

9-25-2023

## Formation Obstacle Avoidance Algorithm Based on Joint Virtual Sub-target and Boundary Force

Man Wang

*School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China, wmm5296@163.com*

Dapeng Li

*School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China, dapengli@njupt.edu.cn*

Lianghui Ding

*Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*

Tianlin Zhu

*School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Formation Obstacle Avoidance Algorithm Based on Joint Virtual Sub-target and Boundary Force

## Abstract

**Abstract:** In view of the formation control of leader-follower swarm and obstacle avoidance in artificial potential field method in unmanned aerial vehicle (UAV) swarm formation system under complex environmental conditions, an obstacle avoidance algorithm for UAV swarm formation based on joint virtual sub-target and boundary force (JVBF) is proposed. The leader-follower method based on a virtual sub-target is used, and the modified force function is optimized to realize the formation control of the UAV swarm, so as to help the follower UAV to recover the formation quickly; the artificial potential field method based on boundary force is used for local path planning, so as to solve the disadvantages of unreachable targets and oscillation in narrow channels of UAVs. Simulation results show that the proposed algorithm has higher formation consistency and time efficiency than the traditional algorithm.

## Keywords

artificial potential field, leader-follower, virtual sub-target, modified force, boundary force

## Recommended Citation

Wang Man, Li Dapeng, Ding Lianghui, et al. Formation Obstacle Avoidance Algorithm Based on Joint Virtual Sub-target and Boundary Force[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(9): 1918-1930.

# 基于虚拟子目标联合边界力的编队避障算法

王曼<sup>1</sup>, 李大鹏<sup>1\*</sup>, 丁良辉<sup>2</sup>, 朱天林<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 上海交通大学 电子工程系, 上海 200030)

**摘要:** 针对复杂环境条件下无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)集群编队系统中领航-跟随集群的编队控制和人工势场法中的避障问题, 提出了一种基于虚拟子目标联合边界力(joint virtual sub-target and boundary force, JVBF)的无人机集群编队避障算法。采用基于虚拟子目标的领航-跟随法并优化修正力函数来实现无人机集群的队形控制, 以达到帮助跟随无人机快速恢复队形的目的; 采用基于边界力的人工势场法负责局部路径规划, 解决无人机目标不可达和狭窄通道内振荡的缺点。仿真结果表明, 所提算法相较于传统算法具有更高的编队队形一致性和时间效率。

**关键词:** 人工势场; 领航-跟随; 虚拟子目标; 修正力; 边界力

中图分类号: TP391.9; TP242.6 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)09-1918-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0538

**引用格式:** 王曼, 李大鹏, 丁良辉, 等. 基于虚拟子目标联合边界力的编队避障算法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(9): 1918-1930.

**Reference format:** Wang Man, Li Dapeng, Ding Lianghui, et al. Formation Obstacle Avoidance Algorithm Based on Joint Virtual Sub-target and Boundary Force[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(9): 1918-1930.

## Formation Obstacle Avoidance Algorithm Based on Joint Virtual Sub-target and Boundary Force

Wang Man<sup>1</sup>, Li Dapeng<sup>1\*</sup>, Ding Lianghui<sup>2</sup>, Zhu Tianlin<sup>1</sup>

(1. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In view of the formation control of leader-follower swarm and obstacle avoidance in artificial potential field method in unmanned aerial vehicle (UAV) swarm formation system under complex environmental conditions, an obstacle avoidance algorithm for UAV swarm formation based on joint virtual sub-target and boundary force (JVBF) is proposed. The leader-follower method based on a virtual sub-target is used, and the modified force function is optimized to realize the formation control of the UAV swarm, so as to help the follower UAV to recover the formation quickly; the artificial potential field method based on boundary force is used for local path planning, so as to solve the disadvantages of unreachable targets and oscillation in narrow channels of UAVs. Simulation results show that the proposed algorithm has higher formation consistency and time efficiency than the traditional algorithm.

**Keywords:** artificial potential field; leader-follower; virtual sub-target; modified force; boundary force

## 0 引言

在世界性军事改革的大背景下, 现代战争的

形式和规模较之前发生了巨大变化, 高精尖技术从根本上改变了战争的走向。随着人工智能技术

收稿日期: 2022-05-18 修回日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(61801240)

第一作者: 王曼(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为无人机集群编队。E-mail: wmm5296@163.com

通讯作者: 李大鹏(1982-), 男, 教授, 博士, 研究方向为通信系统软硬件研发。E-mail: dapengli@njupt.edu.cn

的迅速发展, 无人机正在逐步朝着智能化、小型化的方向发展。与传统的有人机相比, 无人机具有体积小、无人员伤亡和可在高风险空域飞行等众多优势, 被广泛应用于联合攻击和战场侦察等一系列民用和军事领域<sup>[1]</sup>。由多架无人机组成无人机集群协同执行任务无论在协同、经济、效率等方面都有明显的优势, 已成为当今无人机作战的重要模式之一<sup>[2]</sup>。

在无人机集群作战技术和系统研究方面, 美军目前处于领先地位。自 2010 年以来, 美军就开展了众多使用无人机集群作战的演示项目, 使无人机集群作战成为了军事理论的研究热点之一<sup>[3]</sup>。至今, 美军已经展开了多项无人机集群协同作战重点项目, 其中主要包括小精灵 Gremlins 项目、忠诚僚机项目和 LOCUST 项目<sup>[4]</sup>。研究的领域涉及了智能无人机的自主通信、集群协同和集群释放与回收等各方面技术, 形成了较为成熟的智能无人机集群研究体系, 并已经转向实战运用<sup>[5]</sup>。可见, 无人机集群协同作战必将是未来无人机发展的首要趋势。

在实现无人机集群编队避障的过程中, 如何实现无人机集群的编队以及航迹规划是需要解决的首要问题<sup>[6]</sup>, 而这类问题通常可以归结为无人机集群的一致性问题<sup>[7]</sup>, 即无人机集群能否在复杂的战场环境中避免自撞、安全避障之后恢复队形, 并且达到相对位置等信息一致, 从而高效地执行各项任务。因此, 研究无人机集群编队避障和队形恢复具有重要意义。近年来, 许多国内外学者提出了无人机集群的编队控制和避障方法, 其中, 编队控制方法主要有虚拟结构法、基于行为的控制方法和领航-跟随法等<sup>[8-10]</sup>。避障方法主要划分为三类: 基于机器学习、优化算法和势场的避障策略, 基于势场的避障方法主要有人工势场法和速度障碍法。在众多编队控制和避障方法中, 领航-跟随法具有数学分析简单、易于保持编队、通信压力小等优点, 人工势场法具有数学计算较简单, 易于分析的优点, 两种算法都被广泛应用于

无人系统编队中。

但是, 在领航-跟随编队控制领域, 对复杂环境下无人机集群编队的研究较少, 特别是领航无人机如何实时进行在线路径的规划和自主避障等方面有待更深入的研究, 且人工势场法存在目标不可达和狭窄通道内易振荡的劣势, 这都会影响无人机集群编队运动的一致性和可靠性。目前, 关于如何提高无人机集群避障的可靠性和编队队形的一致性已经有许多学者做了大量的研究<sup>[11-15]</sup>, 其中, 文献[11]通过添加虚拟领航者和设计集群一致性控制器来实现编队控制和有效避障, 但无人机在避障后并不能迅速地恢复队形, 编队队形的一致性不高, 且针对人工势场的不易到达目标点和易振荡的局限性没有改进。文献[12]采用传统模糊控制器选择合适的势场增益系数来打破人工势场法在设置增益系数时的局限性, 解决了目标点不可达的问题, 但模糊控制器的输入变量较多, 迭代运行时间较长<sup>[16]</sup>, 且模糊控制器的控制规则确定后不能在线调整, 较难适应飞行情况的变化, 稳态精度不高, 从而导致编队队形的一致性不高<sup>[17]</sup>。而编队队形的一致性对无人机集群编队运动至关重要。

