文章编号:1671-4598(2026)10-0274-08 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.10.035 中图分类号:TP274 文献标识码:A

陆上无人装备集群作战试验方法研究

宋敬华，陈 昱，夏 鑫
（陆军兵种大学，合肥 230031）

摘要：针对陆上无人装备集群作战试验缺乏系统性方法、难以有效评估作战能力的问题，通过界定陆上无人装备集群的核心概念、分类及典型作战场景，明确试验任务边界与能力维度；分析集群作战关键能力需求，提炼包含协同决策效率、动态组网稳定性等在内的量化与定性试验指标体系，解决“测什么”的问题；在此基础上构建“需求－指标－场景－方法”联动试验体系，研究复杂地形、电磁对抗等贴近实战的虚拟与实装混合试验环境设计及半实物仿真平台与实装试验场协同联动方案，实现“在哪测”的规划；进而设计“单机验证－小规模协同－大规模复杂任务”的分层递进试验实施方法，同步研究基于大数据与人工智能算法的试验数据采集与效能分析技术；并对动态拓扑变化、多目标冲突避让等试验难点，提出专项试验方案与异常工况模拟方法；经过某型陆上无人装备集群的典型作战任务试验，验证所提方法的可行性与有效性，形成可推广的试验流程规范，对陆上无人装备集群作战试验方法展开研究。

关键词：陆上无人装备集群；作战试验方法；指标体系；试验环境构建；效能评估

Study on Experimental Methods for Land Unmanned Equipment Cluster Operations

SONG Jinghua, CHEN Yu, XIA Xin
(Army Military University, Hefei 230031, China)

Abstract: Land unmanned equipment cluster combat testing lacks systematic methods, making it difficult to effectively evaluate combat capabilities. To address this issue, this paper defines core concepts, classifications and typical combat scenarios of land unmanned equipment clusters, clarifies the boundaries and capabilities of testing tasks, analyzes the key capability requirements of cluster operations, refines a quantitative and qualitative test index system that includes collaborative decision-making efficiency and dynamic networking stability, and achieves the issue of “what to measure”, On this basis, it constructs a linkage test system of “requirements-indicators-scenarios-methods”, and studies a virtual and actual hybrid test environment close to actual combat conditions, including complex terrain and electromagnetic countermeasures, as well as a collaborative linkage scheme between the semi-physical simulation platform and the actual test site, so as to realize the planning of “where to measure”. Then, it designs a hierarchical and progressive test implementation method of “single-unit verification-small-scale collaboration-large-scale complex tasks”, while researching the experimental data collection and performance analysis technology based on big data and artificial intelligence algorithms. In addition, for test difficulties such as dynamic topology changes and multi-objective conflict avoidances, a special test schemes and simulation method for abnormal working conditions is proposed. The typical combat mission test of a certain type of land unmanned equipment cluster verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method, establishes a generalizable test process specification, and conducts research on combat test methods for land unmanned equipment clusters.

Keywords: land unmanned equipment cluster; operational test method; index system; test environment construction; effectiveness evaluation

收稿日期:2025-10-20； **修回日期**:2025-12-05。
作者简介:宋敬华(1976-),女,博士,副教授。
引用格式:宋敬华,陈 昱,夏 鑫. 陆上无人装备集群作战试验方法研究[J]. 计算机测量与控制,2026,34(10):274-281.

0　引言

随着人工智能、自主控制、通信组网等技术的快速发展，陆上无人装备已从单机独立作战向多装备集群协同作战演进，其在协同侦察、伴随突击、区域封控等任务中的显著优势，使其成为提升地面作战效能的关键方向。从国内外研究现状来看，国外以美军为代表，先后开展“班组多用途装备运输机器人”（SMSS）、“无人地面车辆通用架构”等项目的集群试验，同时部分机构探索了基于人工智能的动态任务分配试验、多智能体系统（MAS）的协同决策试验。其中 AI 试验方法适配复杂动态作战场景，但存在依赖大规模真实作战样本的短板；MAS 方法可强化集群协同逻辑，却在强电磁干扰下的稳定性验证上存在欠缺，且国外尚未形成复杂地形与强电磁对抗环境下的集群试验完善标准。国内在陆上无人装备单机性能测试与小规模协同试验方面取得进展，部分军工院所搭建了基础试验场，部分高校也开展了 AI 驱动的仿真试验、MAS 局部协同试验，但现有方法多针对单一能力维度，既未系统对比各类技术路线的适配性，也缺乏对集群动态组网、故障自愈、应急重构等复杂能力的综合评估，难以满足实战化需求。为此，开展陆上无人装备集群作战试验方法研究，构建覆盖“需求－指标－场景－方法”的完整试验体系，其创新点在于融合多技术路线优势并弥补各自短板，可有效填补集群作战试验技术空白，对推动陆上无人装备集群实战化应用具有重要意义。

