

# 基于A\*算法的多无人机实时打击航迹规划

范铮铮, 王正平, 葛佳昊  
(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对多无人机在复杂战场环境下对多个不同价值目标多向打击航迹规划的实时性要求, 提出一种编队无人机实时打击航迹规划算法。首先对多个目标进行聚类, 然后基于A\*算法, 考虑任务区域、无人机的最小转弯半径等约束, 规划得到基准侦察航迹。提出一种基于规则的多向打击航迹快速扩展方法, 依据目标的价值等级对基准侦察航迹进行快速扩展, 生成对不同价值目标的多向打击航迹。仿真结果表明, A\*算法能够实现对不同价值目标的多向打击, 且规划框架合理可行; 算法规划效率较高, 满足工程实际应用的实时性要求, 可用于多无人机的实时多向打击航迹规划。

**关键词:** 多无人机; 航迹规划; 多向打击; 实时规划; A\*算法; 基准侦察航迹

**中图分类号:** V279      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-1300(2021)05-0094-08

**DOI:** 10.16358/j.issn.1009-1300.2021.1.004

## Real-time Strike Path Planning of Multiple UAVs Based on A\* Algorithm

Fan Zhengzheng, Wang Zhengping, Ge Jiahao

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aiming at the real-time requirement of multi-direction strike path planning for different value targets of multiple UAVs in complex battlefield environment, a real-time strike path planning algorithm for the formation of the UAVs is proposed. Firstly, multiple targets are clustered, and then the baseline reconnaissance path is planned based on A\* algorithm, considering constraints such as the mission area and the minimum turning radius of UAV. A rule-based fast expansion method for multi-direction strike path is proposed, the baseline reconnaissance path is expended according to the value level of the target, and multi-direction strike paths for different value targets are generated. The simulation results show that A\* algorithm can achieve the multi-direction strike against different value targets, and the planning framework is reasonable and feasible. The algorithm is efficient, which can meet the real-time requirement of engineering application, and can be used for the real-time multi-direction strike path planning of multiple UAVs.

**Key words:** multiple UAVs; path planning; multi-direction strike; real-time planning; A\* algo-

收稿日期: 2021-03-24; 修回日期: 2021-05-30

作者简介: 范铮铮, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器总体设计。

通讯作者: 王正平, 高级实验师, 主要研究方向为飞行器总体设计、飞行器结构分析与设计。

引用格式: 范铮铮, 王正平, 葛佳昊. 基于A\*算法的多无人机实时打击航迹规划[J]. 战术导弹技术, 2021, (5): 94-101. (Fan Zhengzheng, Wang Zhengping, Ge Jiahao. Real-time Strike Path Planning of Multiple UAVs Based on A\* Algorithm[J]. Tactical Missile Technology, 2021, (5): 94-101.)

rithm; baseline reconnaissance path

## 1 引言

随着现代战场环境的日趋复杂,无人机因成本低、作战灵活、功能多样、战场生存能力强等优点得到了更加广泛的应用<sup>[1]</sup>。而多架无人机编队是无人机协作的重要方式之一,使得对任务的执行更具有灵活性<sup>[2-3]</sup>。无人机编队对敌方目标的多角度打击具有更高的毁伤概率,是未来巷战、空地作战的主流趋势和重要角色。在战场作战需求的牵引下,无人机编队作战已逐渐成为当今各国武器发展的必备能力。

航迹自主规划和任务分配是无人机任务规划系统的组成部分,而航迹自主规划是提升无人机编队自主作战能力的关键技术。

根据多无人机协同规划体系架构的不同,无人机协同任务执行的航迹规划方法主要分为两类<sup>[4-7]</sup>:第一类是集中式方法,主要分为地面集中式和空中集中式。集中式方法系统架构简单,系统内通信量小,但是高度依赖中央任务控制站。第二类是分布式方法,主要分为完全分布式和有限集中式。完全分布式体系系统扩展性好,但是系统协调性差。有限集中式体系兼顾集中式和完全分布式体系优点,具有较强的可实现性、可靠性和灵活性。