因此, 针对复杂环境条件下领航-跟随群体的编队控制和人工势场法中的避障问题, 本文提出了一种基于 JVBF 的无人机集群编队避障算法。在保证无人机集群成功从起始点运动到目标点且不发生碰撞的前提下提高了集群编队运动的一致性和可靠性。本文研究工作的主要贡献有以下几点:

(1) 当跟随无人机因避障的需要脱离队形时, 动态创建虚拟子目标, 虚拟子目标会对该跟随无人机产生修正力, 本文优化了修正力函数, 优化后的修正力能够帮助跟随无人机更快地修正编队队形, 提高无人机集群编队运动的一致性和可靠性。

(2) 当无人机在临近目标点位置检测到目标点附近出现障碍物或当无人机在向目标点飞行过程中检测到两侧出现两个及以上较为临近的障碍物

时,引入边界力,引入的边界力能够改变无人机的受力状态,从而帮助无人机顺利到达目标点和平滑通过狭窄通道,避免了无人机在编队运动过程中目标点不可达和通过障碍物间狭窄通道时易振荡的情况发生。

(3) 仿真结果显示,在无人机集群编队运动过程中,本文方法下无人机的飞行角度变化更小,更稳定;队形误差也更小,有效提高了编队队形的一致性;整个集群编队飞行的时间也更短,效率更高。

## 1 相关工作

无人机集群编队避障主要分为编队队形控制和避障控制两部分内容,都是当前热点研究问题。

无人机集群编队控制是指由多个无人机组成的系统向特定的目标点移动,既要保持群体的稳定性又要适应环境约束,以完成指定的任务。目前,无人机集群编队方法主要有虚拟结构法、基于行为的控制方法和领航-跟随法等。其中,虚拟结构法具有较高的跟踪精度,但系统缺乏灵活性。基于行为的控制方法能较容易地实现无人机分布式控制,但集群系统的稳定性欠佳。领航-跟随法原理最为简单,首先选定一架无人机作为领航无人机,其余为跟随无人机。领航无人机负责集群的路径规划和避障;跟随无人机负责实时跟踪领航无人机的路径,遇到障碍物时需要完成避障任务,从而保证集群能够保持以预期的队形完成避障任务,到达目标点。领航-跟随法中跟随无人机只需跟踪领航无人机的轨迹即可保持队形,大大减小了无人机之间的通信压力,同时也降低了编队模型的数学分析难度。但该算法也有缺点:缺乏整体的路径规划功能,尤其是领航无人机在复杂环境下如何进行在线路径规划和实时自主避障;整个无人机集群太过依赖领航无人机,若在运动过程中领航无人机发生故障,或是跟随无人机因避障的需要偏离预定轨迹而丢失跟踪目标,整个集群的编队运动将以失败告终。

无人机避障主要是指当无人机检测到存在飞行冲突时立刻规划避障路径,驱动无人机沿着安全路径飞行的过程。当前的避障技术主要划分为三大类:基于机器学习、优化算法和势场的避障方法。基于机器学习的避障方法主要通过对周围信息进行交互来选择最优或近最优策略,但当环境变动时需重新进行信息交互,运行代价较高,且收敛难度大。基于优化算法的避障方法能够在一定约束条件下使无人机的某个性能指标最优,但当约束条件复杂时,计算量大幅增加。人工势场法于1986年由Khatib提出<sup>[18]</sup>,其基本原理是将无人机的运动空间抽象为物理中的势场,无人机被认为是势场中的一个粒子,在目标点位置建立引力势场,吸引无人机,在障碍物位置建立斥力势场,使无人机远离,无人机在这两个势场的影响下移动。人工势场法数学计算简单,易于分析;有较高的灵活性,在复杂环境下该优势更为突出;规划得到的路径较平滑。但人工势场法也存在缺点:当目标点附近出现障碍物时无人机所受斥力大于引力,不能到达目标点<sup>[19]</sup>;无人机通过障碍物间狭窄通道时易振荡<sup>[20]</sup>。

前面列举的无人机集群编队控制和避障方法都有各自的优越性和局限性,随着集群编队避障技术的发展,越来越多的学者发现将不同的集群编队控制和避障方法结合,或是与其他算法结合能获得更优越的系统性能并打破之前的局限性。目前较常用的是将领航-跟随法与人工势场法相结合,一方面,将领航-跟随法用于解决集群编队控制问题,另一方面,将人工势场法用于解决避障问题,这两种算法在一定程度上可以很好的进行互补,再针对两种算法的缺点进行优化来提高集群系统性能。

在提高无人机集群避障性能方面,文献[21]在无人机陷入局部最小时将其所受斥力分为2个分力,有效提高了避障的成功率。文献[13, 15]分别提出旋转势场和虚拟的斥力旋转场帮助无人机克服局部极小,顺利避障。在提高无人机集群编队

队形的一致性方面, 文献[22]将自组织映射(self-organizing map, SOM)神经网络与人工势场法结合, 提出了一种自组织的编队控制方法, 提高了编队队形的稳定性。文献[23]提出了一种滑模运动的控制方法, 较好地实现了跟随者对领航者轨迹的实时跟踪。文献[11-12]分别设计了集群一致性控制器和模糊控制器帮助无人机顺利避障和提高编队队形的一致性。

综合来说, 上述文献仅验证了起始点与目标点之间出现障碍物的环境, 并没有改进目标不可达和易振荡的缺点, 且编队队形的一致性有待提高。

## 2 系统模型与问题描述

首先, 无人机集群编队避障的全过程定义如下,  $m$ 架无人机构成集合  $R=\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ , 它们被放置于指定的起始点, 无人机之间形成一个设定队形, 领航无人机根据受到的合力方向运动, 跟随无人机负责实时跟踪领航无人机的轨迹, 整个集群在领航无人机的带领下向着目标点前进, 在集群飞行过程中, 无人机遇到障碍物时会优先避障, 避障后再恢复初始队形, 当整个无人机集群都到达目标点时, 无人机集群编队避障任务完成。表1列出了系统中主要的参数。

本文使用图论中的有向图描述无人机之间的通信拓扑结构。集群通信拓扑结构如图1所示。

图1的通信拓扑结构可以用有向图  $G(V, E, A)$  来表示。其中  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 为该有向图节点的集合;  $e_{ij}=(v_i, v_j) \in E$ , 为该有向图的边集;  $A=[a_{ij}] \in R^{n \times n}$ , 为该有向图的邻接矩阵。若无人机之间存在通信的关系, 则边  $(v_i, v_j)$  存在且邻接矩阵中  $a_{ij}=a_{ji}=1$ , 否则的话边  $v_i, v_j$  不存在且邻接矩阵中  $a_{ij}=a_{ji}=0$ , 即

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } (v_i, v_j) \in E \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)拓扑结构关系连通后的无人机之间可以互相传递状态信息(包含速度, 位置, 方向

等)。将无人机视为质点, 采用二阶的智能体模型, 则无人机  $R_i(i=1, 2, \dots, m)$  的动力学方程<sup>[11]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{q}_i(t) = p_i(t) \\ \dot{p}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $q_i(t) \in R^2$ ,  $p_i(t) \in R^2$  分别表示无人机  $i$  在  $t$  时刻的位置和速度向量;  $u_i(t) \in R^2$  为无人机  $i$  在  $t$  时刻的输入控制。为了方便研究, 本文设定领航无人机的速度恒定。

