

doi: 10.7690/bgzdh.2021.11.008

# 小型无人机编队队形保持与重构算法设计

齐闾荣, 张 氏, 姚洪斌

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 为解决小型无人机编队保持与队形重构控制的问题, 设计一款适用于编队保持和队形重构的控制器。以小型固定翼无人机为对象, 采用长机-僚机编队模式, 建立相对运动关系模型, 对无人机位置和姿态偏差进行分析, 分别设计作用于速度和侧向通道的控制器, 通过六自由度模型仿真系统对编队性能进行测试。仿真结果表明: 该算法设计可实现编队保持和队形变换, 满足性能要求。

**关键词:** 小型无人机; 队形重构; 长机-僚机编队; 控制器

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A

## Formation Maintenance and Reconfiguration Algorithm Design for Small UAVs

Qi Herong, Zhang Min, Yao Hongbin

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics &amp; Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to solve the control problem of formation maintenance and reconfiguration of small UAV, a controller suitable for formation maintenance and reconfiguration is designed. The small fixed-wing UAV is taken as the research object, the leader-wingman formation mode is adopted, the relative motion relationship model is established, the position and attitude deviation of the UAVs is analyzed and the controller acting on the speed and lateral channels respectively is designed. The six-degree-of-freedom model simulation system is used to test the formation performance. The simulation results show that the algorithm design can realize formation maintenance and reconfiguration, and meet the performance requirements.

**Keywords:** small UAV; formation reconfiguration; leader-wingman formation; controller

### 0 引言

近年来, 随着飞行控制技术的发展, 小型无人机越来越多地应用于军民领域。小型无人机具有小型化、低成本、高机动性和可集群化<sup>[1]</sup>等优势, 未来发展前景广阔。目前, 已对无人机编队飞行技术做了大量理论和实际研究。洪晔等<sup>[2]</sup>基于信息一致性理论, 设计了多无人机编队队形保持算法和编队策略; 邓婉等<sup>[3]</sup>基于常规的 PID 控制设计了一种采用控制间距实现队形变换的编队控制器; 毛琼等<sup>[4]</sup>基于无人机对自身期望位置点的追踪, 提出一种基于规则的队形控制方法; 黄坤等<sup>[5]</sup>设计了满足编队任务的 Dubins 航路规划算法和控制器。

为解决无人机编队队形保持和重构<sup>[6-8]</sup>的技术问题, 并达到精确控制无人机位置和姿态的要求, 笔者以固定编队<sup>[9]</sup>为例, 构建编队相对运动模型, 并把编队飞行状态偏差作为控制输入, 引入偏差限幅, 设计了适用于编队队形保持和重构的控制器, 并进行实验与分析。

### 1 问题描述

笔者以固定编队为对象进行队形设计, 采用的是长机-僚机编队<sup>[10-12]</sup>中的长机模式<sup>[13-14]</sup>作为控制策略。建立了编队相对运动模型, 利用航路传递的无人机位姿信息, 以无人机编队中的相对位置和相对姿态的偏差作为输入, 并在队形变换时, 对偏差进行限幅, 设计新的速度和侧向通道控制器, 使编队队形调整既快速又稳定。此外, 笔者所用的小型无人机的机动性能较好, 速度调整较快, 转弯半径较小, 非常适合无人机编队。

### 2 相对运动关系建模

编队飞行的重点是如何保持长机和僚机的相对位置关系。假设编队飞行不考虑风扰动等干扰且处于平飞状态。笔者采用的是长机的数学模型在惯性坐标系下<sup>[15]</sup>建立, 僚机的相对运动学模型在固连于长机的旋转参考坐标系下建立。图 1 是相对运动模型示意图, 固连于长机的旋转参考坐标系定义如下:

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-08-25

基金项目: 航空科学基金(20181352010)

作者简介: 齐闾荣(1994—), 女, 河南人, 硕士, 从事无人机编队制导与控制技术研究。E-mail: qhr1029@163.com。

原点  $O_L$  位于长机质心， $O_L X$  始终与长机速度  $V_L$  一致， $O_L Y$  则垂直于  $O_L X$ ，沿右机翼指向外侧。其中： $X_V, Y_V$  为编队间隔。

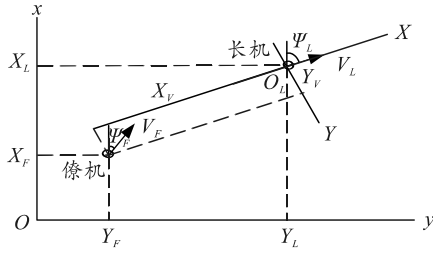


图 1 相对运动模型

在惯性系下，长机和僚机的运动方程为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_i &= V_i \cos \psi_i \\ \dot{Y}_i &= V_i \sin \psi_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中： $i=L, F$ ，分别为长机或僚机在惯性系中的位置坐标。

