

引用格式: 何志凯,舒振杰,王晓华,等.无人机蜂群综合试验标准研究[J].标准科学,2025(2):105-110.

HE Zhi-kai,SHU Zhen-jie,WANG Xiao-hua,et al. Research on the Comprehensive Test Standard for UAV Swarm[J]. Standard Science,2025(2):105-110.

无人机蜂群综合试验标准研究

何志凯 舒振杰 王晓华 刘璐 王兴业

(中国航空综合技术研究所)

摘要:【目的】针对无人机蜂群特性需综合试验评估现状,研究其分类,构建综合能力体系框架,分析试验技术,梳理试验标准需求并构建标准体系框架,提出重点标准建议,助力大规模无人机发展。【方法】从多维度对无人机蜂群分类,采用“场景-需求-能力”法分析综合能力,研究基于LVC的试验技术和实飞验证技术,分析标准需求并构建体系。【结果】明确无人机蜂群分类、综合能力、试验技术及标准体系框架相关内容。【结论】对无人机蜂群装备研制、试验评估有指导意义,有力支撑大规模无人机的应用和发展。

关键词: 蜂群; 分类; 试验; 标准

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2025.02.016

Research on the Comprehensive Test Standard for UAV Swarm

HE Zhi-kai SHU Zhen-jie WANG Xiao-hua LIU Lu WANG Xing-ye

(China Aero-Polytechnology Establishment)

Abstract: [Objective] In view of the current situation that the characteristics of UAV swarms require comprehensive experimental evaluation, this paper studies its classification, constructs a comprehensive capability system framework, analyzes experimental technologies, sorts out the requirements of experimental standards and constructs a standards system framework, and puts forward key standard suggestions to assist the development of large-scale UAVs. [Methods] The UAV swarms are classified from multiple dimensions, the comprehensive capabilities are analyzed using the “scenario-demand-capability” method, the experimental technologies based on LVC and the actual flight verification technology are studied, and the standard requirements are analyzed and the system is constructed. [Results] The relevant contents of the classification, comprehensive capabilities, experimental technologies and standard system framework of UAV swarms are clarified. [Conclusion] It has guiding significance for the equipment development and experimental evaluation of UAV swarms and strongly supports the application and development of large-scale UAVs.

Keywords: swarm, classification, test, standards

基金项目: 本文受国家重点研发计划“国家质量基础设施体系”重点专项(项目/课题编号: 2021YFF0601303)资助。

作者简介: 何志凯, 硕士, 研究员, 研究方向为无人系统标准化。

舒振杰, 硕士, 研究员, 研究方向为航空标准化。

0 引言

无人机蜂群源于蜂群这种具有较低智能的生物迁徙、巡游或是躲避敌害过程中呈现出来的集群行为^[1],是由大量低成本具有一定智能化的无人机,基于开放式体系架构进行集成群组,以通信网络信息为中心,以系统的群智涌现能力为核心,以平台间的协同交互能力为基础,以单平台的节点作战能力为支撑,构建的一种具有抗毁性、低成本、功能分布化等优势 and 智能特征的系统^[2]。

可见,无人机蜂群并不是多无人平台的简单编队,集群能力也不是单一平台能力的简单叠加。其具有无中心、自主协同、能力涌现等特性。传统试验评估具有如下局限:一是无法对这些能力进行评估,二是试验成本居高不下,三是试验周期较长。因此需开展综合试验。无人机蜂群综合试验评价是在无人机蜂群试验理论与框架的指导下,依据集群试验的需求,在试验环境下,为验证无人机蜂群综合能力而制定科学、规范、有效的试验过程和试验方法。

为确保试验的可重复性和客观公正,所有试验都应依据标准进行。当前,开展无人机蜂群综合试验的流程还不规范,方法还不统一,存在很大风险,迫切需要制定无人飞行器蜂群综合试验标准,规范无人飞行器蜂群综合试验方法,提高无人飞行器蜂群综合试验的效率。

