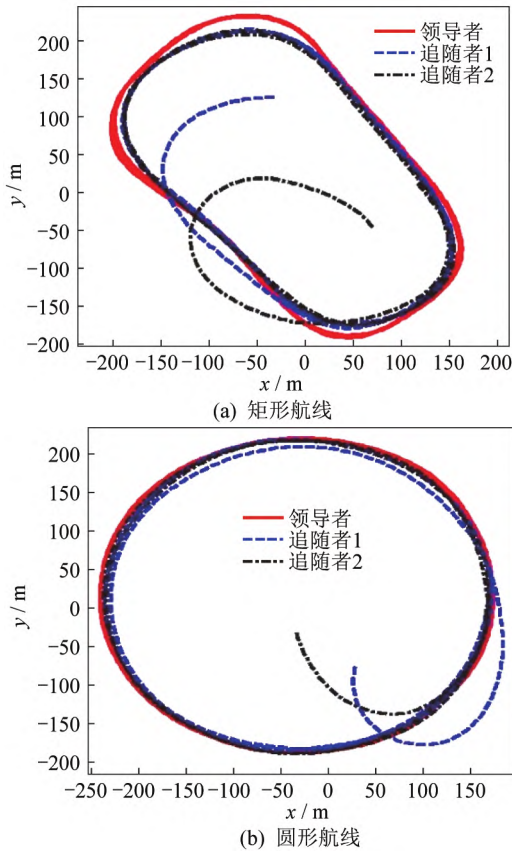
文献[14]利用领从法实现了3架无人机的编队飞行。试验采用的无人机翼展2.4 m,全长1.6 m,起飞质量6.4 kg,如图7所示。

图7 编队飞行试验使用的无人机<sup>[14]</sup>Fig. 7 UAV used in the formation flight test<sup>[14]</sup>

图8所示是上述编队飞行试验生成的航线,图中红色实线为领导者的航线,蓝色和黑色虚线为追随者的航线。从图8中可以看出,无论是矩形航线还是圆形航线,追随者与领导者从随机态势开始经过一段时间后均形成了所需的队形,表明领从法在队形生成和队形保持方面具有较好的性能。

### 2.2 虚拟结构法

虚拟结构法最初由文献[15]引入,用于移动机器人的编队控制,随后在无人机领域用于支持无人机编队飞行<sup>[16]</sup>。此方法在队形保持方面具有显著优势,其思路是将编队形状看作一刚体,通过使编队的物理位置匹配虚拟刚体的位置来维持所需队形。具体来说,给定  $n$  架无人机,它们在世界坐标系(可以采用地球固连坐标系)下的位置由向量  $\mathbf{r}_1^W, \dots, \mathbf{r}_n^W$  表示。给定一个由  $n$  个顶点构成的虚拟结构(Virtual Structure, VS),这些点在虚拟结构自身参考坐标系下的位置由

图8 编队飞行试验航线<sup>[14]</sup>Fig. 8 Trajectories of the tested formation flights<sup>[14]</sup>

向量  $p_1^R, \dots, p_n^R$  表示, 在世界坐标系下的坐标由向量  $p_1^W, \dots, p_n^W$  表示。当每一时刻都存在一个变换  $I_R^W$ , 使得  $p_i^W = r_i^W$  对所有无人机成立, 则称这些无人机以完美的队形在运动。

为实现上述目标(即无人机以完美的队形运动),

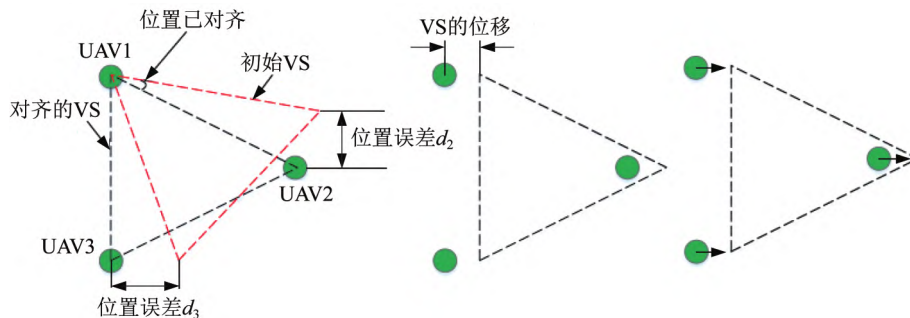


图10 虚拟结构控制方法的步骤

Fig. 10 Steps of virtual structure control method

### 2.2.1 虚拟结构对齐

为了使虚拟结构与无人机对齐, 在虚拟结构点和无人机之间定义一个一一映射。这个从无人机到虚

虚拟结构法采用如图9所示的双向控制策略。在下行方向, 先在虚拟结构上作用一个虚拟力, 以使其发生期望的运动, 然后控制无人机运动到虚拟结构的相应顶点。在上行方向, 受环境干扰, 无人机可能未准确到达虚拟结构的相应顶点, 此时需要通过虚拟结构的移动来匹配无人机的新位置。

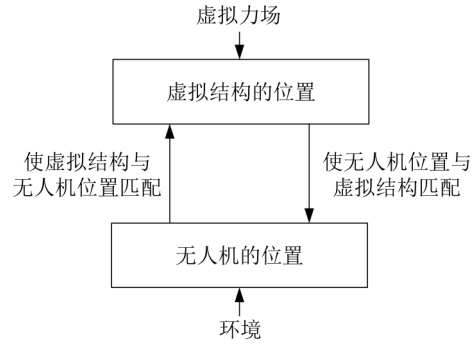


图9 双向控制流

Fig. 9 Bi-direction of control flow

虚拟结构法通过迭代执行以下3个步骤实现<sup>[17]</sup>, 如图10所示。

(1) 使虚拟结构与无人机的当前位置对齐, 即最小化无人机的实际位置及其在虚拟结构中的位置误差。

(2) 将虚拟结构移动  $\Delta x$  和  $\Delta \theta$  (这里  $\Delta x$  表示平移距离,  $\Delta \theta$  表示旋转角度), 即在考虑任务目标和无人机动态行为后生成一外力推动虚拟结构沿期望的方向运动。