根据几何关系，可知僚机在惯性系中的位置为：

$$\left. \begin{aligned} X_F &= X_L - X_V \cos \psi_L - Y_V \sin \psi_L \\ Y_F &= Y_L - X_V \sin \psi_L + Y_V \cos \psi_L \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对式(2)求导，代入式(1)，整理可得僚机的运动学方程为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_V &= V_L - V_F \cos(\psi_F - \psi_L) - Y_V \dot{\psi}_L \\ \dot{Y}_V &= X_V \dot{\psi}_L + V_F \sin(\psi_F - \psi_L) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在惯性坐标系下，编队无人机状态经坐标转换，固连于长机的旋转参考系，建立相对运动关系，再由长机的飞行状态和编队所要求的相对位置相结合，为后文求出编队飞行偏差及编队控制器设计提供了依据。

### 3 偏差的分析

笔者分析的编队飞行状态偏差来源主要包括前向距离偏差、侧向距离偏差和速度偏差。

以编队转弯飞行状态为例，图 2 为飞行状态偏差示意图。指定最内圈无人机为长机，设长机位置为  $D$ ，僚机位置为  $E$ ，圆心位置为  $A$ 。由几何关系，可知僚机在内圈上的参考位置  $D'$ ，由长机和僚机转弯半径之比，求出僚机期望位置  $B$ ，由僚机的实际位置  $E$ ，求出其在航线上的投影位置  $C$ 。

前项距离差  $\Delta x$  为僚机在航线上的投影位置和期望位置组成的弧长，如弧  $\widehat{BC}$  即为所求。侧向偏差  $\Delta y$  为僚机相对于圆心的距离与期望半径之差，如线段  $CE$  即为所求。沿着航线飞行方向，若向量

$\overline{AC} \wedge \overline{AB} > 0$ ，则  $\Delta x < 0$ ，僚机滞后于期望位置；反之，则超前于期望位置。若  $\Delta y > 0$ ，即僚机位于航线段的右侧；反之，位于航线段的左侧。同理，可以求出编队直飞时的距离偏差。

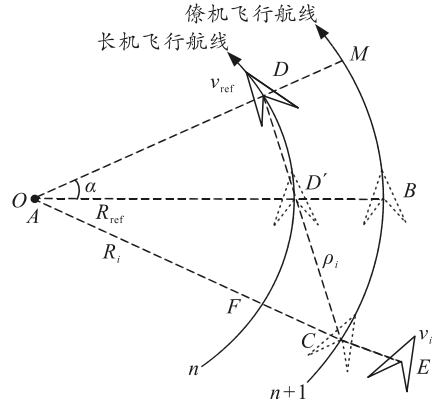


图 2 编队转弯飞行偏差

图中：设长机当前速度为  $v_{ref}$ ，僚机的当前速度为  $v_i$ ，由转弯半径和速度成正比可知，僚机的期望速度是  $v_{trim} = v_{ref} R_i / R_{ref}$ ，故僚机的速度偏差是  $\Delta v = v_{trim} - v_i$ 。同理，可以求出编队直飞时的速度偏差。

## 4 控制器的设计

笔者设计的编队控制器分为速度通道和横侧向通道。速度控制设计以僚机当前速度和速度偏差以及前向距离差作为控制输入量，通过速度控制器调节，实现前向的速度控制；侧向通道的设计以僚机当前的滚转角和偏航角以及侧偏差作为控制输入量，通过侧向控制器调节，实现航向的控制。

### 4.1 速度控制器设计

速度总偏差为：

$$e = k_x \Delta x + k_v \Delta v \quad (4)$$

速度指令为：

$$v_g = v_i + k_p e + k_i \int_0^t e dt \quad (5)$$

其中： $k_x$  为前向距离差比例系数； $k_v$  为速度差比例系数； $k_p$  为总偏差比例系数； $k_i$  为总偏差积分系数； $t$  为积分步长。此外，当各个编队任务切换时，积分需清零。

### 4.2 侧向控制器设计

偏航指令为：

$$\psi_g = k_a^y \Delta y + \psi \quad (6)$$

滚转指令为：

$$\phi_g = K_a^\psi (\psi - \psi_g) + K_a^{I\psi} \int_0^t (\psi - \psi_g) dt + \phi \quad (7)$$

