

doi: 10.7690/bgzd.2019.12.001

多无人机协同编队飞行设计方法

韩本刚, 毛师彬, 马岩
(南京模拟技术研究所, 南京 210016)

摘要: 为解决军事对抗训练中作战飞机协同编队飞行进袭态势的构建问题, 提出一种多无人机协同编队飞行设计方法。采用单机个体路径跟踪控制与多机群体集中控制的综合设计方法, 设计多无人机协同编队飞行总体架构, 建立多无人机之间的相对运动关系模型, 给出飞行实施的控制策略, 通过仿真实例验证了多机协同编队控制效果。仿真结果表明: 多无人机协同编队控制方式能够实现跟随机对领航机航迹的跟踪, 可有效解决在 3 维空间的编队控制。

关键词: 无人机; 路径跟踪控制; 集中控制; 协同编队飞行
中图分类号: TP202 **文献标志码:** A

Design Method of Multi-UAV Cooperative Formation Flight

Han Ben'gang, Mao Shibin, Ma Yan
(Nanjing Research Institute on Simulation Technique, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to solve the problem of cooperative formation flight of combat aircraft in military confrontation training, a cooperative formation flight design method for multi-UAVs is proposed. Using the integrated method of individual path tracking control and group centralized control, the architecture of multi-UAVs cooperative formation flight is designed, the relative motion relationship model between multi-UAVs is established, and the flight implementation control strategy is given. The simulation example verifies the effectiveness of multi-UAVs cooperative formation control. The simulation results show that the cooperative formation control method of multi-UAVs can track the pilot tracks randomly and effectively solve the formation control in 3D space.

Keywords: UAV; path tracking control; centralized control; cooperative formation flight

0 引言

多机协同编队飞行^[1]能够进行协同侦察、防御、攻击, 可有效提升任务完成的成功概率, 同时通过合理的队形编排可减小飞机燃油消耗, 增加航程。现代战争中, 作战飞机大多采取协同编队飞行进袭的形式执行任务, 以提升整体的综合作战效能。为了增强应对多战机协同进袭的能力, 在军事对抗训练过程中有必要模拟多战机协同编队飞行进袭的空中态势, 用于贴近实战化的训练。采用常用的有人机飞行模拟手段, 在飞行时存在风险大、成本高等问题, 且无法满足实弹射击需求。

随着无人机技术的快速发展和逐步成熟, 无人机已经在军事和民用领域得到广泛应用。与有人机相比, 无人机具有飞行效费比高、复杂环境适应能力强、无人员伤亡风险等诸多优势; 因此, 在对抗训练中使用无人机替代有人机模拟多战机协同编队飞行, 可避免有人机使用过程中的不足。笔者从实际应用出发, 综合运用集中式编队控制结构和领航/

跟随者保持策略等相关编队控制方法, 进行多架无人机协同编队飞行设计与测试。

1 协同编队控制介绍

多无人机协同编队问题是指在编队飞行过程中, 如何实时地控制各个无人机的运动, 以实现并保持编队队形的几何关系。

从编队控制策略^[2-3]角度来看, 编队控制主要包括虚拟结构策略、基于行为策略及领航/跟随者策略等, 相关控制策略最初均源于机器人编队控制领域, 其中以领航/跟随者策略最为成熟。该方法主要是选择一个无人机作为领航者, 其他无人机作为跟随者, 飞行过程中领航者按照航迹飞行, 跟随者实时地跟踪领航者来调整运动参数, 以保持和领航者的相对位置关系不变。

从编队控制结构^[2-3]角度, 编队控制可分为集中式、分布式和分散式。集中式控制是将所有无人机信息汇集到一个控制中心进行集中处理, 控制品质较好, 但是数据量较大, 对控制中心运算能力要求

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-23

作者简介: 韩本刚(1982—), 男, 吉林人, 硕士, 工程师, 从事无人机飞行控制系统设计与仿真研究。E-mail: mk_hbg2005@163.com。

