

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0022

一种多机协同打击的快速航迹规划方法

陈清阳*, 辛宏博, 王玉杰, 唐钟南, 贾高伟, 朱炳杰

(国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对多架自杀式无人机对重要目标进行协同打击的问题, 在飞行器运动学、飞行器碰撞、时空协同等约束条件下, 提出了一种空间分层分布的协同打击策略, 在满足飞行器碰撞约束的前提下, 有效提高了对重要目标防御系统的抵抗能力与飞行器自身的生存率。在此基础上, 进一步提出了一种空间协同的多机打击快速航迹规划方法, 结合 Dubins 曲线, 将飞行器数目增加带来的计算量指数增长的问题, 转化为多项式乘积形式的计算量, 实时生成满足时空协同要求的次优航迹。通过仿真实验与实际飞行试验验证了所提方法的有效性, 无人机可以在生成航迹的引导下, 有效到达打击目标。

关 键 词: 自杀式无人机; 协同打击; 空间分层; 碰撞约束; 航迹规划; Dubins 曲线

中图分类号: V249.122+.3

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2022)07-1145-09

随着通信、电子、控制等技术的飞速发展, 无人机越来越广泛地出现在人们的日常生活中。从民用的无人机航拍、航测、农业植保运用、电力巡线、货物运输等, 到军用的情报收集、区域侦察、目标监视等运用, 无人机正以一种快速发展的态势, 渗透到人们生活的方方面面。尤其是随着美国、俄罗斯、以色列等军事强国在军用无人机方面的大量投入, 高空长航时无人机、察打一体无人机、穿透型隐身无人机也在飞速发展。其中, 小型的自杀式巡飞弹或无人机, 以其低成本、方便携带等特征, 逐渐成为人们关注的焦点。

在自杀式无人机的广泛应用中, 采用多机协同进行饱和攻击, 可以以较低的成本、较高的成功率实现对高价值目标的有效打击, 降低不断增强的区域协同防空系统带来的影响, 具有重要的应用前景^[1-4]。协同的过程, 可以从空间和时间 2 个维度进行定义。时间上的协同, 期望多个自杀式无人机能同时到达打击目标, 或按照预定的时间顺序与间隔到达打击目标; 空间上的协同, 则期望

多个无人机以空间均匀分布的方式, 到达打击目标, 或按照期望的间距和队形到达打击目标。目前关于时间协同的研究较多^[5-8], 关于空间协同的研究较少。同时考虑时间与空间的多维约束, 会给问题求解的过程增加更多的约束条件, 大大增加问题的复杂度与所需的计算时间。基于 Dubins 曲线的多机协同航迹规划方法, 是一种相对简单且能满足一定实时性要求的常用方法。文献 [9-10] 提出了基于 Dubins 曲线的多机协同航迹规划方法, 多架飞机期望能同时到达预定的多个目标, 考虑了多机之间的冲突、路径长度的调整等因素, 并在文献 [11] 中拓展到三维空间中。文献 [12-13] 为了提高航迹的可跟踪性, 采用毕达哥拉斯曲线代替 Dubins 曲线, 保证了曲率的连续性, 同时基于所设计的毕达哥拉斯曲线, 路径长度的调整可以通过曲率的实时搜索来实现, 具有一定的可行性, 但没有针对路径之间的冲突所带来的反复搜索问题进行详细讨论, 难以保证在存在冲突的情况下, 实时计算得到每架飞行的期望航

收稿日期: 2021-01-15; 录用日期: 2021-05-07; 网络出版时间: 2021-05-17 15:47

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210517.1350.001.html

基金项目: 国家自然科学基金 (61801495)

* 通信作者: E-mail: chy1982_008@nudt.edu.cn

引用格式: 陈清阳, 辛宏博, 王玉杰, 等. 一种多机协同打击的快速航迹规划方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(7): 1145-1153. CHEN Q Y, XIN H B, WANG Y J, et al. A rapid path planning method for multiple UAVs to cooperative strike [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(7): 1145-1153 (in Chinese).

迹。文献[14]引入了 Bezier 曲线进行多机协同航迹规划,同时通过对形状参数的搜索,对多机之间的路径进行调整,保证多机之间的时间同步性。文献[2]将 Dubins 曲线运用于多弹协同打击的中段航迹生成过程,同时针对末段打击的制导方法进行研究,提出了一种多弹协同对目标进行时空一致饱和攻击的方法,并进行了仿真验证。文献[15]针对给定时间约束下的多无人机最优集结问题进行研究,提出了一种基于时域映射的分布式优化框架,对无人机的状态与指令进行决策与优化,最终保证多架无人机在给定时间内集结到给定位置,并通过仿真实验进行了验证。文献[16]提出了一种多智能体信息协同的一致性算法,不管在有无外部基准输入的情况下,都能保证多个智能体之间的信息与行为的一致性,并通过仿真实验进行了验证。上述方法都对多架无人机或多个智能体之间的时间协同与一致性问题进行了研究,并针对曲率连续性、路径之间的冲突等问题进行了分析。但是,面向多机协同对高价值目标进行饱和攻击的需求,仍存在一定的局限性:

1) 在存在路径冲突的情况下,上述方法都是通过反复迭代搜索来实现的,迭代的过程难以保证在有限的时间内实时得到可行的解。尤其是在多机饱和攻击的需求下,飞行器数目的增加更会导致计算量与计算时间指数增长。