表1 主要参数  
Table 1 Main parameters

符号	描述
$R_L$	领航无人机
$R_F$	跟随无人机
$R_i$	第 $i$ 架无人机
$R_i'$	$R_i$ 对应的虚拟子目标
$q_i(t)$	$R_i$ 在 $t$ 时刻的位置向量
$p_i(t)$	$R_i$ 在 $t$ 时刻的速度向量
$u_i(t)$	$R_i$ 在 $t$ 时刻的输入控制
$D_{r1}$	$R_i$ 与障碍物之间的边界距离
$D_{r2}$	$R_i$ 与目标点之间的边界距离
$D_{bn}$	$R_i$ 与第 $n$ 个障碍物之间的距离
$D_t$	$R_i$ 与目标点之间的距离
$D_o$	障碍物的斥力作用范围大小
$\zeta$	大于0的修正系数
$\xi$	大于1的常数
$F_c$	修正力
$F_d$	边界力
$F_{at}$	$R_i$ 受到的引力
$F_{re}$	$R_i$ 受到的斥力
$F_{sum}$	$R_i$ 受到的合力



图1 通信拓扑结构  
Fig. 1 Communication topology

无人机集群在编队运动过程中的编队模式主要根据领航-跟随法设定, 领航-跟随法主要包含  $l-\varphi$  和  $l-l$  两种常用编队模式。现实生活中  $l-\varphi$  型

编队模式应用较多,该模式要求跟随无人机以固定的角度和距离实时跟随领航无人机,保持设定队形,实现集群编队控制,其主要原理如图2所示。

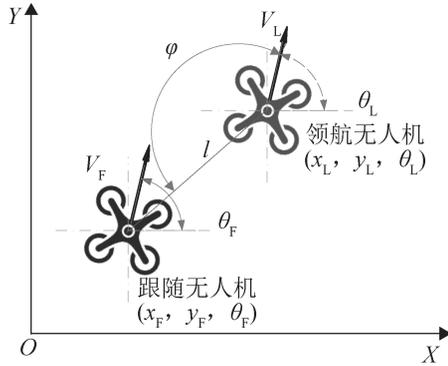


图2  $l-\varphi$ 型编队模式  
Fig. 2  $l-\varphi$  formation mode

$l-\varphi$ 型编队模式的总体控制目标<sup>[24]</sup>为

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} (\varphi_d - \varphi) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (l_d - l) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varphi_d$ 和 $l_d$ 分别为跟随无人机与领航无人机之间期望的角度和距离;  $\varphi$ 和 $l$ 分别为实际测量得到的相对角度和距离。

无人机集群在编队运动过程中采用人工势场法进行在线的局部路径规划,传统人工势场法的受力分析如图3所示。

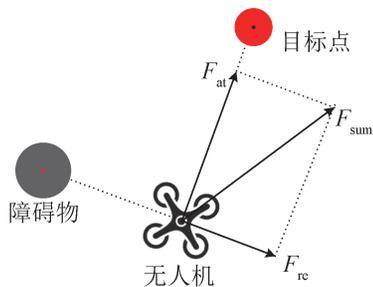


图3 人工势场受力分析图  
Fig. 3 Stress analysis of artificial potential field

无人机在飞行过程中会受到来自目标点的引力 $F_{at}$ 和来自障碍物的斥力 $F_{re}$ ,并根据最后两者的合力 $F_{sum}$ 的方向飞行。引力的势场函数和斥力的势场函数<sup>[16]</sup>由式(4)和(5)表示;分别取引力和斥力

势场函数的负梯度即可得到引力和斥力<sup>[16]</sup>,由式(6)和(7)表示:

$$U_{at}(R_i) = 0.5kD_t^2 \quad (4)$$

$$U_{re}(R_i) = \begin{cases} 0.5\alpha \left[ \frac{1}{D_b} - \frac{1}{D_o} \right]^2, & D_b \leq D_o \\ 0, & D_b > D_o \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{at}(R_i) = -grad(U_{at}(R_i)) = -kD_t \quad (6)$$

$$F_{re}(R_i) = -grad(U_{re}(R_i)) = \begin{cases} \frac{\alpha}{D_b^2} \left( \frac{1}{D_b} - \frac{1}{D_o} \right), & D_b \leq D_o \\ 0, & D_b > D_o \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k$ 和 $\alpha$ 分别为无人机与目标点和与障碍物之间作用力的增益系数;  $D_t$ 为 $R_i$ 到目标点的距离;  $D_b$ 为 $R_i$ 与障碍物之间的距离;  $D_o$ 为障碍物斥力作用范围。

但是,在采用 $l-\varphi$ 型编队模式的领航跟随法和人工势场法相结合的集群编队系统中,无人机由于避障的需要会改变飞行轨迹,飞行状态往往达不到式(3)中的要求,集群编队队形的一致性不高。且人工势场法中仅仅通过来自目标点和障碍物的势场力决定无人机最终的合力,不能保证无人机在任何情况下都能安全且平滑地避开障碍物,到达目标点。本文所提出的虚拟子目标和边界力能有效提高无人机集群编队队形的一致性和避障的可靠性。

### 3 基于JVBF的无人机编队避障算法

基于JVBF的编队避障算法主要由两部分子算法组成,分别是基于虚拟子目标的无人机集群编队队形修正子算法和基于边界力的无人机集群避障子算法。其中,前者负责采用领航-跟随法控制无人机集群编队队形,通过动态设置虚拟子目标对跟随无人机产生修正力的方式提高无人机集群编队队形的一致性;后者负责在线局部路径规划,通过添加边界力改变无人机的受力状态来帮助无人机顺利避障,避免了目标不可达和振荡的情况,从而帮助无人机集群顺利完成编队避障任务。

### 3.1 基于虚拟子目标的编队队形修正子算法

无人机集群由若干架无人机组成, 采用领航-跟随法编队, 其中, 一架为领航无人机, 剩余为跟随无人机, 集群按照指定编队队形飞行, 在飞行过程中跟随无人机以固定的角度和距离实时跟随领航无人机。当跟随无人机因避障脱离队形时会通过动态创建虚拟子目标对该跟随无人机产生修正力来帮助其尽快恢复编队队形。具体的集群编队控制算法的流程图如图4所示。

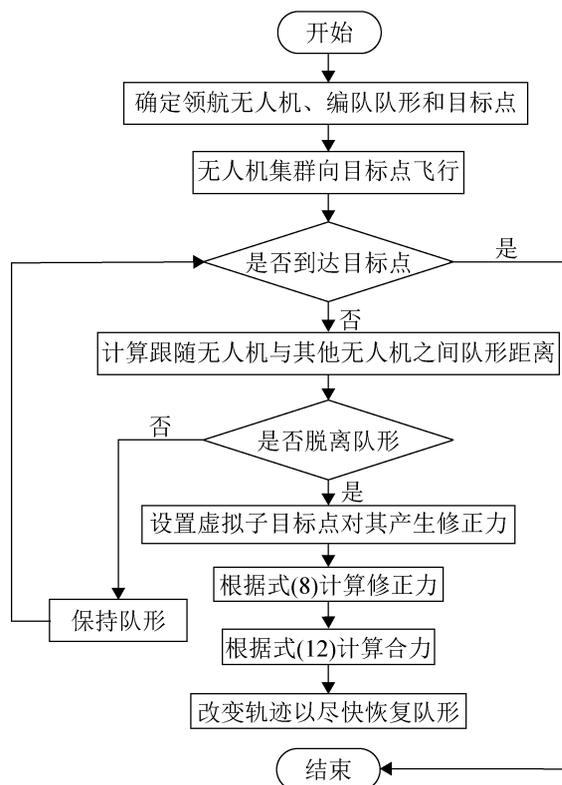


图4 基于虚拟子目标的无人机集群编队队形修正子算法流程

Fig. 4 Sub algorithm flow of UAV swarm formation correction based on virtual sub-target