很高：分布式控制是指在编队队列中两两组合的无人机进行信息交互与处理，系统信息交互较少，但控制效果相对较差；分散式控制是指每架无人机只保持自己在编队队列中约定点的相对关系，不需要与其他无人机交互信息，结构简单且计算量小。

2 协同编队总体设计

2.1 总体架构

基于上述协同编队控制理论，面对军事训练领域无人机使用的实际问题，设计出多无人机协同编队飞行的总体架构见图 1。

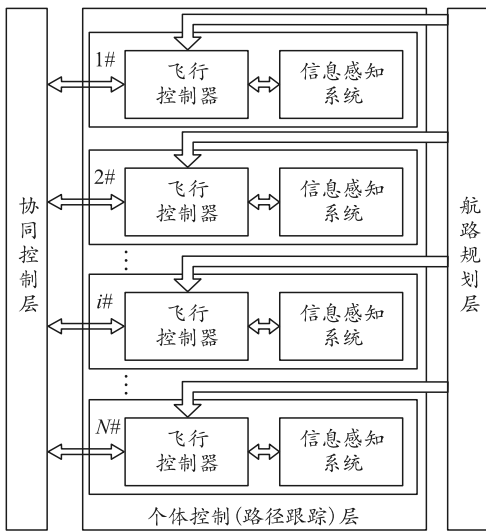


图 1 多无人机协同编队架构

按照层次结构划分为航路规划层、个体控制(路径跟踪)层、协同控制层。其中：航路规划层主要是解决多无人机编队飞行航路规划问题，给出能够满足任务需求且易于达成的编队航路；个体控制(路径跟踪)层是保证单机个体服从多机群体的控制基础，主要是解决单机个体路径跟踪问题，控制个体对指定航路的跟踪；协同控制层主要是解决多机群体分布控制问题，有效消除个体偏差，控制群体改变或保持编队队形。

2.2 工作原理

根据飞行任务要求预先规划协同编队飞行航路，并分配至各无人机。在任务执行过程中，各无人机通过路径跟踪算法自动跟踪指定航路，同时其中一架无人机接收其余无人机位置和速度等关键信息，计算出其他无人机相对于自身的运动状态，生成调节指令指挥其他无人机处于期望位置。这样通过单机个体控制和多机集中控制的共同作用，达成并保持协同编队队形。

3 关于多机集结考虑

训练用无人机飞行速度较快，如何解决多架无人机快速集结是一个难题。实际使用中期望高效地完成集结，这是保证多无人机编队达成的前提条件，也可为任务使用阶段留有更多的调整余地。

为了解决该问题，在总体设计时，从无人机起飞时刻便开始集结考虑，通过严格地控制无人机起飞时序，实现无人机快速准确到达预定的集结区域，并预留一定的时间处置特殊情况，保证无人机高效集结。无人机起飞时序控制有 2 种方式：

1) 通过预先航路仿真方式获取各无人机到达集结区域的时间，反推无人机起飞间隔，获取无人机起飞时刻。该方法需要预先根据任务要求规划好航路并进行仿真飞行，花费时间较长，但在实际使用中通过飞行仿真对任务航路预先模拟训练是必不可缺少的环节。

2) 通过无人机自身机动性能和约束，以及航路要求速度、高度、位置等目标信息，计算出各无人机到达集结区时间，反推无人机起飞间隔，获取无人机起飞时刻。该方法可预先建立模型，计算较快，但误差相对较大。

上述 2 种方式均为估算方法，建模过程中只考虑无人机自身的因素，无法考虑很多其他因素，如实际的各种误差、偏差以及人为差异等，均会影响无人机起飞间隔计算的准确性，但在实际使用过程中并不需要精确的量值，通过协同编队控制可消除这些因素带来的影响。