常见的航迹规划问题主要包括两类,即最优控制问题和空间搜索问题,算法也主要包括两类:基于控制论的优化算法、基于几何学的搜索算法<sup>[8]</sup>。其中基于几何学的优化算法包括随机性搜索算法(遗传算法、神经网络算法、粒子群算法等),确定性搜索算法(A\*算法、D\*算法等)<sup>[9-14]</sup>。近年来,A\*算法被认为是最有效的寻路算法,在理论上是时间最优的<sup>[15-18]</sup>。A\*算法对航迹点的搜索过程中总是选择代价函数值最小的节点作为下一个扩展节点,最终获得最短路径。A\*算法应用场景极丰富,算法可扩展性强、规划效率高。

但是在实际应用中,由于战场环境复杂、板载计算机计算能力有限、通讯链路不稳定等问题,

无人机航迹规划的稳定性和实时性难以得到保证。因此,提高航迹规划效率、提高规划可靠性、在变化环境中为无人机编队快速规划航迹,对任务成败和无人机存活起到关键性作用。

为解决以上问题,本文提出一种基于A\*算法的有限集中式框架下编队无人机实时多向打击航迹规划算法。该算法首先对多个目标进行聚类;其次,考虑任务区域、无人机的最小转弯半径等约束,规划得到基准侦察航迹;提出一种基于规则的多向打击航迹快速扩展方法,生成对不同价值目标的多向打击航迹。最后,通过仿真实验验证了算法的有效性和实时性。

## 2 多向打击问题及模型建立

本文研究的多向打击任务描述如下:携带异构载荷的多架同构无人机采用编队的形式对任务区域内存在的多个疑似静止目标进行侦察与打击。其中,携带侦察载荷的无人机对目标区域进行地图重构与目标详细信息获取;携带打击载荷的无人机对前者识别的不同价值目标进行多向打击。考虑到无人机承载能力有限以及长航时的任务需求,同时考虑打击方式的多样化,该任务采用多无人机察打分离的作战模式。

为提高规划效率,将此任务分为编队长机航迹规划和僚机编队阵型保持。本文主要研究长机的航迹规划。

### 2.1 目标模型

#### 2.1.1 目标价值模型

通过预先侦察或已有情报获取疑似目标的位置信息,派遣侦察无人机进行再次侦察确认。

对目标进行价值分类,针对不同价值目标制定不同的打击方案,目标价值分类与打击方案对应关系如表1所示。

#### 2.1.2 目标坐标整合与聚类

将地图网格化<sup>[8]</sup>,无人机的运动按照节点移动,但是目标的实际位置不一定在网格地图的节点上。通过式(1),把目标的位置整合至网格地

表1 目标价值分类与打击方案

目标价值	价值标号	分配的打击无人机数量
高价值	3	3
中价值	2	2
低价值	1	1
假目标	4	0(不打击)

图上距离其最近的节点,以供侦察航迹规划,如图1所示。

$$\begin{cases} x_i = \text{round}\left(\frac{\pi(X_i - X_0) R}{180 \Delta L}\right) \\ y_i = \text{round}\left(\frac{\pi(Y_i - Y_0) R}{180 \Delta L}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x_i$ 、 $y_i$  为第  $i$  个目标整合后对应的网格地图节点坐标;  $X_i$ 、 $Y_i$  为第  $i$  个目标的真实经纬坐标;  $X_0$ 、 $Y_0$  为网格地图坐标原点的真实地理坐标;  $R$  为地球半径;  $\Delta L$  为网格地图网格宽度;  $\text{round}(\cdot)$  为四舍五入运算符。