1 无人机蜂群的分类

1.1 按平台重量分类

无人机蜂群按平台重量(WG)可分为以下8类:1) $WG < 100\text{ g}$,如“隐蔽接敌自主一次性使用飞机(CICADA)”；2) $100\text{ g} \leq WG < 500\text{ g}$,如“灰山鹑”(Predix)无人机；3) $500\text{ g} \leq WG < 5\text{ kg}$,如LOCUST项目中的“郊狼”无人机；4) $5\text{ kg} \leq WG < 20\text{ kg}$,如“红鸢”(Redkit)无人机和“眼镜蛇”无人机；5) $20\text{ kg} \leq WG < 100\text{ kg}$,如“飞眼”无人机；6) $100\text{ kg} \leq WG < 300\text{ kg}$ ；7) $300\text{ kg} \leq WG < 1000\text{ kg}$,如DARPA的“小精灵”无人机；8) $WG \geq 1000\text{ kg}$ 。

1.2 按平台构型分类

无人机蜂群按平台构型可分为以下4类:1)固定翼无人机蜂群；2)旋翼无人机蜂群；3)复合翼无人机蜂群；4)弹群。

1.3 按发射方式分类

无人机蜂群按发射/起飞方式可分为以下5类:

1)陆基滑跑型:蜂群个体采用陆地地面滑跑的方式起飞；2)陆基弹射型:蜂群个体采用专用的发射装置进行弹射起飞,一般包括气体弹射和火箭助推的方式提供初始弹射动力；3)海基弹射型:蜂群个体以海基水面舰艇或水下潜艇为载体平台,采用专用的发射装置进行弹射起飞；4)空中投放型:采用有人机、无人机、导弹等作为运输载体,将蜂群无人机投放到目标区域附近,快速抵达目标区域；5)天基投放型:采用卫星等航天器作为运输载体,将蜂群无人机投放到目标区域附近。

1.4 按蜂群规模分类

无人机蜂群按规模可分为以下4类:1)小规模无人蜂群:数量小于64架；2)中等规模无人蜂群:数量在64到256架之间；3)大规模无人蜂群:数量在256到512架之间；4)超大规模无人蜂群:数量512架以上。

1.5 按使用用途分类

无人机蜂群按使用用途可以分为以下6类:1)攻击型无人机蜂群:无人机蜂群主要携带攻击型任务载荷,对敌方重要目标进行物理打击和摧毁；2)侦察型无人机蜂群:无人机蜂群主要携带侦察型载荷,对敌方重要目标进行光学、雷达、电子侦察；3)干扰型无人机蜂群:无人机蜂群主要携带干扰型载荷,对敌方重要探测目标进行长时间的干扰,使得对方功能短时失灵；4)诱饵型无人机蜂群:无人机蜂群主要携带有源或无源设备,模拟战斗机、巡航导弹编队等,对地防空雷达、警戒雷达等进行诱骗,诱使对方雷达开机、对导弹进行消耗；5)对抗型无人机蜂群:无人机蜂群主要对敌方无人机蜂群进行打击、网捕、撞击等手段,消耗对方无人机蜂群系统；6)混合型无人机蜂群:无人机蜂群携带多种任务载荷,实现侦察、攻击、干扰、诱饵、对抗等2种以上的作战应用。

2 无人机蜂群的综合能力

对于不同类型的无人机蜂群,其使用场景、功能不同,对无人机蜂群的综合能力要求也不同,通常采用“场景-需求-能力”的方法分析其综合能力。如图1所示,无人机蜂群的综合能力主要包括情报侦察能力、火力打击能力、指挥控制能力、环境适应能力和综合保障能力等5类。

