

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.05.010

面向智能空战的它机协同试飞验证方法

王悦¹, 张少卿¹, 王言伟¹, 王振宇¹, 王玥², 刘志军², 张涛³

1. 沈阳飞机设计研究所综合航电部, 沈阳 110035;
2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081;
3. 中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要:为验证无人机自主协同算法在空战环境下的适用性,提出了一种高等效的它机协同试飞验证方法。根据算法功能实现的需求,以成熟的民用固定翼无人机平台为基础进行改装,搭建它机试飞平台,对真实空战环境开展模拟和等效设计。以四机协同编队算法为例,在试飞平台上移植算法程序,开展相关科目试飞验证。当需要验证不同控制算法时,无需针对它机试飞平台开发控制策略,只需修改控制算法即可。试验结果表明:编队综合误差较小,算法能够实现无人机编队的稳定控制;同时,它机协同试飞验证方法因其迭代速度快、安全稳定性高、成本低等特点,可用作中间阶段算法的前置试飞手段,为算法的开发迭代提供有效验证。

关键词:协同技术;它机;试飞平台;智能空战;试飞验证

中图分类号:V19 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2022)05-0091-09

Cooperative Test Flight Platform Verification Method for Intelligent Air Combat

WANG Yue¹, ZHANG Shao-qing¹, WANG Yan-wei¹, WANG Zhen-yu¹, WANG Yue², LIU Zhi-jun², ZHANG Tao³

1. Integrated Avionics Department, Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China;
2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to verify the applicability of autonomous cooperative algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) in air combat environment, a highly equivalent cooperative flight test verification method is proposed. Based on the requirements of function realization of the algorithm, a mature civilian fixed-wing UAV platform is modified to build a test flight platform of other aircraft, and the simulation and equivalent design of real air combat environment is carried out. Taking the cooperative formation algorithm of four aircraft as an example, the algorithm program is transplanted on the test flight platform to carry out flight test of relevant subjects. During the verification of control algorithms, there is no need to develop control strategies for other aircraft test flight platform, but to modify the control algorithm. The experimental results show that the formation synthesis error is small, and the algorithm can realize the stable control of UAV formation. At the same time, because of its characteristics of fast iteration speed, high safety and stability performance, and low cost, this method can be used as the pre-test method of the intermediate stage algorithm to provide effective validation for the algorithm development iteration.

收稿日期:2022-04-14;**修订日期:**2022-06-04

作者简介:王悦(1991-),女,硕士,工程师,主要从事有无人机协同作战与验证技术方面的研究。

通信作者:王玥(1979-),男,博士,副教授,主要从事任务规划与协同作战方面的研究。

Key words: Collaborative technology; Other aircraft; Test flight platform; Intelligent air combat; Flight verification

0 引言

当前,随着科技发展以及大国间竞争的加剧,传统攻击模式已经不能满足未来复杂的作战场景,在信息化、网络化、智能化和体系对抗环境下,有人-无人战斗机联合编组,实施智能决策、协同攻击的作战方式已成为未来的主要发展方向^[1],主要军事强国都提出了自己对未来空战的理解。美国国防部公开的《无人系统综合路线图(2017—2042)》中,人机协同被列为四个关键主题之一,并在2020年开始正式应用成熟的带有战术意义的有/无人机多机编队技术^[2]。

自2015年以来,美国提出了分布式作战^[3]、联合全域战^[4]、自主空战^[5]等新作战概念,协同与智能技术是未来空战的关键技术。因此,对协同与智能技术的试飞验证也是快速实现关键能力的重要组成部分。

在美国空战演进(Air Combat Evolution, ACE)项目实施途径中,为实施和验证自主平台机动算法,推进人工智能技术在单机和编队战术行为中的自主空战机动应用,开发了近距离格斗算法。美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)空天博格(Skyborg)项目主要面向空中格斗、情报监视侦察和态势感知等任务,希望利用人工智能实现无人僚机的自主飞行以及控制、管理部分战斗任务,提出先在小型但具有代表性的高速替代飞机应用自主飞行控制系统,最终至2023年前创造一型堪比有人战斗机的自主无人作战飞机^[6];法、德“未来空战系统”(Future Combat Air System, FCAS)项目在研制进程中,进行了包含5架由空中客车公司制造的Do-DT25无人机和1架有人驾驶的指控飞机的飞行试验;美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)战术技术办公室(Tactical Technology Office, TTO)启动拒止环境中协同作战(Collaborative Operations in Denied Environment, CODE)项目,研发先进的自主协同算法和监督控制技术,旨在增强无人机在拒止环境下的作战能力^[7];波音澳大利亚公司提出了空中力量编组系统(Airpower Teaming System, ATS)忠诚僚机概念,可与E-7A预警机、EA-18G电子战飞机、F/A-18E/