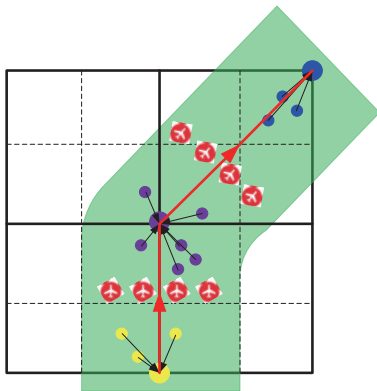


图1 目标整合示意图

为最大限度利用无人机能力,并对多个目标实现有效的侦察打击,基于K-means聚类算法对疑似目标进行聚类,并对每一簇目标分配一组无人机编队进行任务执行<sup>[19-20]</sup>,算法流程图如图2所示。

K-means聚类算法原理简单、聚类效果较好、收敛速度快、占用硬件计算资源少。

### 2.1.3 目标侦察次序规划

根据目标先验坐标信息,对目标进行排序,获取目标侦察次序,实现目标侦察次序规划。此类

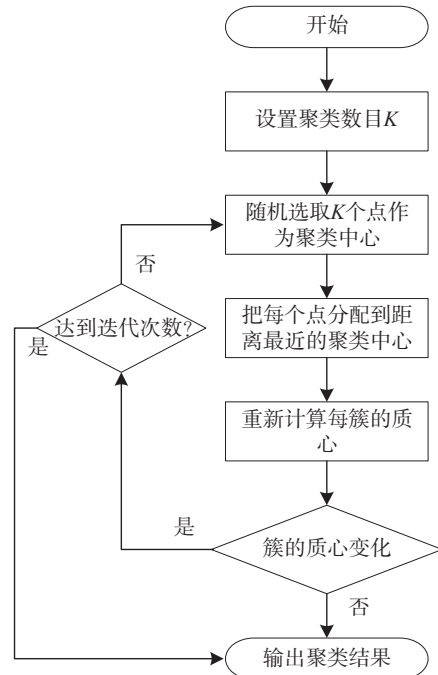


图2 K-means聚类算法流程图

问题通常归结为多旅行商问题 (Traveling Salesman Problem, TSP)<sup>[21]</sup>,其求解方法可通过启发式算法,如遗传算法进行求解,但是对机载规划硬件资源占用较多、计算时间较长。为降低硬件资源占用量,采用如下方法进行目标的侦察次序规划:根据步骤目标聚类获取的每簇目标先验坐标信息,对目标进行排序,优先侦察网格地图上目标坐标  $x$  分量小的目标,如果坐标的  $x$  分量相同,则优先侦察坐标  $y$  分量小的目标。

## 2.2 无人机模型

### 2.2.1 无人机运动约束

无人机的运动约束主要包括:

(1) 无人机最小转弯半径  $R_{\min}$ 。无人机最小转弯半径约束取决于无人机自身性能,其影响了二维航迹规划中的地图网格的设计。如果网格过小,则规划的航迹点与无人机机动能力相悖,航迹不具有实用价值。为满足无人机运动约束,设计地图网格为方形,宽度为  $2R_{\min}$ 。

