

doi: 10.7690/bgzd.2025.07.018

小型固定翼无人机集群编队快速集结及一致性控制技术

高晓博

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450000)

摘要: 为解决小型固定翼无人机集群的编队集结效率、队形保持精度等问题, 设计基于 Dubins 航迹规划的松散编队快速集结和基于分布式一致性算法的精细编队控制相结合的策略, 实现编队快速高效集结、队形稳定保持与变换。借鉴 Dubins 曲线方法建立多机协同航迹规划模型, 利用 GA 遗传优化算法得到松散集结航迹的次优解, 并与解析解进行比较分析, 获取最短编队集结时间; 对于航迹规划产生的集结状态误差, 采用基于虚拟领航者的分布式一致性控制算法生成精确几何队形, 进行编队保持及队形变换, 在保证机间安全距离的同时, 获取稳定的刚性几何构型。以斜一字和 V 字型构型为例进行仿真研究, 结果表明, 该算法在集结时间效率、编队控制精度等方面具备有效性。

关键词: 固定翼; 编队集结; Dubins 航迹规划; 一致性

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

Rapid Formation Assembly and Consistency Control Technology for Small Fixed-wing UAV

Gao Xiaobo

(No. 27 Research Institute of CETC, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to solve the problems of formation assembly efficiency and formation keeping accuracy of small fixed-wing UAV group, a strategy combining loose formation rapid assembly based on Dubins route planning and fine formation control based on distributed consensus algorithm is designed. To achieve rapid and efficient formation assembly, stable formation maintenance and transformation. The Dubins curve method is used to establish a multi-aircraft cooperative route planning model, and the GA genetic optimization algorithm is used to obtain the sub-optimal solution of the loose aggregation route, and the shortest formation assembly time is obtained by comparing with the analytical solution; For the aggregation state error caused by route planning, the distributed consensus control algorithm based on virtual leader is used to generate accurate geometric formation, and the formation is maintained and transformed to obtain a stable rigid geometric configuration while ensuring the safe distance between aircraft. The simulation results of oblique and V-shaped configurations show that the algorithm is effective in terms of time efficiency and formation control accuracy.

Keywords: fixed wing; formation assembly; Dubins route planning; consistency

0 引言

无人集群协同控制技术, 是面向对抗性、不确定性、动态性的任务及环境需求, 基于旋翼、固定翼、复合翼等无人机载体平台, 搭载组网通信、雷达、导引、光电等载荷, 通过机间信息交互、资源共享, 建立满足欠驱动、非线性、强耦合、时变性等运动问题的协同控制算法核心, 实现任务分配、智能决策、航迹规划、编队控制等基本功能单元, 从而构建集中式、分布式、混合式的同构或异构无人集群体系, 在时空及环境约束下自主协同完成复杂任务, 具备作业范围广、执行效率高、抗毁性强、优势互补及效能提升等特征。无人集群在协同察打、

区域搜索、突防对抗、灾难响应、环境保护、物流运输等领域具有重要应用价值。

固定翼无人机相较于旋翼无人机, 具备广范围、长续航、高速度、大载重等优势, 同时也存在最大/最小空速、最大航向角速率、最小转弯半径、推力小、抗风性较差等限制^[1], 且其空气动力学参数与飞行速度紧密耦合, 其编队控制问题更具挑战性。目前, 编队集结研究主要包括 2 种^[2-4]: 1) 基于速度, 通过调整各无人机的速度使得期望到达时间趋于一致, 该方法对于速度变化范围较小、推力较小的小型固定翼无人机, 其时效性、可控性较差。2) 多机协同航迹规划方法, 各无人机保持恒定的巡航速度, 通过调整各无人机的飞行轨迹来协调其到达集