其中： $\psi$  为当前航向角； $\phi$  为当前滚转角； $k_a^y$  为侧偏比例系数； $K_a^y$  为侧向偏差比例系数； $K_a^{ly}$  为侧向偏差积分系数； $t$  为积分步长。

当队形重构时，在横侧向外回路通道，为避免僚机侧向间隔调节时反复修正<sup>[16]</sup>或因调节幅度过大而使队形重构失败，在满足控制要求的前提下，引入了侧偏差限幅环节，表达形式为

$$\Delta y = \begin{cases} a & \Delta y < a \\ \Delta y & a < \Delta y < b \\ b & b < \Delta y \end{cases} \quad (8)$$

式中  $a < 0 < b$ ， $a$  和  $b$  根据无人机队形重构时控制精度的要求等进行取值。

### 5 仿真结果与分析

为验证笔者设计的控制算法，基于六自由度模型，在 VS2010 中，用 4 架小型无人机编队进行实时仿真实验。文中样例无人机的参数如表 1 所示。

表 1 样例无人机参数

指标	参数	指标	参数
翼展/m	2.300	标称速度/(m/s)	22.5
翼弦/m	0.240	滚转角范围/(°)	±35
机翼面积/m <sup>2</sup>	0.736	速度范围/(m/s)	18~34
空机质量/kg	12.000		

#### 5.1 仿真结果

笔者以 4 架无人机编队为例，设置无人机 1 为长机，其余为僚机，且编队高度为同一气压高度下。无人机从横一字形编队变换为菱形编队，并保持菱形编队转弯。横一字形编队的间隔设置为 50 m，飞行速度均为 22.5 m/s。菱形编队转弯半径依次设定为 800、875、875、950 m，菱形边长为  $75\sqrt{2}$  m，按照轨迹半径设定，飞行速度期望值依次为 22.5、24.6、24.6、26.7 m/s。图 3 为 2 维态势显示的飞行轨迹。

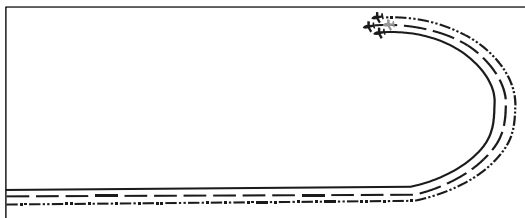


图 3 2 维态势仿真飞行轨迹

图 4—6 为横一字形编队变换到菱形编队的仿真结果，仿真数据包括无人机速度和相对位置关系。其中，相对位置关系由编队间隔表示，分为水平纵向相对间隔和水平横向相对间隔。