4 多机协同编队的实现

4.1 多机相对运动关系建模

多无人机协同编队重点是解决多无人机之间相对位置关系的保持问题，无人机之间相对运动关系模型在文献[4-7]中均有描述。系统在单机个体的路径跟踪控制基础上，引入集中控制方式对多机群体分布保持进行集中指挥控制，进而达成多架无人机协同编队飞行。从编队控制策略角度看，笔者研究的多无人机相对运动关系，本质上仍属于领航/跟随者策略。

为了进一步简化领航机与跟随机的相互关系，设计时将领航机与跟随机之间的高度间隔、水平横向间隔及行进方向等要素进行航路强约束，这样只需重点考虑两者之间的水平纵向相对运动。领航机与跟随机之间的相对分布关系见图 2。

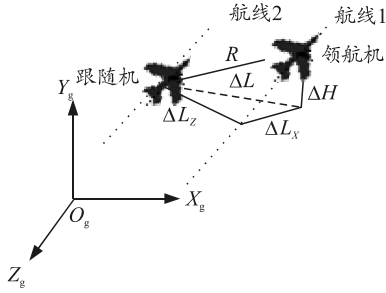


图 2 跟随机与领航机相对位置关系

在编队航路强约束条件下，领航机与跟随机之间的高度间隔 ΔH 和水平横向间隔 ΔL_z 为已知量，那么领航机与跟随机相对运动关系可表示为：

$$\begin{cases} R = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\ \Delta L = R \cos(\arcsin \Delta H / R) \\ \Delta L_x = \Delta L \sin(\arccos \Delta L_z / \Delta L) \end{cases}$$

其中： R 为领航机与跟随机之间的相对距离； ΔH 为领航机与跟随机之间的高度间隔； ΔL 为领航机与跟随机之间的水平间隔； ΔL_x 为领航机与跟随机的水平纵向间隔； ΔL_z 为领航机与跟随机之间的水平横向间隔。

多无人机协同编队的目标是控制领航机与跟随机之间相对运动参数使 ΔL_x 达到期望值。

4.2 多机协同编队控制策略设计

多无人机协同编队控制包含单机个体的路径跟踪控制和多机群体的集中控制 2 部分。单机个体控制主要是完成空中各无人机对指定航路的自动跟踪，多机集中控制主要是完成空中多架无人机协同编队队形的调整与保持^[8]。

4.2.1 单机路径跟踪控制设计

单架无人机的路径跟踪控制采用通常的飞行控制^[9]方式，包括基于角速率、角度等参数的内回路稳定控制和基于位置、高度等参数的外回路制导控制，同时引入发动机自动油门控制，单机个体控制律为：

$$\begin{cases} \dot{\delta}_c = K_c^\theta \theta + K_c^\dot{\theta} \dot{\theta} + K_c^H (H - H_g) + I_c^H \int (H - H_g) dt \\ \dot{\delta}_a = K_a^\phi \phi + K_a^\dot{\phi} \dot{\phi} + K_a^\psi (\psi - \psi_g) + K_a^\Delta y + I_a^\Delta \int \Delta y dt \\ \dot{\delta}_T = K_T^v (v - v_g) + I_T^v \int (v - v_g) dt + D_T^v a_x \end{cases}$$

式中： δ_c 为升降舵偏角； δ_a 为副翼舵偏角； H 、 H_g 为无人机高度、高度给定； ϕ 、 θ 、 ψ 为无人机倾斜角、俯仰角、航向角； ψ_g 为无人机航向设定； $\dot{\phi}$ 、 $\dot{\theta}$ 分别为无人机横倾角速率、俯仰角速率； Δy 为偏

航距离； δ_T 为转速调节量； v 、 v_g 为无人机速度、速度设定； a_x 为无人机前向加速度。

4.2.2 多机集中控制设计

多架无人机群体分布关系控制采用由领航机主导的集中控制方式。领航机指挥调节各跟随机，当领航机与跟随机未形成编队或由于气流扰动等因素使两者的相对位置出现偏差时，通过基于速度增量式的 PID 控制算法来调节或消除偏差。多无人机集中控制框图见图 3。