2) 对于多机饱和攻击的需求,为了有效降低敌方防空系统的影响,一般是期望多机以空间均匀的方式到达打击目标,因此,对空间上的协同也具有较高的要求。如何将上述方法拓展到时间与空间的多维约束下,也是需要解决的问题。

针对上述两方面的难点,本文提出一种空间协同约束下的多机打击快速航迹规划方法。与其他方法相比,具有以下创新点:

1) 为了有效降低敌方防空系统的影响(避免同一高度的无人机,容易被敌方的转动式防御武器顺序各个击破),同时解决多机航迹规划中的冲突判断与消解问题,提出一种空间分层分布的安全高效协同打击策略,以空间的分层分布,解决多机之间可能存在的航迹冲突与迭代搜索。

2) 为了解决飞行器数目增加带来的计算量指数增长的问题,提出一种空间协同约束下的快速航迹规划方法,通过降低对路径最短(时间最短)的要求,来顺序搜索满足空间均匀分布的各个无人机与过渡目标状态之间的对应关系,将指

数搜索的过程转化成多项式搜索的过程,有效提高问题求解效率。

3) 基于 Dubins 曲线的航迹表示方法,可以通过半径参数的优化来对多机的航迹进行同步,以某一飞机的参考航迹为基准,对其余飞机的半径进行求解,得到满足同步要求的多机航迹。

1 问题描述

多机协同打击任务定义如下: 沿着初始期望航线飞行的多架自杀式无人机,在某一时刻接收到地面控制站的指令,向地面某一高价值目标进行打击。考虑敌方对高价值目标的防御,将多个无人机对目标打击的过程分成 2 段:

1) 在中制导段,为了提高多机协同打击的效果,多架无人机沿着地面控制站规划的期望航迹飞行,期望在相同的时间到达敌方防御圈。在向目标防御圈飞行的过程中,允许多机之间存在一定的通信,通过相互之间的信息共享进行速度/航线的调节,以提高多机之间的同步性。

2) 在末制导段,多架无人机启动末端打击制导模式,相互之间不再通信。机载控制系统以打击过程设置的预定打击时间为优化目标,对无人机的飞行速度/航迹进行调节,以实现多机同时到达与打击目标的效果。

目前针对末制导的研究较多,都围绕着地面控制站发现目标后,实时规划多架自杀式无人机向目标防御圈飞行的期望航迹的问题进行研究,示意图如图 1 所示。

针对图 1,对本文涉及的一些变量进行定义。无人机的初始状态为 $p_i = (x_i, y_i, \theta_i)$,下标 i 表示无人机的初始状态 (x_i, y_i) 为无人机的初始位置信息, θ_i 为无人机的初始航向角信息。对于 N 架无人机对目标打击的问题来说,第 j 个无人机的初

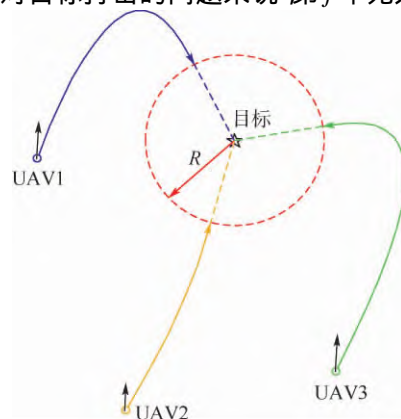


图 1 多机协同打击航迹规划问题示意图

Fig. 1 Demonstration of path planning problem for cooperative strike with multiple UAVs

始状态表示为 $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, \theta_{ij})$, $1 \leq j \leq N$, 下标 j 表示无人机的编号。

为了计算无人机向目标威胁圆飞行的期望航迹, 定义无人机到达目标威胁圈的状态为过渡目标状态, 无人机在目标威胁圆(假设重要目标的防御圈为一个圆柱形的区域, 投影到平面上为一个半径为 R 的圆)上的可选过渡目标状态为 $p_f = (x_f, y_f, \theta_f)$ 。考虑到飞行器控制系统的感知精度、控制精度等因素, 将 $[0, 2\pi)$ 范围的圆心角进行离散化, 离散分辨率为 $\Delta\varphi$, 则可选的过渡目标状态数目为 $M = \left\lceil \frac{2\pi}{\Delta\varphi} \right\rceil$, 可选过渡目标状态的集合为 $p_{fg} = (x_{fg}, y_{fg}, \theta_{fg})$, $1 \leq g \leq M$, 下标 f 表示无人机过渡目标状态, 下标 g 表示过渡目标状态序号。

根据上述状态定义, 中制导段的协同航迹规划问题, 先要解决的是通过算法生成期望航迹 $f(j, g) = (f_x, f_y)$, 建立从 p_{ij} 到 p_{fg} 的映射关系:

$$p_{ij} \xrightarrow{f(j, g)} p_{fg} \quad 1 \leq j \leq N, 1 \leq g \leq M \quad (1)$$

同时满足以下要求:

1) p_{fg} 在威胁圆上均匀分布, 即 $\|\theta_{fg_a} - \theta_{fg_b}\| = l \frac{2\pi}{N} (1 \leq g_a \leq M, 1 \leq g_b \leq M, g_a \neq g_b, 1 \leq l \leq N-1)$ 。

$$2) \frac{\|f(1, g_1)\|}{v_1} = \frac{\|f(2, g_2)\|}{v_2} = \dots = \frac{\|f(N, g_N)\|}{v_N},$$

