

doi: 10.7690/bgzdh.2021.08.009

空中靶机集群协同飞行研究

马岩, 毛师彬, 沈雯, 王小青

(南京模拟技术研究所靶机事业部, 南京 210018)

摘要: 为满足靶机系统对来袭目标的逼真模拟要求, 对靶机编队协同飞行系统的集群编队策略及编队模式进行研究。结合靶机集群协同飞行的特点, 分析其优劣势。研究靶机集群协同飞行的 2 个控制层面, 设计基于相对运动模型的编队控制器, 并使用高亚音速靶机系统做相关仿飞验证。基于现有的工程实践经验, 简要概述空中靶机集群系统未来的研究发展。结果表明: 该控制器的纵向高度间距保持较好, 前向及侧向距离呈逐步收敛趋势。

关键词: 空中靶机; 集群飞行; 编队控制

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Research on Aerial Target Drones Coordinated Formation Flight

Ma Yan, Mao Shibin, Shen Wen, Wang Xiaoqing

(Target Drone Business Unit of Nanjing Research Institute on Simulation Technique, Nanjing 210018, China)

Abstract: In order to meet the realistic simulation requirements of the target drone system to the incoming target, the formation strategy and formation mode of the target drones formation cooperative flight system are studied. Combined with the characteristics of cooperative flight of target drones formation, its advantages and disadvantages are analyzed. The 2 control levels of cooperative flight control of target drone formation are studied. The formation controller based on the relative motion is designed, the high subsonic target drone system is used to do related flight simulation. This paper briefly summarizes the future research and development direction of the target drones formation system, based on the existing engineering experience. The results show that the controller can maintain control the height distance well, the forward distance and lateral distance is gradually convergent.

Keywords: aerial target drones; coordinated formation flight; formation control

0 引言

空中靶机的发展, 主要有 2 方面作用: 1) 为新研武器系统的研制提供检验、鉴定手段; 2) 为作战训练提供逼真模拟目标。正如文献[1]所述, 一个国家的靶机水平间接反映了其对空武器系统的综合性能, 从根本上决定了对空武器装备的最终作战效能。如何有效提升红军指挥员体系化作战的协同指挥水平, 锤炼远、中、近程防空体系战术、战法, 考核作战单元在复杂电磁环境下抗多目标饱和攻击的装备使用技能水平, 都需着力研究空中靶机集群系统, 实现多批次多架次全方位饱和攻击的作战要素构造。

1 空中靶机集群协同飞行

1.1 运动特性模拟

空中靶机作为作战对象的模拟载体, 主要实现对典型目标特性的逼真模拟, 包含几何特性、雷达特性、红外特性、电抗特性及运动特性等方面。运动特性的模拟主要涉及速度、高度和机动等方面。

对于集群协同飞行靶机系统, 由于飞行数量的影响, 单机的速度、位置及高度相关运动一般基于靶机自主程控完成。单机纵向及横侧向的自主程控航路跟踪, 采用基于角速率、角度等参数的内回路稳定控制及基于经纬度位置、高度等参数的外回路制导控制, 前向的速度控制通过给定速度与实际速度差的比例积分控制来自动调节发动机油门^[2-3]。机动特性的模拟主要体现在靶机被武器系统锁定后的摆脱运动, 主要涉及机动样式及机动过载 2 方面。靶机集群协同飞行是在发挥单机系统模拟特性的基础上, 对在各空单机进行编队或协同控制, 实现多型多机的集群飞行, 达到红蓝饱和攻击对抗的目的。

1.2 集群编队策略

靶机的集群飞行包括同型多架靶机编队协同飞行和多型多架靶机协同飞行。靶机集群协同飞行方式主要有 3 种: 时间协同(同时到达或给定时间间隔到达)、空间协同(队形保持或有约束的队形变换)、任务协同(掩护、压制条件下协同突防)。3 种方式

收稿日期: 2021-04-26; 修回日期: 2021-05-28

作者简介: 马岩(1989—), 男, 宁夏人, 硕士, 工程师, 从事固定翼高速无人机飞行控制及编队系统设计研究。E-mail: 1512172901@qq.com。

各有优点，笔者主要对空间协同实施研究分析。从控制策略的角度来看，目前编队保持的控制策略主要包括以下 3 种：

1) 领航-跟随者策略。

领航-跟随者(长-僚机)策略是目前最为成熟的编队控制策略^[4]，编队集群选择一架靶机作为长机，其余靶机作为僚机。编队飞行过程中，长机按照给定航迹飞行，僚机实时跟踪长机的位置变化调整本机的运动参数，以保持和长机的相对位置，从而达到保持编队队形的目的；但僚机的运动均依赖长机，系统需做好长机故障的保护策略。

2) 虚拟结构策略。

虚拟结构策略是将编队队形看成一个虚拟结构^[5]，从中寻找一个虚拟的固定点作为虚拟长机，编队中的每架靶机相对于这个虚拟长机的位置不变。当编队飞行时，每架靶机实时跟踪虚拟长机位置来调整本机的运动参数，以保持和虚拟长机的相对位置不变，从而达到保持编队队形的目的。