### 3.2 基于边界力的集群避障子算法

本文设定无人机在飞行过程中采用人工势场法进行避障, 在飞行过程中, 无人机受到来自目标点的引力和来自障碍物的斥力, 并按照二者合力的方向飞行, 在检测到周围存在需要避障的障碍物时优先避障, 在完成避障后再进行集群编队

任务。但是由于人工势场法自身存在的缺陷, 无人机在避障的过程中不易到达目标点且通过障碍物间狭窄通道时易振荡, 对此, 本文引入了边界力, 当目标点附近出现障碍物或遇到两侧障碍物之间的狭窄通道时, 会给当前无人机加上边界力, 改变无人机的受力状态, 帮助其顺利到达目标点和通过狭窄通道。无人机集群避障算法的具体流程如图5所示。

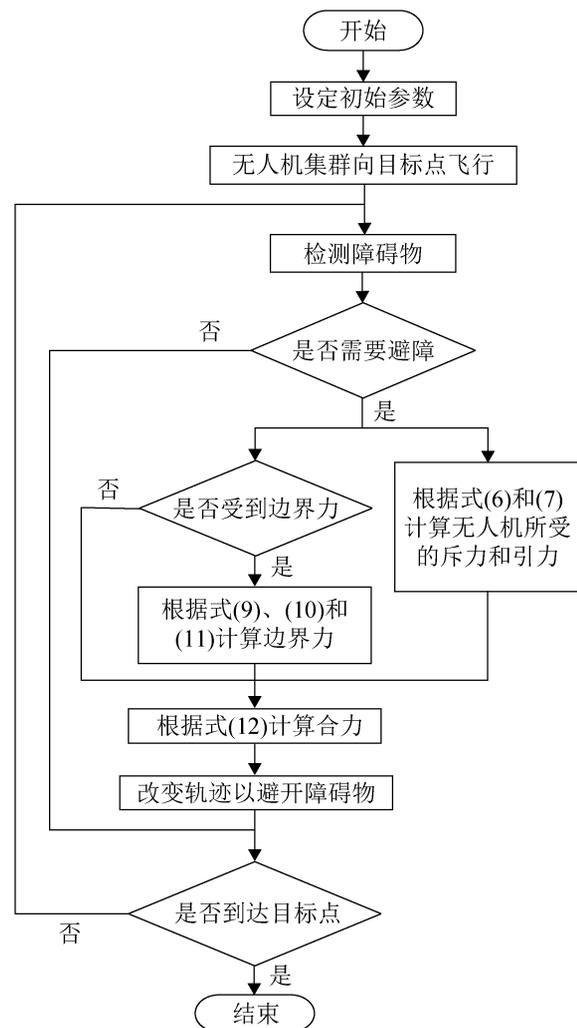


图5 基于边界力的无人机集群避障子算法流程

Fig. 5 Sub algorithm flow of UAV swarm obstacle avoidance based on boundary force

### 3.3 基于JVBF的无人机集群编队避障算法

由基于虚拟子目标的无人机集群编队队形修正子算法和基于边界力的无人机集群避障子算法

的流程图可得到基于JVBF的无人机集群编队避障算法的伪代码如下:

算法: 基于JVBF的无人机集群编队避障算法

1. 指定  $R_L$ 、跟随无人机、集群编队队形和目标点位置(21,22), 初始化障碍物区域
2. while  $R_i$  没有到达目标点位置, 即  $R_i$  当前坐标与目标点坐标之间距离大于0.04
3.     for 无人机  $R_i \in \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$
4.         检测周围的障碍物
5.         if 需要避障
6.             根据式(6)和(7)分别计算  $R_i$  受到的  $F_{at}$  和斥力  $F_{re}$
7.             else 根据式(6)计算  $R_i$  受到的引力  $F_{at}$ , 继续朝着目标点飞行
8.             end
9.             if 遇到障碍物间狭窄通道或者检测到目标点附近出现障碍物
10.                 根据式(9)、(10)和(11)计算  $R_i$  受到的边界力  $F_d$
11.                 end
12.             end
13.     for 跟随无人机  $R_i \in \{R_1, R_2, \dots, R_{m-1}\}$
14.         计算  $R_i$  与  $R_L$  和其他  $R_j$  之间的队形距离, 与初始队形距离比较, 判断是否脱离队形
15.         if 脱离队形
16.             动态设置  $R_i$  所对应的虚拟子目标  $R'_i$ , 并根据式(8)计算  $R'_i$  对  $R_i$  产生的修正力  $F_c$
17.             else 保持队形继续飞行
18.             end
19.         end
20.         根据式(12)计算  $R_i$  所受合力  $F_{sum}$
21.          $R_i$  改变轨迹继续飞行
22.     end while

#### 4 JVBF的作用原理及势场力定义

本节介绍了提出的JVBF作用原理和势场力定

义, 其中, 虚拟子目标用于帮助脱离队形的跟随无人机快速恢复编队队形, 边界力用于帮助无人机当目标点附近出现障碍物和遇到障碍物间狭窄通道时顺利到达目标点和顺利通过障碍物间狭窄通道。

#### 4.1 基于虚拟子目标的受力分析

针对领航-跟随法中跟随无人机由于避障而脱离编队队形的情况, 本文在跟随无人机脱离编队队形时动态创建虚拟子目标, 虚拟子目标的坐标为当前无人机集群中以领航无人机坐标为基准对应的跟随无人机的坐标。

动态创建虚拟子目标来帮助跟随无人机修正编队队形的原理如图6所示。设定  $R_i$  与  $R_j$  之间的队形距离为  $D_{ij}'$ 。初始时  $R_L$ 、 $R_i$  与  $R_j$  形成三角形队形向目标点飞行,  $R_i$  在飞行过程中受到来自障碍物的斥力  $F_{re}$  和来自目标点的吸引力  $F_{at}$ ,  $R_i$  由于避障的需要改变了飞行轨迹, 此时  $R_i$  所受合力为  $F_{sum}'$ , 且  $R_i$  与  $R_j$  的距离  $D_{ij}$  大于  $D_{ij}'$ , 判定为脱离队形, 此时动态创建虚拟子目标  $R'_i$ ,  $R'_i$  会对  $R_i$  产生修正力  $F_c$ , 力的方向由  $R_i$  指向  $R'_i$ , 加入  $F_c$  后  $R_i$  所受合力为  $F_{sum}$ , 加入修正力后无人机能更快速地返回预定轨道, 修正编队队形, 保障整个无人机集群编队运动的可靠性。

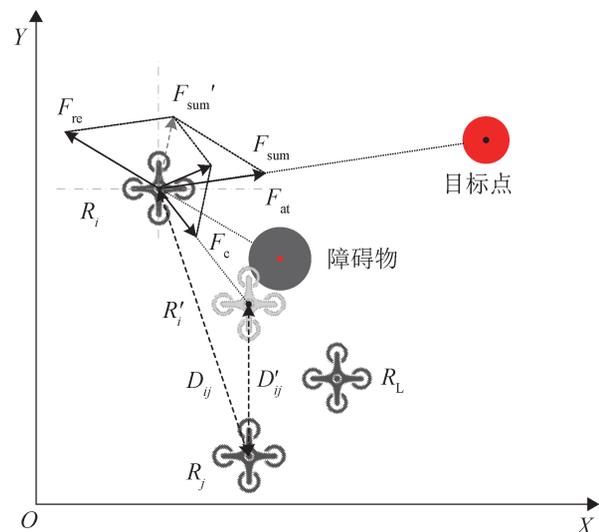


图6 虚拟子目标修正集群编队队形  
Fig. 6 Swarm formation correction by virtual sub-target

## 4.2 基于边界力的受力分析

针对人工势场法中目标不可达和狭窄通道内易振荡的局限性, 本文引入了边界力。边界力的作用原理如下: 边界距离即最大距离限制, 本文设定了两个边界距离, 其中, 无人机与障碍物之间的边界距离为  $D_{r1}$ , 无人机与目标点之间的边界距离为  $D_{r2}$ , 当无人机与位于其两侧的两个及以上障碍物之间的距离  $D_b$  小于  $D_{r1}$  或无人机与目标点之间的距离  $D_t$  小于  $D_{r2}$  时, 会给当前无人机添加边界力, 力的方向与当前无人机所受斥力方向相反, 大小与距离差成正比, 以此帮助无人机通过障碍物间狭窄通道, 顺利到达目标点。引入边界力的人工势场法如图7所示。

