

4-15-2024

Research on Theoretical Framework of Simulative Experiment Evaluation for Intelligent Unmanned Swarm Cooperation

Jipeng Wang

China Academy of Electronics and Information Technology, CETC, Beijing 100041, China

Xing Zhang

China Academy of Electronics and Information Technology, CETC, Beijing 100041, China),

zx218705@163.com

Hao Wu

China Academy of Electronics and Information Technology, CETC, Beijing 100041, China

Yu Gu

China Academy of Electronics and Information Technology, CETC, Beijing 100041, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Special Column is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Research on Theoretical Framework of Simulative Experiment Evaluation for Intelligent Unmanned Swarm Cooperation

Abstract

Abstract: As a typical representative of intelligent equipment, the technology, equipment and combat applications of intelligent unmanned swarm are being promoted globally. However, the research on experimental theory of unmanned swarm lags behind the technology and equipment in general. The emergence of swarm ability and complexity of confrontation of unmanned swarm, the nonrepeatability and non-generalization of swam experiment take great challenge to the basic theory and methods of unmanned swarm. The four experimental models including intelligent technology, intelligent equipment, intelligent swarm, and intelligent sos(system of systems) experiment from the perspective of system engineering and the whole life cycle of equipment construction management are proposed. The basic theory of unmanned swarm experiment is analyzed, and the basic theoretical framework of autonomous cooperative experiment of unmanned swarm is constructed.

Keywords

unmanned swarm, intelligent coordination, intelligent technology experiment, intelligent equipment experiment, intelligent swarm experiment, intelligent sos experiment

Authors

Jipeng Wang, Xing Zhang, Hao Wu, Yu Gu, and Huijie Yang

Recommended Citation

Wang Jipeng, Zhang Xing, Wu Hao, et al. Research on Theoretical Framework of Simulative Experiment Evaluation for Intelligent Unmanned Swarm Cooperation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 795- 804.

无人集群智能协同仿真试验评估理论框架研究

王积鹏, 张兴*, 吴浩, 谷雨, 杨慧杰

(中国电子科技集团有限公司 电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 智能无人集群装备作为智能装备的典型代表, 其技术、装备、作战应用在全球范围内加速推进, 但总体上无人集群试验理论的研究滞后于无人集群技术、装备, 无人集群能力的涌现性、对抗的复杂性, 以及无人集群试验的不可重复、不可泛化等特性给无人集群试验基础理论、方法带来了巨大挑战。从体系工程集成试验视角和装备研制建设全生命周期视角提出面向能力生长的智能技术、智能单装、智能集群、智能体系 4 个集群试验模式, 深度剖析无人集群智能协同试验的基础理论问题, 构建无人集群智能协同试验基础理论框架。

关键词: 无人集群; 智能协同; 智能技术试验; 智能单装试验; 智能集群试验; 智能体系试验

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2024)04-0795-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0070

引用格式: 王积鹏, 张兴, 吴浩, 等. 无人集群智能协同仿真试验评估理论框架研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(4): 795-804.

Reference format: Wang Jipeng, Zhang Xing, Wu Hao, et al. Research on Theoretical Framework of Simulative Experiment Evaluation for Intelligent Unmanned Swarm Cooperation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(4): 795-804.

Research on Theoretical Framework of Simulative Experiment Evaluation for Intelligent Unmanned Swarm Cooperation

Wang Jipeng, Zhang Xing*, Wu Hao, Gu Yu, Yang Huijie

(China Academy of Electronics and Information Technology, CETC, Beijing 100041, China)

Abstract: As a typical representative of intelligent equipment, the technology, equipment and combat applications of intelligent unmanned swarm are being promoted globally. However, the research on experimental theory of unmanned swarm lags behind the technology and equipment in general. The emergence of swarm ability and complexity of confrontation of unmanned swarm, the nonrepeatability and non-generalization of swam experiment take great challenge to the basic theory and methods of unmanned swarm. *The four experimental models including intelligent technology, intelligent equipment, intelligent swarm, and intelligent sos(system of systems) experiment from the perspective of system engineering and the whole life cycle of equipment construction management are proposed. The basic theory of unmanned swarm experiment is analyzed, and the basic theoretical framework of autonomous cooperative experiment of unmanned swarm is constructed.*

Keywords: unmanned swarm; intelligent coordination; intelligent technology experiment; intelligent equipment experiment; intelligent swarm experiment; intelligent sos experiment

收稿日期: 2023-01-29

修回日期: 2024-02-27

第一作者: 王积鹏(1959-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为系统总体技术、体系建模仿真。

通讯作者: 张兴(1987-), 男, 高工, 博士, 研究方向为体系建模仿真。E-mail: zx218705@163.com

0 引言

未来战争的核心是军事智能化，以智能化为前提的自主打击是未来战争形态演化的重要方向。无人集群作战具有智能协同、群智汇聚、智能对抗等特点，通过无人平台的紧密协作，灵活重组遂行多类任务，在信息、计算、决策和执行能力上实现整体性能跃升，具备“高自主、零伤亡、打不烂”的优点，越来越广泛地应用于对抗战场侦察/监视、情报收集、预警探测、通信中继、环境调查、目标感知与识别等诸多领域^[1-6]，成为未来战场中颠覆性的非对称作战力量。