3 无人机蜂群综合试验技术

3.1 基于LVC的无人机蜂群综合试验技术

综合运用网络互连,信息互通,虚实一体互操作技术,支撑试验场、部队和实验室联合构建集实兵实装(Live)、模拟器(Virtual)、数字仿真模型(Constructive)于一体的LVC联合试验环境,形成异地分布、功能一体的逻辑靶场,实现体系级对抗环境下的蜂群装备能力、指标试验和系统联合试验^[3]。为此必须开发开放的、分布式网络基础设施,用于蜂群系统和蜂群装备体系的使用评估、研制试验鉴定和作战试验鉴定;还必须在联合任务环境下充分、逼真地验证蜂群装备或体系完成特定

任务的能力。

无人机蜂群综合试验场景中的LVC环境构建,其重点是建立完整的公共体系结构,开发系列化通用化软件工具,设计灵活、开放并具有良好普适性的综合试验场地的联合试验环境。无人机蜂群综合试验环境由资源层(LVC资源层)、中间件层、基础平台服务层和应用层构成^[4]。资源层是完成试验任务的基础设施和基础数据,涵盖试验场内外部的LVC资源,包括数据资源、基础资源、实装资源、半实物资源以及仿真资源等。数据资源主要包括资源仓库和数据档案库。其中,资源仓库存放靶场资源的对象模型、组件模型和靶场实用工具等;数据档案库存放试验方案、试验数据和试验结果等。基础资源主要包括传输网络、时空基准等。传输网络是由国防干线网络、自建网络以及租用民用网络构建的可信可靠信息传输网络,通过高性能加密安全机制,统一规划IP地址,实施网络性能实时动态监测,支持联合试验任务。中间件层^[5]也是交互服务层,以面向服务模式向基础平台服务层提供标准访问接口,实现可互操作的、实时的、面向对象的分布式系统应用的建立,支持应用层软件快速高效集成及系统运行。中间件层具备在保证安全的条件下实现信息传输的能力。该层采用基于对象模

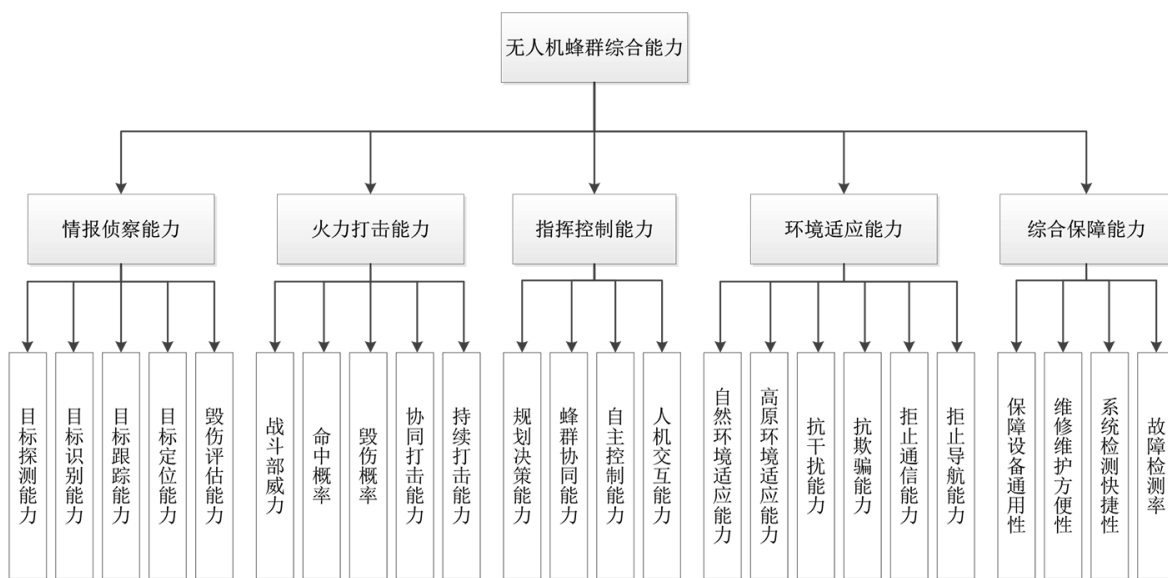


图1 无人机蜂群综合能力框架

型的信息传输模式,在试验场各试验系统运行过程中,试验场资源之间的所有通信都依据对象模型定义实现资源间的互操作。该层采用基于发布/订阅的数据交换机制,并支持以动态加载模式扩展的远程资源访问接口。基础平台服务层提供蜂群试验的基础服务,包括数据采集、数据分析处理、在线资源管理等,支撑试验系统的应用。应用层基于基础平台服务、面向试验科目的集成应用,包括蜂群的各项综合能力试验。