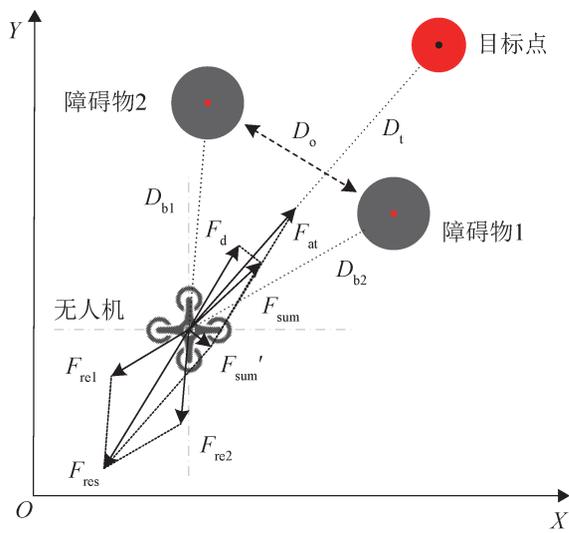


图7 引入边界力的人工势场法

Fig. 7 Artificial potential field method with boundary force

情景1: 图7中, 无人机在向目标点飞行过程中遇到了两个临近的障碍物, 无人机受到来自障碍物1的斥力  $F_{re1}$ 、障碍物2的斥力  $F_{re2}$  和目标点的引力  $F_{at}$ , 所受合力为  $F_{sum}'$ , 偏离了初始轨迹, 此时无人机与两个障碍物的距离分别为  $D_{b1}$  和  $D_{b2}$ , 均小于  $D_{r1}$ , 这时就会给无人机加上边界力  $F_{d1}$ , 力的方向与跟随无人机所受斥力的方向相反, 加入  $F_{d1}$  后  $R_i$  所受合力为  $F_{sum}$ , 加入  $F_{d1}$  能改变无人机受力状态, 帮助其顺利通过障碍物间狭窄通道。

情景2: 图7中, 无人机在目标点附近检测到障碍物, 此时无人机所受合力为  $F_{sum}'$ , 偏离了初始轨迹, 无人机与目标点之间的距离为  $D_t$ , 小于  $D_{r2}$ , 这时就会给无人机加上一个边界力  $F_{d2}$ , 力的方向与跟随无人机所受斥力的方向相反, 加入  $F_{d2}$  后无人机所受合力为  $F_{sum}$ , 加入的  $F_{d2}$  能够帮助无人机在目标点附近存在障碍物时也能顺利到达目标点。

## 4.3 基于JVBF的势场定义

### 4.3.1 修正力的势场

当跟随无人机  $R_i$  脱离编队队形时, 对应的虚拟子目标  $R_i'$  对其产生的修正力为

$$F_c(R_i) = \zeta(q_{R_i'} - q_{R_i}) e^{\frac{\psi_{R_i'}^2}{\xi}} \quad (8)$$

式中:  $\zeta$  为大于0的修正系数;  $\xi$  为大于1的常数;  $\psi_{R_i'}^2$  为  $R_i$  与虚拟子目标  $R_i'$  之间距离差的平方;  $q_{R_i}$  和  $q_{R_i'}$  分别为  $R_i$  和  $R_i'$  的位置向量。

### 4.3.2 边界力的势场

当无人机  $R_i$  在飞行过程中因避障的需要改变预定轨迹, 导致  $R_i$  与两个及以上障碍物之间的距离小于边界距离, 或者  $R_i$  与目标点之间的距离小于边界距离时, 就会给  $R_i$  添加边界力。

当  $R_i$  与两侧两个及以上障碍物之间距离小于边界距离时, 受到的边界力  $F_{d1}$  由式(9)表示; 当  $R_i$  与目标点之间的距离小于边界距离时, 受到的边界力  $F_{d2}$  由式(10)表示:

$$F_{d1}(R_i) = \begin{cases} \frac{q_1}{D_{bn}^2} \left( \frac{1}{D_{bn}} - \frac{1}{D_{r1}} \right) e^{\frac{(D_{bn}-D_{r1})^2}{\gamma_1}}, & D_{bn} < D_{r1} \\ 0, & D_{bn} \geq D_{r1} \end{cases} \quad (n=1, 2, \dots, 80) \quad (9)$$

$$F_{d2}(R_i) = \begin{cases} \frac{q_2}{D_t^2} \left( \frac{1}{D_t} - \frac{1}{D_{r2}} \right) e^{\frac{(D_t-D_{r2})^2}{\gamma_2}}, & D_t < D_{r2} \\ 0, & D_t \geq D_{r2} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $q_1$  和  $q_2$  分别为  $R_i$  与障碍物和与目标点之间

的边界系数； $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 为正的且大于1的常系数，其大小可以根据 $q_1$ 、 $q_2$ 和障碍物来调整； $n$ 为障碍物数目； $D_{bn}$ 表示 $R_i$ 与第 $n$ 个障碍物之间的距离； $D_i$ 为 $R_i$ 与目标点之间的距离。由式(9)、(10)可得， $R_i$ 受到的边界力的合力为

$$F_d = \sum_{i=1}^n F_{d1_i} + F_{d2} \quad (11)$$

### 4.3.3 改进后的势场

加入边界力和修正力后，无人机在飞行中会受到来自目标点位的吸引力 $F_{at}$ 和来自障碍物的斥力 $F_{rc}$ ，还有可能会受到边界力 $F_d$ 和修正力 $F_c$ 。由此，可以得到无人机在飞行过程中所受到的合力为

$$F_{sum} = F_{at} + \sum_{i=1}^n F_{rc_i} + F_d + F_c \quad (12)$$

引入的修正力和边界力能够有效帮助无人机集群在顺利避障的同时提高编队队形的一致性。

## 5 仿真分析

为验证本文算法的有效性，用Matlab软件对2组数据进行具体的仿真验证，并分别对比文献[11]和[12]的算法。采用6架无人机组成一个三角形队形的无人机集群，其中1架为领航无人机，5架为跟随无人机。

数据1：6架无人机的初始坐标分别为 $R_L(0, 1)$ ， $R_1(-1, 2)$ ， $R_2(-1, 0)$ ， $R_3(-2, 3)$ ， $R_4(-2, 1)$ ， $R_5(-2, -1)$ ，目标点为(21, 22)，队形角度为 $45^\circ$ 。领航无人机 $R_L$ 以0.1 m/s的速度向目标点匀速直线前进，当无人机与目标点之间距离小于 $4 \times 10^{-2}$  m时视为到达目标点。5架跟随无人机与 $R_L$ 的距离分别为 $\sqrt{2}$ ， $\sqrt{2}$ ， $\sqrt{8}$ ，2， $\sqrt{8}$  m。障碍物数目为80， $D_o$ 为1.2 m， $D_{i1}$ 为0.5 m， $D_{i2}$ 为1 m，斥力增益 $\alpha$ 为1，引力增益 $k$ 为16，边界力系数 $q_1$ 和 $q_2$ 分