无人集群智能协同作战试验评估是促进无人集群装备体系发展、智能作战能力生成和演化生长的重要手段，是确保智能装备可靠、可信和可用的重要基础，通过以试促研、以试促改、以试促用，推动无人集群装备全生命周期能力快速生成。

目前，国内外对无人集群作战的研究多集中于智能协同控制算法、集群分布式交互技术以及相关演示验证等方面^[7-12]，无人集群试验理论的研究总体上滞后于无人集群技术、装备的研究。2017年美国国防高级研究计划局的进攻性集群使能战术项目，其重要目标就是发展无人自主集群集成试验床，对集群面向模糊不确定威胁的自主认知态势、复杂动态对抗环境的自适应决策，以及多自主系统的集群作战能力进行试验鉴定方法研究。同时美军率先制定了无人自主系统试验鉴定框架，在2011年由试验资源管理中心制定了无人自主系统试验鉴定体系结构框架，对包括各类自主系统、自主性支撑技术、自主系统试验类型、自主系统评价指标和基于LVC的混合试验环境进行综合布局。在试验规程方面，美军2009年发布了“能力试验方法”CTM3.0版文件，提出了在联合任务环境下对装备体系的联合任务效能进行试验鉴定的方法和程序。CTM3.0以LVC分布式环境为基础，可灵活应用于各种类型的试验鉴定活

动，不仅适用于单个系统的试验，也适用于体系试验或非装备解决方案开展试验，从制定试验与鉴定策略、描述试验、规划试验、实现LVC环境、管理试验执行以及分析鉴定，为装备试验评估提供基本的过程和方法指导。针对无人集群等智能装备涌现、不确定等特点，应在CTM3.0基本过程基础上采用螺旋迭代方式进行多轮次试验的迭代和收敛，从概率、统计、置信度等视角审视智能试验过程和结果。

文献[13-14]从合作竞争博弈角度以及生物集群视角开展了无人集群协同搜索和任务分配等研究。文献[15]在确定了有人机/无人机指控体系结构的基础上，给出了一种新的基于复杂网络的有人机/无人机协同作战网络模型描述方法和作战协同效果评估模型，并运用该模型对有人机/无人机协同作战网络拓扑模型进行了协同效果评估。文献[16]通过对集群作战方式的分析，建立了协同海上目标攻击效能评估指标体系，并进行了初步分析。文献[17]系统性梳理了无人集群试验评估领域研究现状及相关的前沿理论方法。文献[18]从无人集群作战试验设计视角进行了探索研究。文献[19]针对智能装备试验与测试问题，从“可用、好用”以及“敢用、实用”2个层面分析了面临的技术挑战，并给出了相应的对策思考。

本文深入分析了无人集群试验的智能化特点，借鉴体系工程集成试验过程，从无人集群装备研制建设全生命周期出发，提出了智能技术、智能单装、智能集群、智能体系4类集群试验模式，形成了完备的智能无人集群试验理论框架，指明了智能无人集群试验的重大理论问题和研究方向，为智能无人集群试验理论、方法和试验环境构建提供有力指导。

1 无人集群试验特点

无人集群试验是在无人集群试验理论指导下，对无人集群智能协同能力进行科学、规范、有效

的评估过程和评估方法^[13]。无人集群试验需要合理设计试验科目, 通过测量手段有效采集试验数据支撑集群能力等级的量化分析。由于个体的行为在单次试验中无法预测, 集群的整体行为在多次试验中无法复现, 无人集群装备的智能性、涌现性等特性使其与传统试验存在显著差别, 主要包括以下几个方面。

(1) 无人集群试验边界难以确定

由于无人集群本身的智能能力需要经过大量的案例数据, 通过学习训练进行获取, 这种学习训练过程具有较强的不确定性和黑箱特性, 导致无人集群系统输入-输出之间缺乏清晰、可理解的因果关系, 在给定具体输入后难以准确预测人工智能会输出何种结果以及解释为什么会输出该结果, 进而使智能无人集群装备的能力、安全性等指标难以完整、准确描述, 而导致无人集群试验边界难以确定。

(2) 无人集群试验过程难以预测

由于人工智能算法推理过程非常复杂, 其不确定性和黑箱特性使无人集群试验过程中集群的行为不可预测, 相同的试验场景试验结果可能存在较大的偏差。因此, 需综合评估大样本试验条件下无人集群的行为表现。

(3) 无人集群试验结果不可解释泛化

在当前人工智能框架下, 由于智能算法存在黑箱特性, 无人集群系统与人类的认知模式和思维方式还存在较大差异。同时无人集群装备对于环境影响和信号干扰较为敏感, 集群的行为通过大量的合作、竞争、学习后呈现涌现性, 使无人集群系统的行为和结果难以进行有效解释。同时一次试验的结果不足以支撑相似场景行为结果的预测, 不具有泛化性。