F和F-15E多功能战斗机等编组协同作战^[8]。

目前,国内也有针对它机试飞所做的一些技术验证,阎家亮等提出了对机载光电雷达它机试飞技术的研究,验证了光电雷达在真实试飞环境下的任务效能^[9];姜健等提出了基于它机试飞的航空发动机试验技术研究,研究了它机试飞平台飞机搭载发动机的选型原则、设计以及建设等问题^[10];韩春永等提出了嵌入式采集器在它机试飞中的应用,并验证了其在它机试飞中的功能实现^[11];赵海刚等为满足某型全数控涡轴发动机试飞的技术需求,搭建了它机试飞平台并进行试验,验证了全数控涡轴发动机的可靠性^[12]。

同时,基于一致性的多无人机协同编队算法的研究,不少学者也提出了自己的见解,如任伟提出了领航-跟随法、行为控制法是可以被统一到一致性理论的框架中^[13];文献[14]提出了一种虚拟结构法、领导-跟随法及基于行为法相结合的方法,提高了机间通信的可靠性;文献[15]提出了基于双模模型预测控制方法,设计了领导-跟随的控制律;文献[16]提出了一种在四旋翼无人机上验证基于一致性的时变编队控制理论。

它机试飞试验技术论证在国内外的项目中均有开展,本文提出了它机协同试飞验证方法,采用模块化封装以及分层控制的思想,由离线仿真模块验证算法;执行层根据控制指令对搭建的无人机平台进行控制,并且采用地面站和数据链保证系统的安全可靠;最后,在搭建的试飞平台上对融合领航-跟随以及一致性理论思想的四机协同编队算法进行了飞行试验,以验证设计它机试飞系统的可靠性。

1 它机试飞系统设计与搭建

1.1 系统总体架构

它机试飞验证系统由仿真验证系统、无人机平台、地面站和信息处理系统共同组成。为了实现系统对算法的应用性和适用性,对无人机平台的搭建和设计分为平台规划和场景模拟。平台规划实现对它机平台的改装设计,包括飞机飞行品质、机动性、多功能通信能力;场景模拟实现对平台运行环境的设计、交互环境以及自然环境的融合,以尽可能地模拟真机的飞行环境。为了增强验证系统的

稳定性和可靠性,通过地面站实时监控、数据链独立运行,以及信息处理系统实现信息交互,控制无人机平台,保证其安全稳定。

系统总体架构如图 1 所示,验证系统包括离线仿真模块、等效试飞模块和信息交互与反馈模块。离线仿真模块为适用于不同条件下的算法验证,根据实际应用需求,对算法进行设计和编写。等效试飞模块根据算法模块的输入输出环境采取相应平台的设计,对平台正常运行的环境进行场景模拟,实现相对应算法参数的设置,同时以信息交互环境和自然环境因素为参照,尽可能保证算法在真机环境下的仿真验证。信息交互与反馈模块通过地面站对平台提供实时定位导航,通过串口通信进行数据传输,及时调整反馈信息,做好试验过程中的信息处理,同时保证试验结束后的平台回收。

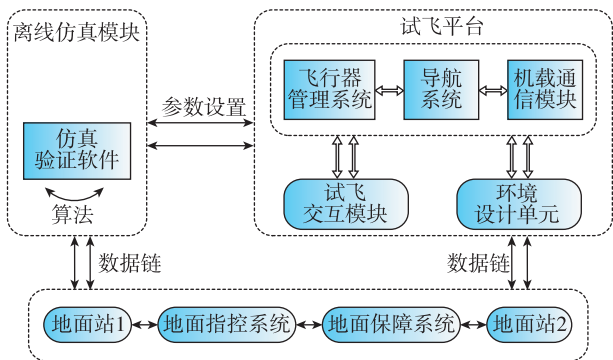


图 1 它机试飞验证系统总体架构图

Fig. 1 Structure chart of test flight verification system

1.2 试验验证流程

它机试飞验证方法具有良好的扩展性,能够适用于智能空战环境下不同的算法,且具有很强的适用性,可以对不同算法做有效验证。本文方法提出的试验流程包括算法分析、平台分析及设计、场景分析及设计、等效性分析、仿真验证、迭代优化、真机验证以及结果评估。它机试飞试验验证流程如图 2 所示。

算法分析主要对算法的搭载环境进行分析,通过对比它机和待验证型飞机试飞算法运行参数,确认算法的输入输出是否具有相同的数据性质与类型,可验证算法的核心运算逻辑是否充分有效。

平台分析针对它机试飞验证平台做功能分析以及架构设计,分析平台下的系统功能在算法运行决策和外部环境下的变化,以及分析和检验平台系统在各种运行场景下的状态特性和交互状况。在

平台选择过程中,应当充分考虑所选择平台的性能比对结果,使之能够充分满足算法对于平台能力的要求以及平台环境下的实现效果。结合平台下的应用场景可模拟性,对于待验证平台的环境要求,充分设计正常环境与非正常环境以及自然环境,判断所选择平台的环境适配能力能否达到该要求。