(3) 控制编队中的成员, 使其移动到它们在虚拟结构中的新位置, 即计算每架无人机移动到相应虚拟结构点的轨迹并调整其速度来跟踪这些轨迹。

无人机的匹配度。这里采用每架无人机与其相应虚拟结构点的位置误差之和作为目标函数。目标函数 $f$ 将变换 $\mathbf{I}_R^W$ 映到实数轴上( $f: \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ),并且具有以下形式:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N d(\mathbf{r}_i^W, \mathbf{I}_R^W(\mathbf{X}) \cdot \mathbf{P}_i^R) \quad (6)$$

式中: $N$ 为无人机的数量; $d(\cdot)$ 为距离函数或范数,它衡量无人机远离虚拟结构中对应点时的损失; $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^m$ 。当虚拟结构在平面上运动时, $m=3$ ,并且 $\mathbf{X}=[x, y, \theta]$ ,其中 $x, y$ 表示平移距离, $\theta$ 表示旋转角度。

函数 $\mathbf{I}_R^W$ 由以下齐次变换来表示:

$$\mathbf{I}_R^W(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$ 且 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^3$ , $\text{SO}$ 为特殊正交群。 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{P}$ 由 $\mathbf{X}=[X_1, \dots, X_6]$ 中的元素来参数化。因此, $\mathbf{X}$ 是需要被优化的变量。虚拟结构对齐的目标是找到一个 $\mathbf{X}^*$ ,使得 $f(\mathbf{X}^*) \leq f(\mathbf{X})$ 对所有 $\mathbf{X}$ 成立。

### 2.2.2 虚拟结构的移动

为使虚拟结构运动,只需要在 $\mathbf{I}_R^W$ 变换所确定的平移和旋转基础上增加一个偏置量即可。设 $\dot{x}$ 和 $\dot{\theta}$ 分别为虚拟结构的期望平移速度和旋转角速度,则虚拟结果在下一时间步 $t+dt$ 的位置可表示为

$$\mathbf{I}_R^W(\mathbf{X}) = \mathbf{T}(\mathbf{x} + \dot{\mathbf{x}}dt) \cdot \mathbf{R}(\theta + \dot{\theta}dt) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{T}(\cdot)$ 和 $\mathbf{R}(\cdot)$ 分别为平移和旋转变换。于是无人机 $i$ 的期望位置可以表示为

$$\mathbf{r}_i^W = \mathbf{I}_R^W(\mathbf{X}) \cdot \mathbf{P}_i^R \quad (9)$$

虚拟结构移动的方式和大小取决于给定的任务以及系统中无人机的能力(因为无人机需要向移动之后的虚拟结构点运动),具体的设计方法请参考文献[17]。如果移动之后的点在无人机的能力范围内,那么在下次迭代中就不会出现误差。反之,当虚拟结构的位移超过无人机的能力时就会产生误差。

### 2.2.3 无人机的移动

算法执行的下一步是计算无人机的速度,以便在下次迭代之前使无人机运动到相应的虚拟结构点上。需要注意的是,仅仅使无人机朝着相应的虚拟结构点飞行还不够,必须根据迭代算法执行的周期计算出无人机所需的速度大小,以便下次虚拟结构对齐时,无人机恰好飞到在这些期望点处。速度过快会导致无人机超过期望的位置,过慢者无法达到期望的位置。这些计算需要用到与无人机自身相关的信息,不

同运动模式的无人机具有不同的约束方程,限于篇幅这里不作详细介绍,具体的计算方法可参考文献[17]。

### 2.2.4 试验验证

文献[16]利用虚拟结构法为无人机编队设计了编队控制算法,并通过试验证明它对于虚拟结构的平移可以生成非常平滑的轨迹。利用虚拟结构法为5架四旋翼无人机生成的金字塔形编队,如图11所示。图11中红线所示即为虚拟结构,研究人员通过驾驶杆操纵该虚拟结构进行平移和旋转运动。虚拟结构运动之后,无人机自动按前文所述策略跟随虚拟结构中对应的顶点进行运动。