其中, $\|f(j, g_j)\|$ 为对应第 j 架无人机到达第 g_j 个过渡目标状态的期望路径的长度, v_j 为第 j 架无人机的飞行速度(地速)。由于本文考虑的自杀式无人机是属于同一构型的飞行器, 忽略风速的影响(风速对飞行器之间同步性的影响, 在飞行器沿着规划航迹飞行的过程中, 通过一定范围内的速度调节来解决), 在航迹规划阶段可以认为 $v_1 = v_2 = \dots = v_N$, 因此, 该条件可以简化为 $\|f(1, g_1)\| = \|f(2, g_2)\| = \dots = \|f(N, g_N)\|$ 。

除了满足上述时间与空间的约束, 在航迹规划的过程中, 还必须考虑以下约束条件:

1) 飞行器的运动学约束。本文主要考虑无人机的最小转弯半径, 即 $|k_{f(j, g)}| \leq k_{\max}$, 其中 $k_{f(j, g)}$ 为 $f(j, g)$ 路径上任意一点的曲率, k_{\max} 为无人机飞行过程中所允许的最大曲率。

2) 飞行器之间的碰撞约束。为了保证无人机自身的安全性, 必须保证飞行器之间在任意时刻不会发生碰撞, 即

$$\|f(j, g_r) - f(j_q, g_q)\| \geq D \quad (2)$$

$$1 \leq r \leq N, 1 \leq q \leq N, r \neq q$$

式中: $f(j, g_r)$ 为第 r 架无人机沿着期望航迹飞行, 在 t 时刻预期到达的位置; $f(j_q, g_q)$ 为第 q 架无人机沿着期望航迹飞行, 在 t 时刻预期到达的位置; D 为无人机飞行过程中所允许的最小安全间距。

2 空间分层分布的协同打击策略

针对上述多约束条件下的协同航迹规划问题, 本节采用一种空间分层分布的协同打击策略与顺序搜索的次优路径快速生成方法相结合的模式, 对各个约束条件“分而治之”。首先, 针对飞行器之间的碰撞约束, 规划航迹之间冲突检测与消解是一个复杂的迭代过程, 尤其是在考虑时间属性的情况下, 导致计算的维度从单纯的空间位置判断, 升级到含有时间属性的序列点的比较与不断优化, 计算量大大增加。目前, 相关的方法难以在有效时间内判断出可能存在的冲突, 并计算出有效的应对策略。因此, 本文采用图2所示的空间分层分布的协同打击策略。无人机在初始时按照一定的队形, 沿着一定的航线和高度飞行, 在发现打击目标后, 地面控制站根据每架无人机的状态与后续空间约束下的多无人机协同打击快速航迹规划方法得到的结果, 进行一种高度上的有效分布, 得到类似图2所示的效果(定义无人机到达过渡目标状态的高度以 H 为中间位置, 往上按照 ΔH 的间隔逐层递加, 往下按照 ΔH 的间隔逐层递减)。以选定的 UAV1 为基准(沿着高度 H 的平面飞行), 沿着逆时针方向, 随着方位角的变化, 按照 $H + \Delta H, H - \Delta H, H + 2\Delta H, H - 2\Delta H, \dots$ 的顺序, 将对应不同方位角的无人机分配到不同的高度平面。为了保证无人机在向规划航迹飞行的过程中不会发生相互碰撞, 不同的高度层所对应的无人机, 即按照初始状态下 N 架无人机的高度顺序进行分配, 从而有效降低计算量, 同时保证无人机之间的安全性。

通过上述空间分层进行协同航迹规划的思想, 一方面可以解决飞行器之间的碰撞约束, 减轻后续航迹搜索的计算压力, 保证算法的实时性; 另一方面, 针对敌方防空武器系统来说, 为了防御上述饱和攻击的自杀式无人机, 转动式的防御系统需要实现一种方位和俯仰无规则运动的控制模式, 尤其是俯仰方向的频繁加减速运动, 对敌方控制系统提出了更高的要求, 可以有效提高自杀式无人机的生存率。基于该空间分层的协同打击策略, 在后续的快速航迹规划方法设计中, 就不再考虑飞行器之间的碰撞约束。

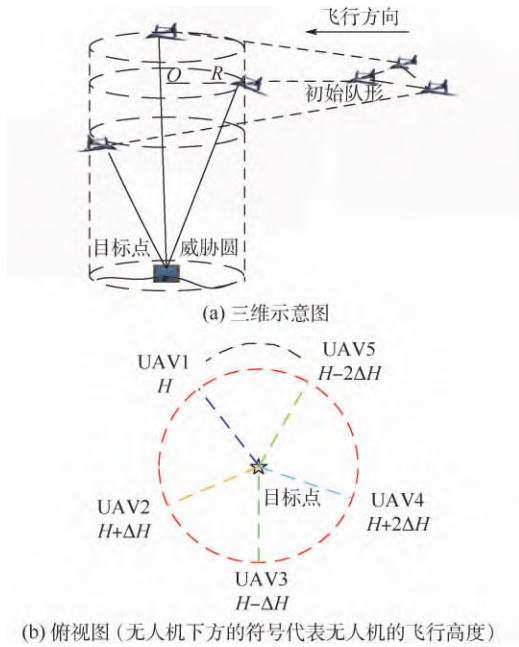


图2 空间分层分布的协同打击策略示意图
Fig.2 Demonstration of cooperative strike strategy
based on hierarchical space distribution