收稿日期: 2024-09-07; 修回日期: 2024-10-05

第一作者: 高晓博(1988—), 男, 河南人, 博士。

结点的时间,例如 Dubins 曲线、PH 曲线、Bezier 曲线等几何规划法^[5-7],并采用长机僚机主从控制保持航迹,但是难以实现多机实时重规划^[8-9]。编队保持与变换,是编队集结完成以后需要解决的核心控制问题。采用一致性控制算法,实现分布式协同控制,相较于集中式主从控制,能够考虑输入饱和、通信时滞、动态拓扑、传感器故障等众多不确定性约束影响,既减少编队的通信压力,又具备极强的容错性和适应性。将一致性算法与动态避障算法相结合,构建分布式编队控制器,实现机间和已知/未知障碍物的防撞并保持队形,在增强刚体约束性的同时,共同保证编队飞行的安全性和稳定性。一致性控制算法的研究主要包括无领航者、领航跟随、虚拟结构、输入饱和、有限时间、通信时延及动态拓扑不确定性等问题^[4, 10-11],以及与人工势场动态避障算法相结合等^[12-16]。

目前, Dubins 协同航迹规划方法大部分用于解决带有终端约束的多机定点集结问题,通过补偿多机航程差及盘旋绕圈等方式完成群集行为^[9],未保证其时间效率,并且缺少针对具有速度变化范围小、推重比较小等特征的小型固定翼无人机集群编队集结及控制研究。笔者借鉴 Dubins 曲线方法,研究连续弹射起飞的小型固定翼无人机集群编队快速集结问题,建立带起始约束、终端状态约束和时间要求的多机协同航迹规划模型,采用智能优化算法求解,获取编队集结的最短时间或最短航迹的多机 CLC 路径,生成编队队形,实现了相同地点、连续时间间隔起飞的无人机快速准确的编队集结。相较于传统的 Dubins 航迹规划算法,该方法不需要盘旋等待时间,极大提升了集结效率。将固定翼无人机动力学模型与一致性理论相结合,构建基于虚拟领航的分布式二阶一致性控制协议算法,通过对队形保持与变换的研究,分析其有效性及存在的问题。

1 问题描述及控制策略

考虑多架小型固定翼无人机,以固定时间间隔、连续弹射起飞方式,依次从同一地面平台发射升空,采用自组网通信终端,组建形成分布式无人机集群编队系统,假定:1) 在无人机爬升至指定高度后,以一定速度变化范围内定高稳定飞行后,进行编队集结控制;2) 不考虑机间通信时延、气流扰动、未知干扰等不确定因素的影响,即理想情况下的通信及环境条件;3) 无人机编队飞行过程中,每架无人机视为刚体,以质点处理,如图 1 所示。

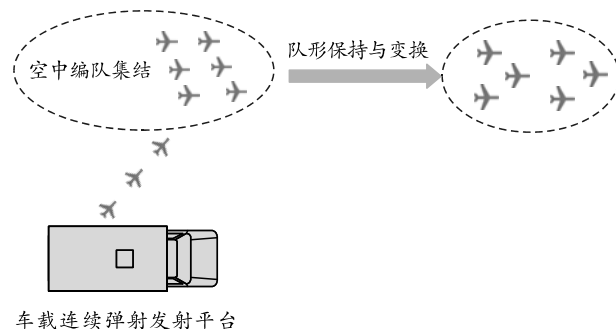


图 1 连续弹射起飞的小型固定翼无人机编队飞行场景描述

固定翼无人机集群定时或定点编队集结,通常采用由松散编队阶段向精细编队阶段过渡的分步骤实施策略^[17-18]。在松散编队阶段采用 Dubins 航迹规划方法,实现快速高效的群集控制,使得集群达到汇聚、避碰及速度一致的运动状态;然后进入速度控制的精细编队阶段,生成稳定的几何编队构型,实现队形保持。该策略充分结合航迹规划算法的高效率集结、速度控制方法的高精度几何构型等特点,笔者采用该方法。