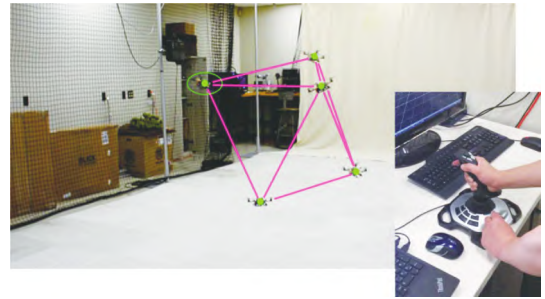


图11 虚拟结构法生成金字塔构型的编队<sup>[16]</sup>

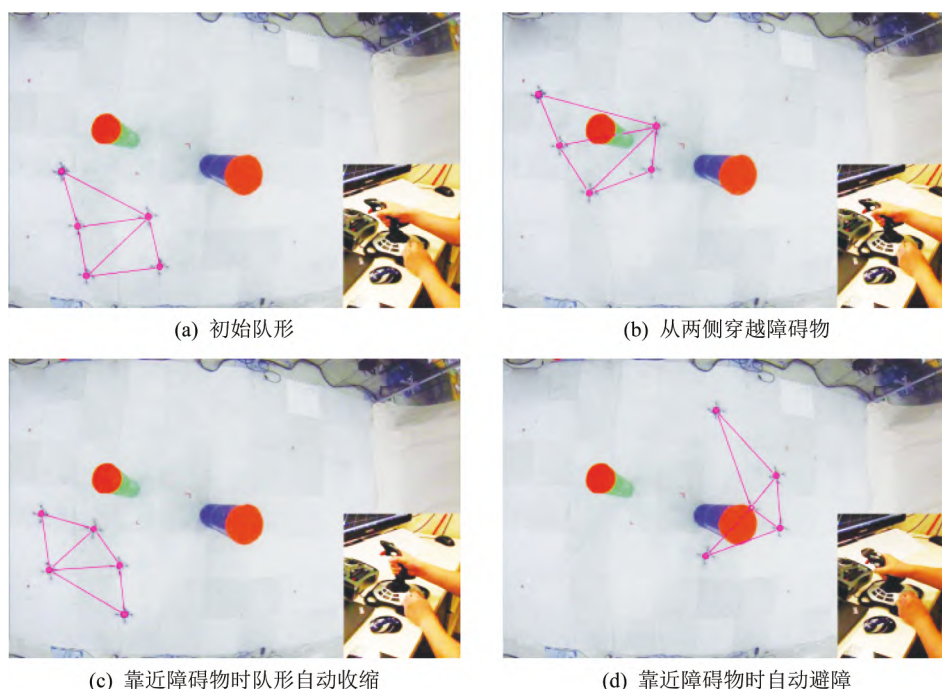
Fig. 11 Formation of pyramid configuration using virtual structure method<sup>[16]</sup>

虚拟结构法在无人机编队避障飞行方面的应用如图12所示。图12(a)是无人机编队的初始队形;图12(b)是无人机编队从两侧穿越障碍物的情形,在穿越过程中编队自动完成了队形变换;图12(c)显示的是编队靠近障碍物时,编队的一角受挤压后自动收缩的情形;图12(d)显示的是其中一架无人机非常靠近障碍物但未发生碰撞的情形。

### 2.3 基于行为的方法

基于行为的方法采用的是一种将多种矢量控制函数结合起来的混合控制结构。该方法模拟蜂群、鸟群、鱼群等自然编队行为,通过将队形保持、避障以及目标搜索等行为进行整合来形成指令信号。文献[18]首次引入该方法并将其用于机器人集群的控制。在该方法中,每种行为都有一个增益,它表示该行为的优先级。控制指令通过将不同行为的输出进行加权求和得到。假设机器人集群需要实现避障( $u_1$ )、编队( $u_2$ )和目标搜索( $u_3$ )这3种行为,则最终的控制指令由函数 $u = a \cdot u_1 + b \cdot u_2 + c \cdot u_3$ 来确定,其中, $a, b, c$



图12 虚拟结构法用于无人机编队的避障飞行<sup>[16]</sup>Fig. 12 Collision avoidance of UAV swarms using virtual structure method<sup>[16]</sup>

为相应行为的增益。基于行为的编队控制方法如图13所示。由于不同的行为可以设置不同的增益,因此,对于多目标任务,基于行为的方法通常是一个更好的选择。

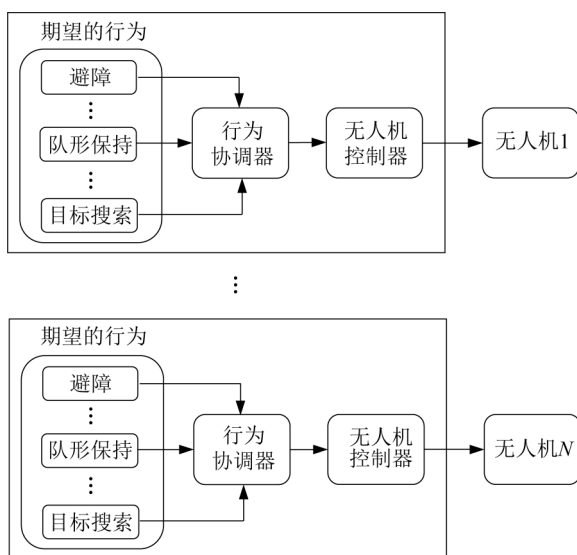


图13 基于行为的方法

Fig. 13 Behavior based methods

该方法随后被应用到编队飞行控制领域。Giulietti等<sup>[19]</sup>通过模拟鸟类迁徙的行为来进行编队飞行控制。其控制信号由2个子控制器(一个轨迹控制器和一个位置控制器)的输出进行加权求和得到。2

个控制器的增益是通过最小化一个二次损失函数来确定的。下面基于文献[19]详细描述基于行为的方法在编队飞行控制中的应用。

### 2.3.1 轨迹控制器

在基于行为的方法中,每架飞机的编队控制器由2个控制系统组成:一个轨迹控制器和一个位置控制器。轨迹控制器的主要目标是根据期望速度 $V_d$ 、航迹倾角 $\gamma_d$ 和航迹偏角 $\chi_d$ 来跟踪给定的航线,即 $\mathbf{r}_T = (V_d, \gamma_d, \chi_d)$ 。轨迹控制器接收航迹误差信息(即当前航迹与期望航迹之间的差值)

$$\mathbf{e}_T = \mathbf{r}_T - \mathbf{y}_T \quad (10)$$

式中: $\mathbf{y}_T = (V, \gamma, \chi)$ ;  $V$ 为无人机实际速度; $\gamma$ 为实际航迹倾角; $\chi$ 为实际航迹偏角。

