

# 一种无人机集群安全高效的分区集结控制策略

赵太飞<sup>\*①②</sup> 官春杰<sup>①</sup> 张港<sup>①</sup> 张爽<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

<sup>②</sup>(陕西省智能协同网络军民共建重点实验室 西安 710000)

**摘要:** 针对无人机集群在特定场景下需要在指定区域安全、快速集结成指定队形的需求, 该文提出了一种分区集结的控制策略。考虑无人机(UAV)的初始分布位置、集结区域以及编队图案等约束, 为每架UAV分配目标集结点并使总航程尽量小。将近集结点区域等分为多个分区, 不同分区内的UAV均按一定规则依次沿直线向所分配目标集结点航行, 无多余航路能耗且互不影响。UAV间通过紫外光进行稳定的机间通信并共享已知信息实现集群内部信息共享。实验结果表明: 随着分区数的增多, 集群的集结时间呈阶梯型下降, 阶梯高度与各分区所含UAV数目的最大值呈近似线性关系, 预测碰撞概率逐渐降低接近于0, 验证了所提方法的可行性和有效性。另外, 根据实验结果得出的规律提出了一种依据不同需求选择最佳分区数的方法。

**关键词:** 无人机集群; 紫外光通信; 集结; 碰撞

中图分类号: V279+.2; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)08-2181-08

DOI: 10.11999/JEIT200601

## A Safe and High Efficiency Control Strategy of Unmanned Aerial Vehicles Partition Rendezvous

ZHAO Taifei<sup>①②</sup> GONG Chunjie<sup>①</sup> ZHANG Gang<sup>①</sup> ZHANG Shuang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

<sup>②</sup>(Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In order to make the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm arrival into the specified place quickly and safely, a control strategy of partition rendezvous is proposed. Considering the start distribution position of each UAV, rendezvous area and formation pattern, target rendezvous point are assigned for each UAV and the total range is minimized. The area near the rendezvous point is divided into several zones. UAVs in different zones travel in a straight line to the target rendezvous points in turn according to certain rules, without excess air route energy consumption and without mutual influence. UAVs communicate with each other stably through ultraviolet light, and share known information to realize information sharing within the swarm. The experimental results show that with the increase of the number of zones, the time taken to rendezvous decreases in a stepped manner. There is an approximate linear relationship between the height of the steps and the maximum number of UAVs in each zone, and the prediction of collision probability gradually decreases and finally approaches 0. In addition, a method to select optimal number of zones according to different needs is proposed.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicles (UAV) swarm; Ultraviolet communications; Rendezvous; Collide

收稿日期: 2020-07-21; 改回日期: 2020-12-08; 网络出版: 2020-12-16

\*通信作者: 赵太飞 tfz@xaut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61971345), 陕西省教育厅科研计划项目(17-JF024), 西安市碑林区科技计划项目(GX1921), 西安市科学计划项目(CXY1835(4)), 榆林市科技计划项目(2019-145)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61971345), The Scientific Research Project of Shaanxi Provincial Department of Education (17-JF024), The Science and Technology Plan Project of Xi'an Beilin Area (GX1921), Xi'an Science Project (CXY1835(4)), The Science and Technology Plan Project of Yulin (2019-145)

## 1 引言

单架无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)因时间、空间、任务层面的冲突而难以完成的复杂任务,无人机集群可以以其数量的优势通过协同工作而轻松完成<sup>[1]</sup>,巨大的潜力使之成为多个领域的研究热点<sup>[2,3]</sup>。无论是军用的空中侦查、蜂群协同作战还是民用的舞台表演、大型活动航拍,效率和能耗都是无人机集群作业过程中两个非常重要的指标,作为集群协同执行任务的第1步,高速率、低能耗、安全的编队集结可以为后续任务的执行提供有效保障<sup>[4]</sup>。

无线紫外光通信(UltraViolet Communications, UVC)具有局域保密性好、抗干扰能力强、窃听率低、位辨率低、背景噪声小、全天候、非直视通信等优点<sup>[5]</sup>,另外紫外光收发装置结构简单、成本低、可靠性高、轻便易搭载<sup>[6]</sup>,可以在无人机集群工作的多种复杂场景中进行稳定的机间通信。