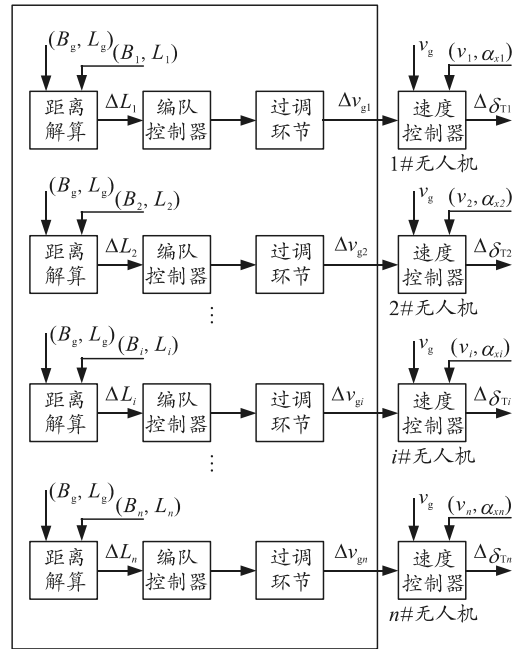


图 3 多无人机集中控制框图

其中： v_g 为编队速度给定； (B_g, L_g) 为选定领航机的位置； (B_i, L_i) 为第*i*号无人机的位置； ΔL_i 为第*i*号无人机相对领航机的水平纵向间隔，可直接由领航机与跟随机位置信息计算得出，可表示为

$$\Delta L_i \propto (B_i, L_i) - (B_g, L_g)$$

在控制框图中编队控制器通过计算水平纵向间隔 ΔL_i 和加速度 a_i 产生的速度给定增量 Δv_{gi} ，实现跟随机对领航机沿水平航路方向上的跟随和调节，协同编队调节律如下：

$$\begin{cases} \Delta v_{gi} = K_v^L \Delta L_i + K_a^v a_i \\ v_{gi} = v_g + \Delta v_{gi} \end{cases}$$

式中 K_v^L 和 K_a^v 为比例系数和加速度反馈系数。

为了避免领航机与跟随机之间水平纵向间隔的调节过程中产生超调或反复修正，在满足控制要求的前提下引入过调环节。过调环节表达形式如下：

$$\Delta v_{ij} = \begin{cases} 0 & |\Delta L_i| < a \\ \text{滞回} & a \leq |\Delta L_i| < b \\ 50 & |\Delta L_i| \geq c \end{cases}$$

式中： a 、 b 、 c ($a < b < c$) 是根据无人机运动特性及控制精度要求等的取值； b 为编队控制允许的误差范围，即跟随机相对领航机水平纵向间隔绝对值小于 b 时，认为编队达成。

5 仿真验证

为验证该协同编队控制方法，搭建了基于 3 机的半实物仿真系统，仿真系统架构见图 4。

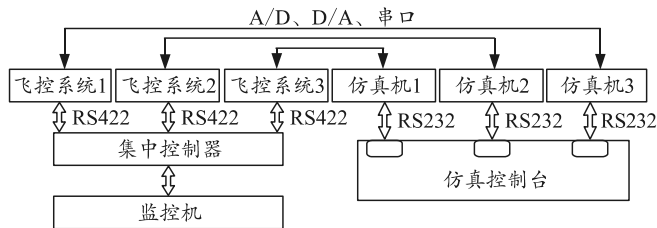


图 4 3 机半实物仿真系统架构

仿真控制台运行控制台软件，控制多仿真机同步或顺序启动仿真模型，并可施加干扰因素；监控机运行无人机监控软件，用于接收显示多机状态信息并可发送操控指令；仿真机运行无人机六自由度模型和传感器动态模型等；集中控制器运行多机群体控制算法，可集成在飞控系统内部。