据此生成轨迹指令向量

$$\mathbf{u}_T = \mathbf{K}_T \mathbf{e}_T \quad (11)$$

式中: $\mathbf{K}_T$ 为轨迹控制器反馈增益。

### 2.3.2 位置控制器

位置控制器的目标是保持飞机之间的距离,从而使编队保持理想的几何形状。它接收编队几何中心(Formation Geometry Center, FGC)距离误差信息(即当前距FGC的距离与期望距离之间的差值)

$$\mathbf{e}_P = \mathbf{r}_P - \mathbf{y}_P \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{r}_p = (d_{xd}, d_{yd}, d_{zd})$  为无人机到FGC的期望距离;  $\mathbf{y}_p = (d_x, d_y, d_z)$  为无人机到FGC的实际距离。

据此生成位置指令向量

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{K}_p \mathbf{e}_p \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{K}_p$  为位置控制器反馈增益。

### 2.3.3 编队几何中心和距离计算

将编队中的每架飞机用一个质点表示,则  $N$  架飞机构成的编队的FGC的动力学由以下微分方程表示:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\text{FGC}} &= \sum_{i=1}^n \frac{V_i \cos \gamma_i \cos \chi_i}{N} \\ y_{\text{FGC}} &= \sum_{i=1}^n \frac{V_i \cos \gamma_i \sin \chi_i}{N} \\ \dot{z}_{\text{FGC}} &= \sum_{i=1}^n \frac{-V_i \sin \gamma_i}{N} \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  架无人机的地速;  $\gamma_i$  为航迹倾角;  $\chi_i$  为航迹偏角。对上述方程积分就得到FGC在地球固连坐标系下的位置  $(x_{\text{FGC}}, y_{\text{FGC}}, z_{\text{FGC}})$ , 而第  $i$  架飞机和FGC之间的距离在地球固连坐标系下可以表示为

$$\begin{cases} d_{x_i} = x_{\text{FGC}} - x_i \\ d_{y_i} = y_{\text{FGC}} - y_i \\ d_{z_i} = z_{\text{FGC}} - z_i \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $x_i, y_i, z_i$  分别为第  $i$  架无人机在地球固连坐标系中的坐标。在编队飞行中,有时候需要将飞机之间的距离旋转到以飞机质心为原点的局部坐标系中。这里选择运动坐标系作为局部坐标系,地球固连坐标系  $F_0$  到运动坐标系  $F_k$  的变换由矩阵  $\mathbf{T}_{k0}$  来刻画,其定义为

$$\mathbf{T}_{k0} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \chi & \cos \gamma \sin \chi & -\sin \gamma \\ -\sin \chi & \cos \chi & 0 \\ \sin \gamma \cos \chi & \sin \gamma \sin \chi & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: 第  $i$  架飞机到FGC的距离在运动坐标系下可以表示为  $d_i^k = \mathbf{T}_{k0} d_i^0$ 。

### 2.3.4 完整控制器设计

为实现编队控制的目标,文献[19]开发了一个LQ (Linear Quadratic) 伺服控制器,其中,反馈增益矩阵通过最小化一个二次损失指标得到。最终的控制指令  $\mathbf{u}_c$  是轨迹指令向量  $\mathbf{u}_T$  和位置指令向量  $\mathbf{u}_p$  凸组合,即

$$\mathbf{u}_c = (1-f)\mathbf{u}_T + f\mathbf{u}_p \quad (17)$$

式中:  $f \in [0, 1]$  为位置误差  $\mathbf{e}_p$  的函数。

在存在干扰的情况下,可能存在一架或多架飞机相对于标称构型存在位置误差。在这种情况下,指令

向量  $\mathbf{u}_c$  既取决于位置误差  $\mathbf{e}_p$ , 也取决于轨迹误差  $\mathbf{e}_T$ , 因此,编队中的飞机可能无法完全按照给定的航线飞行。当编队达到预期形状时,每架飞机的位置误差  $\mathbf{e}_p$  为零,从而  $f=1$ , 这使得指令向量  $\mathbf{u}_c$  仅由轨迹控制器  $\mathbf{K}_T$  提供,此时,所有飞机都将遵循期望航迹  $\mathbf{r}_T$ 。图14为编队中每架飞机的完整控制方案,其中,  $\mathbf{x}_T$ 、 $\mathbf{x}_p$  分别为无人机的真实航迹信息和无人机的真实位置信息。

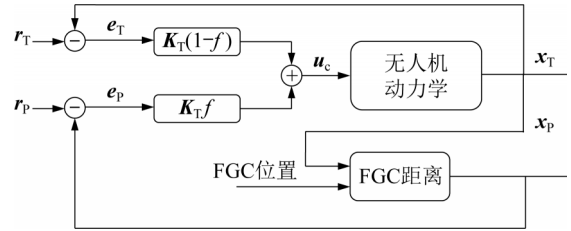


图14 完整的控制方案

Fig. 14 Complete control scheme

### 2.3.5 仿真结果

为了验证整个控制策略的可行性,文献[19]对双机对角编队先后进行了2次仿真,如图15所示。飞机之间  $x$  轴和  $y$  轴方向的标称相对距离分别选为30 ft和40 ft (1 ft=0.304 8 m)。2架飞机的飞行高度相同,均为3 000 ft。