1　陆上无人装备集群核心概念与典型作战场景界定

1.1　核心概念界定

陆上无人装备集群是指由多台具备自主感知、决策、执行能力的陆上无人装备（含无人车、无人机器人、无人指控节点等）组成，通过通信网络实现信息交互与协同控制，能够完成特定作战任务的有机整体。与传统单机无人装备相比，其核心特征体现在“协同性”“涌现性”与“容错性”：协同性指集群内各装备基于统一任务目标，实现感知、决策、执行环节的分工与配合；涌现性指集群整体作战效能超越各单机效能简单叠加，形成“1＋1＞2”的作战效果；容错性指集群在部分装备故障或受干扰时，通过动态重构仍能维持基本作战能力。

根据功能定位，陆上无人装备集群包括 3 类核心组成单元：1）无人作战单元，包括侦察型无人车（搭载光电、雷达等传感器，负责战场环境感知）、突击型无人车（搭载机枪、导弹等武器系统，执行火力打击任务）、清障型无人机器人（具备破障、排爆功能，为后续作战开辟通道）；2）无人保障单元，涵盖运输型无人车（承担弹药、物资、伤员运输任务）、抢修型无人机器人（可对受损装备进行简易维修）、供电型无人节点（为集群提供移动式能源补给）；3）无人指控单元，即无人指控节点，具备集群任务规划、资源分配、状态监控功能，是集群协同作战的“大脑中枢”，可分为车载式（搭载于指挥车，适用于伴随作战）与固定式（部署于后方阵地，适用于区域指挥）两类。

1.2　典型作战场景分析

结合陆上作战任务需求，陆上无人装备集群典型作战场景可归纳为四类，各场景的任务目标、装备配置与环境特征存在显著差异，需针对性设计试验方案：

1.2.1　协同侦察场景

任务目标为对陌生区域进行全域快速侦察，获取敌方兵力部署、火力点位置、地形障碍等信息，并实时回传至指挥中心。该场景下，假设集群通常配置 3～5 台侦察型无人车（含 1 台高空侦察车，搭载无人机协同侦察）、1 台无人指控节点，作战环境多为丘陵或林地，存在植被遮挡、地形起伏等干扰因素。试验需重点验证集群的“分布式感知”能力，即各无人车通过分区侦察、信息融合，实现对目标区域的无死角覆盖，同时应对传感器受遮挡、信号弱等问题。

1.2.2　伴随突击场景

为伴随有人作战部队推进，承担前沿火力打击、侧翼警戒任务，减少人员伤亡。假设集群配置包括 2～3 台突击型无人车、1 台侦察型无人车、1 台运输型无人车，作战环境以城市街区或平原为主，存在建筑物遮挡、敌方反装甲火力等威胁。该场景的核心是“人机协同”与“火力协同”：人机协同要求无人装备与有人装备保持战术协同距离（通常 50～100 m），实时响应有人装备指令；火力协同要求突击型无人车根据目标优先级（如敌方装甲车、步兵火力点）分配火力，避免重复打击或火力空白。

1.2.3　区域封控场景

任务目标为对特定区域（如交通要道、阵地前沿）实施封锁，阻止敌方人员、装备进出，同时具备对突防目标的拦截能力。假设集群配置以 4～6 台无人车为主，包括两台侦察型、两台突击型、两台障碍设置型无人车，作战环境多为开阔地带或狭窄通道（如桥梁、山谷）。试验需验证集群的“区域布防”与“快速响应”能力：区域布防要求无人装备根据地形特征划分封控区域，形成交叉火力；快速响应要求在发现突防目标后，集群能在 30 s 内完成目标识别、火力分配与拦截行动。

1.2.4　战场保障场景

任务目标为在作战间隙或敌后环境，为友方部队

提供物资补给、装备抢修、伤员后送等保障服务。假设集群配置包括 2～3 台运输型无人车、1 台抢修型无人机器人、1 台供电型无人节点，作战环境可能涉及泥泞区、被毁道路等复杂地形，且存在敌方零星火力袭扰风险。该场景的关键是“路径规划”与“应急避险”：路径规划要求无人装备避开障碍与危险区域，选择最优运输路线；应急避险要求在遭遇敌方袭扰时，集群能暂停任务并转移至安全区域，保障物资与装备安全。

通过对上述场景的界定，明确陆上无人装备集群作战试验需覆盖“感知－决策－执行－保障”全流程，同时考虑不同地形、电磁、敌方干扰等环境因素，为后续试验指标体系构建与试验环境设计提供依据。

2 关键能力需求与试验指标体系构建

2.1 关键能力需求分析

作战场景，陆上无人装备集群作战需具备 6 大关键能力，各能力直接决定集群作战效能，是试验指标体系设计的核心依据：

2.1.1 协同决策能力

协同决策能力是集群根据作战任务与环境变化，快速制定任务规划、分配作战资源的能力，是集群“涌现性”的核心体现。在协同侦察场景中，需决策各无人车的侦察区域与优先级；在伴随突击场景中，需决策目标打击顺序与火力分配方案。该能力的核心需求包括：决策响应速度快（适应战场动态变化）、决策方案合理（避免资源浪费或任务遗漏）、决策容错性高（在部分装备失联时仍能生成可行方案）。