关于编队集结,国内外学者已进行了大量研究并取得了一些成果。Reynolds<sup>[7]</sup>在观察群体生物活动规律的基础上改进粒子系统,提出一种极化的、非碰撞的无人机集群运动模型。Daniel等人<sup>[8]</sup>在此基础上提出了一种避免无人机集群自分离的通道感知转向策略,但未考虑机间防碰撞。Gazi等人<sup>[9]</sup>提出了一种分散控制策略,利用势场法模拟群体的集结。Olfati-saber等人<sup>[10]</sup>利用从所需编队的结构约束中获得的自然势函数为每一辆自主机器人提供无碰撞、分布和有界的状态反馈律。Easthope<sup>[11]</sup>通过粒子滤波法为无人机集群的质心提供稳定的轨迹,令各UAV跟踪该质心从而实现集群的稳定。朱旭等人<sup>[12]</sup>利用协同变量令各UAV先以较高的速度快速集结成松散编队,再降低几何约束逐步聚集成紧密编队,提高平均集结效率。部分学者通过路径规划来实现无人机集群安全、快速集结。Alejo等人<sup>[13]</sup>提出了一种基于粒子群的随时逼近方法,快速计算出当前可用计算时间内质量最高的4维轨迹规划。倪良巧等人<sup>[14]</sup>基于Dubins算法在单机规划层为每架UAV规划出4条最短路径,再在多机协同规划层利用绕圈等待等控制策略实现多机同时集结到位。虽然优化

路径规划算法提高其收敛速度可以在避障的同时加快集结速度,但这必然会导致航迹非直线而产生多余的飞行能耗。

本文在文献<sup>[12]</sup>位置协同变量的基础上提出了一种无人机快速、安全集结的新思路——分区集结。通过将近集结点区域划分为互不影响的独立分区并规划各区内UAV的集结顺序,有效提高集结效率、减少多余飞行能耗,在不采用额外避碰措施,仅依靠集结策略本身也能有效降低碰撞概率。

## 2 分区集结控制策略

### 2.1 控制策略描述

无人机集群由多架UAV模拟动物群体行为通过感知交互、信息传递,在一定的规则下呈现出整体的行为<sup>[15]</sup>。在微观学中,反应物的浓度越高,粒子间布朗运动相互碰撞的概率越大,反应速度也就越快<sup>[16]</sup>。降低反应物浓度可以减缓布朗运动,类比到UAV集结的场景中,在有限区域内同时移动的UAV越少,发生碰撞的概率就越低。基于此思想提出了一种适用于旋翼UAV在近集结点区域进行高效集结活动的分区集结方法。将近集结点区域平均划分成几个分区,UAV进入某个分区后的活动范围严格限制在该分区内部,这样不同分区内的UAV就不会发生碰撞。将每个分区视为独立的空间,每个空间同一时刻在一定范围内只允许一架UAV移动,分区数越多,可同时移动且不会发生碰撞的UAV个数也越多,这将会大大提高集结效率。

首先根据集结区域、编队图案<sup>[17]</sup>和各UAV的初始位置设定参考集结点位置、计算目标集结点坐标<sup>[18]</sup>以及分配目标集结点<sup>[19]</sup>。以参考集结点为中心将3维近集结点区域人工划分为不同等份,详细分区方式见图1。

图1(a)为将参考集结点所在平面以参考集结点为中心等分为3份和6份的情况,将区域间的分界线竖直延伸成面,即可将3维的集结区域等分为立体的3份和6份,如图1(b)所示。这些分界面是虚拟的,为不同分区内的UAV隔出独立的航行区域。每个分区具有编号,目标集结点分布在不同标号的分区内,引导UAV从远处向其靠近,各UAV在进



图1 分区方式示意图

入近集结点区域的同时进入对应目标集结点所在的分区。

每架UAV均搭载紫外光收发装置，主要包含两种波长( $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ )的紫外光源以及对应的光接收器。区别于经典频分复用的无线通信方式，本系统中采用的两种波长紫外发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的目的不在于复用，而是通过波长划分区域。调节两种波长紫外LED阵列的角度和光功率，使发出的两种波长紫外光刚好全覆盖以UAV机体为球心、半径分别为 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的球形区域，并以此划分出通信区、识别区和未知区。