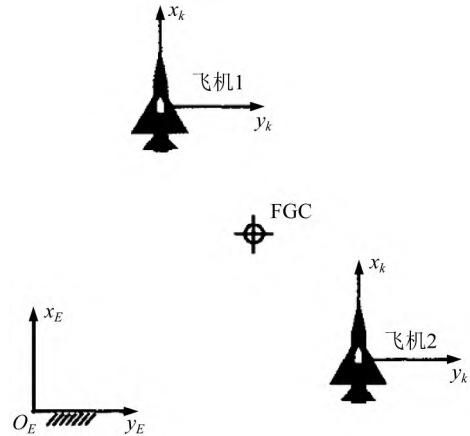


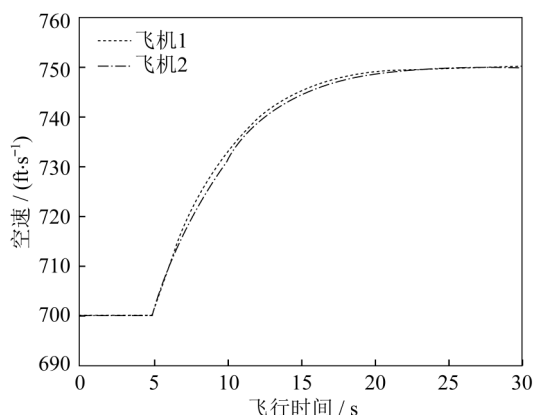
图15 编队几何形状<sup>[19]</sup>

Fig. 15 Formation geometry<sup>[19]</sup>

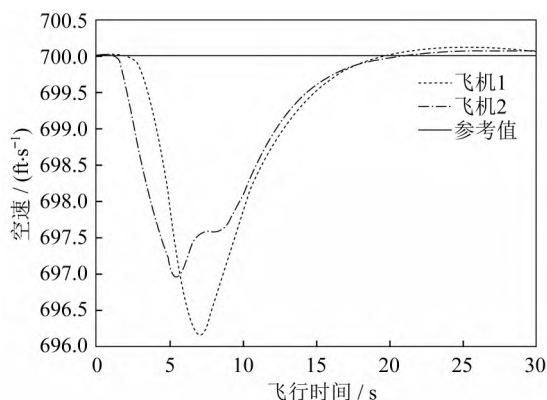
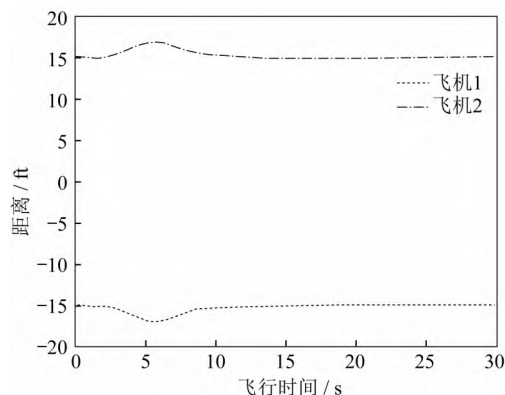
第1次仿真模拟的是一个航迹跟踪任务。每架飞机均从虚拟领导者接收指令轨迹,并且初始状态均为700 ft/s的稳定水平飞行状态。利用上述方法可以实现对期望航迹的稳定跟踪,并且飞机之间的相对距离始终保持在给定值。飞机对空速阶跃的响应如图16所示。

第2次仿真展示了编队控制器是如何再现候鸟行为的。初始条件依旧是空速为700 ft/s的稳定水平飞



图16 飞机对速度指令的响应<sup>[19]</sup>Fig. 16 Aircraft response to a velocity command<sup>[19]</sup>

行。在仿真过程中引入了速度扰动,扰动使得2号飞机相对于1号飞机减速。2架飞机的速度曲线如图17所示,从图17中可以清楚地看到1号飞机没有继续按照规定的速度飞行,而是“等待”2号飞机并保持给定距离。干扰一旦消失,1号和2号飞机又会重新按照规定的轨迹飞行。扰动飞行期间,飞机之间 $x$ 轴方向的相对距离如图18所示。

图17 扰动飞行过程中飞机的速度<sup>[19]</sup>Fig. 17 Aircraft velocity during perturbed flight<sup>[19]</sup>图18 扰动飞行过程中飞机到FGC的距离<sup>[19]</sup>Fig. 18 Distances to FGC during perturbed flight<sup>[19]</sup>

## 2.4 人工势场法

人工势场的概念最早由 Khatib<sup>[20]</sup>提出,用于处理机械臂和移动机器人的避碰问题。其主要思想是通过引入人工引力和斥力势场来生成控制力,从而使机器人远离障碍并趋向目标。其中,引力势场由目标发出,目的是使机器人向着目标运动。斥力场由障碍物发出,目的是使机器人远离障碍。

由于其在避障方面的优势,该方法随后被许多学者加以改进并用于解决障碍环境下无人机的编队飞行问题。例如,为了在编队高速运动时实现避障,文献[21]提出了改进的人工势场法。文献[22]提出了基于人工势场法的战地多无人机路径规划。文献[23]引入了虚拟结构法和人工势场法相结合的混合控制结构,在生成作用力的时候,考虑了飞行器的极限速度,使飞行器能以最大速度飞行。文献[24]提出了一种基于人工势场的方法来解决无人机编队的路径规划问题。文献[25]通过改进斥力的势函数解决了避碰以及无法到达目标的问题。文献[26]提出了基于反步控制的设计方法来解决输入饱和问题。接下来,本文基于文献[27]简要介绍人工势场法在无人机编队中的应用。