3.2 无人机蜂群的实飞验证技术

无人机蜂群仿真技术受限于软件仿真的局限性,仍然不能完整地对接蜂群战术进行更高还原度的准确研究。因此,可采用实飞验证技术平台作为蜂群单项技术试验验证工具与能力、指标评估手段,为蜂群单项能力的研究、评估、验证提供了可信的工具^[6]。

蜂群实飞验证平台支持多种类型微小型廉价无人机,单机飞行能力、抗风能力、机动能力、续航能力等满足蜂群试验验证要求。蜂群单机机载飞行数据记录系统可对飞机位置、姿态进行时间同步日志记录,并可通过数据链将信息实时发送到地面控制站用于蜂群技术试验、验证与评估。为保证试验安全性,单机须具备一定抗干扰能力,当干扰停止,飞机自动恢复原任务状态,也可通过地面站手动引导到指定地点。蜂群实飞验证平台具备地面弹射系统,可采用气动自动弹射或皮筋弹射等方式实现蜂群无人机密集起飞^[7]。

蜂群实飞验证平台地面站可提供无人飞行器蜂群集成态势显控界面,用于对集群内各无人机进行飞行参数监控、任务规划、参数设置、显示飞行状态、日志回放,同时具备实时动作控制、任务控制等操作,并可在特殊情况下人为进行单机返航等应急处理。

利用数据链回传数据及机载飞行数据记录设备对飞行日志进行储存,可对飞行路径、姿态及记录时间进行回放^[8],用于对蜂群效能、战术战法进行定量评估。蜂群日志回放功能具有如下组成部分:批量加载机载日志文件、可修改回放速度、开始/暂停回放、同步显示无人机集群飞行轨迹飞行参

数、同步显示各飞机参数对比曲线图^[9-10]。

无人机蜂群飞行日志数据及位姿数据导入评估软件后,带有时序位姿参数的真实数据生成动态三维数据,直观显示无人飞行器蜂群数据关系,为蜂群单项算法能力评估、效能指标评测提供依据。

4 无人机蜂群综合试验标准研究

4.1 无人机蜂群综合试验标准需求

综合试验是用户评价、采购无人机蜂群的重要手段,也是研制单位提高无人机蜂群综合性能及自身研究水平的重要方法。当前,无人机蜂群综合试验还存在以下亟待解决的问题:1)无人机蜂群综合试验需求不明确。当前关于无人机蜂群的作战样式研究还不深入,无人机蜂群实战对抗场景研究还不系统,基于实战对抗环境,开展无人飞行器蜂群综合试验与验证的项目还不明确,存在很大风险,迫切需要开展无人机蜂群综合试验技术研究,明确无人机蜂群综合试验内容,支撑无人机蜂群综合试验和验证。2)无人机蜂群综合试验方法不明确。当前,开展无人机蜂群综合试验与验证的方法、流程还不固化,存在很大风险,迫切需要制定无人机蜂群综合试验标准,规范无人飞行器蜂群综合试验方法,提高无人机蜂群综合试验的效率。3)无人机蜂群综合试验标准体系尚未建立。标准体系是标准化工作的基础,无人机蜂群综合试验标准需求尚未分析,无人机蜂群综合试验标准项目尚未规划,无法用标准指导和牵引无人机蜂群综合试验的开展。

4.2 无人机蜂群综合试验标准体系

在无人机蜂群综合能力和综合试验技术的基础上,构建无人机蜂群综合试验标准体系框架。如图2所示,无人机蜂群综合试验标准类型主要包括试验方法、试验规程、通用要求、评价方法、工作指南等标准。