UAV周围由两种波长紫外光划分不同区域的方式如图2，针对接收到紫外光信号的不同情况可以判断互处于对方的哪个区域，具体判定方式如下：

接收不到任何波长的紫外信号 $\Rightarrow$ 互处于对方的未知区，只能接收到 $\lambda_2$ 波长的紫外信号 $\Rightarrow$ 互处于对方的识别区，可同时接收到 $\lambda_1, \lambda_2$ 两种波长的紫外信号 $\Rightarrow$ 互处于对方的通信区。

当互处于对方的未知区时，说明两架UAV间距离较远，暂时没有碰撞危险；当互处于对方的识别区时，可以识别到对方的信息且能得出二者间距 $d$ 处于 $\lambda_1 < d < \lambda_2$ 范围内；当互处于对方的通信区时，可以利用紫外光进行稳定的机间通信。含本机当前位置、航向、航速、对应的目标集结点、所在分区编号以及已获取的其他UAV信息，每架UAV通过邻居节点实现信息共享，获取集群内全部UAV的相关信息。由于近集结点区域范围本就不大，只要通信区足够大，就可以忽略孤立节点<sup>[20]</sup>的存在，即可以实现整个集群内部的信息互通。

实现集群内部信息互通后着重关注同属一个分区的UAV，将同分区内各UAV与对应目标集结点的距离从小到大排列，当前一架UAV集结到位或者后一架UAV开始接收不到前一架UAV波长为 $\lambda_2$ 的紫外信号时，后一架UAV才开始移动。每个分区内同一时刻以任一点为球心、 $\lambda_2$ 为半径的球形区域内至多有一架UAV处于移动状态，其他UAV悬停，而处在不同分区内UAV的移动、悬停状态互

不影响。当所有UAV都到达各自目标集结点，即每架UAV产生的位置协同变量都指向参考集结点时<sup>[12]</sup>，集结完成。

## 2.2 控制策略分析

目标集结点的分配是通过匈牙利算法<sup>[21]</sup>完成的，以每架UAV与各目标集结点之间的空间距离作为矩阵元素进行一一匹配，使集群的集结总航程最短。分配好目标集结点后，每架UAV已知起点和终点，在该前提下沿直线集结主要有以下5种方式：

- (1) 各UAV同时开始匀速集结， $v_i \in [v_{\min}, v_{\max}]$ ；
  - (2) 各UAV同时开始匀速集结， $v_i = \frac{v_{\min} + v_{\max}}{2}$ ；
  - (3) 各UAV同时开始集结同时集结到位；
  - (4) 各UAV按照与目标集结点间的距离从小到大的顺序依次集结， $v_i \in [v_{\min}, v_{\max}]$ ；
  - (5) 各UAV按照与目标集结点间的距离从大到小的顺序依次集结， $v_i \in [v_{\min}, v_{\max}]$ 。
- 其中， $v_i$ 是第 $i$ 架UAV的航行速度， $v_{\min}, v_{\max}$ 分别是无人机在机动限制下的最小、最大航行速度。由于所研究情景下各UAV沿直线集结不存在调转航向的情况，即不考虑UAV的偏航角约束。

为了选出最适合分区集结的集结方式，选取了一种分区集结中常见的无人机和目标集结点的分布情况进行仿真，无人机 $U_i$ 和目标集结点 $M_j$ 的位置分布情况如图3所示。

当两架UAV间距离小于 $d_{\text{safe}}$ 、飞行方向间夹角小于 $(\theta_{\text{safe}} + \pi)$ 时视为碰撞<sup>[22]</sup>。为了表述方便，将上述5种集结方式的集结时间和碰撞情况发生次数分别用 $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5$ 和 $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$ 表示。仿真得到如下结论：

集结时间： $T_5 \approx T_4 > T_1 > T_2 > T_3$ ，碰撞次数： $n_3 > n_5 > n_1 > n_2 \approx n_4 \approx 0$ 。

由结论可得，集结方式(2)和集结方式(4)的碰撞次数均约等于0，但集结方式(2)令每架UAV全程以同一速度进行集结，在实际场景中没有必要且需要付出多余的控制代价，方式(4)的集结时间虽然较长，但可以通过分区集结增加同时移动的UAV数目从而成倍降低集结时间，综合考虑下，分区集结策略采用集结方式(4)更加合适。确定好集结方