3) 基于行为的策略。

基于行为的策略是为每架靶机预先设计几种基本行为^[6]，如目标跟随、碰撞避免、障碍物回避和队形保持等，在编队飞行过程中每架靶机根据传感器信息和其他靶机的信息，将几种基本行为按照一定的策略进行加权合成后，作为当前的输出来控制靶机。

1.3 编队通信模式

多无人机编队协同飞行系统的控制结构主要分为集中式控制结构和分布式控制结构^[7-8]。

1) 集中式控制结构。

集中式控制系统由一个集中的综合指挥系统来综合指挥控制。每架靶机将单机运动状态通过测控链路系统下传至指挥控制站，经过指控系统运算后，将相关求解结果(航迹、航速等)转成控制指令并发送至各在空靶机，控制各靶机执行控制指令以完成作战任务。集中式控制体系结构如图 1 所示。

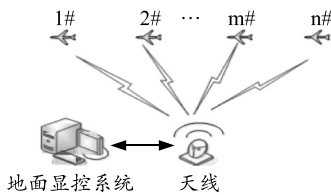


图 1 集中式控制结构

2) 分布式控制结构。

分布式协同控制结构将集群系统分成若干个子

系统，分别由若干个局部控制器实施控制，通过通信子网络把各个局部控制器联系起来，分工实现协同或编队的目的。每个靶机都将自己的位置、速度、姿态和运动目标的相关信息与系统中其他靶机进行数据共享，每个靶机按照自己的任务目标和控制策略自主控制。分布式控制体系结构如图 2 所示。

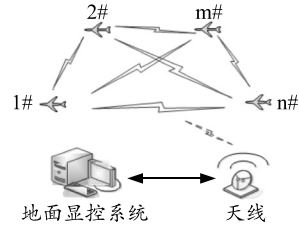


图 2 分布式控制结构

2 靶机编队系统设计

由于分布式控制以机间通信为基础^[9]，对于靶机体系而言，一方面，靶机集群协同飞行的数量较大、飞行速度快；另一方面，各靶机 3 维空间的间距可能以数十公里计，对机间通信的带宽、功率及节点个数都提出了较高要求。相较于分布式控制，地面集中式编队控制方式更适合于靶机集群系统研究的工程化转换；同时，基于行为的策略一般更适合分布式控制方式的应用，笔者选取地面集中式结合长-僚机控制方式，对大规模高速靶机空间位置协同的集群飞行进行研究。

对于长-僚机模式的集中式控制，系统采用两级控制方法，上层控制将编队系统作为被控对象，主要为编队系统产生导航指令；下层控制是集群编队系统中各单机作为被控对象，依据编队系统产生的导航指令，控制各机的 3 维空间间距，实现集群编队系统的功能实现^[10]。

2.1 编队飞行运动模型

建立长-僚机协同编队飞行模型如图 3 所示。

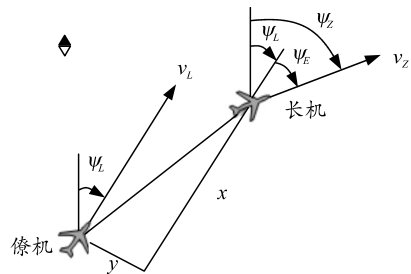


图 3 长-僚机集群编队飞行建模

以僚机轴线方向定义 x 轴，长-僚机轴向相对运动方程为：

$$\dot{x} = v_z \cos \psi_E + \dot{\psi}_L y - v_L \quad (1)$$

以僚机右侧向方向定义 y 轴,长-僚机侧向相对运动方程为:

$$\dot{y} = v_z \sin \psi_E - \dot{\psi}_L x \quad (2)$$

以僚机纵向向下方向定义 z 轴,长-僚机轴向相对运动方程为:

$$\dot{z} = \dot{h}_z - \dot{h}_L \quad (3)$$

式中: v_z, v_L 分别为长机与僚机水平方向上的速度; ψ_z, ψ_L 分别为长机与僚机的航向角; 定义 $\psi_E = \psi_z - \psi_L$ 为偏航角偏差,即长机与僚机速度向量之间的夹角; 定义长机垂速为 \dot{h}_z , 僚机垂速为 \dot{h}_L 。

2.2 编队飞行控制

如图 4 所示,编队飞行控制分别对前向通道、纵向通道和侧向通道进行控制,即前向通道由长-僚机在纵向上的相对速度和间距组成,纵向通道由长-僚机在垂直方向上的间距组成,侧向通道由长-僚机在横侧向上的航向角偏差和间距组成。