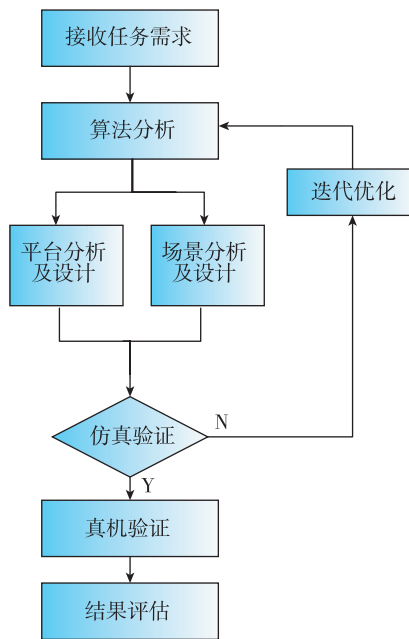


图 2 它机试飞试验验证流程

Fig. 2 Flow chart of test flight verification

等效性分析通过合理的设计使核心算法与外部环境解耦,可以在它机上完成对算法功能和性能的验证。

仿真验证是经等效性分析后,通过建立仿真模型和仿真试验对算法、平台以及场景设计的验证。通过仿真验证可以进一步检验各个功能模块设计的合理性以及正确性,从而达到对实际环境的真实模拟和应用,可判断在设计环节中的优缺点,并做进一步的迭代优化。

真机验证是在优化解决仿真所暴露出的问题,保证算法、平台以及环境稳定性和安全性的前提下,对待验证平台做进一步的验证和优化处理。

在进行真机验证后,应对验证结果做正确性和合理性分析,对于不满足验证要求的结果以及低质量的结果,预估导致结果的可能性,做更深一步的分析处理。

2 四机协同编队算法

本文采用四机协同编队算法以验证它机试飞

方法的适用性。在四机协同编队算法设计中,采用经典的带自动驾驶仪的三自由度无人机数学模型^[17]。无人机根据控制指令使速度保持器、航向角保持器、航迹俯仰角保持器保持飞行,如式(1)所示

$$\begin{cases} \dot{x}_i = V_i \cos\phi_i \cos\theta_i \\ \dot{y}_i = V_i \sin\phi_i \cos\theta_i \\ \dot{z}_i = V_i \sin\theta_i \\ \dot{V}_i = -\frac{1}{\tau_v} V_i + \frac{1}{\tau_v} V_i^c \\ \dot{\phi}_i = -\frac{1}{\tau_\phi} \phi_i + \frac{1}{\tau_\phi} \phi_i^c \\ \dot{\theta}_i = -\frac{1}{\tau_\theta} \theta_i - \frac{1}{\tau_\theta} \theta_i + \frac{1}{\tau_\theta} \theta_i^c \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 表示无人机在三维惯性空间中的位置; (V_i, ϕ_i, θ_i) 分别表示无人机的飞行速度、航向角和航迹俯仰角; $u_i = [V_i^c, \phi_i^c, \theta_i^c]$ 为系统的控制输入,分别指的是速度指令、航向角指令和俯仰角指令; $\tau_v, \tau_\phi, \tau_\theta$ 是与无人机及其飞行状态相关的速度时间常数、航向角时间常数及两个俯仰角时间常数。

四机协同编队算法是在集群系统中,采用长机-僚机控制方法,并融合一致性理论思想,以区别于目前主流的编队控制算法。将编队中某架无人机定义成长机,承担领航任务,其他无人机定义成僚机。僚机跟随长机运动,根据设置的相对于长机的位置偏移,僚机总是期望保持在长机附近的某一位置,编队的控制问题也就转换成了僚机的位置控制问题。僚机跟随长机运动,将长机和僚机之间的位置误差转换为速度、偏航角、航迹俯仰角控制输入指令,僚机接收这一指令,通过调整航向、速度以及高度改变自身飞行状态。控制航向角和速度一致性算法,即提出一致平衡点为:所有无人机航向角和速度的加权平均;同时,实际编队中根据长机提供的期望航向值和期望速度值,保证航向角以及速度的一致性。

航向控制策略如式(2),速度控制策略如式(3),同时式(4)给出高度控制策略,可保证各无人机之间的高度间隔,调整编队飞行高度避障。当长机检测到前方有障碍物时,采取的避障策略为调整长机的飞行高度,僚机跟随长机做高度调整且保持编队飞行,或者也可以通过编队变换的方式进行避障,判断障碍物的间距以及无人机间的最小安全距离,变换队形直至通过障碍区。

$$\begin{cases} \phi_i^c = \phi_i + \frac{1}{1+n_i} u_i \\ u_i = -b_i(\phi_i - \phi^*) - \sum_{j=1}^n a_{ij}(\phi_i - \phi_j) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} v_i^c = v_i + \tau_v u_i \\ u_i = -c_i(v_i - v^*) - \sum_{j=1}^n a_{ij}(v_i - v_j) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} z_i^c = z_i + \frac{\tau_z}{\tau_z} \dot{z}_i + \tau_z u_i \\ u_i = -k\dot{z}_i - \sum_{j=1}^n a_{ij}[(z_i - z_j - z_{ij}^r) + \gamma(\dot{z}_i - \dot{z}_j)] \end{cases} \quad (4)$$