3 空间协同的多机协同打击快速航迹规划方法

空间分层分布的协同打击策略,只是考虑了无人机航迹搜索的平面,但是距离完成空间和时间协同的打击要求,还存在较大的差距。本节提出一种顺序搜索的次优路径快速生成方法,在保证规划路径接近最优性的前提下,将飞行器数目增加带来的计算量指数增长的问题,转化为飞行器数目与可选过渡目标状态数目乘积的形式,有效提高搜索效率,保证方法的实时性。在所设计的方法中,考虑 Dubins 曲线所具有的路径最短、位置/航向连续、圆形曲线半径与路径长度的直接映射关系等特性,采用 Dubins 曲线作为基本的路径曲线。

3.1 Dubins 曲线

为了解决空间机器人在 2 个构型(早期主要考虑地面的移动机器人,主要考虑的状态信息包括位置和方位)之间运动的路径生成问题,Dubins^[17]于 1957 年提出了由 2 个最小转弯半径的圆弧和 1 段直线连接所构成的最短路径,并命名为 Dubins 曲线^[18]。Dubins 曲线的 4 种基本形式如图 3 所示。

由图 3 可见,Dubins 曲线一般由 3 段基本曲线组成。其中,初始段和终止段由满足机器人运动学约束的最大曲率的圆弧组成,初始段圆弧同时与机器人的初始方位角相切,终止段圆弧同时

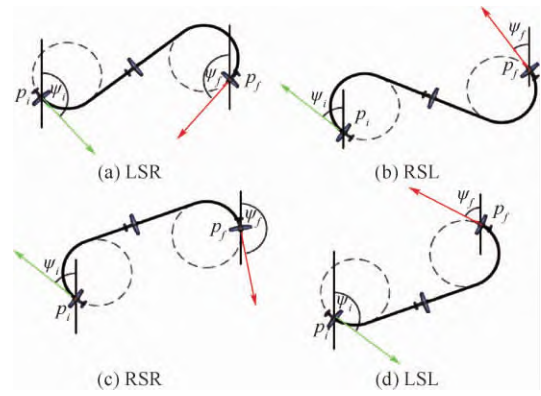


图3 Dubins 曲线的 4 种构型

Fig.3 Four different types of Dubins curves

与机器人的期望方位角相切。在初始段圆弧与终止段圆弧之间,由一段与 2 个圆弧相切的直线构成。根据该设计,Dubins 曲线一般主要包括 4 类,分别为 LSL、LSR、RSR、RSL(L 代表逆时针盘旋的圆弧,R 代表顺时针盘旋的圆弧,S 代表直线段)。该曲线能保证所生成的航迹满足机器人的位置和方位角连续的要求。同时,Dubins^[17]也证明了,最小转弯半径的圆弧与中间的切线所构成的曲线,是满足位置/方位约束的最短路径。

在应用 Dubins 曲线解决移动机器人的路径规划问题时,一般采用的是先计算满足初始状态和目标状态(位置/方位)的 4 条 Dubins 曲线,对 4 条 Dubins 曲线进行比较,再选择其中最短的曲线,用于移动机器人的控制。4 种类型的 Dubins 曲线的长度计算分别如下所示。

本文中讨论的无人机的初始状态为 $p_i = (x_i, y_i, \theta_i)$,过渡目标状态为 $p_f = (x_f, y_f, \theta_f)$,对应 RSR 类型的 Dubins 曲线的初始圆心为(方位角定义顺时针为正,范围为 $[-\pi, \pi]$,无人机的最小转弯半径为 R_{\min})

$$\begin{cases} x_{oi} = x_i + R_{\min} \sin(\theta_i + \pi/2) \\ y_{oi} = y_i + R_{\min} \cos(\theta_i + \pi/2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: (x_{oi}, y_{oi}) 为针对初始状态的圆心的坐标。

针对目标状态的圆心为

$$\begin{cases} x_{of} = x_f + R_{\min} \sin(\theta_f + \pi/2) \\ y_{of} = y_f + R_{\min} \cos(\theta_f + \pi/2) \end{cases} \quad (4)$$

式中: (x_{of}, y_{of}) 为针对目标状态的圆心的坐标。

从而 RSR 类型的 Dubins 曲线的路径长度 d 为

$$d = \sqrt{(x_{of} - x_{oi})(x_{of} - x_{oi}) + (y_{of} - y_{oi})(y_{of} - y_{oi})} + R_{\min}(\theta_f - \theta_i) \quad (5)$$

其他 3 种类型 Dubins 曲线的路径长度可以类似推导得到。可以发现,路径的长度与圆的半径具有直接的映射关系,既可以根据半径计算相

应路径的长度,又可以在多机协同航迹规划的过程中,根据期望的路径长度,搜索相应的圆形半径。因此,采用 Dubins 曲线作为无人机的基本路径曲线,用于实时的多机协同航迹规划。

3.2 多机协同打击的快速航迹规划方法

以上述 Dubins 曲线为基础,提出一种空间协同的多机协同打击快速航迹规划方法,基本思路如下:

1) 对于 N 个初始状态 $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, \theta_{ij})$, $1 \leq j \leq N$, M 个可选过渡目标状态 $p_{fg} = (x_{fg}, y_{fg}, \theta_{fg})$, $1 \leq g \leq M$ 。根据上述 Dubins 曲线计算出连接所有初始状态与目标状态的最短路径,得到一个 $N \times M$ 的数字矩阵 w_{jg} ($1 \leq j \leq N$, $1 \leq g \leq M$), 以及相应的 $N \times M$ 条 Dubins 曲线 f_{ij-gfg} 。为了后续搜索方便,不失一般性,在计算与存储 $N \times M$ 数字矩阵的过程中,假设每一列过渡目标状态的方位角是一致的,第 g 列的过渡目标状态的方位角为 $(g-1)\Delta\varphi$ 。

$$\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1M} \\ w_{21} & w_{22} & & w_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{N1} & w_{N2} & \cdots & w_{NM} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) 对数字矩阵进行搜索,得到 $N \times M$ 个数据中的最小值 w_{nm} ,从而确定对应第 n 个无人机的过渡目标状态为 p_{fm} (p_{fm} 的方位角为 $(m-1)\Delta\varphi$), 得到数据结构 $[p_{in}, p_{fm}]$, 并计算由 p_{in} 和 p_{fm} 所确定的最短可行路径 f_{in-gfm} , 重新标记为 $[p_{i1}, p_{f1}, f_{i1-gf1}]$ 。

3) 将数字矩阵中的第 n 行和第 m 列删除,得到一个 $(N-1) \times (M-1)$ 的矩阵。

4) 以 $(m-1)\Delta\varphi$ 为起始状态,相隔 $\Delta\theta = 2\pi/N$ 确定一个过渡目标状态的方位角 $((m-1)\Delta\varphi + \Delta\theta)$, 在 $(N-1) \times (M-1)$ 的矩阵中对应 $\left\lceil \frac{((m-1)\Delta\varphi + \Delta\theta)}{\Delta\varphi} \right\rceil$ 所在的列 ($\lceil \cdot \rceil$ 是对数值取整的操作), 寻找列中最小的数值, 根据最小数值所在的行数确定对应 $((m-1)\Delta\varphi + \Delta\theta)$ 方位角的无人机, 得到 $[p_{i2}, p_{f2}, f_{i2-gf2}]$ 。

5) 重复步骤 3) 和步骤 4), 直到找到 N 个过渡目标状态所对应的 N 架无人机, 得到新的结构数组 $[p_{ij}, p_{fj}, f_{ij-gfj}]$ ($1 \leq j \leq N$)。

6) 对 N 条 Dubins 曲线 f_{ij-gfj} ($1 \leq j \leq N$) 的长度进行排序, 确定其中最长的路径, 定义为参考航线。参考航线的长度 L 为

$$L = \max_{1 \leq j \leq N} |f_{ij-gfj}| \quad (7)$$

7) 以参考航线的长度 L 为基准, 根据 3.1 节讨论的 Dubins 曲线的长度与圆弧半径的关系, 对半径参数进行计算, 使得所有的路径长度都与参考航线的长度一致。由于 Dubins 曲线的长度与半径的关系式存在三角函数等非线性函数, 在计算的过程中可以采用二分法等数值方法进行搜索。

需要说明的是, 本文所提出的空间分层分布的协同打击策略中, 无人机在接收到规划航迹, 向目标高度飞行的过程, 存在一个由于高度变化, 从而导致式(5)的期望航线长度的计算存在一定偏差的问题。为了提高飞行器的安全性, 降低多架无人机往目标飞行的过程中, 相互碰撞的风险, 目前采用的策略是在生成 Dubins 曲线之后, 各个飞行器以最大的爬升角或者下滑角, 快速地到达期望的高度层, 再沿着生成的 Dubins 曲线向目标威胁圆飞行。因此, 三维空间中的航线长度计算可以在式(5)的基础上, 采用式(8)进行更准确计算, 从而进一步提高多机协同打击的同步性。

$$d = \sqrt{(x_{of} - x_{oi})(x_{of} - x_{oi}) + (y_{of} - y_{oi})(y_{of} - y_{oi})} + R_{\min}(\theta_f - \theta_i) + \Delta h \left(\frac{1}{\sin \gamma_{\max}} - \frac{1}{\tan \gamma_{\max}} \right) \quad (8)$$

式中: Δh 为无人机向期望高度飞行需要变化的高度差; γ_{\max} 为无人机的最大爬升角或者下滑角。从而可以根据式(8)进行半径参数的搜索与优化。

根据以上方法, 一方面确定了 N 架无人机与对应过渡目标状态之间的映射关系, 实现了 N 架无人机在威胁圆上的均匀分布; 另一方面也生成了用于引导无人机飞行的期望航线。由于是在 Dubins 曲线的基础上进行轨迹延伸, 以保证多架无人机之间的时间同步, 生成的航线能保证无人机在较短的时间内到达威胁圆, 是一种次优的航线。

4 仿真与飞行试验结果

为了验证本文方法, 开展了一系列的仿真与实际飞行试验, 下面对仿真与试验的情况进行详细介绍。

4.1 仿真结果

实验场景设置如下:

1) 8 架无人机起飞后, 沿着预设的航线飞行, 仿真飞机的飞行速度为 19 m/s。

2) 在某一时刻, 地面控制站软件设置了任意的打击目标点与预设的防御圈(防御圈半径设置为 300 m)。

3) 地面控制站软件根据打击目标点进行航

迹规划,并根据生成的航线引导无人机飞行。仿真结果如图 4 所示。

从仿真结果和表 1 的规划结果可以看到,在 8 架无人机飞行并进行协同打击的情况下,所设计的航迹规划方法能实时给出期望的航线(所使用的电脑为 Intel i9-9900 八核处理器,16 GB 内存,所需的计算时间为 5 ms)。同时 8 架飞机沿着生