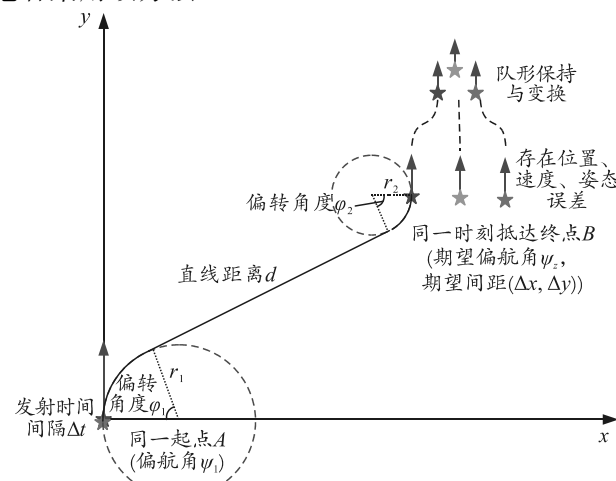


图 2 连续弹射小型固定翼无人机编队集结及控制策略

2 算法模型

2.1 固定翼无人机模型

考虑无人机以质心运动对无人机之间的位置、姿态、速度等状态量进行数学建模,并作如下假设:1) 地面坐标系是惯性坐标系;2) 假设地球是相对静止,地面表面为平面,地球的曲率为 0;3) 高度的变化不会引起重力加速度值的变化;4) 无人机质量均匀分布,几何对称;5) 无人机质量为常量且是刚体;6) 忽略风速、侧滑角的影响,此时航向角 χ 与偏航角 ψ 相等^[19-20]。考虑无风条件下无人机稳定水平飞行,在惯性坐标系下建立固定翼无人机运动学和动力学模型^[10, 13, 20-22]。

$$\dot{x}_i = V_{gi} \cos \chi_i \cos \gamma_i; \quad (1)$$

$$\dot{y}_i = V_{gi} \sin \chi_i \cos \gamma_i; \quad (2)$$

$$\dot{z}_i = -V_{gi} \sin \gamma_i; \quad (3)$$

$$\dot{V}_{gi} = (T_{hi} - D_{gi}) / m_i - g \sin \gamma_i; \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_i = (L_{fi} \cos \phi_i / m_i - g \cos \gamma_i) / V_i; \quad (5)$$

$$\dot{\chi}_i = L_{fi} \sin \phi_i / m_i V_{gi} \cos \gamma_i. \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, n$ 为无人机编号, n 为无人机个数; $[x_i, y_i, z_i, V_{gi}, \gamma_i, \chi_i]$ 为无人机飞行状态变量, x_i, y_i, z_i 分别为第 i 架无人机惯性坐标系下的 (x, y, z) 方向的位置; V_{gi}, γ_i, χ_i 分别为第 i 架无人机的地速 (机体相对于地面惯性坐标系的速度 $V_{gi} = \|V_{gi}\|$)、航迹角 (惯性速度矢量与 x - y 平面的夹角) 和航线角 (惯性速度矢量在 x - y 平面投影与 x 轴的夹角); 考虑无风条件下, 即风速为 0, 有 $V_{gi} = V_{ai}$, $\chi_i = \psi_i$, $\gamma_i = \gamma_{ai} = \theta_i - \alpha_i$, V_{ai}, γ_{ai} 分别为第 i 架无人机的空速和对空航迹角; ψ_i 为偏航角; θ_i 为俯仰角; α_i 为攻角; T_{hi}, D_{gi}, L_{fi} 为第 i 架无人机的发动机推力、气动阻力和升力; ϕ_i 为无人机的滚转角; m_i 为无人机的质量; g 为重力加速度。考虑在定高水平稳定飞行模式下的编队控制, 即 $\gamma_i = 0, \dot{\gamma}_i = 0, \dot{z}_i = 0$, 可将问题简化为经典 2 维模型^[6, 23-24]。

固定翼无人机的输入指标约束条件为^[1, 6, 24]:

$$0 \leq V_{\min, i} \leq V_{gi} \leq V_{\max, i}; \quad (7)$$

$$|a_i| \leq a_{\max, i}; \quad (8)$$

$$|\dot{\psi}_i| \leq \dot{\psi}_{\max, i}. \quad (9)$$

式中 a_i 为第 i 架无人机的加速度。 $\dot{\psi}_{\max, i} = V_{gi} / r_{\min, i}$, $r_{\min, i}$ 为第 i 架无人机在一定速度下的最小轨迹曲率半径, 即最小转弯半径。

2.2 Dubins 曲线编队快速集结

建立如图 2 所示的 2 维模型 Dubins, 假设每架无人机保持相同大小的巡航速度, 起点和终点的偏航角相同都为 $\pi/2$, 无人机依次按顺序出发, 时间间隔 Δt 相同, 每架无人机只经历一次 CLC 路径, 偏转角度为 $\varphi_{i1} = \varphi_{i2} = \varphi_i$, 2 次偏转半径分别为 r_{i1}, r_{i2} 。每架无人机 i 建立如下方程组, 也可建立不同的初始状态及多个 CRC 路径, 不再详述。