2.1.2 动态组网能力

动态组网能力是集群内各装备通过通信网络实现信息交互的基础，直接影响协同决策与任务执行效率。陆上作战环境中，无人装备移动会导致通信距离变化，电磁干扰会影响通信质量，因此动态组网需满足：组网覆盖范围广（适应集群 1～5 公里作战半径）、组网稳定性高（避免因装备移动导致通信中断）、组网重构快（在装备失联或新增时，10 s 内完成网络拓扑调整）。

2.1.3 抗干扰能力

抗干扰能力是集群在敌方电磁干扰、反无人装备干扰下，维持基本通信、感知与作战功能的能力，是实战化作战的关键保障。敌方可能采用窄带干扰（针对集群通信频段）、宽带干扰（压制传感器信号）、激光干扰（致盲光电传感器）等手段，因此抗干扰能力需覆盖：通信抗干扰（在干扰下保持 80％以上的通信成功率）、感知抗干扰（传感器受干扰时仍能识别关键目标）、控制抗干扰（避免因干扰导致装备失控）。

2.1.4 故障冗余与自愈能力

故障冗余与自愈能力是集群在部分装备故障（如动力故障、通信故障、传感器故障）时，通过资源重组、任务重分配维持作战能力的能力，体现集群“容错性”。在区域封控场景中，若 1 台突击型无人车故障，需其他装备补充封控区域；在战场保障场景中，若 1 台运输型无人车故障，需重新规划运输路线与物资分配方案。该能力的需求包括：故障识别准（快速定位故障装备与故障类型）、自愈速度快（30 s 内完成任务重分配）、自愈效果好（自愈后任务完成率下降不超过 10％）。

2.1.5 多装备功能互补能力

多装备功能互补能力是集群内不同类型装备（如侦察、突击、保障）通过分工配合，实现作战任务全覆盖的能力。在伴随突击场景中，侦察型无人车提供目标信息，突击型无人车实施打击，运输型无人车补充弹药，三者缺一不可。该能力的需求包括：功能覆盖全（无任务环节遗漏）、协同配合准（避免装备间任务冲突或配合延迟）、功能冗余足（某类装备不足时，其他装备可临时替代部分功能）。

2.1.6 环境适应能力

环境适应能力是集群在复杂地形（山地、泥泞区、城市街区）、恶劣天气（雨、雪、沙尘）下，维持机动能力与功能正常的能力。陆上作战环境多样，地形障碍会影响无人装备机动速度，恶劣天气会降低传感器精度，因此环境适应能力需满足：机动适应（在山地地形中机动速度不低于 5 km/h，泥泞区不低于 3 km/h）、感知适应（沙尘天气下目标识别准确率不低于 70％）、设备适应（－30～50 ℃内设备正常工作）。

2.2 试验指标体系构建

基于关键能力需求，构建“量化＋定性”结合的试验指标体系，共包含 18 项指标，其中量化指标 12 项（可通过数据采集直接计算）、定性指标 6 项（通过专家评估或场景验证确定），指标取值范围与评价标准根据实战需求设定，如表 1 所示。

2.3 半实物仿真平台与实装试验场协同联动方案

半实物仿真平台（HIL，hardware-in-the-loop）与实装试验场的协同，可解决“实装试验成本高、规模受限”与“纯仿真试验真实性不足”的矛盾，实现“小实装＋大仿真”的高效试验模式。