在地图网格内,无人机可沿如图3所示的方向进行节点扩展。

(2) 无人机航时约束  $T_{\max}$ 。无人机航时取决于任务时长限制与无人机携带的能源。假设无人机

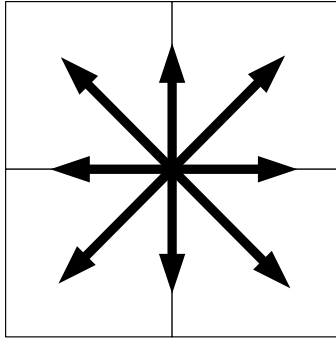


图3 无人机运动节点扩展

在任务过程中匀速飞行,并设第 $i$ 架无人机第 $j$ 段网格节点路径间的航时为 $t_i^j$ ,则该约束可表示为

$$\sum_j t_i^j \leq T_{\max}^i$$

### 2.2.2 无人机编队拓扑

为避免目标位置移动对打击效果的影响,异构载荷的多无人机组成侦察打击混成编队,如图4所示,旨在实现对目标的即察即打。

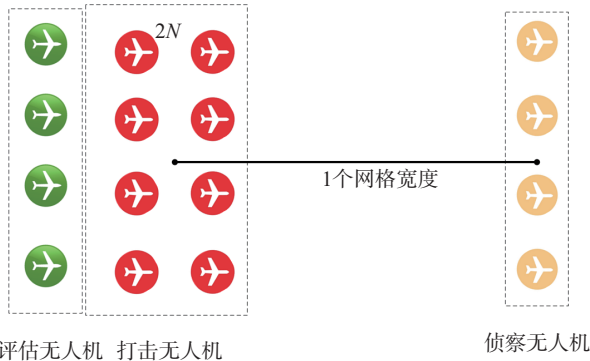


图4 无人机编队拓扑示意图

每个编队包括侦察无人机、打击无人机和用于打击评估的侦察无人机。侦察无人机采用“一”字形扩大侦察范围,其数量 $M$ 由式(2)确定。

$$M = \left\lceil \frac{2R_{\min}}{d_s} \right\rceil \quad (2)$$

其中, $d_s$ 为侦察无人机的侦察宽度, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符。

根据目标聚类结果,为每个编队配置 $2N$ 架打击无人机,跟随在侦察无人机后方,距离为1个网格宽度,为无人机阵型变动留出机动时间与空间。其中, $N$ 为疑似目标数量。

## 3 基于A\*的多向打击航迹规划

### 3.1 基于A\*的基准侦察航迹规划

选取所有目标的西南方向某点为网格地图原点,选取原则为:将所有目标囊括在网格地图中,并使所有目标距离地图原点2个网格以上,以保证编队无人机具有一定的机动距离。

选用A\*算法规划得到无人机编队的基准侦察航迹,具体实现方法包括如下步骤:

步骤1:创建OPEN集与CLOSED集,其中OPEN集用来存放已经产生但是没有扩展的节点,CLOSED集用来存放已经被扩展的节点。初始化时,将A\*地图起点装入OPEN集,CLOSED集清空。

步骤2:若OPEN集为空,则规划失败,规划结束。若OPEN集不为空,则从OPEN集中选取代价值最小的节点作为当前的节点,将其从OPEN集移入CLOSED集。并将代价值最小的节点标记为Best。

步骤3:判断是否抵达整合的目标节点,若抵达目标节点,则将目标节点放入CLOSED集,依次回溯每一步生成的节点,生成当前段基准侦察航迹,执行步骤4。若尚未抵达目标节点,则执行步骤5。

步骤4:判断是否完成所有目标节点的遍历侦察航迹规划,若完成所有目标的遍历侦察航迹规划,则基准航迹生成,基准侦察航迹规划结束;若尚未完成所有目标的遍历侦察航迹规划,则以当前目标点为起点,下一个目标点为终点,执行步骤5。

步骤5:以步骤2中节点Best为中心,向四周四角和四角的中点这八个点创建待扩展空间,计算每个待扩展节点的代价值,选取代价值最小的装入OPEN集,继续执行步骤2。所述每个待扩展节点的代价值 $f$ 为

$$f = g + h \quad (3)$$

其中, $g$ 为起始点到此待扩展节点的代价值, $h$ 为由该待扩展节点到目标点的估计代价值,其中估计代价值可根据忽略障碍物情况下,待扩展节点到目标点的直线距离长度计算得到。所述扩展节



点的代价值即为节点距离。

3.2 基于规则的多向打击航迹快速扩展

侦察无人机将目标识别结果，包括目标价值和目标位置等，传递给打击无人机。打击无人机根据表 1 中目标价值分类，分配相应数量的无人机用于执行对当前目标的打击，如图 5 所示。

若打击无人机数量充足，则分配需用数量的无人机用于打击；若编队剩余的打击无人机数量不足以完成对目标的多角度打击要求，则按照剩余可分配的打击无人机数量在表 1 中对应的目标价值标号对当前目标的价值标号进行降级修改，使得剩余的无人机全部用于对当前目标的多角度打击。