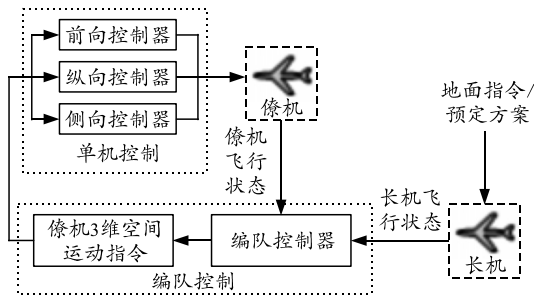


图 4 编队控制系统框图

令 Δx 为编队系统 x 向长-僚机偏差, Δy 为编队系统 y 向长-僚机偏差, ΔH 为编队系统 z 向给定与反馈偏差。

$$\Delta x = x_g - x, \quad (4)$$

$$\Delta y = y_g - y, \quad (5)$$

$$\Delta H = z_g - z. \quad (6)$$

式中: x_g, y_g, z_g 是编队系统的 3 轴方向期望给定; x, y, z 为 3 轴方向相对位置。

编队控制器设计如下:

1) 前向通道:

$$\Delta V = K_x \Delta x + K_{fx} \int \Delta x dt; \quad (7)$$

2) 侧向通道:

$$\Delta \gamma = K_y \Delta y + K_{fy} \int \Delta y dt + K_{\psi} \Delta \psi; \quad (8)$$

3) 纵向通道:

$$\Delta \theta = K_H \Delta H + K_{Hf} \int \Delta H dt. \quad (9)$$

式中: ΔV 为速度调节量; $\Delta \gamma$ 为滚转角调节量; $\Delta \theta$ 为俯仰角调节量。

3 仿飞实例

选取某亚音速靶机为仿飞对象,采用集中式控制结构,编队控制系统选取上下分层控制方式。飞行相对高度为 2 000 m,飞行速度为 220 m/s,接入编队数量为 5 架靶机,选取 3#靶机为长机,1#、2#、4#、5#为僚机,模拟三代机“一字型”小编队突防。

设置 1#僚机在任务段与长机侧向间距为 50 m,纵向间距为-50 m; 2#僚机在任务段与长机侧向间距为-50 m,纵向间距为-30 m; 4#僚机在任务段与长机侧向间距为 100 m,纵向间距为 30 m; 5#僚机在任务段与长机侧向间距为-100 m,纵向间距为 50 m。仿飞效果如图 5—8 所示。

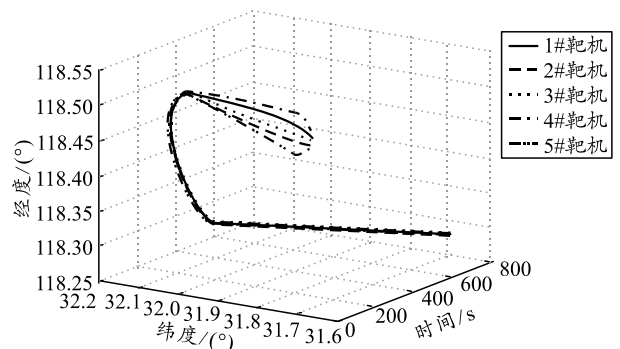


图 5 某型靶机编队飞行轨迹

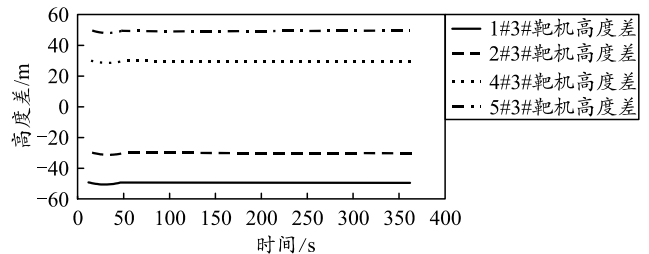


图 6 某型靶机编队纵向高度差数据分析

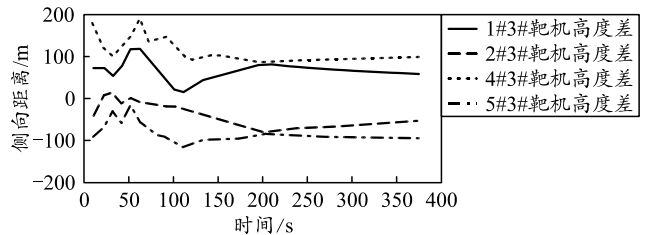


图 7 某型靶机编队侧向距离差数据分析

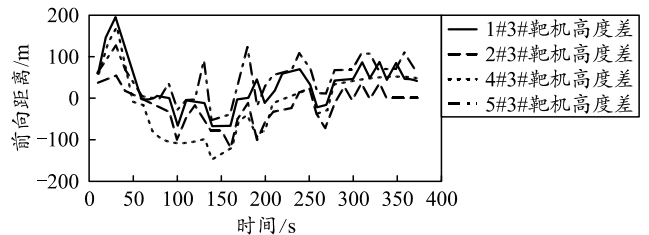


图 8 某型靶机编队前向距离差数据分析