起点到终点的曲线路径 l_{si} :

$$r_{i1}\varphi_{i1} + d_i + r_{i2}\varphi_{i2} = V_g(dt + \Delta t_i). \quad (10)$$

在 x 轴上的距离 l_{xi} :

$$(r_{i1} - r_{i1}\cos\varphi_{i1}) + d_i \sin\varphi_{i1} + (r_{i2} - r_{i2}\cos\varphi_{i2}) = dx + \Delta x_i. \quad (11)$$

在 y 轴上的距离 l_{yi} :

$$r_{i1} \sin\varphi_{i1} + d_i \cos\varphi_{i1} + r_{i2} \sin\varphi_{i2} = dy + \Delta y_i. \quad (12)$$

式中: r_i, φ_i, d_i 分别为第 i 架无人机的偏转轨迹曲率半径、偏转角度和经历的直线距离; (dt, dx, dy) 分别为某个参考无人机的飞行时间, 以及在 x 和 y 轴上的飞行距离; 笔者选取第 1 架无人机的 (dt, dx, dy) 为参考, $\Delta t_i, \Delta x_i, \Delta y_i$ 分别为其余无人机相对于该参考无人机的起始时间间隔以及在 x 和 y 轴上的终端集结位置处的期望相对距离。

采用 2 种方法计算该方程组, 一种是解析解, 选取第 j 个无人机为参考节点, 假定该无人机的 (r_j, φ_j, d_j) 为已知量, 即可获取 (dt, dx, dy) , 以此为参考值求解出编队中各个无人机变量的精确解; 另一种是采用智能优化算法, 不需要选取参考节点, 采用多架无人机的非线性方程组建立目标函数进行最小值寻优, 求解得到所有未知变量的数值解。对带约束的非线性多变量函数寻优, 可采用粒子群、改进粒子群、蚁群、人工鱼群、免疫、多目标优化等算法, 考虑计算效率和数值精度上, 笔者设计 C++ 算法程序对比分析, 选取经典的遗传算法求解非线性规划问题。

带约束的非线性多变量规划模型如下:

$$\min F(X) \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} A \cdot X \leq b \\ Aeq \cdot X = beq \\ c(X) \leq 0 \\ ceq(X) = 0 \\ lb \leq X \leq ub \end{cases}. \quad (13)$$

式中: $F(X) = \sum_{i=1}^n (|l_{si}| + |l_{xi}| + |l_{yi}|)$ 为目标适应度函数,

l_{si}, l_{xi}, l_{yi} 分别对应式(10)~(12)相减得到的函数;

$X = [t, dx, dy, r_1, r_2, \dots, r_n, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, d_1, d_2, \dots, d_n]$ 为变量构成的向量; lb, ub 为变量 X 的下边界和上边界; b, beq 为向量; A, Aeq 为矩阵; $c(X), ceq(X)$ 为向量函数, 定义了约束条件, 笔者未使用这些约束。

通过多次迭代循环求解固定约束条件下的所有适应度值, 进行排序之后, 对生成的路径进行安全距离的碰撞检测; 若不存在, 则取最优适应度值即最小值对应的最优解, 作为多机航迹规划结果; 若存在碰撞或小于安全距离, 则选取其他次优解; 若

在该多次迭代循环次数内不存在解，则需增大边界取值范围或迭代次数，重新进行计算，直至获取满足碰撞检测的最优解。在实际飞行中，也可考虑无人机在不同的高度进行编队飞行，则可以不需要进行多机航迹的碰撞检测。算法流程如图 3 所示。