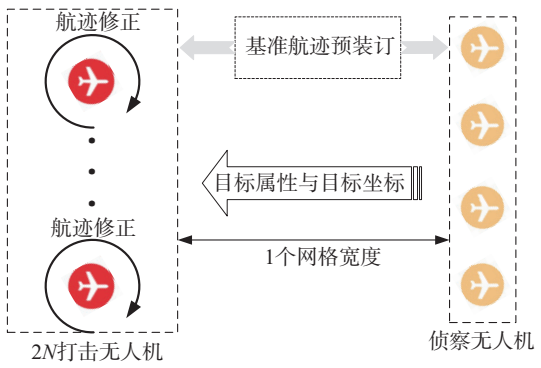


图 5 无人机通信内容示意图

本文提出了不同情况下多角度打击航迹的生成规则：

若整合后的目标节点与其前一个侦察航迹节点存在  $x$  或  $y$  坐标分量相同，两节点分别标记为  $T$  和  $S_1$ ，则取  $S_1$  与  $T$  的路径中点为过渡节点，记为节点  $A$ ，向  $S_1$  与  $T$  连线的两侧扩展转弯半径对应的网格距离，生成过渡节点  $A'$  和  $A''$ 。

若整合后的目标节点与其前一个侦察航迹节点  $x$  或  $y$  坐标分量均不相同，两节点分别标记为  $T$  和  $S_2$ ，则取  $S_2$  与  $T$  的路径中点为过渡节点，记为节点  $B$ ，在节点  $B$  所在的网格内，由节点  $B$  向与  $T$  连线的两条网格边线中点扩展，生成过渡节点  $B'$  和  $B''$ 。

以上两种情况包括了所有的基准侦察路径情况，在确定打击航迹后，将打击航迹的末节点替换为真实的目标节点坐标，实现对真实目标位置

的打击。不同情况下多角度打击航迹生成规则如表 2 和图 6 所示。

表 2 不同情况下多角度打击航迹生成规则

分类	目标节点与前一节点相对位置	打击航迹		
			1 打击	$S_1 \rightarrow A \rightarrow T$
1	节点坐标的 $x$ 分量或 $y$ 分量相同	3 打击	2 打击	$S_1 \rightarrow A' \rightarrow T$
				$S_1 \rightarrow A'' \rightarrow T$
2	节点坐标 $x, y$ 分量均不相同	3 打击	1 打击	$S_2 \rightarrow B \rightarrow T$
			2 打击	$S_2 \rightarrow B' \rightarrow T$
				$S_2 \rightarrow B'' \rightarrow T$

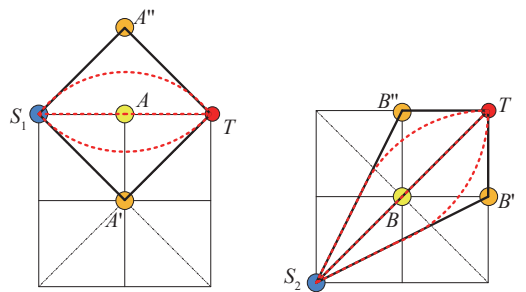


图 6 基于基准侦察航迹的多向打击航迹扩展规则

综上所述，多无人机实时多向打击航迹规划的流程如图 7 所示。

4 仿真算例及结果分析

为验证本文所提出方法的有效性与实时性，仿真基于 Microsoft Visual Studio 2015 平台进行，采用 C++ 语言实现，系统处理器能力为 Intel (R) Core8 i7 CPU@3.40 GHz。

4.1 仿真算例设置

选取某型无人机作为仿真验证对象，其飞行速度 30 m/s，航时 1 h，最小转弯半径  $R_{\min}=150$  m；侦察载荷的有效探测宽度为 80 m。任务区域为边长 3 km 的方形区域，任务区域被分为  $10 \times 10$  网格，网格宽度为  $2R_{\min}$ 。