(4) 无人集群试验场景高复杂强对抗

集群试验重点对无人集群装备的自主能力和协同能力进行评估, 涉及自主感知、自主判断、自主决策、自主行动等各个方面能力的测试。由于无人集群装备常应用于复杂作战环境, 其性能

易受复杂地域、空域和电磁环境等干扰和影响, 因此, 需要高逼真度复杂虚拟场景, 使之在近似真实的环境中进行充分的边界测试, 提高试验结果的可信度。

2 无人集群试验模式

2.1 能力生成试验模式

按照体系工程“设计、研制和集成试验”的基本过程, 在设计环节, 无人集群自顶向下按照需求设计、集群设计、单装设计、技术设计思路, 分别形成无人集群装备的产品基线、集群能力基线、单装能力基线, 以及技术基线; 在集成试验环节, 对标设计环节形成的技术基线、单装能力基线、集群能力基线, 以及产品基线进行相应试验验证。因此, 无人集群试验应包括智能技术试验、智能单装试验、智能集群试验和智能体系试验 4 个维度, 如图 1 所示。从每个试验阶段来看, 依托仿真支撑下的试验模式, 通过试验实现该层级能力的循环迭代, 从 4 个试验阶段纵向来看, 通过试验实现从技术能力到体系能力的螺旋式生长演化。无人集群 4 类试验对象和试验内容如表 1 所示。

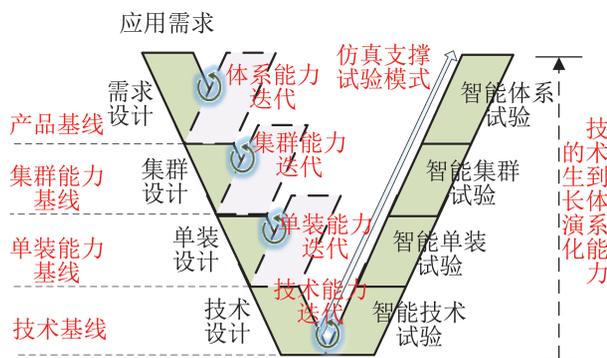


图 1 体系工程视角下的无人集群试验模型
Fig. 1 Unmanned swarm experiment model from perspective of system engineering

从无人集群装备全生命周期视角来看, 包括 4 个阶段: 装备研制阶段, 面向智能化技术, 以集群算法为载体进行技术试验, 对算法的适用性和

成熟度进行验证；试验阶段，面向智能化装备和集群，以单装和集群装备为载体开展技术、单装和集群试验，进一步测试技术的适用性、单装的自主能力和集群的协同能力；训练阶段，面向智

能化集群，开展以集群协同能力为目标的集群试验；作战阶段，面向智能化体系，开展以集群博弈对抗能力为目标的体系试验。无人集群装备全生命周期试验过程如图2所示。

表1 无人集群试验对象和试验内容
Table 1 Experiment objects and contents of unmanned swarm

试验模式	试验对象	试验对象形态	试验目标	试验内容
智能技术试验	智能化技术	集群算法程序或算法包	技术“点”试验评估：算法的适用性和成熟度	算法的技术指标，算法的边界性能、算法的成熟度等
智能单装试验	智能化装备	无人机、无人车、机器鱼、无人艇等单装	单装“线”试验评估：单装的自主能力	单装的自主能力，包括自主导航能力、自主任务能力等
智能集群试验	智能化集群	无人机、无人车、机器鱼、无人艇集群或者混合集群装备	集群“面”试验评估：集群的协同能力	协同任务能力，包括协同态势感知能力、协同任务分配能力、协同行动控制能力等
智能体系试验	智能化体系	集群装备以及协同作战装备	体系“体”试验评估：集群的跨域对抗、智能博弈能力	集群的博弈对抗决策能力、体系协同对抗能力等

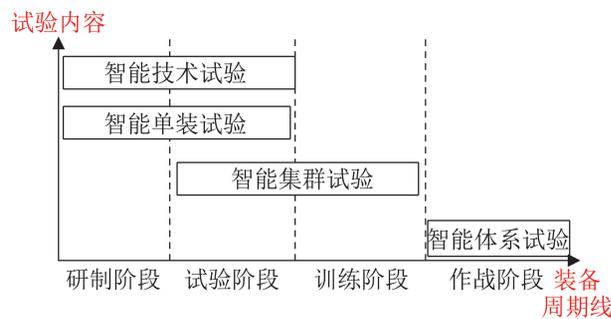


图2 装备生命周期视角下的无人集群试验模型
Fig. 2 Unmanned swarm experiment model from perspective of equipment life cycle

2.2 分层递进试验模式

对于无人集群4类试验内容，总体上按照“静态试验、仿真试验、混合试验、实装试验”的模式进行分层递进式试验。静态试验主要对集群涉及的算法等进行静态测试；仿真试验在逼真的仿真环境中进行数字化驱动试验；混合试验通过“仿真+实装”虚实结合的方式进行验证；实装试验则通过真实装备在完全真实的环境中进行试验。每一层的试验结果作为下一层试验的输入和依据，上层的试验结果又进一步佐证下层的试验结论，综合多层试验结果给出具有高可信度的评估结果。