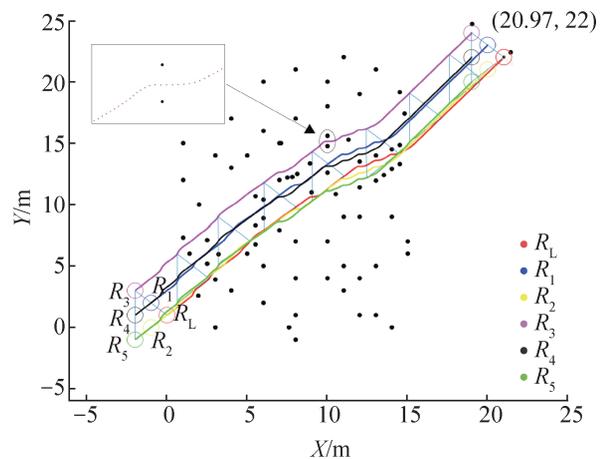
别为8.4和0.3。

数据2：6架无人机初始坐标分别为 $R_L(-1, 2)$ ， $R_1(-2, 3)$ ， $R_2(-2, 1)$ ， $R_3(-3, 4)$ ， $R_4(-3, 2)$ ， $R_5(-3, 0)$ ，目标点为(18, 20)，其余参数均与数据1相同。分别对比文献[11-12]的算法。

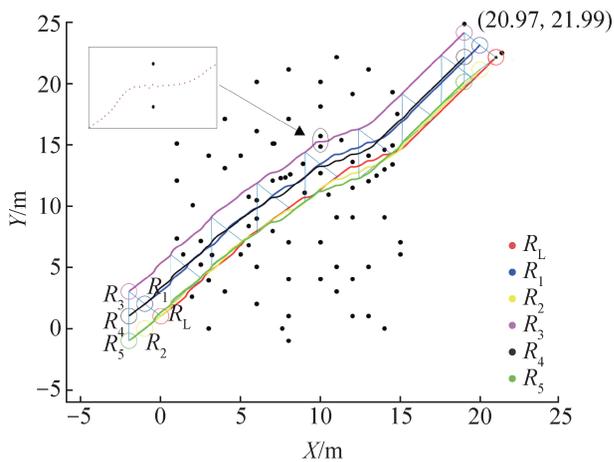
### 5.1 避障轨迹

2组数据下无人机集群从起始点运动到目标点的轨迹如图8所示，图中标注坐标为领航无人机终点坐标。

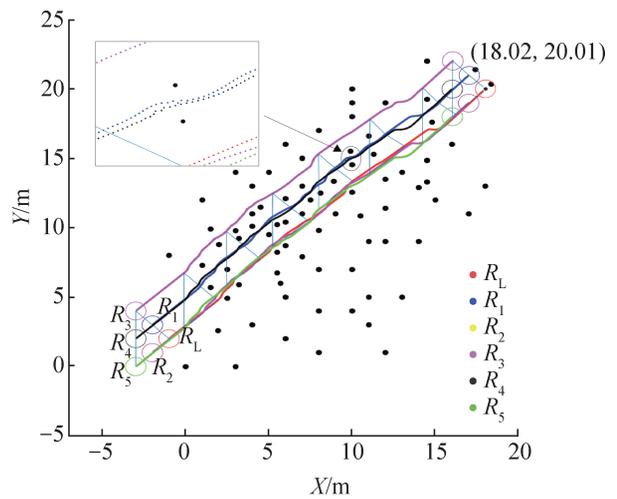
图8(a)、(d)中，无人机集群在障碍物密集且目标点附近出现障碍物的环境中，安全且平滑地从起始点飞行到目标点。其中， $R_1$ 、 $R_3$ 和 $R_4$ 在遇到狭窄通道时能够平滑通过，领航无人机最终距离目标点分别为 $3 \times 10^{-2}$  m和 $2.2 \times 10^{-2}$  m，视为到达目标点。图8(b)、(e)中，领航无人机最终距离目标点分别为 $3.2 \times 10^{-2}$  m和 $2.2 \times 10^{-2}$  m，视为到达目标点。图8(c)、(f)中，领航无人机最终距离目标点分别为0.163 m和 $9.8 \times 10^{-2}$  m，不在目标点范围内，集群编队运动失败。图8(b)、(c)、(e)、(f)中，跟随无人机 $R_1$ 、 $R_3$ 和 $R_4$ 通过狭窄通道时产生大幅振荡，这是因为文献[11-12]没有针对该情况调整无人机的受力状态。



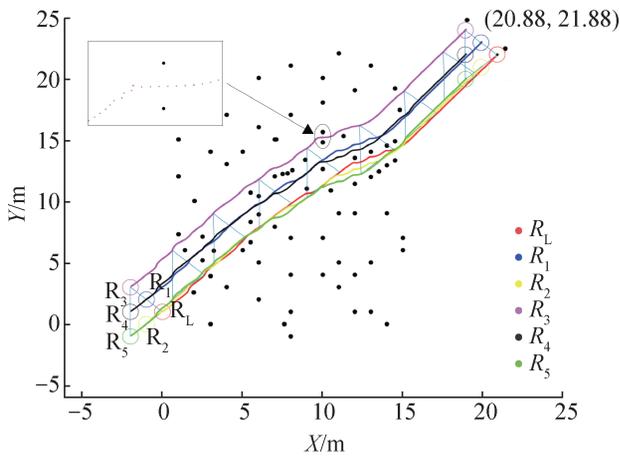
(a) 数据1中本文方法



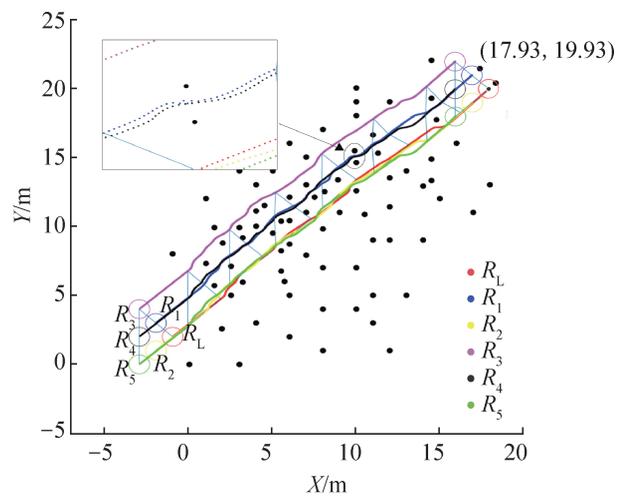
(b) 数据1中文献[12]方法



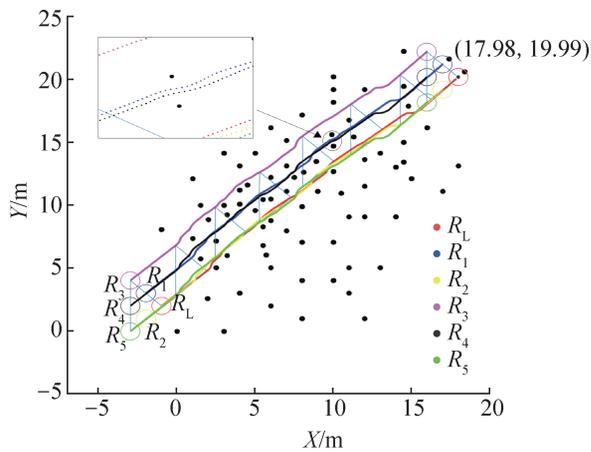
(e) 数据2中文献[12]方法



(c) 数据1中文献[11]方法



(f) 数据2中文献[11]方法



(d) 数据2中本文方法

图 8 无人机集群编队运动轨迹  
Fig. 8 Trajectory of UAV swarm formation

### 5.2 无人机集群运动角度差

数据 1 中集群从起始点运动到目标点的角度差变化如图 9 所示。从图 9 可知, 本文算法、文献 [11-12] 的算法下无人机集群编队飞行的最大角度差分别在  $30^\circ$ 、 $65^\circ$  和  $90^\circ$  以内, 本文算法下无人机集群的角度稳定性优于文献 [11-12] 算法。图 9(b) 可以看到  $R_3$  通过狭窄通道时产生振荡, 且由于文