根据目标位置，确定网格地图的坐标原点，作为多无人机的初始位置。再结合目标聚类信息，对携带侦察载荷的无人机进行航迹规划，得到最短的基准侦察航迹，携带打击载荷的无人机跟随在侦察无人机后方 1 个网格宽度距离。在对疑似目标的侦察过程中，侦察载荷对目标的位置和价值进行再确认，并将真实目标信息传递给打击无



1、2、3、4归于一簇，记作A簇；目标5、8、10归于一簇，记作B簇；目标6、7、9归于一簇，记作C簇。仿真结果如图8~图9、表4所示。

图8为编队中侦察长机航迹、每个编队侦察聚类后的一簇目标。无人机编队实现了对所有目标的有效侦察，并将目标的价值传递给打击无人机，并标注于图8。

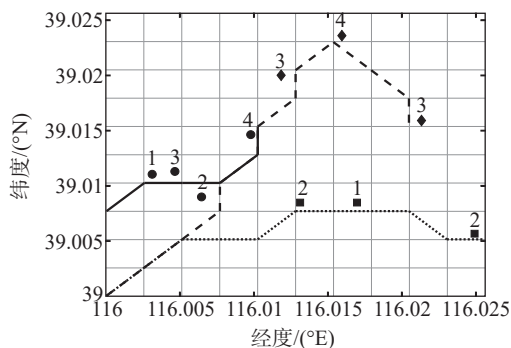


图8 多目标的编队侦察航迹规划结果

编队的无人机分配结果如表4所示。每个编队配置的打击无人机数量满足对目标的打击需求。

表4 无人机编队载荷分配结果

编队	侦察UAV	打击UAV	评估UAV	需求
1	4架	8架	4架	满足
2	4架	6架	4架	满足
3	4架	6架	4架	满足

图9为编队中打击无人机的多向打击航迹。

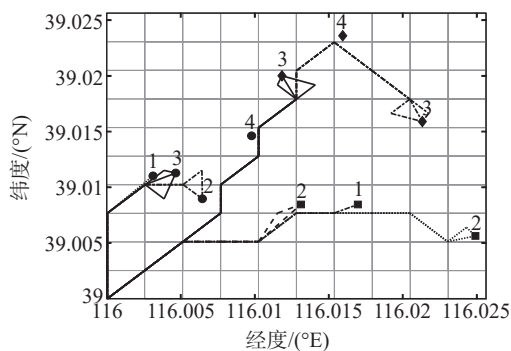


图9 多目标的多向打击航迹规划结果

由图9可知，无人机编队可以实现对不同价值目标的多向打击，且对于假目标，无人机编队不做出打击机动，规划的路径合理可用。同时，算法的规划时长仅需0.03 s，具有一定的规划实

时性。

#### 4.2.2 目标动态增减时的实时航迹规划

假定在任务执行1 min时，任务区域内增加2个目标，其参数信息如表5所示。此时编队无人机数量已固定，针对更新的目标进行航迹重规划。

表5 新增目标信息

编号	经度/(°E)	纬度/(°N)	价值度
11	116.00717658641	39.01486578614	2
12	116.02076083927	39.00538243981	2