式(2)中, ϕ_i^c 为航向控制指令; n_i 为无人机个数; b_i 为航向角控制系数; ϕ^* 为航向角收敛值; a_{ij} 为权值系数。式(3)中, v_i^c 为速度控制指令; c_i 为速度控制系数; v^* 为速度收敛值。式(4)中, z_i^c 为高度控制指令; k 为控制参数; z_{ij}^r 为无人机在纵轴平面上的相对距离。

因此,在实际编队飞行中,通过无人机编队的横向平面控制以及纵向平面控制,利用无人机横纵向解耦的特性,在多无人机空间编队队形中采用编队控制策略如式(5)。通过调整 b_i, c_i 以及高度控制系数 k ,可以同时指定编队飞行航向、飞行速度以及飞行高度,控制无人机编队以指定角度、指定速度和指定高度向期望位置移动。

$$\begin{cases} \phi_i^c = \phi_i - b_i(\phi_i - \phi_i^*) - \sum_{j=1}^n a_{ij} \left[\frac{1}{1+n_i} (\phi_i - \phi_j) + k_i^\phi \sum_{j=N_i}^n (y_i' - y_j' - y_{ij}^r) \right] \\ v_i^c = v_i - c_i(v_i - v^*) - \sum_{j=1}^n a_{ij} \left[\tau_v (v_i - v_j) + k_i^v \sum_{j=N_i}^n (x_i' - x_j' - x_{ij}^r) \right] \\ z_i^c = z_i - \frac{\tau_z}{\tau_z} \dot{z}_i + \tau_z \left\{ -k\dot{z}_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} [(z_i - z_j - z_{ij}^r) + \gamma(\dot{z}_i - \dot{z}_j)] \right\} \end{cases} \quad (5)$$

式中, x_{ij}^r, y_{ij}^r 分别为无人机 i 和无人机 j 之间的距离; k_i^v 和 k_i^ϕ 分别为调整无人机间隔的控制增益。

通过无人机的状态控制和队形控制,使多架无人机完成协同编队。在编队保持时,队形矩阵为固定矩阵 $\mathbf{R}_{ij} = [x_{ij}', y_{ij}', z_{ij}']^T$; 改变队形时,队形矩阵则需重新被定义为 $\mathbf{R}_{ij}(t) = [x_{ij}'(t), y_{ij}'(t), z_{ij}'(t)]^T$ 。按照长机与僚机之间的位置控制以及状态控制约束,当僚机与长机机间距离满足式(6),队形

可保持稳定。当编队中长机出现故障或者检测不到其他无人机的信号时,定义距离长机最近位置的僚机为新的长机,进行编队重构;当编队中某个僚机出现故障,长机根据当前情况调整变换组成新的队形。

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} (x'_i(t) - x'_j(t)) = x'_{ij}(t) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (y'_i(t) - y'_j(t)) = y'_{ij}(t) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (z'_i(t) - z'_j(t)) = z'_{ij}(t) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (v_i(t) - v_j(t)) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\psi_i(t) - \psi_j(t)) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由于在无人机协同编队任务中,存在时间延迟比较突出的问题,容易对系统的稳定性产生影响。通过设计时延控制算法,保证无人机编队收敛以及稳定的时延上限,以降低时延问题产生的影响。引用(Schur 补引理),假设有 n 架无人机参与编队,令 $\xi_i = [x_i, y_i, z_i]^T, \zeta_i = [v_i^x, v_i^y, v_i^z]^T$, 则有

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = \zeta(t) \\ \dot{\zeta}(t) = -k_1[\mathbf{L}\zeta(t - \tau) - \text{diag}(\mathbf{A}\mathbf{R}_1)] - k_2(\mathbf{L} + \mathbf{B})[\zeta(t) - v_0(t) \otimes \mathbf{I}_n] \end{cases} \quad (7)$$

其中, k_1, k_2 表示控制增益; $\mathbf{R}_1 = [r_{ij}]_{n \times n}, r_{ij}$ 表示编队内无人机机间间隔信息; $\mathbf{I}_n = [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbf{R}^n$; 符号 \otimes 表示 Kronecker 积。

令 $\zeta(t) = [\mathbf{L}\zeta(t - \tau) - \text{diag}(\mathbf{A}\mathbf{R}_1), \zeta(t) - v_0(t) \otimes \mathbf{I}_n]^T$, 可将式(7)表述为动态误差系统方程为

$$\dot{\zeta}(t) = \mathbf{E}\zeta(t) + \mathbf{F}\zeta(t - \tau) \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_n & \mathbf{L} \\ \mathbf{O}_n & -k_2(\mathbf{L} + \mathbf{B}) \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_n & \mathbf{O}_n \\ -k_1\mathbf{I}_n & \mathbf{O}_n \end{bmatrix}$$

定义 Lyapunov-Krasovskii 函数为

$$V(t) = \zeta^T(t)\mathbf{P}\zeta(t) + \int_{t-\tau}^t \zeta^T(s)\mathbf{Q}\zeta(s)ds + \int_{-\tau}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{\zeta}^T(s)\mathbf{R}\dot{\zeta}(s)d\theta$$