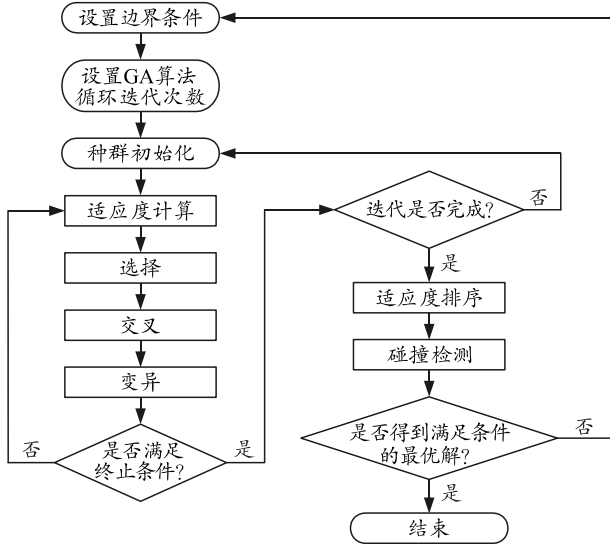


图 3 基于遗传算法的协同航迹规划算法流程

2.3 编队保持与变换

笔者采用图论方法建立机间通信拓扑网络模型，设计基于虚拟领航的分布式一致性算法编队控制律。根据 2.1 节无人机模型，令 $\xi_i = [x_i, y_i, z_i]^T \in R^3$ 表示无人机 i 的位置， $\zeta_i = [v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}]^T \in R^3$ 表示无人机 i 的速度， $u_i = [u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}]^T \in R^3$ 。将式(1)–(3)对时间求导并将式(4)–(6)代入整理，可以将无人机模型转化为二阶积分模型^[10, 12, 21–22]：

$$\dot{\xi}_i = \zeta_i; \quad (14)$$

$$\dot{\zeta}_i = u_i。 \quad (15)$$

式中 u_i 为待设计的控制率， u_i 与实际控制输入之间的关系式为：

$$\phi_i = \arctan \frac{u_{yi} \cos \chi_i - u_{xi} \sin \chi_i}{\cos \gamma_i (u_{zi} + g) - \sin \gamma_i (u_{xi} \cos \chi_i + u_{yi} \sin \chi_i)}; \quad (16)$$

$$L_{fi} = m_i \frac{\cos \gamma_i (u_{zi} + g) - \sin \gamma_i (u_{xi} \cos \chi_i + u_{yi} \sin \chi_i)}{\cos \phi_i}; \quad (17)$$

$$T_{hi} = D_{gi} + m_i [\sin \gamma_i (u_{zi} + g) + \cos \gamma_i (u_{xi} \cos \chi_i + u_{yi} \sin \chi_i)]。 \quad (18)$$

考虑无时延、无干扰等固定网络拓扑通信条件下，采用虚拟领航法，所有无人机跟随一个虚拟领航点，且每个无人机都能够获取到虚拟点和邻

居节点的状态信息，使得各自与虚拟点保持一定相对位置，针对存在领航者的情况，一致性控制算法为^[10, 12, 25–28]：

$$u_i = \dot{\xi}_0 - \alpha \{ [\xi_i - d_i] - \xi_0 \} + \beta (\zeta_i - \zeta_0) / \eta_i - \frac{1}{\eta_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} \{ [(\xi_i - d_i) - (\xi_j - d_j)] + \beta (\zeta_i - \zeta_j) \}。 \quad (19)$$

式中：下标 0 为虚拟领航者， $\xi_0 = (x_0, y_0)$ ， $\zeta_0 = (v_{x0}, v_{y0})$ 分别为虚拟领航者的位置和速度信息；

$d_i = (\Delta x_i, \Delta y_i)$ ， $d_j = (\Delta x_j, \Delta y_j)$ 为第 i 架和第 j 架无人机与领航者的生成队形的期望相对距离； $\eta_i = \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij}$ ，

$A = [a_{ij}] \subseteq R^{n \times n}$ 为带有权值的邻接矩阵， a_{ij} 为每条边（通信关系）赋予的权值； α 为跟随者与领航者的邻接关系，当跟随者 i 能接收到领航者的状态信息时， $\alpha > 0$ ，否则， $\alpha = 0$ ，笔者取 $\alpha = 1$ ； β 表示系数，为常数，笔者取 $\beta = 2$ 。图论及稳定性，结合人工势场避障的控制协议^[13, 15, 16, 27, 29–31]，以及速度障碍法避障^[32–35]和紧密编队控制^[36–38]。