3 无人集群试验理论框架

3.1 智能技术试验理论框架

无人集群智能技术试验的试验对象主要涵盖无人单体和集群的智能算法，单体算法包括自主感知算法、自主规划和决策算法等，集群算法包括分布式协同算法、智能对抗算法等。智能技术试验对象的形态主要为集群算法程序或者算法包。智能技术试验主要测试算法的可用性，包括算法的技术指标，算法的边界性能、算法的成熟度等是否满足应用需求。

无人集群智能技术试验可通过“静态试验”“仿真试验”结合的方式进行。

(1) 静态试验：根据测试的集群算法生成测试数据集，驱动集群智能算法运行，获得算法输出数据进行综合评估，给出评估报告，如集群单体的目标识别算法、集群的规划路径算法等均可通过静态测试的方式进行试验。

(2) 仿真试验：仿真试验通过构建动态虚拟的算法仿真环境，将集群协同算法包载入仿真环境，通过模拟应用场景，在动态仿真环境中开展算法测试，如文献[7, 9, 11]中提出的无人集群系统仿真

平台, 可支持算法的仿真试验。

围绕智能技术试验的目标、试验方式和试验途径, 按照基础理论、支撑理论、应用理论的总体框架, 形成技术试验理论基础框架, 如图 3 所示。

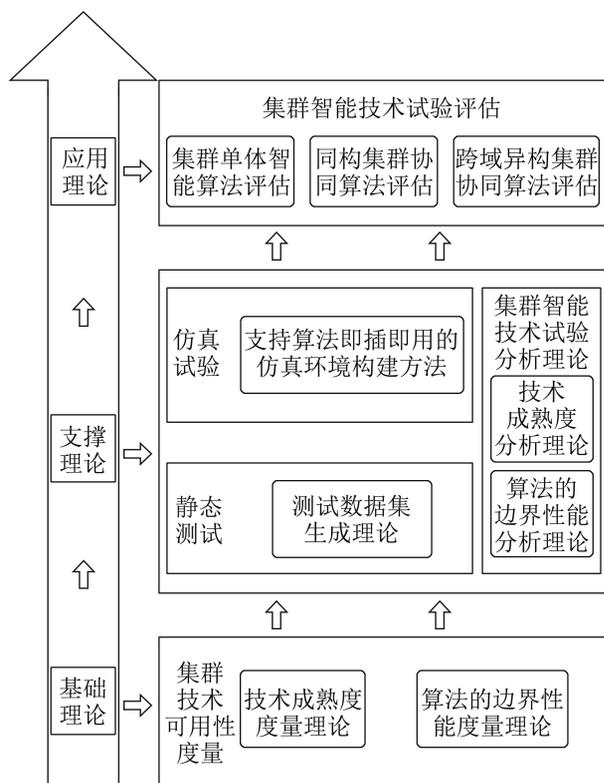


图 3 智能技术试验基本理论框架

Fig. 3 Basic theoretical framework for intelligent technology experiments

基础理论方面, 重点研究集群技术的可用性度量理论方法, 参考技术成熟度等级划分方法^[20], 针对集群呈现的自主化、智能化等特点, 形成集群技术成熟度、技术边界性能度量描述方法。

支撑理论方面, 静态测试方式下重点研究面向不同试验场景的测试数据集生成理论, 考虑试验边界和极端情况, 支撑形成完备的测试数据集; 仿真试验方式下重点研究支持算法即插即用的仿真环境构建方法, 形成通用的集群技术验证平台和环境, 支持算法模块的快速集成和应用验证; 评估方面针对技术度量形成针对性的技术成熟度和算法的边界性能分析理论。

应用理论方面, 能够支撑集群单体智能算法、

同构集群协同算法, 以及跨域异构集群协同算法评估。

3.2 智能单装试验理论框架

无人集群智能单装试验对象形态为集群中单体无人机、无人车、机器鱼和无人艇等装备。单装试验主要对集群单装的自主性进行测试, 摸清单装的自主能力, 包括自主导航能力、自主任务能力等。无人集群单装试验主要通过“实装试验”形式进行。