联立动态误差系统方程,对其求导可得式(9),其中, $\mathbf{A} = (\mathbf{E} + \mathbf{F})^T\mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{E} + \mathbf{F}) + \tau\mathbf{E}^T\mathbf{R}\mathbf{E} + \mathbf{Q}$, 并根据(Schur 补引理)进行判定。若存在正定的对称矩阵 $\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}$ 满足带有时延 τ 的不等式,误差系统全局渐进稳定,同时编队无人机在满足固定时延的情况下渐进收敛至预定编队队形,并使编队飞行速度趋于一致。

$$\dot{V}(t) < 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{P}\mathbf{F} & \tau\mathbf{E}^T\mathbf{R}\mathbf{F} \\ * & -\frac{\mathbf{R}}{\tau} & \mathbf{O}_{2n} \\ * & * & \tau\mathbf{F}^T\mathbf{R}\mathbf{F} - \mathbf{Q} \end{bmatrix} < 0 \quad (9)$$

根据算法原理,编队算法可实现控制僚机和长机之间的相对运动关系,在算法功能上可实现无人机飞行平台的解耦,但目前该算法不能涵盖,如通信受严重干扰、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)拒止等情况下的编队场景。因此,未来需要对通信信道干扰及自身定位拒止等环境下如何保持算法编队能力进行探索研究与试验。

设计它机试飞无人机成员编队算法执行流程如图 3 所示。同时,在实际试飞过程中,设置每个无人机的初始状态如表 1 所示,以及试验中涉及的相关参数如表 2 所示。

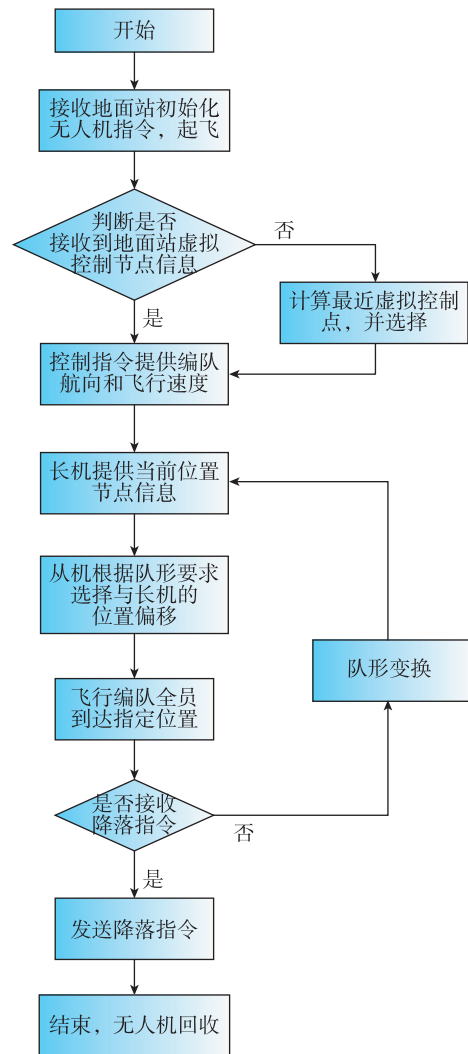


图 3 无人机成员编队算法执行流程图

Fig. 3 Flow chart of UAV formation control algorithm

表 1 各无人机初始状态

Tab. 1 The initial states of different UAVs

无人机编号	位置/ (m,m,m)	飞行速度/ (m/s)	爬升速度/ (m/s)	航向角/ rad
6001	(0,0,280)	20	5	$\pi/6$
6002	(40,0,250)	27	7	$\pi/7$
6003	(20,-30,300)	21	5	$\pi/3$
6004	(0,-50,290)	30	8	$\pi/4$

表 2 试验参数取值

Tab. 2 Test parameter selection

参数	取值
b_i	1
c_i	0.9
k	1
k_i^v	0.8
k_i^ψ	0.1

3 试验验证

设计它机试飞验证平台由无人机编队系统、目标机以及地面指控系统构成。系统实物如图 4 所示。



(a) 试飞无人机外形图



(b) 地面控制站—测控车

图 4 它机试飞验证平台系统

Fig. 4 The test flight verification platform

无人机编队试飞系统由 4 架改装民用无人机、2 架目标机和一套地面站设备组成。其中,试飞无人机电载重能力不小于 30kg,起飞总质量在 120~

150kg。目标机起飞总质量在 20~25kg。试飞样机平台由固定翼无人机机体、动力装置、燃油系统、电源系统、飞行器管理系统、导航系统、大气数据系统、机载通信系统、机载有效载荷(机载雷达、机载光电探测设备)和起落架等系统或设备组成。地面指控系统由地面控制站和地面保障系统组成,其中地面控制站主要由测控车和地面保障系统组成;地面保障系统主要由地面检测供电、转场运输、常务保障等三部分组成。

试飞试验选取 4 架无人机,以 6001 号为长机,6002、6003、6004 号为僚机,主机按程控航路飞行,以长机为基准,僚机由协同编队算法进行控制。为检验算法功能,验证协同编队队形变换的能力,流程为:起飞盘旋集结→楔队飞行→菱队飞行→横队飞行→返场解散降落。协同编队队形变换如图 5 所示。