3 仿真及结果分析

笔者所述方法针对连续弹射起飞的小型固定翼无人机集群，在机间保持安全距离条件下，实现不同横向和纵向间距的多种构型生成和保持，以斜一字型队形为例进行 2 维模型仿真及分析。考虑 3 架无人机编队飞行，每架翼展不超过 5 m，机间安全距离为 25 m；在松散编队集结阶段，每架无人机依次以相同的时间间隔，从起始点(0, 0)位置处开始按照协同航迹规划的 CLC 路径以恒定巡航速度飞行；集结完成后，采用基于虚拟领航者的一致性控制算法进入精细编队阶段，实现斜一字几何构型的队形保持，稳定飞行一段时间之后，进行 V 字型队形变换；飞行过程中，假定各无人机节点都能获取领航者和其余无人机的状态信息；飞行速度、巡航速度、加速度、转弯半径、发射时间间隔和航迹规划等参数如表 1 所示。

多机航迹规划采用解析方法和 GA 优化算法比较分析，在 x 和 y 轴上的机间期望间距都为 100 m，每架飞机先在 y 轴上以时间间隔 Δt 匀速直线飞行至起点(0, 0)位置处，开始按照 CLC 编队路径飞行，集结完成后再以匀速直线飞行，如图 4 所示。解析解计算过程中，选取第 1 架飞机为参考节点，设置一定范围内的 C 偏转角度和 L 直线距离，求解方程

组并搜索 CLC 路径的最小值, 仿真设置的 2 次偏转半径相同, 结果为 $r_i=[200.0, 221.8, 212.8]$, $\psi_i=[1.745, 1.579, 1.116]$, $d_i=[300.0, 217.6, 363.0]$, CLC 最小集结时间 $dt=24.95$ 。GA 数值优化算法如上所述, 通过多次迭代循环从中选取符合最短时间和安全航迹等条件的数值计算结果, 得到 $r_i=[628.0, 653.5, 677.7]$, $\psi_i=[1.67, 1.58, 1.43]$, $d_i=[452, 412, 453]$, CLC 集结时间 $dt=63.8$ 。通过航迹及相对距离的对比分析, 可见采用解析解能够获得最短的集结时间, 计算精度较高, 如图中虚线所示期望相对距离, 但是由于需要搜寻变量范围内的最小值, 计算花费时间长, 实际应用中需要预先采集飞机的各种信息, 采用线下计算方式, 灵活性较差; GA 数值优化算法, 由于采用随机数在变量区间范围寻找极值, 难以获取最优的集结时间, 计算结果为次优解, 存在一定误差 (位置误差在 10 m 以内), 但是计算速度快, 可实现准实时性的编队集结协同航迹规划。

表 1 仿真参数

参数	数值
最小飞行速度 $V_{\min,i}/(\text{m/s})$	35
最大飞行速度 $V_{\max,i}/(\text{m/s})$	45
巡航速度 $V_i/(\text{m/s})$	40
最大加速度 $a_{\max,i}/(\text{m/s}^2)$	0.5
最小转弯半径 $r_{\min,i}/\text{m}$	200
连续弹射发射时间间隔 $\Delta t/\text{s}$	2
多机航迹规划起始位置 $(x_i, y_i)/\text{m}$	(0, 0)
多机航迹规划起始偏航角 ψ_{i0}/rad	$\pi/2$
相邻飞机期望的横向和纵向间距 $(\Delta x_i, \Delta y_i)/\text{m}$	(100, 100)
多机航迹规划终端期望偏航角 ψ_{i1}/rad	$\pi/2$
机间安全距离 ρ_0/m	25

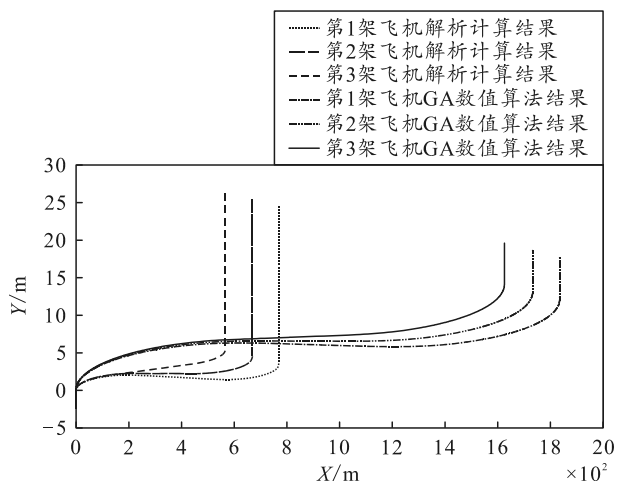
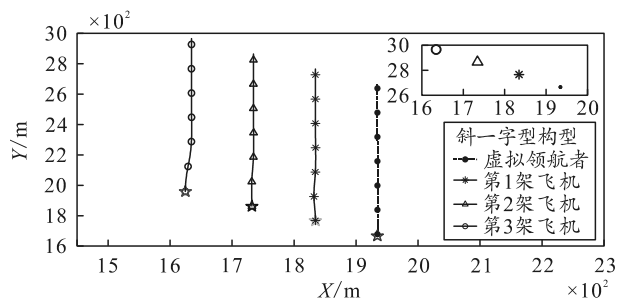