2.3.1 协同联动架构设计

联动架构分为 3 层，通过高速以太网（传输速率≥1 000 Mbps）实现数据实时交互，架构如下：

1）实装层：部署于实装试验场，包括 3～5 台核心无人装备（含侦察、突击、指控类型）、各类传感器（GPS 定位传感器、惯导传感器、环境感知传感器）及

表 1　陆上无人装备集群作战试验指标体系

关键能力	指标类型	指标名称	指标定义	评价标准
协同决策能力	量化	决策响应时间	从接收任务指令到生成决策方案的时间	≤10 s 为优秀，10～20 s 为良好，>20 s 为不合格
	量化	决策方案合格率	符合任务目标与资源约束的决策方案占比	≥90%为优秀，80%～90%为良好，<80%为不合格
	定性	决策容错性	部分装备失联时决策方案的可行性	3 台以下装备失联仍可行为优秀，1～两台可行为良好，1 台即不可行为不合格
动态组网能力	量化	组网覆盖半径	集群通信网络的最大有效覆盖距离	≥5 公里为优秀，3～5 公里为良好，<3 公里为不合格
	量化	通信丢包率	传输数据中丢失数据包的比例	≤3%为优秀，3%～5%为良好，>5%为不合格
	量化	拓扑重构时间	装备失联/ 新增后网络恢复稳定的时间	≤10 s 为优秀，10～20 s 为良好，>20 s 为不合格
抗干扰能力		干扰下通信成功率	电磁干扰环境中成功传输数据的比例	≥80%为优秀，70%～80%为良好，<70%为不合格
	量化	干扰下目标识别准确率	传感器受干扰时正确识别目标的比例	≥70%为优秀，60%～70%为良好，<60%为不合格
	定性	控制抗干扰性	干扰环境中装备执行指令的准确性	指令执行误差≤5%为优秀，5%～10%为良好，>10%为不合格
故障冗余与自愈能力	量化	故障识别准确率	正确识别故障装备与类型的比例	≥95%为优秀，90%～95%为良好，<90%为不合格
	量化	自愈响应时间	发现故障到完成任务重分配的时间	30 s 为优秀，30～60 s 为良好，>60 s 为不合格
	量化	自愈后任务完成率	自愈后实际完成任务量与计划任务量的比例	≥90%为优秀，80%～90%为良好，<80%为不合格
多装备功能互补能力	定性	功能覆盖完整性	作战任务各环节是否有对应装备负责	全环节覆盖为优秀，1～2 个环节需人工补充为良好，≥3 个环节缺失为不合格
	定性	协同配合流畅性	装备间信息交互与任务衔接的顺畅程度	无衔接延迟为优秀，偶有延迟(≤5 s)为良好，频繁延迟(>5 s)为不合格
	量化	功能替代率	某类装备故障时，其他装备替代其功能的比例	≥70%为优秀，50%～70%为良好

干扰设备。实装层的核心功能是采集真实装备的动态数据（如机动速度、通信状态、任务执行进度），并接收上层下发的控制指令与仿真环境参数。

2）仿真层：基于半实物仿真平台构建，包括虚拟无人装备模型（数量可扩展至 50 台以上，模拟大规模集群）、虚拟地形与干扰环境模型。仿真层通过接收实装层的真实数据，对虚拟装备的运动状态、任务决策进行“校准”，确保虚拟环境与实装环境的一致性；同时，将虚拟装备的交互数据（如虚拟侦察信息、协同请求）发送至实装层，实现“虚实装备协同作战”。

3）控制层：作为联动中枢，部署于试验指挥中心，包括数据融合服务器、试验控制终端、效能评估终端。控制层的功能包括：(1) 数据融合，将实装数据与仿真数据统一格式（如采用 JSON 格式，时间戳精度≤1 ms），消除数据偏差；(2) 试验控制，通过终端设定试验场景参数（如干扰等级、任务目标），并向实装层、仿真层下发控制指令；(3) 实时监控，通过可视化界面（如三维态势图）显示虚实装备的位置、状态及任务进度，便于试验人员实时调整试验方案。

2.3.2　协同联动流程设计

以“大规模集群区域封控试验”为例，联动流程分为 4 个阶段，总时长控制在 120 min，具体如下：

1）环境初始化阶段（0～10）：控制层向实装层下发试验场地形参数（如封控区域边界、障碍位置），向仿真层下发虚拟地形与干扰环境参数（如中度电磁干扰，功率 40 W）；实装层无人装备完成自检（如传感器精度校准、通信链路测试），仿真层生成 20 台虚拟无人装备（含 8 台侦察型、8 台突击型、4 台障碍设置型），并与实装装备完成组网。

2）任务部署阶段（10～20 min）：控制层向虚实集群下发“区域封控任务”指令，明确封控范围（5 平方公里开阔地带）、突防目标类型（3 个模拟敌方车队）；实装指控节点与虚拟指控节点协同制定封控方案，实装装备负责封控区域东侧（2 平方公里），虚拟

装备负责西侧（3 平方公里），并通过控制层同步任务分配结果。

3）任务执行阶段（20～110 min）：突防目标从北侧进入封控区域，实装侦察车发现目标后，将位置信息同步至虚拟侦察车；虚实突击车根据目标优先级（如“敌方指挥车优先拦截”）分配火力，实装突击车打击 1 号目标，虚拟突击车打击 2、3 号目标；其间，控制层触发“突发干扰”（重度电磁干扰，功率 70 W），实装层通信丢包率上升至 15%，仿真层同步调整虚拟装备通信状态，虚实装备通过动态组网（如跳频通信）恢复链路，继续执行拦截任务。

4）数据回收阶段（110～120 min）：任务结束后，实装层上传传感器日志、通信记录、任务执行视频，仿真层上传虚拟装备的状态数据、交互日志；控制层对数据进行汇总存储，为后续效能分析提供基础。

2.3.3 协同联动关键技术

1）时间同步技术：采用 IEEE 1588 Precision Time Protocol（PTP）实现 3 层架构的时间同步，将实装数据与仿真数据的时间偏差控制在 5 ms 以内。通过在实装层、仿真层部署 PTP 从时钟，控制层部署 PTP 主时钟，主时钟每 100 ms 向从时钟发送时间同步信号，确保所有设备的时间戳一致，避免数据时序混乱。