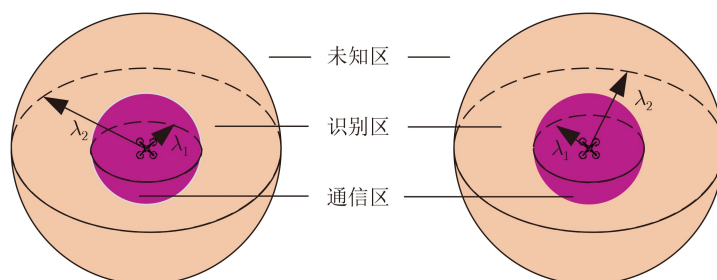


图2 无人机周围由紫外光划分的不同区域



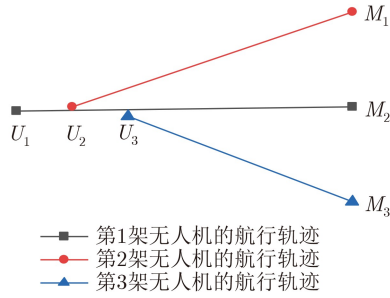


图3 3架无人机的飞行轨迹

式后, 将从集结时间、平均集结时间、预测碰撞概率几个方面来分析分区集结控制策略的性能。

集结时间 $T$ 是实际集结场景中最后一架UAV集结到位所用的时间

$$T = \text{Max}\{t_1, t_2, \dots, t_k\} \quad (1)$$

其中,  $t_i$ 为第 $i$ 个分区内最后一架UAV集结到位的时间;  $k$ 为分区数。

平均集结时间 $T_{\text{av}}$ 是将每个分区集结所用时间的和平均分给各个分区得到的值, 能够体现出规律性走势。

$$T_{\text{av}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_i \quad (2)$$

本方案中, 每隔 $\Delta t$ 更新一次各UAV间的距离信息和航向角度信息, 并生成以UAV总数为阶数的距离矩阵 $\mathbf{D}$ 和航向角度矩阵 $\mathbf{A}$

$$\mathbf{D} = [d_{ij}]_{s \times s} = \begin{matrix} & U_1 & U_2 & \dots & U_s \\ \begin{matrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_s \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1s} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{s1} & d_{s2} & \dots & d_{ss} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = [\theta_{ij}]_{s \times s} = \begin{matrix} & U_1 & U_2 & \dots & U_s \\ \begin{matrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_s \end{matrix} & \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dots & \theta_{1s} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \dots & \theta_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{s1} & \theta_{s2} & \dots & \theta_{ss} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

其中,  $d_{ij}$ 表示 $U_i$ 与 $U_j$ 之间的空间距离(标量);  $\theta_{ij}$ 表示 $U_i$ 与 $U_j$ 飞行方向的夹角;  $s$ 为UAV总数。

由于 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{A}$ 都关于主对角线对称, 所以本系统每次只检测矩阵的右上半部分, 通过分析两个矩阵同一位置的信息即可得到两架UAV间的相对位置和相对运动状态。将文献[22]中预测碰撞概率的方法简化, 从以下两个方面预警无人机间的碰撞危险

$$\left. \begin{matrix} d < d_{\text{safe}} \\ |\theta - \pi| < \theta_{\text{safe}} \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

其中,  $d$ 为两架UAV质心间的距离;  $\theta$ 为两架UAV

飞行方向的夹角;  $d_{\text{safe}}$ 为触发避碰措施时 $d$ 的最小值。 $\theta_{\text{safe}}$ 为 $d = d_{\text{safe}}$ 时安全飞行 $\theta$ 的最小值;  $d_{\text{safe}}$ 与无人机的物理尺寸相比是一个较大的值, 若两个矩阵同一位置的量均满足式(5)且两架UAV处于同一分区内, 说明二者距离较近、航向近似相向, 将有碰撞的危险, 应当对该机引起重视并采取后续避碰措施, 具体措施暂不考虑, 此时触发避碰措施的次数加1。