成的航线飞行,根据表 1 的规划结果与图 4(d)、(e)所示的剩余路径的长度变化,在第 8 295 与 8 296 帧的瞬间(飞行时间大约为 145 s),多架飞机几乎同时到达威胁圆,实现了时间上的协同(路径长度的保存是以离散的点来表示的,因此剩余路径的曲线都是一个一个的台阶,也导致了最终到达时存在一个数据离散化导致的偏差)。

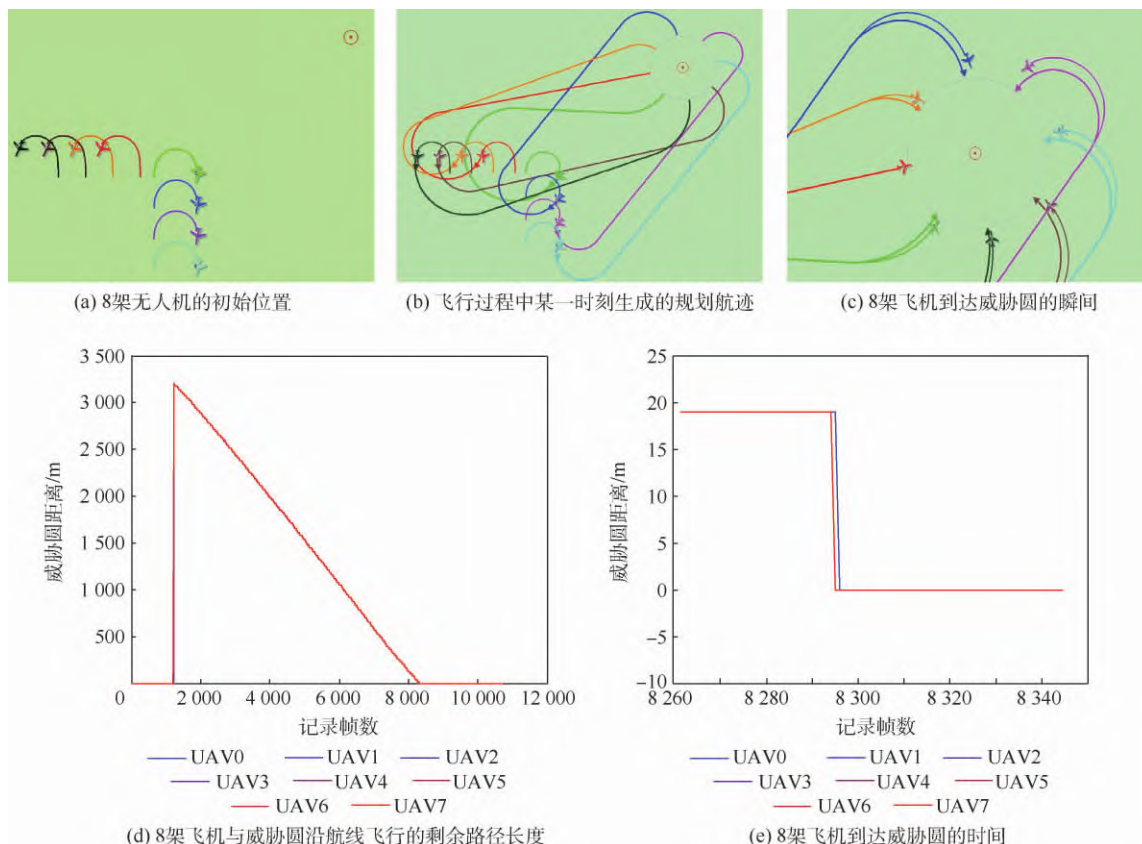


图 4 模拟打击结果

Fig. 4 Simulation results of cooperative strike

表 1 仿真实验的规划结果

Table 1 Planned results during simulation

无人机序号	规划航线长度/m
UAV0	3 232.8
UAV1	3 205.4
UAV2	3 206.1
UAV3	3 197.7
UAV4	3 218.5
UAV5	3 204.6
UAV6	3 218.1
UAV7	3 218.2

4.2 飞行试验

为了进一步对本文方法进行验证,在仿真实验的基础上,笔者所在团队开展了相关的飞行试验。采用如图 5 所示的 3 架泡沫模型机,对地面设定的目标进行模拟打击,该模型机采用电池作为唯一能源,通过电调驱动电机,带动螺旋桨旋转

进行飞行,飞行的速度约为 18 m/s。同时,平台具有较好的俯冲特性(大约能达到 20° 的俯冲角),适合用于开展模拟打击飞行试验。

无人机飞行控制系统采用笔者所在团队自研的 RX-0701 自驾仪(见图 6),自驾仪上集成了三轴陀螺仪、三轴加速度计、三轴磁力计、空速、气压高度、GNSS 导航模块等传感器,通过机载处理器进行传感器融合与导航解算,进一步通过打击制导与控制算法^[19]输出相应的脉冲宽度调制信号驱动机载舵机,控制飞机飞行。同时,为了实时监控飞行器的状态,在必要时给无人机发送一定的控制指令,在控制系统与地面控制站之间配置了 900 MHz 的数传链路,基本的系统框架如图 7 所示。

3 架无人机进行协同打击的试验过程如下:

1) 3 架无人机手抛起飞,在天上沿着预先设定的四边形航线飞行,正常飞行的过程采用文



图 5 飞行试验平台
Fig. 5 Experimental flight platforms



图 6 飞行控制系统
Fig. 6 Flight control system

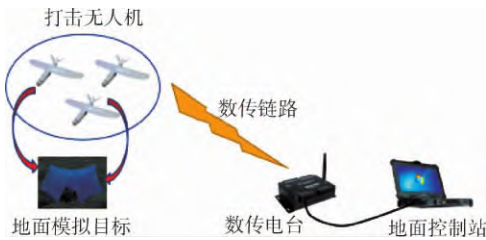


图 7 模拟打击过程系统框架
Fig. 7 Architecture of flight striking system

献 [20] 中的航迹跟踪算法。

2) 在无人机沿着四边形航线飞行的过程中, 地面控制站根据预先布置的地面装备(如图 8 中的伪装网所示) 设定打击的目标点, 并将打击目标点的位置信息, 通过数传链路发送给 3 架无人机(自杀式无人机采用 GNSS 导引的方式, 代替可见光导引的制导方式)。

3) 在某一时刻, 地面控制站向 3 架无人机发送打击指令, 同时将生成的向过渡目标状态飞行的航线发送给无人机上的控制系统。

4) 3 架无人机沿着规划航迹飞行。在飞行的过程中, 3 架无人机按照预先设定的飞行时间与距离过渡目标点的距离, 进行速度的调整^[21], 保证 3 架无人机尽量同步到达过渡目标状态。

5) 在到达过渡目标状态后, 切换到末端打击模式, 采用文献 [16] 中的打击制导算法进行飞行, 并最终实现对模拟目标的打击, 试验结果如图 8 所示。

从图 8 和表 2 可以看到, 本文方法在无人机飞行过程中能实时生成引导无人机到威胁圆的期望航线。无人机在跟踪航线并进行模拟打击的过程中, 能实现基本的时空同步, 3 架无人机接近同一时刻到达模拟打击目标(最终到达模拟目标的最大时间差在 1.3 s), 充分验证了本文方法的有效性。

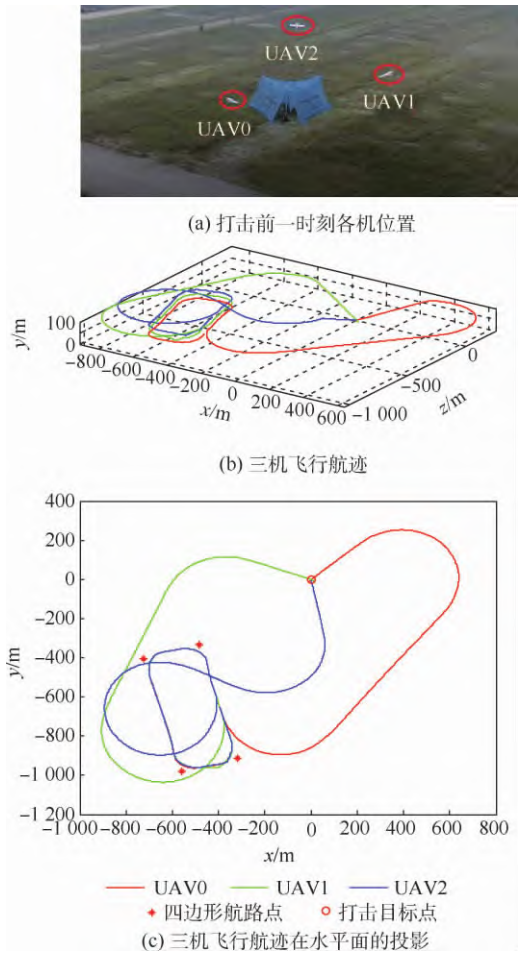


图 8 三机协同打击试验结果
Fig. 8 Experimental results of cooperative strike with three UAVs

表 2 飞行试验的规划结果

Table 2 Planned results during flight experiment	
无人机序号	规划航线长度/m
UAV0	1 876.4
UAV1	1 913.1
UAV2	1 865.8

5 结 论

针对多架自杀式无人机对重要目标进行打击的问题, 本文提出了一种空间分层分布的协同打击策略, 并进一步提出了一种多机协同打击的快速航迹规划方法。

1) 空间分层分布的协同打击策略, 能有效解决多飞行器航迹规划的碰撞问题, 实现对问题的

降维,提高方法的效率与实时性。

2) 空间分层分布的协同打击策略,能有效提高敌方防御系统应对多架自杀式无人机攻击所带来的防御难度,增强无人机自身的生存率。

3) 所提出的快速航迹规划方法,将飞行器数目增加所带来的计算量指数增长的问题,转化为飞行器数目与可选过渡目标状态数目乘积的形式,有效降低计算复杂度,能解决更多飞行器进行饱和攻击所带来的实时性问题。

如何对方法进一步优化,将生成的次优航迹进一步提升为路径最短的最优航迹,是下一步需要研究的内容。同时,如何克服外界风场等扰动的影响,进一步提高无人机之间的时空同步性,也是值得研究的内容。

参考文献 (References)