(1) 基础标准

对蜂群综合试验基础标准提出术语定义和分类完整、试验文件编写规范、试验质量管理严谨、试验单位资质合规等要求。

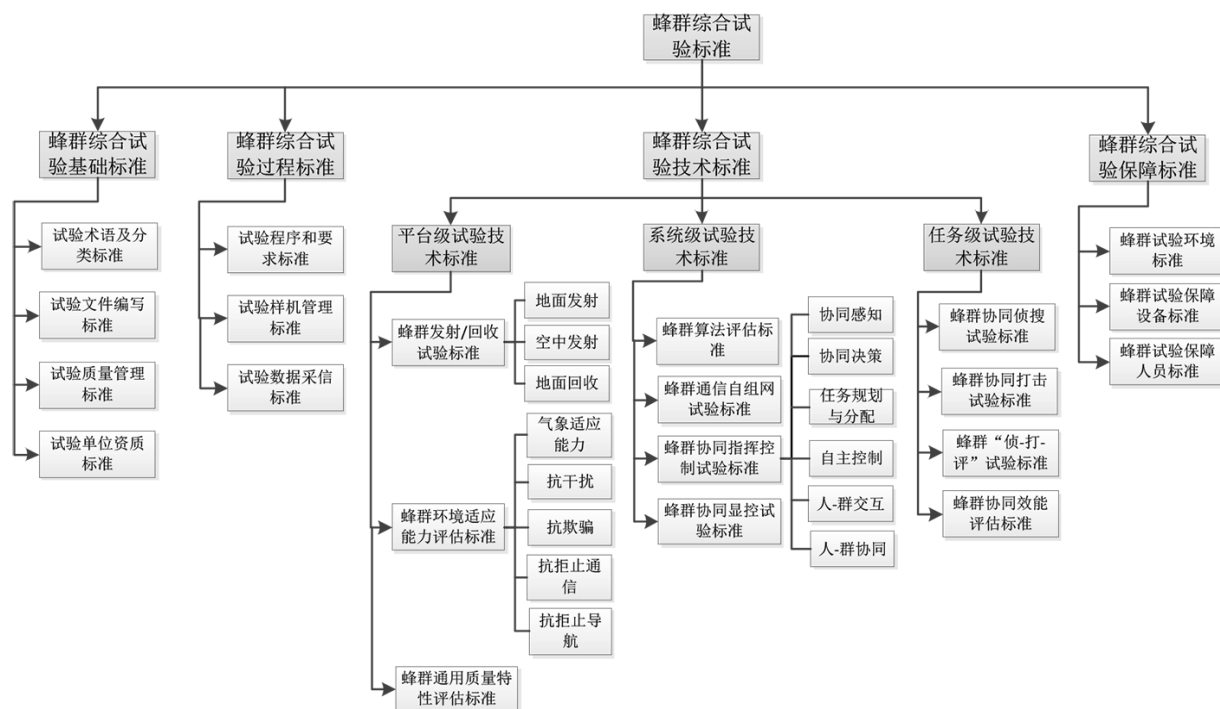


图2 无人机蜂群综合试验标准体系框架

蜂群综合试验基础标准分为4大类,分别是试验术语及分类标准、试验文件编写标准、试验质量管理标准、试验单位资质标准。

(2) 过程标准

对蜂群综合试验过程标准提出试验程序和要求规范全面、试验样机管理严谨合理、试验数据采集准确无误等要求。

蜂群综合试验过程标准分为3大类,分别是试验程序和要求标准、试验样机管理标准、试验数据采集标准。

(3) 技术标准

对蜂群综合试验技术标准提出技术覆盖全面、流程衔接流畅、领域划分合理、能力对应简明,技术要求可定量、指标参数可考核等要求^[11]。

蜂群综合试验技术标准分为11大类,分别是作为蜂群飞行器系统作战的必要性辅助环节的蜂群发射/回收试验、蜂群自组网试验及蜂群综合保障试验;体现蜂群飞行器系统基本战术能力的蜂群编队飞行试验标准^[12];作为蜂群系统核心作战任务的蜂群情报侦察试验、蜂群指挥控制试