### 2.4.1 人工势场

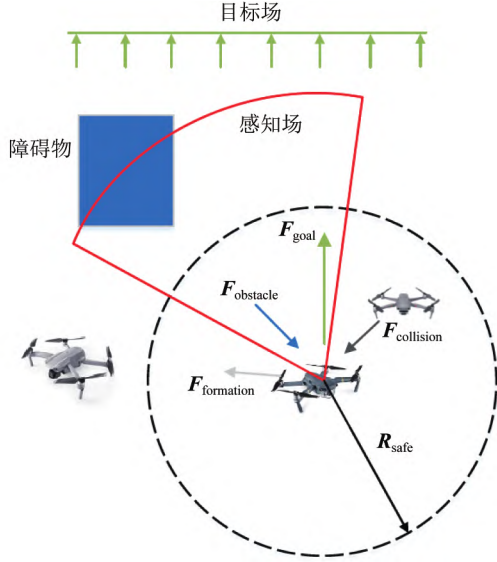
将编队中的每个成员视为一个质点,编队中心的状态记作  $\mathbf{x}_0 = [\mathbf{p}_0^T, \mathbf{v}_0^T]^T$ , 其中  $\mathbf{p}_0$  为编队中心,  $\mathbf{v}_0$  为编队的平均速度。每一个成员在特定时刻  $t$  的全局坐标为

$$\mathbf{p}_i^d(t) = \mathbf{C}\mathbf{p}_i^R(t) + \mathbf{p}_0(t) \quad (18)$$

式中:  $\mathbf{p}_i^R$  为编队成员在编队参考坐标系下的局部坐标;  $\mathbf{C}$  为编队参考坐标系到 NED 全局坐标系的旋转变换矩阵。每一个成员在 NED 全局参考坐标系下的位置构成的集合记作

$$D(t) = \{\mathbf{p}_1^d(t), \mathbf{p}_2^d(t), \dots, \mathbf{p}_N^d(t)\} \quad (19)$$

编队成员从初始几何构型出发,逐步朝着目标前进,在此过程中需要逐步形成所需队形,并且要避免与障碍物以及其他成员发生碰撞。为使无人机趋向目标,可在目标周围人为构造一引力场  $F_{\text{goal}}$ , 如图19所示。为使无人机形成所需队形,可在无人机期望位置人为构造另一引力场  $F_{\text{formation}}$ ; 为避免与障碍物发生碰撞,可在障碍物周围人为构造一斥力场  $F_{\text{obstacle}}$ ; 为避免与编队中其他成员发生碰撞,可在其他成员周围人为构造另一斥力场  $F_{\text{collision}}$ 。

图19 人工势场法<sup>[27]</sup>Fig. 19 Artificial Potential Field approach<sup>[27]</sup>

#### 2.4.2 引力场的构造

引力场由两部分构成,即位置引力和速度引力场,分别记作  $\mathbf{F}_p$  和  $\mathbf{F}_v$ 。  $\mathbf{F}_p$  主要与无人机的实时位置相关,其目的是使无人机朝着目标位置飞行;  $\mathbf{F}_v$  只与无人机的实时速度相关,其目的是使无人机达到期望的速度。将编队中第  $i$  架无人机在  $t$  时刻受到的位置引力和速度引力分别记作  $\mathbf{F}_p^i(t)$  和  $\mathbf{F}_v^i(t)$ ,则

$$\mathbf{F}_p^i(t) = K_g(\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_o(t)) + K_p(\mathbf{p}_i^d(t) - \mathbf{p}_i(t)) \quad (20)$$

$$\mathbf{F}_v^i(t) = K_v(\mathbf{v}_i^d(t) - \mathbf{v}_i(t)) \quad (21)$$

式中:  $K_g$ 、 $K_p$ 、 $K_v$  为标量增益;  $\mathbf{p}_g$  为编队整体的目标位置;  $\mathbf{p}_o$  为编队中心的实际位置;  $\mathbf{p}_i^d$  为无人机  $i$  在编队中的期望位置;  $\mathbf{p}_i$  为其实际位置。式(20)中的第1项对应于图19中的  $\mathbf{F}_{goal}$ ,第2项对应于图中的  $\mathbf{F}_{formation}$ 。因此,第  $i$  架无人机受到的总吸引力为

$$\mathbf{F}_{att}^i(t) = \mathbf{F}_p^i(t) + \mathbf{F}_v^i(t) \quad (22)$$

#### 2.4.3 斥力场的构造

为了避免无人机编队成员与障碍物或成员之间发生碰撞,确保编队成员与障碍物以及编队成员之间保持安全的距离,需在它们之间人为构造一个排斥力。首先确定安全距离。对于无人机与障碍物,其安全距离为

$$r_{safe} = \begin{cases} r_{safe}^{min} + K_{safe}v(t)\cos\delta, & \delta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ r_{safe}^{min}, & \text{else} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $r_{safe}^{min}$  为最小安全距离;  $\delta$  为无人机相对于障碍物的速度与无人机和障碍物位置连线的夹角;  $v$  为无人

机速度;  $K_{safe}$  为标量增益。

当考虑无人机之间避碰时,则需考虑无人机之间的相对速度,此时的安全距离为

$$r_{safe} = \begin{cases} 2r_{safe}^{min} + K_{safe}(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)\cos\delta, & \delta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ 2r_{safe}^{min}, & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