(1) 混合试验: 构建仿真驱动环境, 接入单装, 在数字化环境驱动下对单装的性能进行试验。

(2) 实装试验: 依托无人集群单装, 设计不同环境、不同复杂度任务场景, 采集单装对任务的完成情况数据, 对单装自主导航能力、自主任务能力等进行测试。

围绕单装试验的目标、试验方式和试验途径, 按照基础理论、支撑理论、应用理论的总体框架, 形成单装试验理论基础框架, 如图 4 所示。

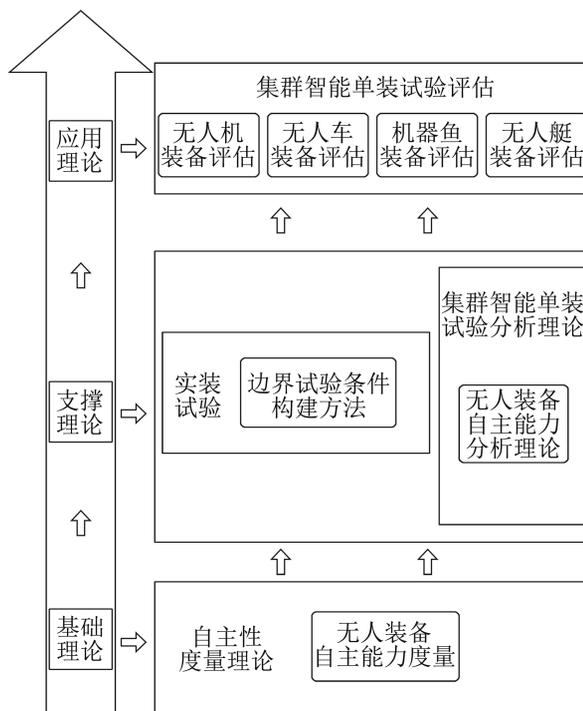


图 4 智能单装试验基本理论框架

Fig. 4 Basic theoretical framework for intelligent single-equipment experiments

基础理论方面，重点研究不同类无人集群单装自主能力的度量理论，包括单装自主导航能力、自主任务能力的度量等。

支撑理论方面，重点研究实装试验条件下边界试验构设方法，支撑对单装极限条件下的自主任务能力进行边界和极限测试，摸清单装自主能力底数；评估方面开展对无人集群单装自主能力的分析理论研究。

应用理论方面，能够支撑无人机、无人车、机器鱼、无人艇等各类无人单装自主能力评估应用。

3.3 智能集群试验理论框架

智能集群试验的对象为无人机、无人车、机器鱼、无人艇等各类无人集群装备或跨域的混合无人集群装备。试验主要测试无人集群装备协同性，包括协同任务分配能力、协同态势感知能力、协同行动控制能力等。集群试验可通过“仿真试验”“混合试验”“实装试验”相结合形式进行。

(1) 仿真试验：构建虚拟算法试验环境，将集群协同算法包插入仿真环境，构建无人集群协同任务场景，在动态仿真环境中模拟集群协同过程，采集集群间的信息流、指挥流以及任务完成数据，对集群协同能力进行综合测试。

(2) 混合试验：在仿真试验的基础上，采用LVC试验模式，以虚实混合的试验形式，通过小规模实装结合大规模仿真的模式，进一步测试大规模集群的协同能力。

(3) 实装试验：构建典型的协同任务场景，通过实装形式开展集群协同试验。如空军组织的“无人争锋”挑战赛中设置的竞赛科目，即是通过实装的形式对集群的协同任务能力进行测试评估。

围绕智能集群试验的目标、试验方式和试验途径，按照基础理论、支撑理论、应用理论的总体框架，形成集群试验理论基础框架，如图5所示。

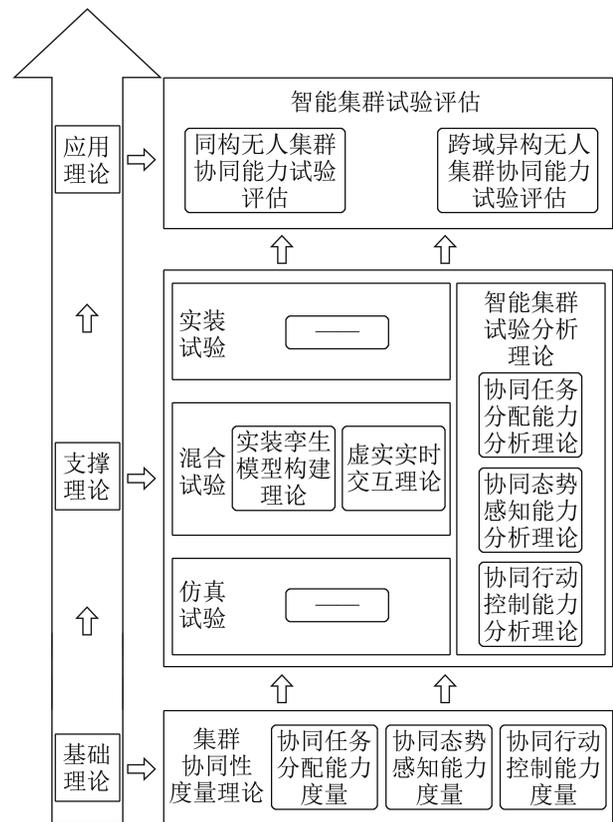


图5 智能集群试验基本理论框架

Fig. 5 Basic theoretical framework for intelligent swarm experiments

基础理论方面，重点研究集群协同能力度量理论，从集群任务过程维度包括集群协同任务分配能力、协同态势感知能力、协同行动控制能力等。

支撑理论方面，采用混合方式开展试验时，重点研究实装孪生模型构建理论以及虚实交互理论，支撑构建与实装功能、性能、流程等方面保持一致的仿真模型，并支持虚拟模型和实装集群之间的实时交互，形成对集群协同能力的评估理论。