经过聚类，目标11归于A簇，目标12归于B簇，那么，针对A簇和目标B簇目标的基准侦察航迹和打击航迹如图10~图13所示。

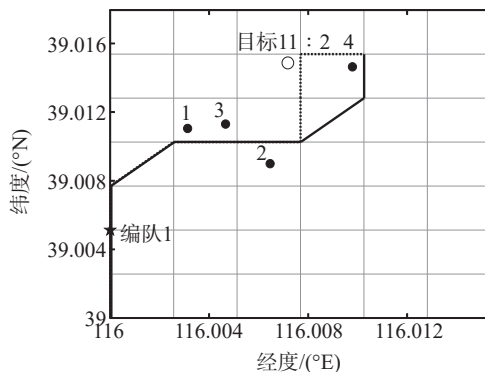


图10 A簇目标基准侦察航迹对比

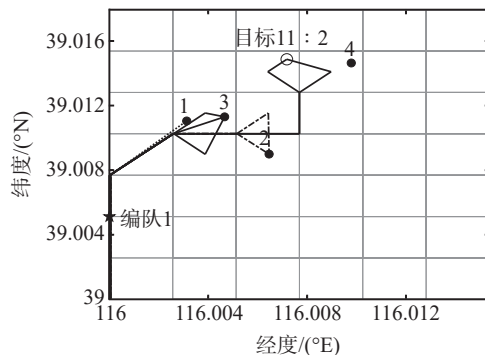


图11 A簇目标打击航迹更新

为避免图中内容混乱，仅展示相应簇目标的规划结果，星形为1 min时无人机编队所在位置。编队执行任务的过程中，编队配置不再改变。

结合图8~图9可知，编队1完成对目标1、2、3的打击后，用剩余2架打击无人机完成了对新增目标11（价值度2）的多向打击。编队2首先完成

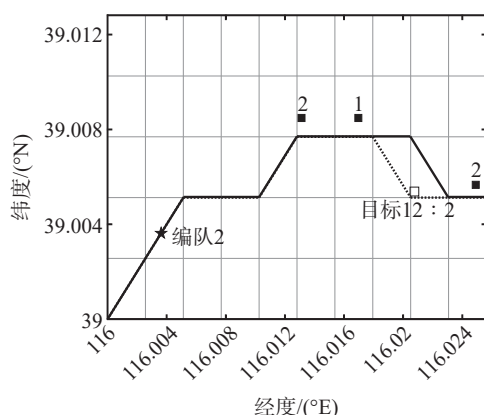


图12 B簇目标基准侦察航迹对比

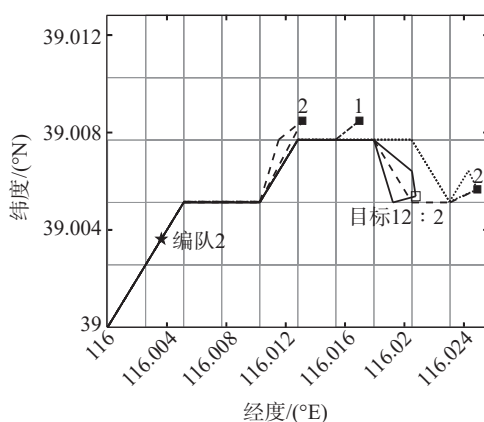


图13 B簇目标打击航迹更新

了对目标5、8、12的多向打击,在对新增目标12(价值度2)打击时,仅剩1架打击无人机,因此算法使目标10价值度降级为1,即剩余的打击无人机全部用于对目标10的打击。

当疑似目标动态减少时,可直接将该点标记为假目标(价值度4),仅进行侦察而不打击。

通过航迹重规划的方法可得到编队无人机的可行航迹,需用时间约0.03 s,占用规划板硬件资源少,能够满足多无人机航迹规划和重规划的实时性要求,具有较高的实用价值。

## 5 结束语

航迹规划是多无人机协同作战的关键技术之一。本文提出了一种基于规则的多向打击航迹快速扩展方法,使得异构载荷无人机编队可实时实现多无人机任务分配、侦察航迹规划和多向打击航迹规划。该算法具有较高的规划效率,对硬件