2）数据交互协议：制定专用的“虚实协同数据交互协议”，定义数据帧结构（含设备 ID、数据类型、时间戳、数据内容、校验码），其中数据类型包括“状态数据”（如位置、速度）、“控制指令”（如任务调整、干扰触发）、“交互请求”（如协同决策请求）。协议支持数据压缩（压缩率≥50%）与重传机制（丢包后 100 ms 内重传），确保数据传输效率与可靠性。

3）虚实一致性校准技术：在试验前，通过“单机性能对标试验”校准虚实装备的性能参数。例如，测试实装侦察车在无干扰环境下的目标识别准确率（如 92%），调整虚拟侦察车的识别准确率模型参数，使其与实装值偏差≤3%；测试实装无人车的山地机动速度（如 4.5 km/h），同步修正虚拟无人车的机动速度模型，确保虚实装备的性能一致性，避免仿真数据失真。

3 分层递进试验实施方法与数据处理技术

3.1 分层递进试验实施方法设计

基于集群作战能力的“从简到繁、从单一到复杂”演进逻辑，设计“单机验证－小规模协同－大规模复杂任务”的三层递进试验方法，每层试验聚焦不同能力维度，前一层试验通过后方可进入下一层，确保试验的系统性与安全性。

3.1.1 第一层：单机功能验证试验

1）试验目标：验证单台无人装备的基础功能（感知、控制、通信）是否满足集群协同的前提条件，排除单机故障对集群试验的干扰。

2）试验对象：集群内所有类型的单机装备（如侦察型无人车、突击型无人车、无人指控节点），每种类型至少测试 3 台。

试验内容与步骤（以侦察型无人车为例）：

1）感知功能测试（2 h）：在实装试验场的开阔地带、山地区域分别布置 10 个模拟目标（含装甲车辆、人员、火力点），无人车以 5 km/h 速度机动，记录其目标识别准确率（要求≥90%）、识别距离（要求≥800 m）；在沙尘天气（能见度≤500 m）下重复测试，记录感知性能衰减情况（要求准确率≥70%）。

2）控制功能测试（1. 5 h）：通过指控终端向无人车下发“直线行驶”“转弯（转向角 30°）”“紧急制动”指令，记录指令响应时间（要求≤1 s）、执行误差（如直线行驶偏差≤0. 5 m /100 m）；模拟动力系统故障（如降低 30%功率），测试无人车的故障报警准确率（要求≥95%）与应急停车能力（要求≤5 s 内停车）。

3）通信功能测试（1.5 h）：在试验场设置 3 个通信测试点（距离指控终端 1、3、5 km），无人车在各点与指控终端进行数据交互（如传输目标图像、状态信息），记录通信成功率（要求≥98%）、数据传输速率（要求≥10 Mbps）；在窄带干扰（功率 30 W）下重复测试，记录通信抗干扰能力（要求成功率≥80%）。

4）合格标准：所有测试项目的合格率≥90%，且单台装备的不合格项不超过 1 项；若存在不合格装备，需维修后重新测试，直至合格。

3.1.2 第二层：小规模集群协同逻辑试验

1）试验目标：验证 3～5 台无人装备的协同决策、动态组网能力，确保小规模集群的协同逻辑（如任务分配、信息交互）可行。

2）试验对象：由两台侦察型无人车、两台突击型无人车、1 台无人指控节点组成的小规模集群（共 5 台）。

试验内容与步骤（以“协同突击任务”为例）：

1）集群组网测试（1 h）：在实装试验场部署集群，指控节点下发“组网指令”，记录组网完成时间（要求≤30 s）、初始通信丢包率（要求≤3%）；控制无人车以 3 km/h 速度机动（模拟战场移动），持续 30 min，记录组网拓扑重构次数（要求≤5 次）、重构后丢包率（要求≤5%）。

2）协同决策测试（2 h）：在试验场布置 5 个模拟敌方目标（含 2 个高优先级装甲目标、3 个低优先级人员目标），指控节点下发“打击高优先级目标”任务，记录集群任务分配时间（要求≤10 s）、分配合理性（如两台突击车分别打击 1 个高优先级目标，无重复或

遗漏）；移除 1 台突击车（模拟失联），记录集群任务重分配时间（要求≤20 s）、重分配方案可行性（如剩余 1 台突击车优先打击 1 个高优先级目标，侦察车辅助监控另 1 个）。

3）执行测试（2.5 h）：集群按照决策方案执行突击任务，侦察车向突击车传输目标实时位置（更新频率≥1 次/s），突击车根据信息调整射击角度，记录目标打击成功率（要求≥80%）、协同延迟（如侦察车发现目标到突击车开火的时间≤10 s）；在中度电磁干扰（功率 40 W）下重复测试，记录协同性能衰减情况（要求成功率≥60%，延迟≤15 s）。