应用理论方面，支撑开展同构无人集群以及跨域异构无人集群协同能力试验。

3.4 智能体系试验理论框架

智能体系试验的试验对象为以无人集群为主的作战体系。试验主要测试无人集群的博弈对抗

能力, 以无人集群为主的作战体系为对象(如空地协同城市作战集群、智能集群空战对抗等), 测试对抗条件下的集群博弈对抗能力等。集群试验可通过“仿真试验”“混合试验”“实装试验”相结合形式进行。

围绕集群体系试验的目标、试验方式和试验途径, 按照基础理论、支撑理论、应用理论的总体框架, 形成集群智能体系试验理论基础框架, 如图6所示。

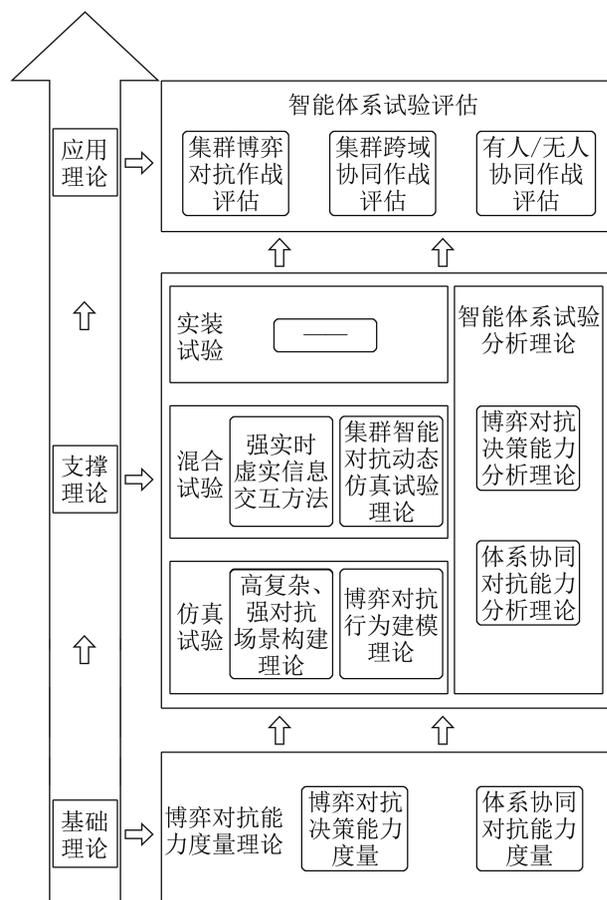


图6 集群智能体系试验基本理论框架
Fig. 6 Basic theoretical framework for sos experiments of unmanned swarm

基础理论方面, 面向集群智能体系典型的博弈对抗和体系协同特征, 重点研究无人集群博弈对抗能力度量理论, 包括博弈对抗决策能力、体系协同对抗能力度量等。

支撑理论方面, 仿真试验模式下, 重点研究

高复杂、强对抗仿真试验场景构建理论, 博弈对抗行为建模理论, 构建逼真的对抗试验环境; 在混合试验方式下, 重点研究强实时虚实交互方法, 集群智能对抗动态仿真理论, 支撑虚实集群混合试验; 评估方面依托试验数据形成对智能集群博弈对抗能力以及体系协同对抗能力的分析理论, 形成对集群体系的综合评估能力。

应用理论方面, 支撑集群博弈对抗作战评估、跨域协同作战评估、有人/无人协同作战等评估应用。

3.5 无人集群智能试验综合理论框架

综合无人集群智能技术、智能单装、智能集群以及智能体系4类试验基本理论框架, 形成无人集群智能协同试验评估综合理论框架, 如图7所示。

在无人集群4类试验构建的基础理论、支撑理论, 以及应用理论基础上, 还需针对集群智能装备的特点, 重点研究集群智能试验可解释性、试验结果泛化, 以及试验结果置信度分析理论, 支撑智能无人集群试验评估更科学、有效地实施。

试验可解释理论: 智能协同试验结果的可解释性是衡量集群智能透明度的重要标准, 人工智能的可解释性研究还处于初级阶段, 应结合人工智能的可解释性研究强化试验结果, 瞄准试验驱动目标, 使试验结果可被理解、可被解释, 辅助纠正试验过程, 提升试验结论准确性。

试验结果泛化理论: 集群智能试验旨在摸清集群在技术、单装、集群、体系层面的技术底数, 为集群应用提供明显的边界条件, 因此, 应加强集群试验结果的泛化研究, 为拓展集群任务场景, 提升任务能力提供理论基础。

试验结果置信度分析理论: 利用有限的试验样本和试验数据, 在形成无人集群技术、单装、集群、体系能力评估结果的过程中, 需进一步研究集群试验结果置信度和试验样本、试验过程的关系, 为集群智能协同效果评估提供更科学的结论。