资源占用较少,具有一定的算法移植实用能力,实现方案具有较高的任务实时性和广阔的作战应用场景。

## [参考文献]

- [1] 陈开生, 刘南. 无人机作战运用与发展趋势研究[J]. 科技信息, 2007, (3): 9-19.
- [2] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49 (3): 1-14.
- [3] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [4] 吴蔚楠. 多无人飞行器分布式任务规划技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [5] 张民强, 宋建梅, 薛瑞彬. 通信距离受限下多无人机分布式协同搜索[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35 (11): 2980-2986.
- [6] 王国强, 罗贺, 胡笑旋, 等. 无人机编队管理的研究综述[J]. 电光与控制, 2013, 20 (8): 48-53.
- [7] Yu X, Zhang Y. Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: review and prospects [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 74: 152-166.
- [8] 王维平, 刘娟. 无人飞行器航迹规划方法综述[J]. 飞行力学, 2010, 28 (2): 6-10.
- [9] Wu J, Deer B, Feng X, et al. GA based adaptive singularity-robust path planning of space robot for on-orbit detection[J]. Complexity, 2018, 2018: 1-11.
- [10] Choi H, Kim Y, Kim H. Genetic algorithm based decentralized task assignment for multiple unmanned aerial vehicles in dynamic environments [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2011, 12 (12): 163-174.
- [11] Wang Z, Liu L, Long T, et al. Multi-UAV reconnaissance task allocation for heterogeneous targets using an opposition-based genetic algorithm with double-chromosome encoding [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31 (2): 339-350.
- [12] 徐卓. 基于神经网络算法的无人机航迹规划研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
- [13] Lu E, Xu L, Li Y, et al. A novel particle swarm optimization with improved learning strategies and its application to vehicle path planning [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, (8): 1-16.

(下转第112页)



- control of hypersonic flight vehicle with parametric uncertainty and actuator fault [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 92 (3): 1299–1315.
- [14] 郭超, 梁晓庚, 王雯. 基于ADP的高超声速飞行器非线性最优控制[J]. *火力与控制*, 2014, 39 (6): 77–81.
- [15] Dhar N K, Verma N K, Behera L. Adaptive critic-based event-triggered control for HV AC systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14 (1): 178–788.
- [16] Parker J T, Serrani A, Yurkovic S, et al. Control-oriented modeling of an air-breathing hypersonic vehicle [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30 (3): 856–869.
- [17] Bolender M A, Doman D B. Nonlinear longitudinal dynamical model of an air-breathing hypersonic vehicle [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, 44 (2): 374–387.
- [18] Xu B, Gao D X, Wang S X. Adaptive neural control based on HGO for hypersonic flight vehicles [J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54 (3): 511–520.
- [19] Bu X W, Wu X Y, Chen Y X, et al. Design of a class of new nonlinear disturbance observers based on tracking differentiators for uncertain dynamic systems [J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2015, 13 (3): 595–602.
- [20] 张吉烈. 基于单网络模糊及无模型自适应动态规划最优控制方法的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [21] Wang X H, Chen Z Q, Geng Y. Finite-time-convergent differentiator based on singular perturbation technique [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52 (9): 1731–1737.
- 
- (上接第101页)
- [14] 马华伟, 朱益民, 胡笑旋. 基于粒子群算法的无人机舰机协同任务规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38 (7): 1583–1588.
- [15] Rouse D M. Route planning using pattern classification and search techniques [C]. *Aerospace and Electronics Conference, NAECON, Proceedings of the IEEE 1989 National, IEEE*, 1989.
- [16] Jason K Howlett, Timothy W McLain, Michael A Goodrich. Learning real-time A\* path planner for unmanned air vehicle target sensing [J]. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2006, 3 (3): 108.
- [17] 李世晓, 朱凡, 张健, 等. 改进A\*算法的多约束航迹规划[J]. *电光与控制*, 2014, 21 (7): 36–40.
- [18] 杨润洲, 丁勇, 张承果. 基于DTW的改进A\*算法在航迹规划中的应用[J]. *电光与控制*, 2016, 23 (6): 5–10.
- [19] 杨俊闯, 赵超. K-Means聚类算法研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55 (23): 7–14.
- [20] Jain A K. Data clustering: 50 years beyond K-means [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31 (8): 651–666.
- [21] Alemayehu T S, Kim J H. Efficient nearest neighbor heuristic TSP algorithms for reducing data acquisition latency of UAV relay WSN [J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 95 (3): .