4）合格标准：组网测试的各项指标达标，协同决策与执行的任务完成率≥80%；若协同逻辑存在漏洞（如任务分配混乱），需优化算法后重新测试。

3.1.3　第三层：大规模集群复杂任务试验

1）试验目标：验证 10 台以上无人装备的故障冗余、环境适应、多任务协同能力，全面评估大规模集群的作战效能。

2）试验对象：由 4 台侦察型无人车、4 台突击型无人车、两台运输型无人车、两台无人指控节点组成的大规模集群（共 12 台），结合半实物仿真平台扩展至 30 台虚拟装备（总规模 42 台）。

试验内容与步骤（以“区域封控＋战场保障”多任务为例）：

1）多任务协同测试（4 h）：在实装试验场划分“封控区”（3 平方公里，需 4 台突击车、两台侦察车驻守）与“保障区”（距离封控区 2 km，需两台运输车、两台侦察车负责物资补给）；虚拟装备（20 台）补充封控区兵力，形成“实装＋虚拟”混合集群；指控节点下发“封控区拦截突防目标＋保障区运输弹药”双任务，记录：

任务分配合理性（要求无任务冲突，如运输车不占用封控区资源）；

跨区域信息交互效率（如封控区向保障区发送“弹药需求”请求到运输车出发的时间≤3 min）；

多任务完成率（要求封控拦截率≥85%，保障物资送达率≥90%）。

2）故障冗余与自愈测试（2 h）：在任务执行中，模拟 3 台实装装备故障（1 台突击车动力故障、1 台侦察车通信故障、1 台运输车传感器故障），记录：

（1）故障识别时间（要求≤10 s）；

（2）自愈方案生成时间（要求≤30 s，如虚拟突击车补充分控区、剩余侦察车扩大监控范围）；

（3）自愈后任务完成率（要求较故障前下降≤10%）。

3）复杂环境适应测试（3 h）：在“泥泞区＋重度电磁干扰（功率 70 W）”复合环境下，重复多任务测试，记录：

（1）集群机动速度（要求封控区装备≥3 km/h，保障区运输车≥2 km/h）；

（2）抗干扰能力（要求通信成功率≥70%，目标识别准确率≥65%）；

（3）复杂环境下任务完成率（要求≥75%）。

4）合格标准：多任务完成率≥80%，故障自愈后任务完成率衰减≤10%，复杂环境适应能力达标；若未达标，需优化集群控制算法或试验环境参数，重新测试。

3.2　试验数据采集与处理技术

试验数据是评估集群作战效能的核心依据，需构建“全维度采集、高精度处理、多算法分析”的数据处理体系，确保数据的完整性与分析结果的可靠性。

3.2.1　试验数据全维度采集

数据类型与采集方式：

1）装备状态数据：包括无人装备的位置（GPS 定位，精度≤1 m）、速度（惯导传感器，精度≤0.1 m/s）、动力状态（如电池电量、发动机功率）、故障信息（如传感器故障代码），通过装备自带的 CAN 总线、传感器实时上传至控制层的数据服务器（采样频率≥10 Hz）。

2）任务执行数据：包括目标识别结果（如目标类型、坐标、识别时间）、任务分配记录（如任务 ID、执行装备、分配时间）、打击/保障结果（如打击目标数量、物资送达数量），由无人指控节点自动记录，同步至数据服务器（采样频率≥1 Hz）。

3）环境与干扰数据：包括试验场的地形参数（如坡度、植被覆盖率）、天气条件（温度、能见度、风速）、干扰参数（干扰类型、功率、频率），通过部署在试验场的环境监测站（如温湿度传感器、风速仪）、干扰设备控制终端采集，每 10 s 记录 1 次。

4）人工观测数据：针对定性指标（如协同配合流畅性、设备环境适应性），由 3 名试验观察员（须具备无人装备试验经验）通过三维态势图、实装监控视频进行评估，采用“5 分制”打分（5 分为优秀，1 分为不合格），试验结束后汇总平均分。

5）数据存储方案：采用分布式数据库（如 Hadoop HDFS）存储数据，单场试验的数据量约 500 GB～1 TB；为确保数据安全，采用“本地＋云端”双备份，本地存储保留 1 年，云端存储保留 3 年。

3.2.2　试验数据高精度预处理

原始数据存在噪声（如传感器误差）、缺失值（如通信中断导致的数据丢失），需通过以下步骤预处理：

1）数据去噪：采用“滑动平均滤波”处理装备状

态数据（如速度、位置），窗口大小设为 5 个采样点，消除瞬时噪声（如 GPS 信号跳变）；采用“小波变换”处理目标识别数据，去除图像噪声对识别结果的干扰，提升数据精度（如识别准确率修正后提升 2%～3%）。

2）缺失值补全：针对短时间缺失（≤5 s）的数据，采用“线性插值法”补全（如根据缺失前后的速度值计算中间值）；针对长时间缺失（>5 s）的数据，若为关键参数（如任务执行结果），需结合人工观测记录补全；若为非关键参数（如环境温度），标记为“缺失”，不参与后续分析。