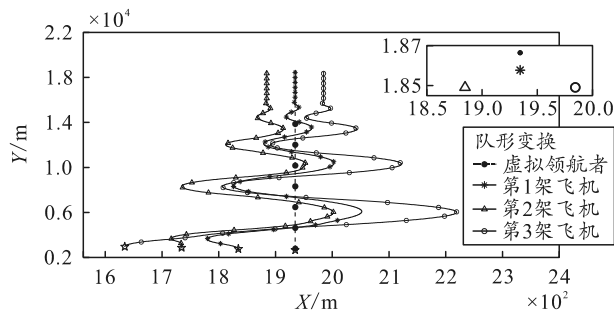
图 4 Dubins 多机协同航迹规划解析解与 GA 数值解结果对比

完成松散集结编队后, 进入精细编队阶段, 对航迹规划的状态误差进行修正。假设虚拟领航者以匀速运动: $x_0=V_g t$, $y_0=0$, 如图 5 虚线所示。经历大

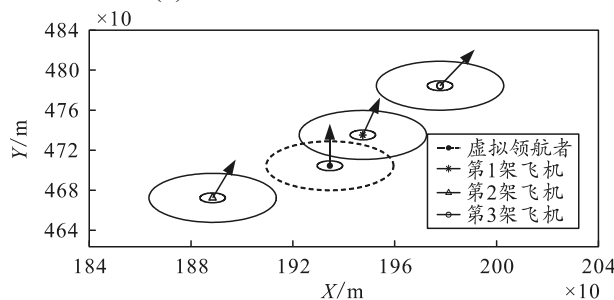
约 10 s 时间后, 形成刚性稳定几何构型 (位置误差 $<10^{-3} \text{ m}$)。队形保持飞行航迹及各机终端位置队形如图 5(a)所示。随后进入队形变换阶段, 由斜一字型队形向 V 字型队形变换, 经历大约 350 s 时间, 形成以 3 个节点为顶点、边长为 100 m 的等边三角形 V 字型编队队形, 飞行航迹、期望队形位置、机间最近距离局部图 (外圆代表安全距离半径 25 m, 内圆代表飞机机体翼展半径 5 m, 直线代表飞机速度方向) 结果如图 5(b)所示, 算法能较好地完成编队保持及变换, 图 5(c)为队形变换过程中机间达到最小相对距离时刻的位置, 表明在飞行过程中各节点仍能保持安全距离, 后续需要考虑结合动态避障方法的一致性控制问题, 以保证并实现无人机集群自主协同安全飞行。



(a) 状态误差修正的精细编队生成及保持飞行航迹



(b) V 字型队形变换飞行航迹



(c) 队形变换飞行过程中最小相对距离局部

图 5 斜一字至 V 字型的队形保持及变换

4 结束语

笔者研究连续弹射起飞的小型固定翼无人机集群编队快速集结及一致性控制技术: 首先, 采用 Dubins 曲线方法建立协同航迹规划模型, 基于 GA

智能优化算法得到松散集结航迹的次优解, 并与解析解进行比较分析; 其次, 针对航迹规划产生的集结状态误差, 采用基于虚拟领航者的分布式一致性控制算法进行队形保持, 获取稳定的刚性几何精细构型, 完成斜一字型到 V 字型的队形变换。