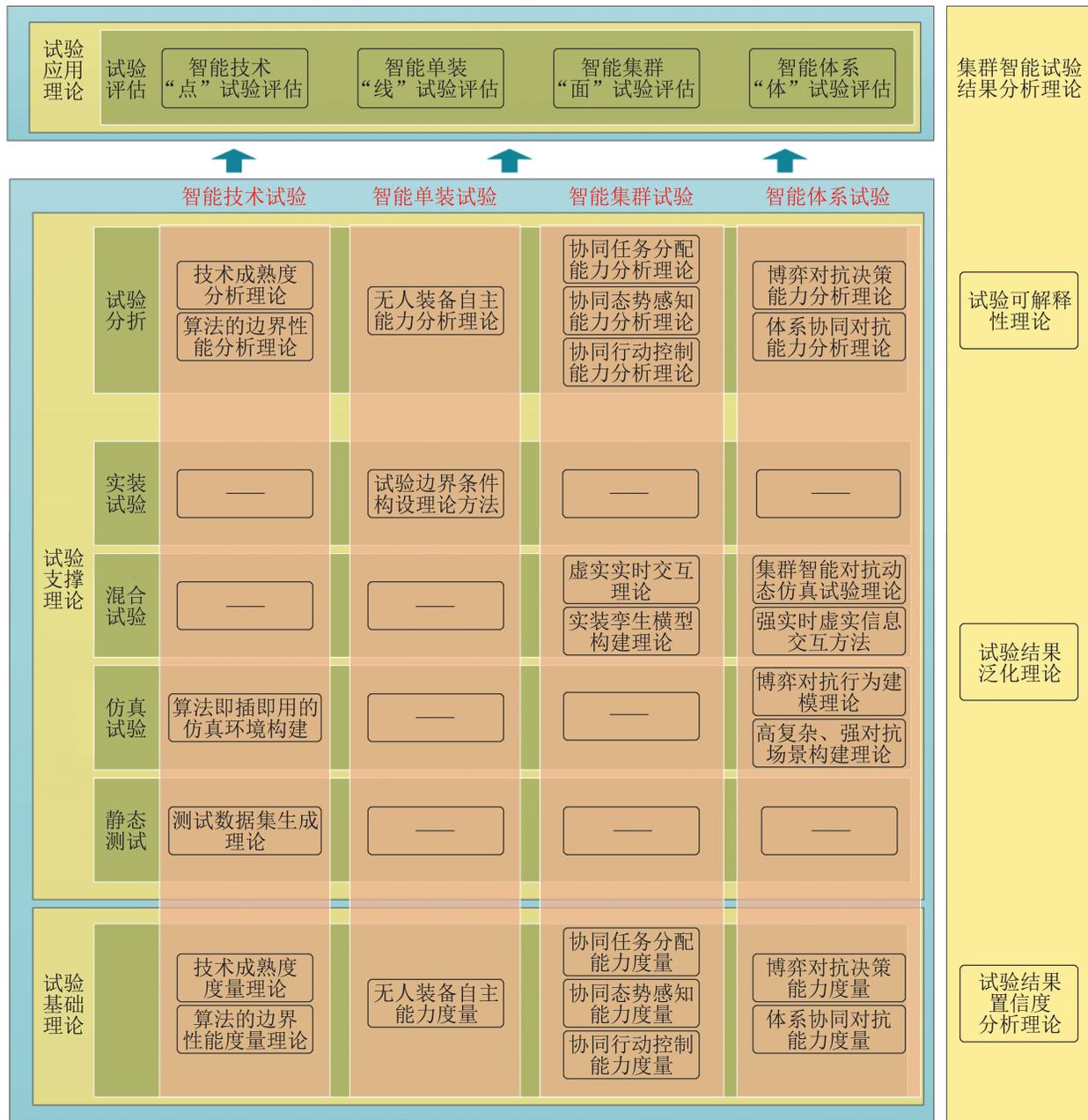


图 7 无人集群智能试验综合理论框架

Fig. 7 Comprehensive theoretical framework for intelligent experiments of unmanned swarm

4 结论

从无人集群智能试验的内涵和特点入手，分析了智能化集群试验区别于传统试验的典型特征；从体系工程集成试验角度和无人集群装备全生命周期试验角度出发，提出了无人集群智能技术、智能单装、智能集群、智能体系 4 类试验模式；从试验基础理论、支撑理论、应用理论 3 个层面

分析了 4 类试验的理论框架，形成了集群试验综合理论框架，指明了无人集群试验的重大理论问题和研究方向，为后续进一步深入研究相关的理论、方法、试验环境构建等奠定良好基础。

参考文献：

- [1] 周宇, 李志伟, 王增光. 军事变革下未来作战典型样式研究进展[J]. 飞航导弹, 2021(10): 64-67, 91.