预测碰撞概率 $p$ 的计算基于触发避碰措施的次数, 具体计算公式为

$$p = \frac{n}{m} \quad (6)$$

其中,  $n$ 为触发避碰措施的次数;  $m$ 为整个集结过程中各UAV间相对状态的检测总次数。

### 3 仿真实验

以参考集结点(0, 0, 200)为中心, 在近集结点区域进行分区集结策略的仿真实验。近集结点区域设定为( $r < 300$  m,  $180$  m  $< h < 220$  m) ( $r$ 为半径;  $h$ 为高度)的圆柱体区域, 为了充分考虑仿真开始前的多种集结情况, 应令UAV初始速度、初始位置具有一定的随机性。令各UAV初始位置按照所属的分区随机分布在 $240$  m  $< r < 300$  m,  $180$  m  $< h < 220$  m的圆环柱区域内, 如图4的阴影部分。集结全过程中UAV的飞行速度范围为 $0 \sim 20$  m/s, 初始速度范围为 $15 \sim 20$  m/s。

各UAV在进入近集结点区域前就向所分配的目标集结点航行, 即各UAV在仿真开始时的初始航向为当前位置朝向对应目标集结点的方向, 继续沿直线集结则航向不变。本实验分别仿真了10架、20架、30架UAV在不同分区数下航行至所分配目标集结点且速度刚好降为0的集结时间、平均集结时间、触发避碰措施次数以及预测碰撞概率, 下文中的规律性数据均为仿真10次结果的平均值。

#### 3.1 仿真结果及分析

集结时间与分区数的关系如图5所示。从图5(a)中可以看出, 随着分区数的增多, 3个UAV总数下集结时间均大幅度降低, 说明分区集结确实可以提

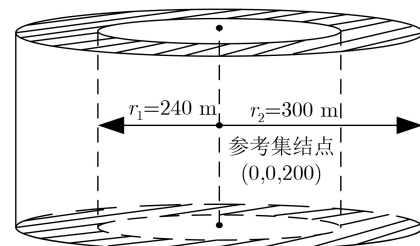


图4 近集结点区域

高集结效率。图5(b)为集结时间局部数据的放大图，可以发现集结时间是呈阶梯型下降的。由于每架UAV从初始位置到达所分配目标集结点的距离与航行时间均相差不大，因此依次集结时，拥有UAV数量较多的分区集结时间更长。因此集结时间由拥有UAV数量最多的分区决定的，即由各个分区内包含UAV数目的最大值 $n_{most}$ 所决定。

集结时间与各分区内UAV数目最大值的关系如图6所示，可以看到3条曲线近乎重合，二者呈近似线性关系，且斜率为每架UAV集结所用时间的平均值。为了尽量减少集结时间，应令每个分区内UAV的个数平均，即需要合理设计编队图案，使目标集结点尽量均等地分布在每个分区内。由于分区数 $k$ 与UAV总数 $s$ 一定是整数，所以当 $s/k$ 不是整数时，各分区拥有UAV的数目也稍有差异，因此在不同的分区数下，只要 $n_{most}$ 相同，集结时间也相差不大，处于同一阶梯。平均集结时间与分区数的关系如图7所示，可以观察到，3个UAV总数下的平均集结时间均随着分区数的增多先大幅降低，在 $k$ 约等于 $s/5$ 处后再缓缓减少，总体轨迹平滑。分区数相同时，30架UAV的平均集结时间总是大于20架、10架UAV，这是因为分区数相同时，30架UAV平均分给每个分区的UAV数量更多，集结时间也就更长。

每隔0.05 s更新1次 $D$ 和 $A$ ，按照式(5)、式(6)

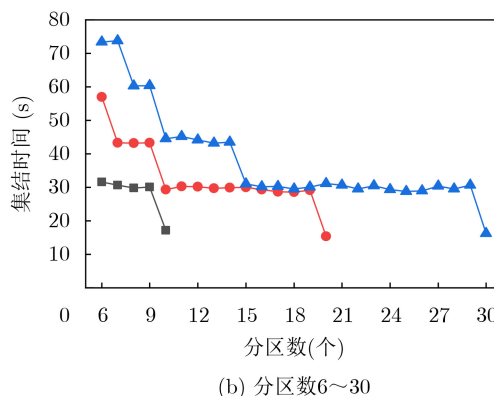
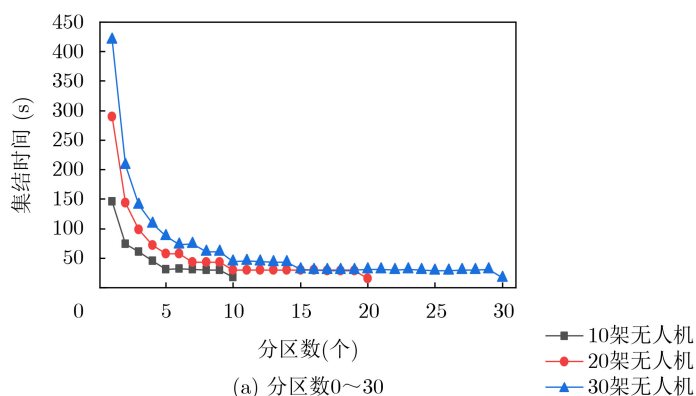