3）数据标准化：将不同维度的数据转换为统一格式，便于横向对比。例如，将“通信成功率（%）”“目标识别准确率（%）”等比例数据保留 2 位小数；将“响应时间（s）”“机动速度（km/h）”等连续数据转换为“标准化值”（公式：标准化值 =（实际值－最小值）/（最大值－最小值）），使数据范围映射至 [0，1] 区间。

4 试验难点与专项解决方案

4.1 动态拓扑变化导致的组网稳定性试验难点与方案

难点表现：大规模集群中，无人装备的机动（如快速穿插、规避障碍）会导致通信链路频繁断开/重连，拓扑结构动态变化，难以精准测试组网稳定性（如重构时间、丢包率）；传统试验方法仅记录静态拓扑状态，无法反映动态过程。

专项解决方案：

1）动态拓扑实时监测系统：基于“软件定义网络（SDN）”技术，在控制层部署拓扑监测终端，实时采集各装备的通信连接状态（如连接设备 ID、信号强度、传输速率），通过“动态拓扑图”可视化显示（每 0.5 s 更新 1 次），直观呈现拓扑变化过程（如某装备断开连接后，其他装备的链路重连路径）。

2）拓扑变化预测与试验设计：采用“长短期记忆网络（LSTM）”预测拓扑变化趋势，输入装备的历史机动轨迹、通信参数，输出未来 30 s 内的拓扑重构概率（如某区域的重构概率≥60%）；根据预测结果，在高重构概率区域布置额外的通信测试点，重点记录拓扑重构时间（要求≤10 s）、重构后的通信丢包率（要求≤5%）。

3）多场景拓扑压力测试：设计“密集机动场景”（10 台装备在 1 平方公里内快速穿插，速度≥8 km/h）、“分散－集结场景”（装备从 5 平方公里区域向中心点集结，机动距离≥3 km），分别测试 2 h，记录拓扑变化频率（要求≤1 次/分钟）、极端情况下的组网中断时间（要求≤30 s）。

4）试验验证结果：在某场“分散－集结场景”试验中，集群拓扑重构 12 次，平均重构时间 8.2 s，重构后丢包率 3.8%，均满足指标要求；未出现组网中断超过 30 s 的情况，验证方案有效。

4.2 多目标冲突避让导致的协同安全试验难点与方案

难点表现：集群在执行任务时（如区域封控），多台装备可能同时向同一目标机动（如两台突击车打击同一火力点），导致路径冲突（如碰撞风险）；传统试验仅关注任务完成率，忽略冲突避让的安全性，易引发装备碰撞事故。

专项解决方案：

1）分布式冲突避让算法嵌入：在无人装备的控制模块中嵌入“基于优先级的路径调整算法”，规则如下：①根据装备类型设定优先级（突击型＞侦察型＞运输型）；②优先级高的装备优先选择最优路径，优先级低的装备在距离冲突点 50 m 范围内调整路径（如转向角≤15°），避免碰撞。

2）冲突风险实时预警系统：在控制层部署“冲突预警终端”，基于装备的实时位置、速度、路径规划数据，计算任意两台装备的最小距离（要求≥10 m）；若预测 10 s 内最小距离＜5 m，向相关装备发送“减速”“转向”预警指令，同时向试验人员报警（声光提示）。

3）冲突避让压力测试：在试验场布置“窄通道场景”（通道宽度≤10 m，长度 500 m），安排 8 台装备（4 台突击型、4 台运输型）依次通过通道，模拟“任务优先级冲突”（如两台突击车同时需通过通道），记录冲突预警准确率（要求≥95%）、避让成功率（要求≥98%）、平均避让延迟（要求≤2 s）。

4）试验验证结果：在“窄通道场景”试验中，共发生 15 次潜在冲突，预警终端准确识别 14 次（准确率 93.3%，接近指标要求），装备成功避让 14 次（成功率 93.3%），平均避让延迟 1.5 s；1 次预警漏判因电磁干扰导致，优化抗干扰算法后，后续试验预警准确率提升至 96.7%，满足要求。

4.3 应急任务重构导致的效能衰减试验难点与方案

1）难点表现：当集群遭遇装备故障（如 30%装备失联）、敌方强干扰（如重度电磁干扰）时，需应急重构任务（如重新分配目标、调整作战区域），易导致任务完成率下降、协同延迟增加；传统试验难以模拟“突发故障＋强干扰”的复合极端条件，无法精准评估效能衰减程度。

2）专项解决方案：

（1）复合极端条件模拟：在大规模集群试验中，

采用“故障注入＋干扰叠加”的方式构建复合条件：①故障注入：通过控制层远程模拟 3 台突击型无人车、两台侦察型无人车的通信失联（共 5 台，占比 41.7%）；②干扰叠加：同时开启窄带干扰（功率 50 W）、激光干扰（功率 5 W），模拟敌方复合干扰。

（2）动态任务分配模型：在无人指控节点中部署“基于剩余资源的动态分配模型”，核心逻辑为：①计算剩余装备的能力冗余（如剩余 1 台突击车的火力覆盖范围、剩余两台侦察车的监控区域）；②根据能力冗余重新划分任务区域（如缩小封控范围至原范围的 70%），优先保障高优先级任务（如拦截敌方指挥车）。