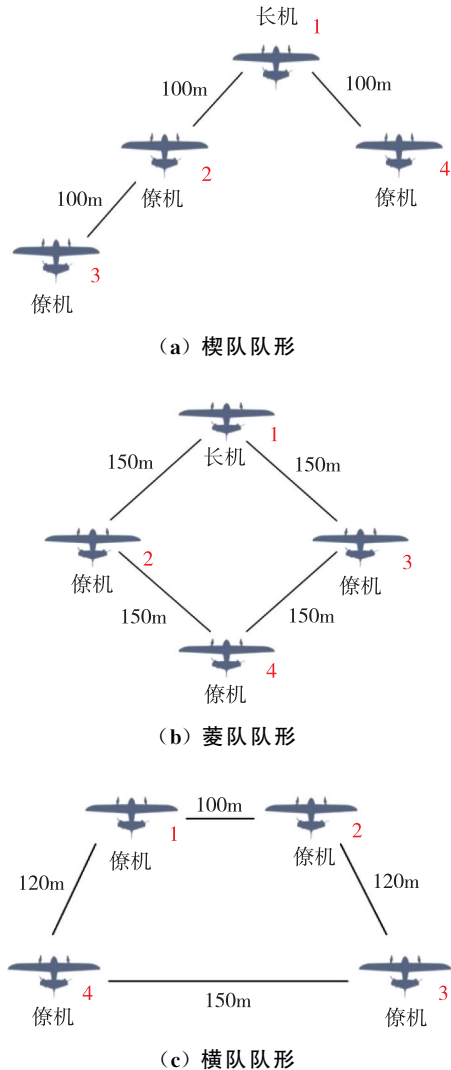


图 5 协同编队队形变换(楔队—菱队—横队)

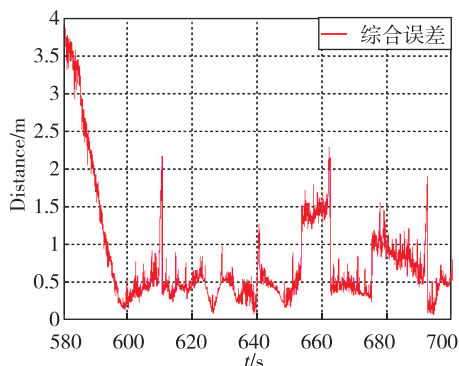
Fig. 5 Collaborative control of formation change (Wedge team-Diamond team-Transverse team)

无人机编队飞行有多种实现方式,战斗机采用集中长僚式编队的管理通过长机实现。地面站模拟有人机下发指令,长/僚机的角色和位置可以进行变换和调整。由于每架飞机均存储本次任务航线信息,该信息可以视为横航向上的基准信息,大大提高编队控制精度,同时减少编队内飞机传输的信息。

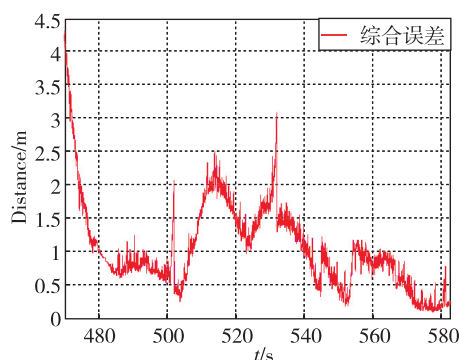
建立编队坐标系,以长机质心为坐标原点, X 轴为长机航迹坐标系, Z 轴垂直指向大地, Y 轴在 X 轴右侧,符合右手坐标系定义。编队实际飞行过程中,与存储的导航信息间的位置误差定义为编队导航误差,即:在队形保持阶段,当长机匀速定高平飞

时,以僚机期望位置为起点,指向僚机实际位置的向量。将其投影到编队坐标系时,分解出 X、Y、Z 三个方向的误差。图 6 所示为各编队飞行时不同飞机的导航误差。

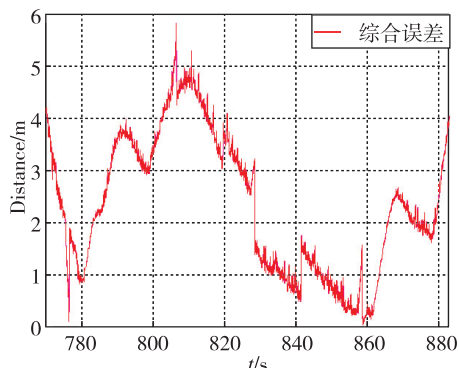
根据飞行数据记录以及误差分析采集方法,分析图 6 中不同编队队形下无人机飞行导航误差曲线。由于在同一编队队形下,不同飞机的机载计算机开关机时间存在差异,所以表现为飞机的综合误差曲线中不同飞机的开机时间与关机时间不同,但是不同飞机的飞行时间区间均保持一致。观察图 6 (a ~ c)发现,楔形编队飞行保持时间在 111s,在飞行保持时间内,各无人机的飞行综合误差均小于