图5 集结时间与分区数的关系

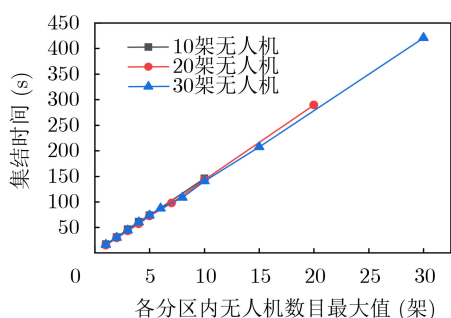


图6 集结时间与分区内无人机数目最大值的关系

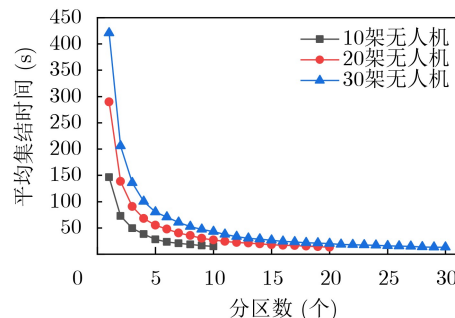


图7 平均集结时间与分区数的关系

记录触发避碰措施的次数 $n$ 、计算预测碰撞概率 $P$ 。图8是触发避碰措施次数与分区数的关系，图9是预测碰撞概率与分区数的关系。从图8、图9的曲线可以看出，随着分区数从1到10, 20和30, 3个UAV总数下触发避碰措施的次数分别从5, 17.2和24.6降为0, 0.2和0.3, 预测碰撞概率分别由0.0307, 0.0649和0.1167降为0, 0.0007和0.0013。UAV总数较少时效果最好，20架、30架无人机的 $n$ 和 $P$ 均下降了约80倍，这充分证明了分区集结方法可以有效减少碰撞情况的发生。当 $k = s$ 时，20架、30架UAV的 $n$ 和 $P$ 均没有如理想状态降为0，这是因为本仿真实验的范围只是近集结点区域，同一分区内UAV的随机初始分布状态可能满足碰撞条件，且UAV总数越多，这种情况出现的概率就越大。在实际场景中可以通过在远集结点处合理引导来减少此类情况的发生，进一步降低碰撞概率。另外，触发的后续避碰措施也可以进行有效避碰，将集群内部UAV碰撞的危险降到最低。

针对UAV数目过多或空间区域受限的情况，可参考图5、图8、图9中分区数较少时的数据，将3种UAV总数下的 $T, n$ 和 $P$ 进行纵向比较。如当 $k = 2$ 时分区数相对较小，每个分区的体积相同， $s$ 越多，同一分区内UAV的数目就越多，空间区域越受限。分析图5、图8、图9中 $k = 2$ 时的数值可以得出，随着 $s$ 递增， $T, n$ 和 $P$ 均逐渐增加，即按照本文的集结