验和蜂群协同打击试验;以及验证蜂群技术特有的蜂群能力涌现试验和专门针对算法评测验证的蜂群算法通用评估,同时蜂群通用质量特性评估和蜂群环境适应性试验也是蜂群综合的重要组成部分。

其中,作为蜂群作战系统核心任务能力,体现在蜂群情报侦察试验、蜂群指挥控制试验和蜂群协同打击试验的相关标准中。蜂群情报侦察试验标准应包括如下试验项目:蜂群协同侦察感知、蜂群协同信号源探测、蜂群协同信息融合、蜂群协同跟踪监视、蜂群协同毁伤评估。蜂群指挥控制试验标准应包括如下试验项目:蜂群协同任务规划、蜂群协同决策、蜂群协同任务分配、蜂群自主控制、人与蜂群交互、人与蜂群协同。上述三类试验科目共同构成蜂群作战系统的基本OODA闭环^[13],能够在便于试验设计和定量考核的前提下有效对蜂群系统的各方面作战能力进行试验评估。

(4) 保障标准

对蜂群综合试验保障标准提出蜂群试验环境满足条件、试验保障设备运行良好、保障人员素养

专业等要求。

蜂群综合试验过程标准分为3大类,分别是蜂群试验环境标准、蜂群试验保障设备标准、蜂群试验保障人员标准。

5 结论

本文研究形成结论如下:

(1) 无人机蜂群的分类方式很多,从平台重量、平台构型、发射方式、编队规模、使用用途等维度对无人机蜂群进行分类,能很好地指导后续

无人机蜂群装备研制、试验评估。

(2) 标准是确保无人机蜂群综合试验可重复性和客观公正性的前提,所有试验都应依据标准进行。开展无人机蜂群综合试验标准建设,可规范试验流程、协调试验方法、明确试验结果,具有很大的工程意义。

(3) 基于无人机蜂群综合能力和综合试验技术,构建了无人机蜂群综合试验标准体系框架,主要包括试验方法、试验规程、通用要求、评价方法、工作指南等标准。

参考文献

- [1] 韩宝明,余怡然,习喆,等.2023年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J].都市轨道交通,2024,37(1):1-9.
- [2] 韩宝明,习喆,孙亚洁,等.2022年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J].都市轨道交通,2023,36(1):1-8.
- [3] 城市轨道交通工程基本术语标准: GB/T 50833-2012[S].
- [4] 陈明昊,徐凌,朱胜利,等.城市轨道交通工程建设标准体系构建研究[J].都市轨道交通,2022,35(1):147-154.
- [5] 标准体系构建原则和要求: GB/T 13016-2018[S].
- [6] 庄园,于铁强.北京城市副中心智慧城市标准体系框架及实施路线研究[J].标准科学,2021(4):56-60.
- [7] 齐锡晶,韩新刚,邓李杰.沈阳地下空间开发的霍尔三维研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(3):573-578.
- [8] 赵蕊蕊,于海跃,游雅倩,等.无人集群试验评估现状及技术方法综述[J].系统工程与电子技术,2024,46(02):570-585.
- [9] 董广胜.基于OSDK的分布式无人机编队控制技术研究[D].南京邮电大学,2023.
- [10] 林思伟.复杂环境下无人机路径规划与控制研究[D].南京信息工程大学,2023.
- [11] 何志凯.无人缩比模型试飞应用及标准研究[J].标准科学,2021,(05):59-65.
- [12] 何志凯.无人机飞行品质标准技术要素分析[J].标准科学,2021,(11):60-66.
- [13] 沈博,武文亮,杨刚,等.基于群体OODA的无人集群系统智能评价模型及方法[J].航空学报,2023,44(14):263-278.