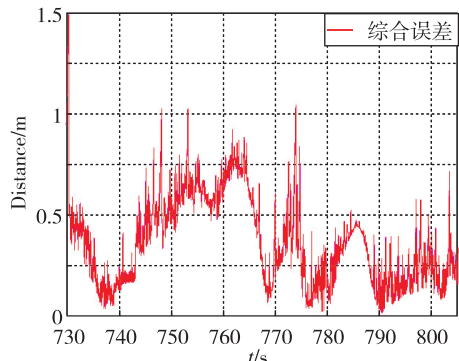
(a) 楔队队形中 6002 号机飞行综合误差



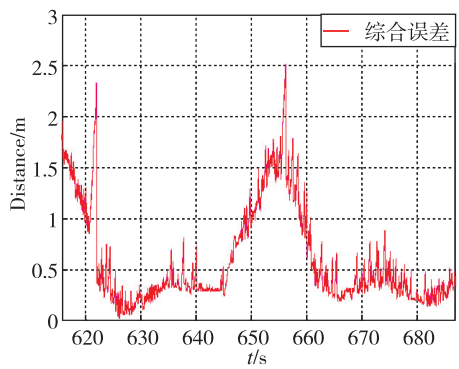
(b) 楔队队形中 6003 号机飞行综合误差



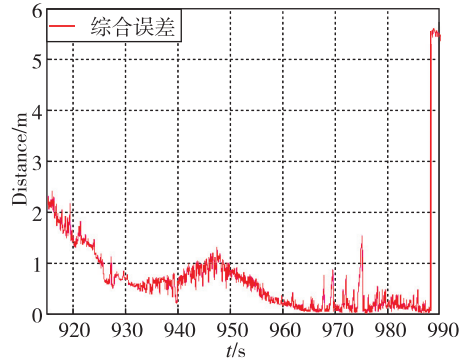
(c) 楔队队形中 6004 号机飞行综合误差



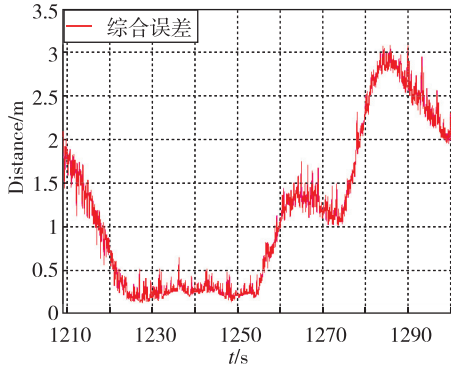
(d) 菱队队形中 6002 号机飞行综合误差



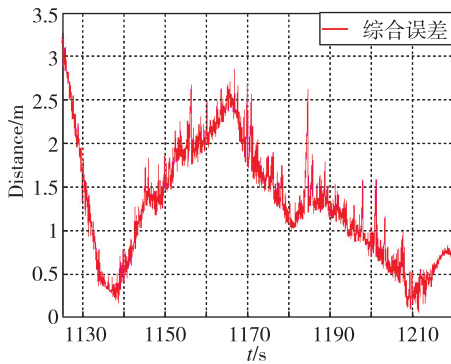
(e) 菱队队形中 6003 号机飞行综合误差



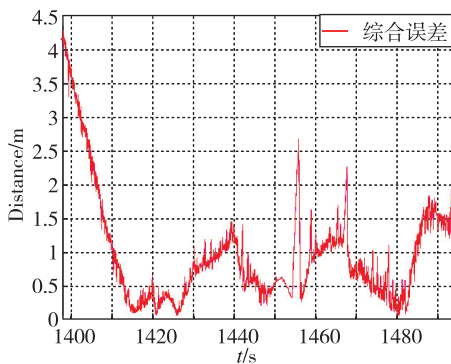
(f) 菱队队形中 6004 号机飞行综合误差



(g) 横队队形中 6002 号机飞行综合误差



(h) 横队队形中 6003 号机飞行综合误差



(i) 横队队形中 6004 号机飞行综合误差

图 6 不同编队飞机飞行时的导航误差曲线
Fig. 6 Navigation error curves of aircraft in different formations

等于 5m;由图 6(d ~ f)发现,菱形编队飞行保持时间在 74s,队形保持期间各无人机的飞行综合误差均小于等于 3m;由图 6(g ~ i)发现,横形编队飞行保持时间在 90s,队形保持期间各无人机的飞行综合误差均小于等于 4.5m。由此可知,在不同编队队形保持下,各无人机的综合误差曲线均小于等于 5m,说明通过算法验证能够实现无人机编队控制的稳定性以及无人机编队成员状态的一致性。

同时,对比图 6 中各编队队形下不同无人机的

综合误差曲线可知,在不同编队飞行情况下,各无人机的飞行误差均在设计的算法指标内,可实现算法对于不同编队飞行条件下的功能要求。所以,由上述数据分析表明,它机试飞验证方法可以达到对于自主协同控制算法的有效验证。

4 结论

针对智能空战环境,本文提出了一种高适用性的它机协同试飞验证方法,并用四机协同编队算法进行了验证,运行结果表明:

1)系统完整度高,可实现从地面站指挥系统、无人机到战场态势的完整展现。

2)系统运行稳定可靠,能够和仿真系统形成闭环,提升算法开发迭代的速度与效率,加速算法成熟。

3)系统架构开放性更好,自包含的算法模块设计,使模块间实现了完全解耦,可以方便地进行模块替换,对不同算法的验证效率有明显提升。

它机试飞验证方法因其迭代速度快、安全性高、稳定性高、成本低等特点,可用作中间阶段算法的提前试飞验证,为算法的开发迭代提供有效经验。但面向空战环境下不同集群协同控制任务的提出,下一步工作将进一步扩大验证系统的验证范围,解决在平台设计中针对更多复杂环境下的协同编队控制试验研究,为验证无人机自主与协同关键技术提供有力支撑。

参考文献

- [1] 申超,李磊,吴洋,等. 美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J]. 战术导弹技术, 2018, 39(1): 16-21.
Shen Chao, Li Lei, Wu Yang, et al. Research on the development of US air manned/unmanned autonomous cooperative combat capability[J]. Tactical Missile Technology, 2018, 39(1): 16-21(in Chinese).
- [2] 樊洁茹,李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(1): 39-47.
Fan Jieru, Li Dongguang. Overview of MAV/UAV collaborative combat and its key technologies[J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2(1): 39-47(in Chinese).
- [3] 杨建军,赵保军,陈士涛. 空中“分布式作战”概念解析[J]. 军事文摘, 2019(2): 11-15.
Yang Jianjun, Zhao Baojun, Chen Shitao. An analysis

- of the concept of “distributed operation” in the air[J]. Military Abstract, 2019(2): 11-15(in Chinese).
- [4] 范晋祥, 陈晶华. 未来空战新概念及其实现挑战[J]. 航空兵器, 2020, 27(2): 15-24.
Fan Jinxiang, Chen Jinghua. New concepts of future air warfare and the challenges for its realization[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(2): 15-24(in Chinese).
- [5] Rodin E Y, Lirov Y, Mittnik S, et al. Artificial intelligence in air combat games[J]. Computers and Mathematics with Applications, 1987, 13(1-3): 261-274.
- [6] Trevithick J. USAF plans for its Skyborg AI computer brain to be flying drones in the next two years[EB/OL]. [2019-03-20]. [2020-05-01]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/27067/usaf-plans-for-its-skyborg-ai-computer-brain-to-be-flying-drones-in-the-next-two-years>.
- [7] DARPA reveals details of CODE program[EB/OL]. [2019-03-25]. [2021-03-11]. <https://www.uasvision.com/2019/03/25/darpa-reveals-details-of-code-program>.
- [8] 郑大壮. “忠诚僚机”概念将大幅提升有人/无人机协同作战能力[J]. 防务视点, 2016(6): 63.
Zheng Dazhuang. The concept of “loyal wingman” will greatly enhance the capability of manned/UAV cooperative operations[J]. Defense Viewpoint, 2016(6): 63(in Chinese).
- [9] 闯家亮, 喻彪, 杨百剑, 等. 机载光电雷达它机试飞技术研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 728-730.
Chuang Jialiang, Yu Biao, Yang Baijian, et al. Research on other plane flight test technology of airborne electro-optic radar[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 728-730 (in Chinese).
- [10] 姜健, 苗禾状, 张晓飞, 等. 基于它机试飞的航空发动机试验技术研究[J]. 工程与试验, 2017, 57(2): 36-41.
Jiang Jian, Miao Hezhuang, Zhang Xiaofei, et al. Study on test technology for aero-engine based on flight test bed [J]. Engineering & Test, 2017, 57(2): 36-41(in Chinese).
- [11] 韩春永, 李太平. 嵌入式采集器在它机试飞中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2015(11): 220-222.
Han Chunyong, Li Taiping. Application of embedded collector in aircraft test flight[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2015(11): 220-222(in Chinese).
- [12] 赵海刚, 郭佳男, 王俊琦. 某型涡轴发动机试飞平台设计及试验验证[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 820-824.
Zhao Haigang, Guo Jianan, Wang Junqi. Design and test verification of a turboshaft engine flight test platform[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 820-824(in Chinese).
- [13] Ren W. Consensus based formation control strategies for multi-vehicle systems[C]// Proceedings of American Control Conference. Minneapolis, 2006: 6-16.
- [14] Kownacki C. Multi-UAV flight using virtual structure combined with behavioral approach[J]. Acta Mechanica et Automatica, 2016, 10(2): 92-99.
- [15] Duan H B, Liu S Q. Non-linear dual-mode receding horizon control for multiple unmanned air vehicles formation flight based on chaotic particle swarm optimization[J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(11): 2565-2578.
- [16] Dong X W, Zhou Y, Zhang R, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies [J]. Control Engineering Practice, 2016, 46: 26-36.
- [17] Wang J, Xin M. Integrated optimal formation control of multiple unmanned aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1731-1744.

(编辑:李瑾)