- [2] 吕震华, 高亢. 美国无人集群城市作战应用发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(8): 738-745.
Lü Zhenhua, Gao Kang. Review of the Development of Drone Swarm Urban Combat Applications in the USA[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(8): 738-745.
- [3] 房肖, 温广辉, 付俊杰, 等. 基于博弈的水面无人艇集群对抗问题研究[J]. 控制工程, 2022, 29(3): 492-497.
Fang Xiao, Wen Guanghui, Fu Junjie, et al. Study on Group Confrontation of Unmanned Surface Vessels Based on Game Theory[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(3): 492-497.
- [4] Chaymaa Lamini, Said Benhlina, Ali Elbekri. Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning[J]. Procedia Computer Science, 2018, 127: 180-189.
- [5] 刘丽, 王森, 胡然. 美军主要无人机集群项目发展浅析[J]. 飞航导弹, 2018(7): 37-43.
- [6] 周鑫, 王维平, 朱一凡, 等. 基于人机协作的无人集群搜索方法研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(4): 735-744.
Zhou Xin, Wang Weiping, Zhu Yifan, et al. An Unmanned Swarm Search Method Based on Human-robot Cooperation[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(4): 735-744.
- [7] 陈志明, 蒋文凯, 吴云华. 基于Cesium的无人机集群作战仿真演示系统[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 218-223.
Chen Zhiming, Jiang Wenkai, Wu Yunhua. Simulation Demonstration System of UAV Cluster Combat Based on Cesium[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(4): 218-223.
- [8] 张阳, 司光亚, 王艳正. 无人集群作战建模与仿真综述[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(3): 30-36.
Zhang Yang, Si Guangya, Wang Yanzheng. Review on Modeling and Simulation of Unmanned Swarm Operation[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(3): 30-36.
- [9] 冯聪. 无人集群编队交互式仿真平台的设计与实现[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Feng Cong. Design and Implementation of an Interactive UAV Swarm Simulation Platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [10] 张磊, 庞永杰, 李晔, 等. 智能无人潜水器半实物仿真平台设计[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2321-2325.
Zhang Lei, Pang Yongjie, Li Ye, et al. Design of Semi Physical Simulation Platform for Autonomous Underwater Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(10): 2321-2325.
- [11] 刘立辉, 赵彦杰, 赵小虎, 等. 一种无人集群系统仿真平台设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(5): 506-512.
Liu Lihui, Zhao Yanjie, Zhao Xiaohu, et al. Design of a Simulation Platform of Unmanned Swarm System[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2017, 12(5): 506-512.
- [12] Federico Venturini, Federico Mason, Francesco Pase, et al. Distributed Reinforcement Learning for Flexible and Efficient UAV Swarm Control[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(3): 955-969.
- [13] 周义蛟, 郭基联, 姜禹呈, 等. 有人机/无人机协同作战超网络社团化算法设计[C]//2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(上册). 北京: 中国科学技术出版社, 2017: 392-397.
- [14] 王浩淼, 段海滨, 魏晨. 基于合作竞争公共物品博弈的无人机集群动态资源分配[J]. 中国科学(信息科学), 2022, 52(9): 1598-1609.
Wang Haomiao, Duan Haibin, Wei Chen. Dynamic Resource Allocation of UAV Swarms Based on Cooperative and Competitive Public Goods Game[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2022, 52(9): 1598-1609.
- [15] 刘云昊, 邓亦敏, 段海滨, 等. 基于飞蛾信息素寻偶机制的无人机集群协同搜索[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(4): 22-31.
Liu Yunhao, Deng Yimin, Duan Haibin, et al. Unmanned Aerial Vehicle Swarm Cooperative Search Based on Moth Pheromone Courtship Mechanism[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(4): 22-31.
- [16] 王光源, 孙涛, 毛世超, 等. 基于任务协同的有人机/无人机对海攻击作战效能评估研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(5): 491-495.
Wang Guangyuan, Sun Tao, Mao Shichao, et al. Research on Effectiveness Assessment for Attack Against Maritime Targets of Manned/Unmanned Vehicles Based on Mission Cooperative[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32(5): 491-495.
- [17] 梁晓龙, 侯岳奇, 胡利平, 等. 无人集群试验评估研究现状分析及理论方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 846-854.
Liang Xiaolong, Hou Yueqi, Hu Liping, et al. Review on Evaluation and Theoretical Methods of Unmanned Swarm Test[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 846-854.
- [18] 蒋平, 程志君, 王博, 等. 无人集群作战试验设计框架初探[J]. 航空兵器, 2020, 27(6): 30-35.
Jiang Ping, Cheng Zhijun, Wang Bo, et al. Preliminary

- Study on Design Framework of Unmanned Swarm Operational Tests[J]. *Aero Weaponry*, 2020, 27(6): 30-35.
- [19] 韦正现. 智能装备试验与测试的挑战与对策思考[J]. *测控技术*, 2021, 40(2): 1-5, 12.
- Wei Zhengxian. Challenge and Countermeasure of Intelligent Equipment Experiment and Test[J]. *Measurement & Control Technology*, 2021, 40(2): 1-5, 12.
- [20] 陈利安, 肖明清, 赵鑫, 等. 复杂武器系统技术成熟度评估方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(10): 2395-2400.
- Chen Li'an, Xiao Mingqing, Zhao Xin, et al. Study of Complex Weapon System Technology Readiness Level Assessment Methods[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(10): 2395-2400.