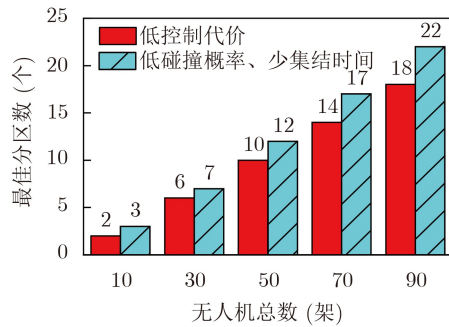


图 12 最佳分区数选择

着重考虑低碰撞概率、少集结时间选出的 $k_{\text{best}}$ 总是大于着重考虑低控制代价选出的 $k_{\text{best}}$ 。

#### 4 结束语

本文提出了一种利用无线紫外光通信实现无人机集群内部信息共享，并将近集结点空域分区，令各分区内同时进行互不影响集结行为的分区集结控制策略。本策略可以有效减少集结时间，未加额外避碰策略就可以有效降低碰撞概率，另外每架UAV沿直线集结，可以有效减少多余飞行能耗。由实验结果可知：随着分区数的增多，无人机集群的集结时间呈阶梯型下降，所处阶梯的高度与该分区数下各区拥有UAV数目的最大值呈近似线性关系；随着分区数的增多，控制代价升高，预测碰撞概率大幅下降后缓缓降低至接近于0，UAV总数越少效果越好。根据上述规律，还提出了一种根据控制代价、集结时间、碰撞概率等不同需求选择最佳分区数的方法。另外，所提集结策略需要对近集结点区域进行等体积分区并要求UAV尽量平均分布于每个分区，后期可以考虑根据UAV的当前散落状态以UAV的数目按比例划分各区域，更满足实际场景的需求。

#### 参考文献

- [1] 朱华勇, 张庆杰, 沈林成. 提高无人作战飞机协同作战能力的关键技术[J]. 控制工程, 2010, 17(S1): 52–55. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.2010.s1.005.  
ZHU Huayong, ZHANG Qingjie, and SHEN Lincheng. Technologies for promoting cooperatively combat capability of UCAV[J]. *Control Engineering of China*, 2010, 17(S1): 52–55. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.2010.s1.005.
- [2] 尹欣繁, 章贵川, 彭先敏, 等. 军用无人机技术智能化发展及应用[J]. 国防科技, 2018, 39(5): 30–34. doi: 10.13943/j.issn1671-4547.2018.05.06.  
YIN Xinfan, ZHANG Guichuan, PENG Xianmin, et al. Intelligent development and application of military UAV technology[J]. *Defense Technology Review*, 2018, 39(5): 30–34. doi: 10.13943/j.issn1671-4547.2018.05.06.
- [3] 吴应斌. 多旋翼无人机在人防指挥通信中的应用[J]. 信息与电脑, 2019, 31(17): 181–182.  
WU Yingbin. Application of multi-rotor UAV in civil air defense command communication[J]. *China Computer & Communication*, 2019, 31(17): 181–182.
- [4] 张晋武. 无人机编队飞行技术研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(8): 9–12. doi: 10.3969/j.issn1672-9730.2015.08.003.  
ZHANG Jinwu. Technology of unmanned aerial vehicles (UAVs) formation flight[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2015, 35(8): 9–12. doi: 10.3969/j.issn1672-9730.2015.08.003.
- [5] 赵太飞, 许杉, 屈瑶, 等. 基于无线紫外光隐秘通信的侦察无人机蜂群分簇算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 967–972. doi: 10.11999/JEIT180491.  
ZHAO Taifei, XU Shan, QU Yao, et al. Cluster-based algorithm of reconnaissance uav swarm based on wireless ultraviolet secret communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 967–972. doi: 10.11999/JEIT180491.
- [6] 胡立群, 陈敦军, 张开晓. 基于单片机的可见光及紫外光强探测系统[J]. 电子设计工程, 2013, 21(24): 81–83, 86. doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2013.24.026.  
HU Liqun, CHEN Dunjun, and ZHANG Kaixiao. The visible light and UV-light detection system based on microprocessor[J]. *Electronic Design Engineering*, 2013, 21(24): 81–83, 86. doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2013.24.026.
- [7] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model[J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1987, 21(4): 25–34. doi: 10.1145/37401.37406.
- [8] DANIEL K, ROHDE S, GODDEMEIER N, et al. A communication aware steering strategy avoiding self-separation of flying robot swarms[C]. The 5th IEEE International Conference Intelligent Systems, London, UK, 2010: 254–259. doi: 10.1109/IS.2010.5548367.
- [9] GAZI V and PASSINO K M. Stability analysis of swarms[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(4): 692–697. doi: 10.1109/TAC.2003.809765.
- [10] OLFATI-SABER R and MURRAY R M. Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, 35(1): 495–500. doi: 10.3182/20020721-6-ES-1901.00244.
- [11] EASTHOPE P F. Tracking simulated UAV swarms using particle filters[C]. IET Conference on Data Fusion & Target Tracking 2014: Algorithms and Applications, Liverpool, UK, 2014, doi: 10.1049/cp.2014.0524.
- [12] 朱旭, 张逊逊, 尤谨语, 等. 基于信息一致性的无人机紧密编队集结控制[J]. 航空学报, 2015, 36(12): 3919–3929. doi: 10.7527/S1000-6893.2015.0165.  
ZHU Xu, ZHANG Xunxun, YOU Jinyu, et al. Swarm