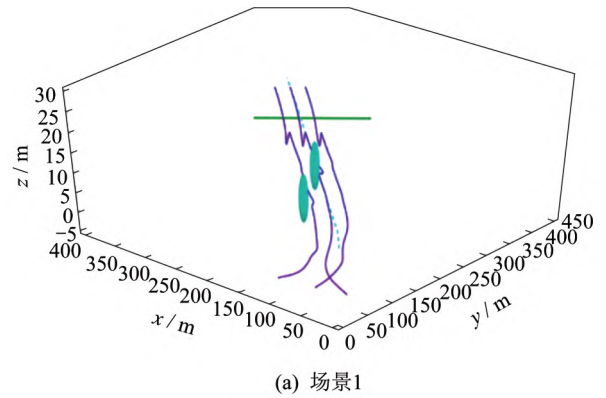
确定好安全距离之后,斥力为

$$\mathbf{F}_{rep} = \begin{cases} K\left(\frac{1}{r_{safe}} - \frac{1}{\|\mathbf{d}\|}\right)\frac{\mathbf{d}}{\|\mathbf{d}\|}, & \|\mathbf{d}\| < r_{safe} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (25)$$

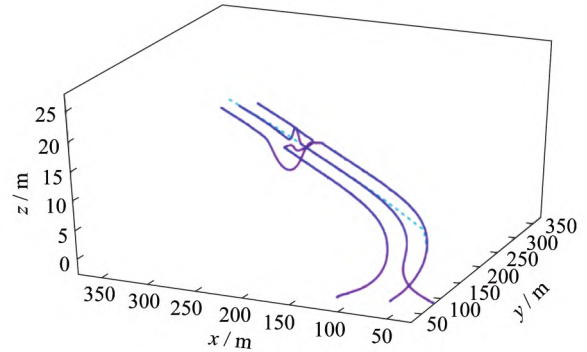
式中:  $\mathbf{d} = \mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i$  为无人机与障碍物(或其他无人机)之间的相对位置矢量;  $K$  为标量增益。从式(25)可以看出  $\mathbf{F}_{rep}$  只在小于安全距离时起作用。

#### 2.4.4 仿真验证

文献[27]利用人工势场法实现了3架四旋翼飞行器组成的编队在障碍环境下的自主避障飞行。仿真共考虑了2个场景,场景1主要用于测试人工势场法在队形重构和避障方面的有效性,仿真结果如图20(a)所示;场景2主要用于测试编队成员之间的避碰能力,仿真结果如图20(b)所示。从仿真结果看出,人工势场法在避障和避碰方面具有较好的性能。



(a) 场景1



(b) 场景2

图20 编队飞行仿真结果<sup>[27]</sup>Fig. 20 Simulation results of formation flight<sup>[27]</sup>

3 讨 论

表 1 对前文所述主要控制方法进行了总结和比较。领从法在实际应用中最为广泛,因为这种方法易于设计和实现。其机制很简单,即编队成员跟随选定的领导者,因此,编队关系很容易分析。通信网络的低复杂性是领从法的另一个优点,因为编队成员只需与领导者建立联系。该方法最主要的问题是对领导者的依赖度太高,领导者的失误可能导致整个系统的失效。虚拟结构法在保持编队结构方面能力出众。然而,刚性结构降低了编队在行进过程中的灵活性,导致在避障方面或在狭窄空间环境中运行时性能不佳。此外,编队重构可能导致编队成员计算负担的增加,从而限制其在实际场景中的应用。基于行为的方法是最适合多目标任务的方法,其产生的控制信号可以满足不同任务的需求。此方法的缺点是编队动态模型非常复杂,因此,难以对系统的稳定性进行分析。人工势场法可以迅速为无人机的避障或避碰生成平滑的轨迹,但该方法不能保证路径最短。此外,人工势场法未考虑障碍物的分布,因此,在复杂环境中效率不高。

表 1 编队控制策略对比  
Tab. 1 Comparison of formation control strategies

策略	优势	劣势
领从法	设计和实现简单; 良好的编队跟踪性能	对领导者的依赖性强; 追随者对领导者没有反馈
虚拟结构法	稳定性高	灵活性差; 避障能力差
基于行为的方法	可以处理多 目标任务	建模难; 稳定性低
人工势场法	生成的航迹光滑; 计算时间短; 避障能力好	在复杂环境 中效率低

尽管已经开展了大量研究,但编队控制问题仍面临许多挑战。正如前文所述,每种方法都有各自的优缺点。一个任务可能包含多个子任务,但没有哪种方法适用于所有子任务,因此,可以考虑根据特定任务需求将一些传统方法结合起来,这样的混合机制可能是未来研究的一个方向,有望为更复杂的应用提供一个有前途的解决方案。此外,现有研究大部分只考虑同种平台间的协同,但在实际应用中往往需要不同类型的成员进行协同。例如,在文献[28]中,研究人员将由一架无人机和多个自动潜航器组成的编队用于海上导航。在文献[29]中,研究人员将由无人机和无人地面车组成的编队用于数据采集任务。不同种类

的移动机器人其动态行为各不相同,因此,编队的控制问题变得更加复杂。

受限于论文篇幅,本文对于无人机编队飞行方面其他一些新兴的方法并未讨论,如基于图论的方法、基于共识的方法以及基于人工智能的方法等。其中,基于人工智能的方法在最近几年受到研究人员极大的关注<sup>[10]</sup>,此方法无须精确的无人机数学模型,并且具备很强自适应和自学习的能力,有望为更复杂的应用场景提供完整的解决方案,是未来较有潜力的发展方向。然而,此方法存在对算力要求较高,需要进行大量训练和学习等缺点,为了将其应用到无人机集群协同这样实时性强、计算资源受限的应用场景,急需开发更高效、收敛性更好的算法。

4 结 论

本文根据通信和计算机制将常见的编队控制方案分为集中式、分布式和混合式 3 种,并且全面讨论了无人机编队控制相关方法,包括领从法、虚拟结构法、基于行为的方法和人工势场法等。表 1 对各种方法的利弊进行了评估,在未来的工作中可根据任务需求选择合适的方法。由于领从法简单易实现的特性,对于一般的任务,在满足要求的前提下可优先选择此方法,以降低系统的复杂性和开发成本;对于编队队形有严格要求的任务则可优先选择虚拟结构法;对于多目标任务,基于行为的方法通常是一个更好的选择;在对避障有严格要求时,首选的方法是人工势场法。在实际应用过程中,根据任务的特点可以对上述方法进行取长补短,开发一些混合控制策略来适应复杂的任务。此外,在设计编队控制方法时应充分考虑异构平台的动态特性。

参 考 文 献

[ 1 ] DEVALLA V, PRAKASH O. Developments in unmanned powered parachute aerial vehicle: a review[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2014, 29(11): 6-20.