- [1] KIM H G, KIM H J. Backstepping-based impact time control guidance law for missiles with reduced seeker field-of-view[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 2019, 55(1): 82-94.
- [2] ZENG J, DOU L H, XIN B. A joint mid-course and terminal course cooperative guidance law for multi-missile salvo attack[J]. Chinese Journal of Aeronautics 2018, 31(6): 1311-1326.
- [3] ZHEN Z Y, XING D J, GAO C. Cooperative search-attack mission planning for multi-UAV based on intelligent self-organized algorithm[J]. Aerospace Science and Technology 2018, 76: 402-411.
- [4] DUAN H B, ZHAO J X, DENG Y M, et al. Dynamic discrete pigeon-inspired optimization for multi-UAV cooperative search-attack mission planning[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 2021, 57(1): 706-720.
- [5] LIU X, LIU L, WANG Y J. Minimum time state consensus for cooperative attack of multi-missile systems[J]. Aerospace Science and Technology 2017, 69: 87-96.
- [6] HE S M, KIM M G, SONG T, et al. Three-dimensional salvo attack guidance considering communication delay[J]. Aerospace Science and Technology 2018, 73: 1-9.
- [7] KANG S, WANG J N, LI G, et al. Optimal cooperative guidance law for salvo attack: An MPC-based consensus perspective[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 2018, 54(5): 2397-2410.
- [8] 彭志红, 孙琳, 陈杰. 基于改进差分进化算法的无人机在线低空突防航迹规划[J]. 北京科技大学学报 2012, 34(1): 96-101.
PENG Z H, SUN L, CHEN J. Online path planning for UAV low-altitude penetration based on an improved differential evolution algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2012, 34(1): 96-101 (in Chinese).
- [9] SHANMUGAVEL M, TSOURDOSY A, ZBIKOWSKIZ R, et al. Path planning of multiple UAVs using Dubins sets[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA 2005: 1-17.
- [10] SHANMUGAVEL M, TSOURDOSY A, WHITE B, et al. Cooperative path planning of multiple UAVs using Dubins paths with clothoid arcs[J]. Control Engineering Practice 2010, 18(9): 1084-1092.
- [11] SHANMUGAVEL M, TSOURDOSY A, ZBIKOWSKIZ R, et al. 3D Dubins sets based coordinated path planning for swarm of UAVs[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA 2006: 1-20.
- [12] SHANMUGAVEL M, TSOURDOSY A, ZBIKOWSKIZ R, et al. A solution to simultaneous arrival of multiple UAVs using Pythagorean Hodograph curves[C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference. Piscataway: IEEE Press 2006: 2813-2818.
- [13] SHANMUGAVEL M, TSOURDOSY A, ZBIKOWSKIZ R, et al. 3D path planning for multiple UAVs using Pythagorean Hodograph curves[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Reston: AIAA 2007: 1-14.
- [14] ASKARI A, MORTAZAVI M, TALEBI H, et al. A new approach in UAV path planning using Bezier-Dubins continuous curvature path[J]. Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(6): 1103-1113.
- [15] 丁超, 魏瑞轩, 周凯. 基于时域映射的多无人机系统给定时间分布式最优集结[J]. 北京航空航天大学学报 2021, 47(2): 315-322.
DING C, WEI R X, ZHOU K. Distributed optimal rendezvous of multi-UAV systems in prescribed time based on time-domain transformation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2021, 47(2): 315-322 (in Chinese).
- [16] 陈旻, 张鑫, 金鑫, 等. 一种多智能体协同信息一致性算法[J]. 航空学报 2017, 38(12): 3212-3222.
CHEN W, ZHANG X, JIN X, et al. A cooperative information consensus algorithm for multi-agent system[J]. Acta Aeronautica Sinica 2017, 38(12): 3212-3222 (in Chinese).
- [17] DUBINS L E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents[J]. American Journal of Mathematics 1957, 79(3): 497-516.
- [18] CHEN Q Y, LU Y F, JIA G W, et al. Path planning for UAVs formation reconfiguration based on Dubins trajectory[J]. Journal of Central South University 2018, 25(11): 2664-2676.
- [19] XIN H B, CHEN Q Y, WANG Y J, et al. Terminal guidance simulation and flight test for small UCAV[C]//International Conference on Control, Automation and Diagnosis. Piscataway: IEEE Press 2019: 1-6.
- [20] 李槌, 陈清阳, 侯中喜. 自适应引导长度的无人机航迹跟踪方法[J]. 北京航空航天大学学报 2017, 43(7): 1481-1490.
LI Y, CHEN Q Y, HOU Z X. Path following method with adaptive guidance length for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2017, 43(7): 1481-1490 (in Chinese).
- [21] CHEN Q Y, LI Y. UAVs formation flight control based on following of the guidance points[C]//Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Piscataway: IEEE Press 2016: 730-735.

A rapid path planning method for multiple UAVs to cooperative strike

CHEN Qingyang^{*}, XIN Hongbo, WANG Yujie, TANG Zhongnan, JIA Gaowei, ZHU Bingjie

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Focusing on the cooperative strike problem to important with multiple suicide UAVs, a cooperative striking strategy based on hierarchical space distribution is proposed. The strategy is proposed with the vehicle kinematic constraint, the collision constraint of UAVs, and the space-time cooperative constraint. With the proposed strategy, the collision constraint can be solved. What's more, with the strategy, the resistibility of the UAVs to the recovery system of the target can be improved, and the chance of survival can be increased. A rapid path planning method for multiple UAVs with space cooperative requirements is proposed. The Dubins curve is combined in the method, and the exponential increment of computation with the number of UAVs is transformed into a polynomial form. The real-time requirement can be satisfied with the method, and sub-optimal trajectories can be generated. Simulation and flight experiments are carried out, and the results show that the UAVs can be guided to the target with the generated paths effectively, and the effectiveness of the proposed method is verified.

Keywords: suicide UAV; cooperative strike; hierarchical space; collision constraint; path planning; Dubins curve

Received: 2021-01-15; **Accepted:** 2021-05-07; **Published online:** 2021-05-17 15:47

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20210517.1350.001.html

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61801495)

*** Corresponding author.** E-mail: chy1982_008@nudt.edu.cn