献[11]算法中没有针对在目标点附近检测到障碍物的情况调整无人机的受力状态，导致无人机在目标点附近大幅振荡，无法到达目标点，无人机集群编队运动失败。

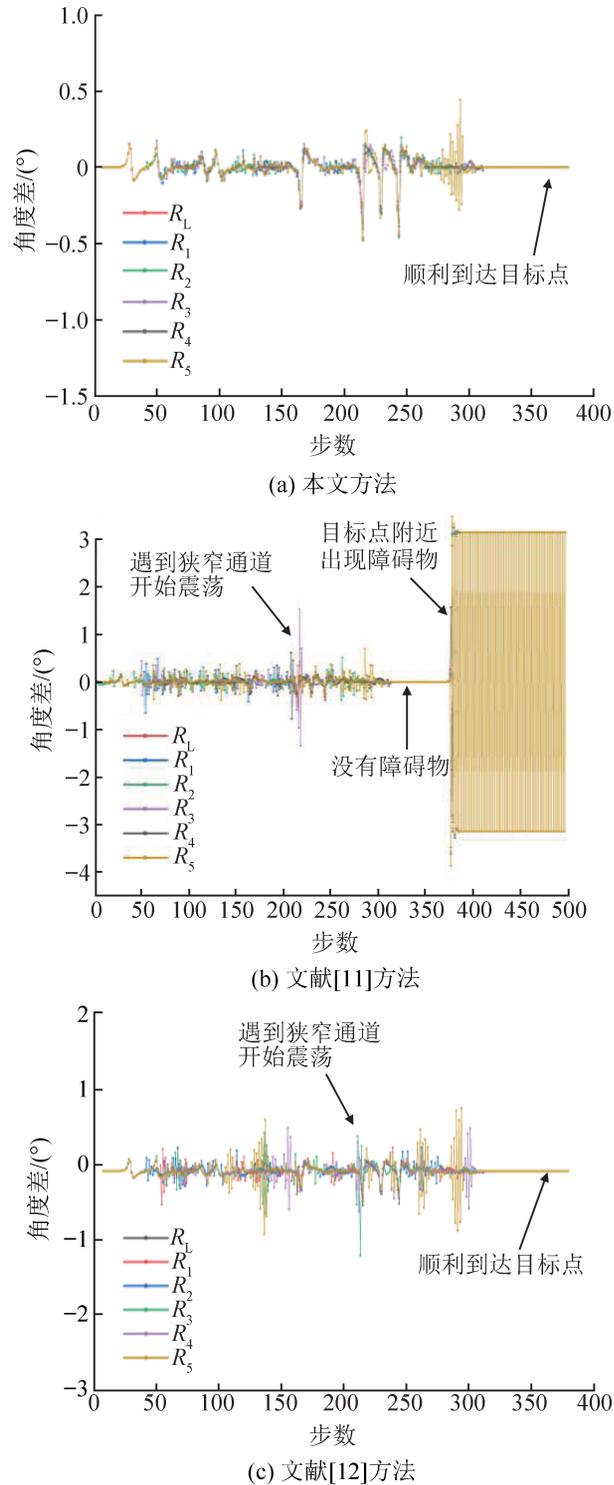


图9 无人机集群飞行角度差曲线

Fig. 9 Flight angle difference curve of UAV swarm

### 5.3 无人机集群编队距离误差

数据 1 中集群从起始点运动到目标点过程中无人机与期望位置的距离误差如图 10 所示。

由图 10 可知，本文算法下集群的最大距离误差为  $6.8 \times 10^{-2}$  m，误差小幅变动；文献[11-12]算法下的最大距离误差分别为 0.193 m 和 0.209 m，误差变动大。因此，本文算法下集群编队队形的一致性和稳定性优于文献[11-12]的算法。

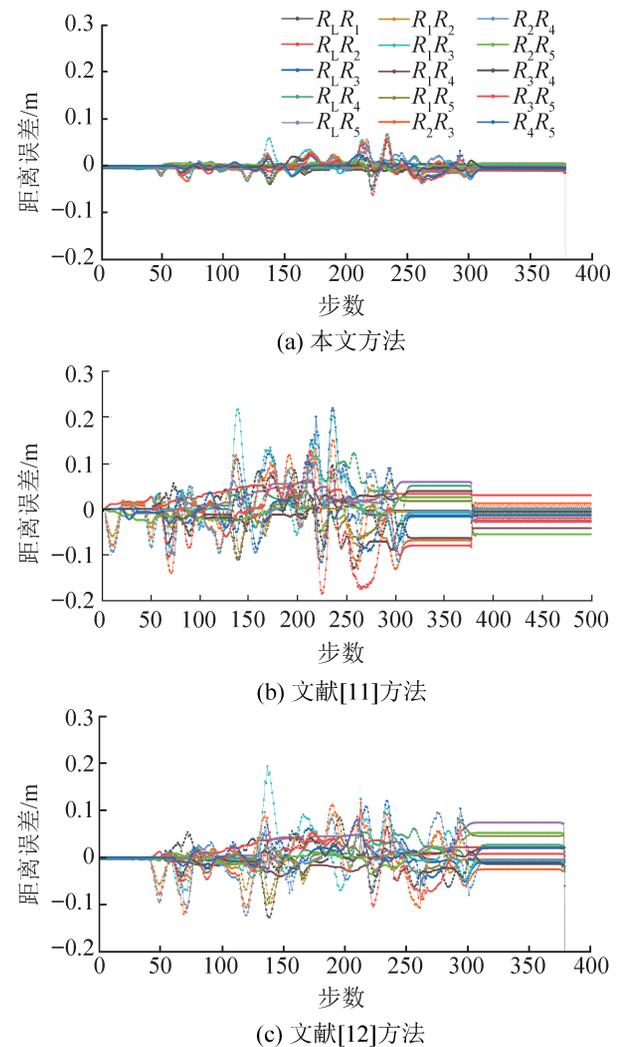


图 10 无人机与期望位置距离误差

Fig. 10 Distance error between UAV and desired position

### 5.4 算法仿真时间

选取数据 1 的环境信息，定义算法仿真时间为从程序运行开始到程序运行结束的时间，对比

文献[12]算法, 进行10次飞行实验, 得到的算法仿真时间数据如表2所示。

表2 算法仿真时间  
Table 2 Algorithm simulation time s

次数	本文	文献[12]	次数	本文	文献[12]
1	24.45	81.23	6	27.58	84.23
2	25.13	85.34	7	27.77	85.63
3	25.61	79.68	8	26.68	87.61
4	26.54	84.53	9	25.31	82.74
5	24.97	86.32	10	26.97	88.69

从表2数据可得, 本文算法和文献[12]算法下无人机集群10次飞行的平均算法仿真时间分别为27.3 s和84.6 s, 本文算法下无人机集群编队运动的时间效率更高。文献[12]算法下无人机在避障过程中除了要计算势场力, 还要进行模糊控制来选择合适的增量系数, 该算法采用了3个输入变量, 大大增加了模糊控制器的迭代运行时间, 并且文献[12]算法仅仅是将传统人工势场法与传统模糊控制器简单结合, 并没有对二者做出针对性的改进, 传统模糊控制器稳态精度不高, 导致无人机在避障时容易较大幅度脱离队形, 并且传统人工势场法存在狭窄通道内易振荡的缺陷, 这都会大大增加算法仿真时间。