[ 2 ] QUYEN T, NGUYEN C, LE A, et al. Optimizing hybrid energy harvesting mechanisms for UAVs [J]. EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2018. DOI: 10.4108/eai.13-7-2018.164629.

[ 3 ] HEINTZ F, RUDOL P, DOHERTY P. From images to traffic behavior-A UAV tracking and monitoring application[C]// 2007 10th International Conference on Information Fusion. Quebec City: IEEE, 2007: 1-8.

[ 4 ] SREENATH K, LEE T, KUMAR V. Geometric control and differential flatness of a quadrotor UAV with a cable-suspended load [C]// 52nd IEEE Conference on Decision and Control.



- Firenze: IEEE, 2013: 2269-2274.
- [5] BOURSIAIANIS A D, PAPADOPOULOU M S, DIAMANTOULAKIS P, et al. Internet of Things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: a comprehensive review[J]. *Internet of Things*, 2022, 18: 100187.
- [6] 罗统, 张民, 梁承宇. 多无人机协同目标跟踪制导律设计[J]. *空天防御*, 2023, 6(3): 113-118.
- [7] 阎宏磊, 陆远, 郭杰, 等. 欠驱动高超滑翔飞行器集群协同编队控制方法[J]. *空天防御*, 2024, 7(1): 56-62.
- [8] SKOROBOGATOV G, BARRADO C, SALAMÍ E. Multiple UAV systems: a survey[J]. *Unmanned Systems*, 2020, 8(2): 149-169.
- [9] 刘峰, 王振亚, 吴志壕, 等. 无人机集群分层通信及连通性研究[J]. *导弹与航天运载技术(中英文)*, 2023(4): 114-117.
- [10] DO H, HUA H, NGUYEN M, et al. Formation control algorithms for multiple-UAVs: a comprehensive survey[J]. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 2021, 8(27): 170230.
- [11] ROLDÃO V, CUNHA R, CABECINHAS D, et al. A leader-following trajectory generator with application to quadrotor formation flight[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(10): 1597-1609.
- [12] DESAI J P, OSTROWSKI J, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH3614 6)*. Leuven: IEEE, 1998: 2864-2869.
- [13] LIU Z X, YU X, YUAN C, et al. Leader-follower formation control of unmanned aerial vehicles with fault tolerant and collision avoidance capabilities[C]// *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Denver: IEEE, 2015: 1025-1030.
- [14] YUAN W, CHEN Q Y, HOU Z X, et al. Multi-UAVs formation flight control based on leader-follower pattern[C]// *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*. Dalian: IEEE, 2017: 1276-1281.
- [15] TAN K H, LEWIS M A. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control[C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS '96*. Osaka: IEEE, 1996: 132-139.
- [16] ZHOU D J, WANG Z J, SCHWAGER M. Agile coordination and assistive collision avoidance for quadrotor swarms using virtual structures[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4): 916-923.
- [17] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387-403.
- [18] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multirobot teams[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926-939.
- [19] GIULIETTI F, INNOCENTI M, POLLINI L. Formation flight control - A behavioral approach[C]// *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Montreal: AIAA, 2001: AIAA2001-4239.
- [20] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[M]// COX I J, WILFONG G T. *Autonomous Robot Vehicles*. New York: Springer, 1986: 396-404.
- [21] ZHAO Y C, JIAO L, ZHOU R, et al. UAV formation control with obstacle avoidance using improved artificial potential fields[C]// *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*. Dalian: IEEE, 2017: 6219-6224.
- [22] EUN Y, BANG H. Cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles using the potential field theory[J]. *Journal of Aircraft*, 2006, 43(6): 1805-1814.
- [23] PAUL T, KROGSTAD T R, GRAVDAHL J T. Modelling of UAV formation flight using 3D potential field[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, 16(9): 1453-1462.
- [24] CHEN Y B, YU J Q, SU X L, et al. Path planning for multi-UAV formation[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2015, 77(1): 229-246.
- [25] SUN J Y, TANG J, LAO S Y. Collision avoidance for cooperative UAVs with optimized artificial potential field algorithm[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 18382-18390.
- [26] CUI G Z, XU S Y, LEWIS F L, et al. Distributed consensus tracking for non-linear multi-agent systems with input saturation: a command filtered backstepping approach[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(5): 509-516.
- [27] NIE Z L, ZHANG X J, GUAN X M. UAV formation flight based on artificial potential force in 3D environment[C]// *2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Chongqing: IEEE, 2017: 5465-5470.
- [28] SUJIT P B, SOUSA J, PEREIRA F L. UAV and AUVs coordination for ocean exploration[C]// *OCEANS 2009-EUROPE*. Bremen: IEEE, 2009: 1-7.
- [29] ASADI K, KALKUNTE SURESH A, ENDER A, et al. An integrated UGV-UAV system for construction site data collection[J]. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103068.