- control of UAV close formation based on information consensus[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(12): 3919–3929. doi: [10.7527/S1000-6893.2015.0165](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2015.0165).
- [13] ALEJO D, COBANO J A, HEREDIA G, *et al.* Collision-free 4D trajectory planning in unmanned aerial vehicles for assembly and structure construction[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2014, 73(1/4): 783–795. doi: [10.1007/s10846-013-9948-x](https://doi.org/10.1007/s10846-013-9948-x).
- [14] 倪良巧, 王道波, 蒋婉玥. 时间协同多无人机编队航迹规划[J]. *机械与电子*, 2016, 34(2): 7–11. doi: [10.3969/j.issn.1001-2257.2016.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2257.2016.02.002).
- NI Liangqiao, WANG Daobo, and JIANG Wanyue. Multi UAV route planning based on time collaboration[J]. *Machinery & Electronics*, 2016, 34(2): 7–11. doi: [10.3969/j.issn.1001-2257.2016.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2257.2016.02.002).
- [15] 贾永楠, 田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. *航空学报*, 2020, 41(S1): 723738.
- JIA Yongnan, TIAN Siying, and LI Qing. Recent development of unmanned aerial vehicle swarms[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(S1): 723738.
- [16] MILLIS J. Brownian movements and molecular reality[J]. *Science*, 1911, 33(846): 426–427. doi: [10.1126/science.33.846.426](https://doi.org/10.1126/science.33.846.426).
- [17] DESAI J P, OSTROWSKI J, and KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots[C]. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998: 2864–2869. doi: [10.1109/ROBOT.1998.680621](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.680621).
- [18] 朱旭. 基于信息一致性的多无人机编队控制方法研究[D]. [博士学位论文], 西北工业大学, 2014.
- ZHU Xu. Research on Multi-UAV formation control based on information consensus[D]. [Ph. D. dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2014.
- [19] GAO Pu, LIUA H P, and GLUCH D P. On modelling, simulating and verifying a decentralized mission control algorithm for a fleet of collaborative UAVs[J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 9: 792–801. doi: [10.1016/j.procs.2012.04.085](https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.04.085).
- [20] 黄元秋, 王晶. 图的交叉数综述[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2010(3): 68–80. doi: [10.3969/j.issn.1000-5641.2010.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5641.2010.03.008).
- HUANG Yuanqiu and WANG Jing. Survey of the crossing number of graphs[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2010(3): 68–80. doi: [10.3969/j.issn.1000-5641.2010.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5641.2010.03.008).
- [21] 常庭懋, 韩中庚. 用“匈牙利算法”求解一类最优化问题[J]. *信息工程大学学报*, 2004, 5(1): 60–62. doi: [10.3969/j.issn.1671-0673.2004.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0673.2004.01.019).
- CHANG Tingmao and HAN Zhonggeng. Solution to a class optimization problem by utilizing the “Hungary calculate way” [J]. *Journal of Information Engineering University*, 2004, 5(1): 60–62. doi: [10.3969/j.issn.1671-0673.2004.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0673.2004.01.019).
- [22] LA COUR-HARBO A, and SCHIOLER H. Probability of low-altitude midair collision between general aviation and unmanned aircraft[J]. *Risk Analysis*, 2019, 39(11): 2499–2513. doi: [10.1111/risa.13368](https://doi.org/10.1111/risa.13368).
- 赵太飞: 男, 1978年生, 教授, 研究方向为通信网络、无线光通信技术、无人机集群协作技术.
- 宫春杰: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为紫外光通信、无人机集群集结与防碰撞.
- 张 港: 男, 1997年生, 硕士生, 研究方向为紫外光通信、无人机集群编队控制与算法.
- 张 爽: 女, 1983年生, 讲师, 研究方向为通信网络、机器学习.

责任编辑: 余 蓉