## 6 结论

本文提出了一种基于JVBF的无人机集群编队避障算法, 该算法同时考虑了编队队形的一致性和时间效率。引入虚拟子目标帮助跟随无人机在脱离队形后快速恢复队形, 有效提高了编队队形的一致性。针对人工势场法存在的不易到达目标点和振荡这两个缺陷引入边界力, 帮助无人机顺利到达目标点和安全避障。仿真结果表明, 该算法在保障无人机集群从起始点顺利运动到目标点的同时, 还能够在避障后快速恢复队形, 编队队形的一致性更高, 且无人机集群飞行的时间效率也优于其他算法。

## 参考文献:

- [1] Aggarwal S, Kumar N. Path Planning Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: a Review, Solutions, and Challenges[J]. Computer Communications, 2020, 149: 270-299.
- [2] 张丹凝, 程岳, 林清, 等. 无人机集群作战关键技术及发展趋势[J]. 中国新通信, 2022, 24(4): 56-58.  
Zhang Danning, Cheng Yue, Lin Qing, et al. Key Technologies and Development Trend of UAV Swarm Operation[J]. China New Telecommunications, 2022, 24(4): 56-58.
- [3] 邹立岩, 张明智, 柏俊汝, 等. 无人机集群作战建模与仿真研究综述[J]. 战术导弹技术, 2021(3): 98-108.  
Zou Liyan, Zhang Mingzhi, Bai Junru, et al. A Survey of Modeling and Simulation of UAS Swarm Operation[J]. Tactical Missile Technology, 2021(3): 98-108.
- [4] 胡利平, 黄晓阳, 梁晓龙, 等. 美军无人机蜂群作战研究动态及应对策略[J]. 国防科技, 2021, 42(4): 17-25.  
Hu Liping, Huang Xiaoyang, Liang Xiaolong, et al. Research Trends and Countermeasures of American UAV Swarm Warfare[J]. National Defense Science and Technology, 2021, 42(4): 17-25.
- [5] 齐智敏, 张海林, 伊山, 等. 智能无人机群体作战效能评估指标体系研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(9): 1-5.  
Qi Zhimin, Zhang Hailin, Yi Shan, et al. Research on Operational Effectiveness Evaluation Index System of Intelligent UAV Group[J]. Naval Electronic Engineering, 2021, 41(9): 1-5.
- [6] Cai Zhihao, Wang Longhong, Zhao Jiang, et al. Virtual Target Guidance-based Distributed Model Predictive Control for Formation Control of Multiple UAVs[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 1037-1056.
- [7] Cao Yanfen, Sun Yuangong. Necessary and Sufficient Conditions for Consensus of Third-order Discrete-time Multi-agent Systems in Directed Networks[J]. Journal of Applied Mathematics and Computing, 2018, 57(1): 199-210.
- [8] Gao Zhenyu, Guo Ge. Velocity Free Leader-follower Formation Control for Autonomous Underwater Vehicles with Line-of-sight Range and Angle Constraints[J]. Information Sciences, 2019, 486: 359-378.
- [9] Amini A, Asif A, Mohammadi A. Formation-containment Control Using Dynamic Event-triggering Mechanism for Multi-agent Systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(5): 1235-1248.
- [10] Tao Han, Guan Zhihong, Ming Chi, et al. Multi-formation Control of Nonlinear Leader-following Multi-agent Systems[J]. ISA Transactions, 2017, 69: 140-147.

- [11] 王钦钊, 程金勇, 李小龙. 基于多虚拟领航者的多机器人编队控制方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(5): 49-54.  
Wang Qinzhao, Cheng Jinyong, Li Xiaolong. Formation Control for Multi-robot Based on Multi-virtual Leaders [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017, 31(5): 49-54.
- [12] 郑延斌, 席鹏雪, 王林林, 等. 基于模糊人工势场法的多智能体编队控制及避障方法[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(8): 1504-1511.  
Zheng Yanbin, Xi Pengxue, Wang Linlin, et al. A Multi-agent Formation Control and Obstacle Avoidance Method Based on Fuzzy Artificial Potential Field Method[J]. Computer Engineering and Science, 2019, 41(8): 1504-1511.
- [13] 付雷, 秦一杰, 何顶新, 等. 基于改进人工势场法的多机器人编队避障[J]. 控制工程, 2022, 29(3): 388-396.  
Fu Lei, Qin Yijie, He Dingxin, et al. Obstacle Avoidance in Multi-robot Formation Based on Improved Artificial Potential Field[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(3): 388-396.
- [14] 乔勇军, 王思卿. 基于改进的跟随领航者与人工势场的CGF队形控制及避障[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(12): 48-51.  
Qiao Yongjun, Wang Siqing. CGF Formation Control and Obstacle Avoidance Based on Improved Leader-follower and Artificial Potential Field[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(12): 48-51.
- [15] 李金芝, 张志安, 程志, 等. 基于全向移动平台的多机器人编队控制研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(2): 326-330, 398.  
Li Jinzhi, Zhang Zhian, Cheng Zhi, et al. Research on Multi-robot Formation Control Based on Omnidirectional Mobile Platform[J]. Computer Simulation, 2021, 38(2): 326-330, 398.
- [16] 吕晓丹, 吴次南. 改进型模糊神经网络PID控制器的设计与仿真[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(2): 365-373.  
Lü Xiaodan, Wu Cinan. Design and Simulation of Improved Fuzzy Neural Network PID Controller[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2021, 36(2): 365-373.
- [17] 李庆春, 高军伟, 谢广明, 等. 基于模糊控制的仿生机器鱼避障算法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(12): 65-69.  
Li Qingchun, Gao Junwei, Xie Guangming, et al. Obstacle Avoidance Algorithm of Bionic Robot Fish Based on Fuzzy Control[J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(12): 65-69.
- [18] KHATIB O. A Unified Approach for Motion and Force of Robot Manipulators[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(1): 43-53.
- [19] 徐钊, 胡劲文, 马云红, 等. 无人机碰撞规避路径规划算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1): 100-106.  
Xu Zhao, Hu Jinwen, Ma Yunhong, et al. A Study on Path Planning Algorithms of UAV Collision Avoidance[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(1): 100-106.
- [20] 丛玉华, 赵宗豪, 邢长达, 等. 基于改进人工势场的无人机动态避障路径规划[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(9): 170-176.  
Cong Yuhua, Zhao Zonghao, Xing Changda, et al. Dynamic Obstacle Avoidance Path Planning of UAV Based on Improved Artificial Potential Field[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2021, 42(9): 170-176.
- [21] Lagunas-Avila J, Castro-Linares R, Alvarez-Gallegos J. Obstacle Avoidance in Leader-follower Formation Using Artificial Potential Field Algorithm[C]//2021 18th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE). Mexico City, Mexico: IEEE, 2021: 1-6.
- [22] 陈杨杨, 朱大奇, 李欣. 多AUV的自组织人工势场编队控制方法研究[J]. 控制工程, 2019, 26(10): 1875-1881.  
Chen Yangyang, Zhu Daqi, Li Xin. Research on the Method of Multi-AUV Formation Control Based on Self-organized Artificial Potential Filed[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(10): 1875-1881.
- [23] 王荪馨, 王经国. 一种领航-跟随型多移动机器人编队控制方法[J]. 重型机械, 2019(1): 14-21.  
Wang Sunxin, Wang Jingguo. An Integrated Method for Multi-robot Formation Based on Leader-follower Mode[J]. Heavy Machinery, 2019(1): 14-21.
- [24] Zhai Haichuan, Ji Zhijian, Gao Junwei. Formation Control of Multiple Robot Fishes Based on Artificial Potential Field and Leader-follower Framework[C]//2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Guiyang, China: IEEE, 2013: 2616-2620.