通过数值仿真验证了算法的有效性, 但是还需要针对一些问题进行研究: 1) 在已知目标点和起始点且距离相对较大时, 仍可以建立该方程组求解定点定时快速集结问题; 2) 引入不确定信息、动态拓扑等设计一致性控制协议; 3) 建立障碍物环境模型, 结合人工势场避障算法, 构建一致性控制协议, 分析动态避障适用性及效果; 4) 人工势场方法以整个圆形为障碍区, 引入过多在速度方向上无关的障碍物, 可采用基于速度射线构建障碍区的速度障碍法进行动态避障, 通过定义速度障碍区域, 采用速度大小或航向调整解决飞行冲突问题, 与一致性算法相结合, 更好地完成编队避障; 5) 对于控制算法的一致性控制量和避障控制量的协作问题, 采用零空间方法, 通过任务优先级选择避免二者算法冲突; 6) 对于机间距离过近或紧密编队问题, 需要特别考虑气动耦合、通信时延等紧耦合影响, 设计稳定性的一致性控制协议。

参考文献:

- [1] 王祥科, 陈浩, 赵述龙. 大规模固定翼无人机集群编队控制方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2063-2073.
- [2] 蒋婉琍. 无人机协同编队的若干关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [3] 刘流, 梁晓龙, 何吕龙. 考虑速度约束的无人机 Dubins 路径规划[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(12): 50-54, 58.
- [4] 范林飞. 基于鸽群算法的多无人机协同编队[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [5] 朱学平, 杨军, 袁博, 等. 固定翼无人机编队集结控制算法研究[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 128-133.
- [6] 刘流, 梁晓龙, 何吕龙, 等. 考虑速度约束的无人机 Dubins 路径规划[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(12): 50-54, 58.
- [7] 邵壮, 周洲, 王彦雄, 等. 基于 CPSO 的 UAV 编队集结路径规划[J]. 飞行力学, 2017, 35(1): 61-65.
- [8] 齐闾荣, 张民, 姚洪斌. 小型无人机编队队形保持与重构算法设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(11): 32-35.
- [9] 黄坤, 张民, 林云. 无人机编队 Dubins 航路规划及编队控制器设计[J]. 兵工自动化, 2019, 38(9): 87-90.
- [10] 葛健. 随机时延下的多无人机编队控制[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [11] 梁晓龙, 刘流, 何吕龙, 等. 基于固定时间一致性的无人机集群构型变换[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(7): 1506-1512.
- [12] 李磊, 李小民, 郑忠贵, 等. 基于一致性理论的四旋翼无人机分布式编队控制方法[J]. 电光与控制, 2015, 22(10): 19-23, 29.
- [13] 郭冬冬. 无人机自主编队协同控制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [14] 邱建. 四旋翼飞行器群集控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [15] 林敏, 夏元清, 吴爽. 多智能体领航跟随一致性和轨迹跟踪问题研究[J]. 无人系统技术, 2018, 1(3): 21-28.
- [16] 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.
- [17] 王锦锦, 祁圣君, 钟海, 等. 基于 Dubins 曲线的一致性编队集结控制[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 40-44, 213.
- [18] 朱旭. 基于信息一致性的多无人机编队控制方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [19] 张佳龙, 闫建国, 张普, 等. 三架固定翼无人机协同编队飞行避障策略[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 123-129.
- [20] BEARD R W, MCLAIN T W. Small Unmanned Aircraft Theory and Practice[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 127-133.
- [21] WANG J N, XIN M. Integrated Optimal Formation Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1731-1744.
- [22] 张蕊. 多高阶积分器系统鲁棒一致性算法及编队控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [23] WANG X K, SHEN L C, LIU Z H, et al. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: methods and experiments[J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(11): 1-17.
- [24] 孙小雷, 孟宇麟, 齐乃明, 等. 多无人机交会过程的协同航迹规划方法[J]. 机器人, 2015, 37(5): 621-627.
- [25] 卢添. 基于多智能体系统一致性理论的固定翼无人机编队控制[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [26] 晏川又. 具有领导-跟随者结构的多无人机系统一致性研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- [27] 易文, 雷斌. 群体无人机跟踪目标编队控制仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(8): 66-70.
- [28] 易文. 群体无人机一致性跟踪及编队控制研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [29] 韩宇洪. 基于改进人工势场法的无人车避障路径规划研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.