以某型无人机为例进行仿真测试。该无人机有关质量、尺寸及气动参数等均为已知量，其自身控制参数采用小扰动线性化方法和经典控制设计方法获取，其中： $K_e^\delta = 0.2$ 、 $K_e^\theta = 0.8$ 、 $K_e^H = 0.2$ 、 $I_e^H = 0.01$ ； $K_a^\phi = 0.1$ 、 $K_a^\theta = 0.4$ 、 $K_a^\psi = 2.5$ 、 $K_a^y = 0.02$ 、 $I_a^y = 0.001$ ； $K_T^v = 400.0$ 、 $I_T^v = 50.0$ 、 $D_T^v = 10.0$ 。多机群体集中控制参数通过经验试探法选取，主要考虑跟随机与领航机水平纵向间隔调整和发动机调节的平稳，避免航迹跟随超调或发动机振动，这里取值为 $K_v^L = 0.1$ 、 $K_a^v = 0.05$ 。

仿真前设计了飞行参考航迹见图 5。考虑到该无人机起飞前检测需要花费一定时间，为了尽可能贴近实际情况，参考航迹设计时按照 3 机间隔 5 min 顺序起飞，先起飞的无人机按照预设航线飞行等待，当 3 机均起飞后进入集结段后，并发送编队指令开始 3 机编队控制。为了便于区分，将 3 机分别定义为 1#、2#、3#，其中选取 1# 机为领航机，2# 和 3# 机为跟随机。

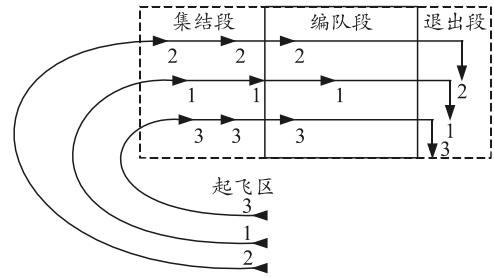


图 5 飞行参考航迹

仿真时设定 3 机之间的高度间隔为 200 m，水平横向间隔为 250 m，水平纵向间隔为 300 m。仿真对比结果见图 6—8。

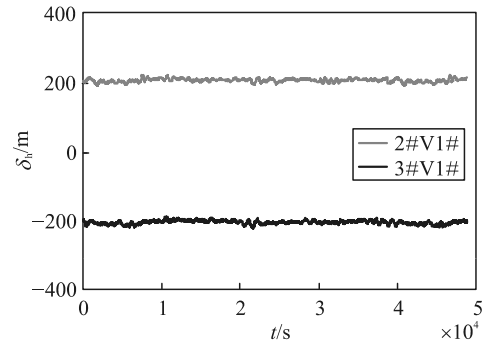


图 6 2#、3#机相对1#机的高度间隔

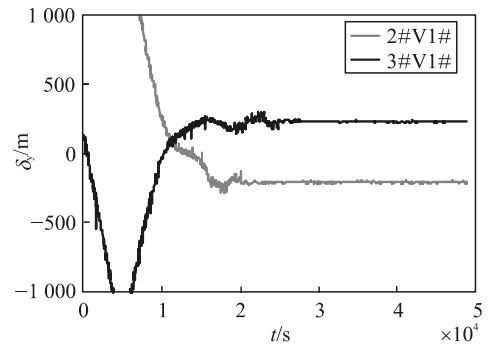


图 7 2#、3#机相对1#机的水平横向间隔

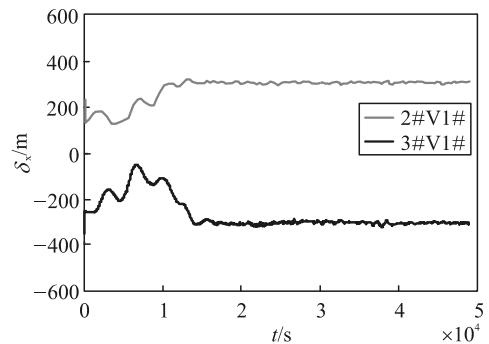


图 8 2#、3#机相对1#机的水平纵向间隔

仿真验证结果表明：多无人机协同编队控制方式能够快速实现跟随机对领航机航迹的跟踪，可有效控制 3 机并保持期望的相对位置关系。

参考文献:

- [1] 张勇, 陈跃良, 樊伟杰, 等. $\times\times$ 飞机半封闭部位局部环境谱当量加速关系研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 24-29.
- [2] 谭晓明, 王德, 衣俸贤, 等. 当量加速腐蚀条件下飞机结构耐久性评估方法研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 84-89.
- [3] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 48-52.
- [4] 张栋. 确定飞机日历寿命用的当量环境谱研究[J]. 航空学报, 2000, 21(2): 128-132.
- [5] 张福泽. 飞机停放日历寿命腐蚀温度谱的编制方法和相应腐蚀介质的确定[J]. 航空学报, 2001, 22(4): 359-362.
- [6] 江雪龙, 杨晓华. 加速腐蚀当量加速关系研究方法综述[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 50-59.
- [7] 陈跃良, 卞贵学, 郁大照, 等. 腐蚀环境下飞机结构疲

劳全寿命评估模型[J]. 机械强度, 2012, 34(1): 137-143.

- [8] 杨晓华. 腐蚀累积损伤理论与飞机结构日历寿命分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002: 55-60.
- [9] 陈群志, 康献海, 刘健光, 等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 1-6.
- [10] 陈刚, 蒋浦宁. 汽轮机部件应力腐蚀寿命评估方法研究[J]. 热力透平, 2012, 41(3): 179-184.
- [11] 丁国清, 张波. 钢在自然环境中的大气腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 42-47.
- [12] 张大全. 大气腐蚀和气相腐缓蚀剂应用技术[J]. 上海电力学院学报, 2006, 22(3): 273-277.
- [13] 刘嘉焜. 应用随机过程[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 1-355.
- [14] COX D R, MILLER H D. The Theory of Stochastic Processes[J]. Mathematical Gazette, 1966, 51(377): x-262.
- [15] 谭晓明, 穆志韬, 张丹峰, 等. 海军飞机结构当量加速腐蚀试验研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(2): 9-12.

(上接第 4 页)

6 结束语

笔者将单机个体的路径跟踪控制与多机群体的集中控制相结合, 设计并实现了多架无人机空中自动协同编队飞行, 可有效解决军事对抗训练过程中使用无人机对多战机协同编队飞行进袭态势的模拟问题。该方法适用于具备空中组网通信或地面集中通信的亚音速和低速无人机。目前, 该方法已在工程实践得以应用, 协同编队控制效果较好, 可满足实际使用需求。

参考文献:

- [1] 樊琼剑, 杨忠, 方挺, 等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 683-691.
- [2] 刘超. 无人机协同编队队形保持控制算法研究[D]. 沈

阳: 沈阳航空航天大学, 2016: 3.

- [3] 王晋云, 魏瑞轩, 董志兴, 等. 无人机编队飞行控制仿真研究[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(3): 34-38.
- [4] 欧超杰. 多无人机编队控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 3.
- [5] 沈佩璐. 小型高速无人机及其协同编队控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 3.
- [6] 赵国立. 无人机三维编队队形结构技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 3.
- [7] 秦昂, 张登成, 魏扬. 多无人机编队队形保持优化控制仿真研究[J]. 飞行力学, 2017, 35(6): 44-48.
- [8] 李知宇, 刘爱东, 王丰. 基于无人机的嵌入式标校系统[J]. 兵工自动化, 2018, 37(2): 6-9.
- [9] 李腾. 有人/无人机协同编队控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 3.