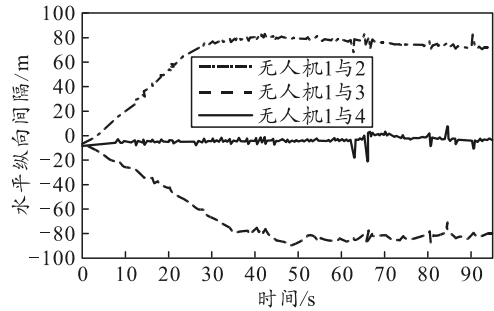


图 4 水平纵向相对间隔

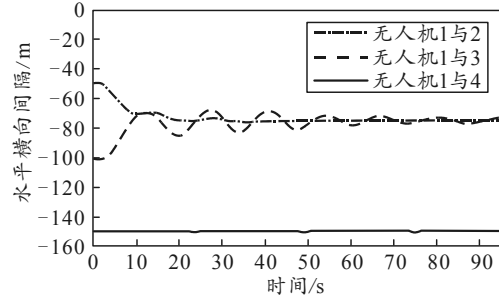


图 5 水平横向相对间隔

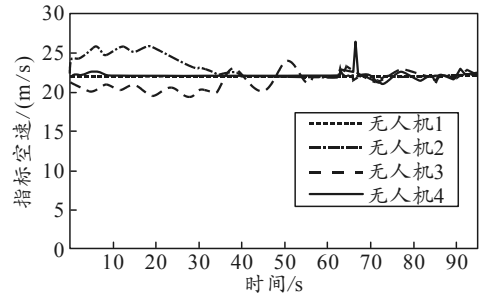


图 6 无人机速度

图 7—8 为菱形编队转弯保持的仿真结果，仿真数据包括无人机速度和相对位置关系。其中，转弯时相对位置关系由相对机间距离表示。

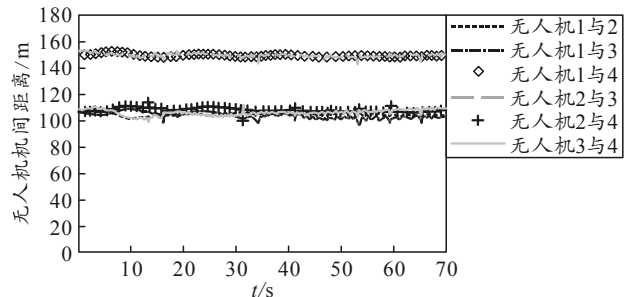


图 7 无人机机间距离

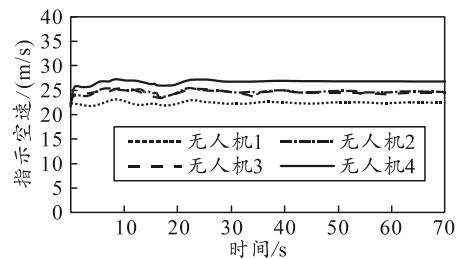


图 8 无人机速度

## 5.2 仿真分析

在横一字形编队变换为菱形编队的变换指令下，以无人机 1 为长机，由图 4 可知：水平纵向相对间隔经过 50 s 左右调整，无人机 2 与无人机 1 间隔趋于 75 m，无人机 3 与无人机 1 间隔趋于 75 m，无人机 4 与无人机 1 间隔保持不变。由图 5 可知：水平横向相对间隔经过 60 s 左右调整，无人机 2 与无人机 1 间隔趋于 75 m，无人机 3 与无人机 1 间隔趋于 75 m，无人机 4 与无人机 1 间隔 150 m 保持不变。由图 6 可知：无人机编队在横一字形编队时速度为 22.5 m/s，大约经过 60 s，各僚机经过速度调整，菱形编队保持的速度也稳定在 22.5 m/s，并以菱形队形继续保持编队飞行。

在菱形编队转弯保持阶段，在菱形编队左转弯指令下，以内圈无人机为长机，由图 7 可知：无人机间相对距离，大约经过 25 s 调整，菱形对角线趋于 150 m，菱形各边趋于 106 m。由图 8 可知：无人机速度经过 25 s 的调整，逐渐趋于各自的期望值。另外，图中的毛刺是由于无人机链路通讯延迟引起的。

以上仿真结果表明：无人机编队在变换和保持阶段，僚机均可与长机保持期望的相对速度和相对距离，该算法满足编队精确要求，编队性能具有快速性和稳定性。

## 6 结束语

针对无人机编队飞行对执行任务多样性的需求，为满足队形保持和变换等任务，笔者构建了无人机相对运动模型，且以编队飞行中的偏差为输入，设计了速度和侧向通道的控制器。仿真结果表明，该算法能够实现小型无人机编队保持与队形重构。

## 参考文献：

- [1] 李晓文. 小型无人机在战术空中控制中的应用分析[J]. 飞航导弹, 2020(5): 49-50.
- [2] 洪晔, 缪存孝, 雷旭升. 基于长机—僚机模式的无人机编队方法及飞行实验研究[J]. 机器人, 2010, 32(4): 505-509.
- [3] 邓婉, 王新民, 王晓燕, 等. 无人机编队队形保持变换控制器设计[J]. 计算机仿真, 2011, 28(10): 73-75.
- [4] 毛琼, 李小民, 王正军. 基于规则的无人机编队队形构建与重构控制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(5): 1118-1120.
- [5] 黄坤. 无人机编队跟踪地面目标制导方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [6] LUO D L, ZHOU T, WU S X. Obstacle avoidance and formation regrouping strategy and control for UAV formation flight[J]. IEEE International Conference on Control and Automation(ICCA), 2013, 42(2): 1921-1926.
- [7] 王卫宁. 三维无人机编队队形重构与队形保持控制算法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- [8] 张佳龙, 闫建国, 张普. 基于反步推演法的多机编队队形重构控制研究[J]. 航空学报, 2019, 40(11): 203-215.
- [9] 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.
- [10] 王晶, 顾维博, 窦立亚. 基于 Leader-Follower 的多无人机编队轨迹跟踪设计[J]. 航空学报, 2020, 41(S1): 88-98.
- [11] 成成, 张跃, 储海荣, 等. 分布式多无人机协同编队队形控制仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(5): 31-36.
- [12] SEMSAR E, KHORASANI K. Adaptive formation control of UAVs in the presence of unknown vortex forces and leader commands[C]. Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minnesota, USA, 2006: 3563-3569.
- [13] 王新民, 王晓燕, 肖堃. 无人机编队飞行技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015: 18-19.
- [14] 施书城. 无人机多机编队飞行控制技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [15] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 8-11.
- [16] 韩本刚, 毛师彬, 马岩. 多无人机编队飞行设计方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(12): 1-3.