（3）效能衰减量化评估：设定“无极端条件”为基准组，“复合极端条件”为试验组，对比两组的任务完成率（要求试验组≥基准组的 70%）、协同延迟（要求试验组≤基准组的 1.5 倍）、故障自愈率（要求≥80%）。

（4）试验验证结果：基准组的任务完成率为 92%，协同延迟为 8 s；试验组的任务完成率为 68%（≥92%×70%＝64.4%），协同延迟为 11 s（≤8×1.5＝12 s），故障自愈率为 82%，均满足指标要求；效能衰减程度可控，验证方案可有效应对应急任务重构场景。

5　结束语

本文围绕陆上无人装备集群作战试验的“需求—指标—场景—方法”核心逻辑，系统开展研究：首先界定集群的核心概念、分类及 4 类典型作战场景，明确试验边界；其次分析 6 项关键能力需求，构建包含 18 项“量化＋定性”指标的试验指标体系，解决“测什么”的问题；进而构建“虚拟＋实装”混合的试验环境与半实物协同联动方案，设计“单机—小规模—大规模”分层递进试验方法，同步提出动态拓扑、冲突避让等难点的专项解决方案；最后通过 LX-1 型集群的试验案例，验证方法的可行性与有效性。研究成果填补了陆上无人装备集群作战试验的系统性方法空白，为集群作战能力评估与技术迭代提供支撑。未来可进一步扩展研究方向，如多军种（陆＋空）无人装备集群的协同试验方法、智能化干扰环境下的试验技术，提升试验方法的全域适应性。

参考文献：

[1] 王建国，李　刚，张　伟. 陆上无人装备集群协同作战关键技术研究 [J]. 兵工学报，2022，43（5）：1123－1135.

[2] 美国陆军装备司令部. Unmanned ground vehicle common architecture specification [R]. 华盛顿：美国陆军装备司令部，2020：45－68.

[3] 刘　敏，赵　亮，王　浩. 无人装备集群作战试验环境构建技术 [J]. 火力与指挥控制，2021，46（8）：78－83.

[4] 张　军，李　明，陈　晓. 基于层次分析法的无人集群作战效能评估 [J]. 系统工程与电子技术，2023，45（2）：512－520.

[5] 欧洲防务局. Test standards for unmanned vehicle clusters in complex environments [S]. 布鲁塞尔：欧洲防务局，2021：22－36.

[6] 赵　伟，王　鹏，刘　杰. 半实物仿真平台在无人装备试验中的应用 [M]. 北京：国防工业出版社，2020.

[7] 孙　明，李　娜，张　阳. 陆上无人装备集群动态组网稳定性测试方法 [J]. 计算机测量与控制，2022，30（10）：56－61.

[8] 美国国防部高级研究计划局. DARPA robotics challenge test report [R]. 弗吉尼亚：DARPA，2019：78－92.

[9] 陈　明，王　超，李　红. 无人装备集群多目标冲突避让算法研究 [J]. 机器人，2023，45（3）：345－353.

[10] 国防科技大学. 陆上无人装备集群作战试验数据处理技术 [C] //中国无人系统大会论文集，南京：国防工业出版社，2022：210－218.

[11] 李　丽，张　伟，王　浩. 基于 BP 神经网络的无人集群作战效能预测 [J]. 控制与决策，2021，36（6）：1456－1462.

[12] 德国莱茵金属公司. Unmanned ground combat vehicle test manual [M]. 杜塞尔多夫：莱茵金属公司出版社，2020.

[13] 王　强，刘　敏，赵　亮. 复杂电磁环境下无人装备集群抗干扰试验方法 [J]. 电子学报，2022，50（8）：1987－1995.

[14] 张　远，李　明，陈　晓. 无人装备集群应急任务重构模型研究 [J]. 系统仿真学报，2023，35（4）：890－898.

[15] WAHID A，BRESLIN J G，INTIZAR M A. Hybrid CNN-LSTM framework for machine fault prediction in Industry4.0 [J]. Applied Sciences，2022，12（9）：4221.

[16] LIU Z，ZHANG D，JIA W. et al. An adversarial bidirectional serial-parallel LSTM-based QTD framework for product quality prediction [J]. Journal of Intelligent Manufacturing，2020，31（2）：345－359.

[17] 李　明. 数字孪生驱动的装备试验虚实融合框架 [J]. 计算机集成制造系统，2024，30（1）：45－55.

[18] ALQASEM O. CNN-based software fault prediction using NASA datasets [J]. Journal of Systems and Software，2023，185：111－125.

[19] PCB Piezotronics. 352C33 Piezoelectric Accelerometer Datasheet [Z]. Depew：PCB Piezotronics Inc，2023.

[20] 孙建华. 智能制造中的质量智能检测系统设计 [J]. 自动化仪表，2023，44（6）：34－40.