

## 无人集群体系设计与仿真评估方法

杨松, 王维平, 李小波\*, 周鑫, 井田  
(国防科技大学系统工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**无人集群作战正在成为一种改变战争形态的新型作战样式。针对当前无人装备试验相对独立、缺乏一体化闭环设计与集成验证手段的问题,提出了一种体系设计与仿真评估方法。该方法包含了作战概念建模与需求分析、体系设计理念与体系设计、内场仿真实验与方案探索、体系原型研发与评估优化、外场集成试验与综合决策五个阶段,创新发展了体系设计、仿真试验、评估优化的理论方法、工具链路、集成环境,为无人集群的体系化、智能化、实战化提供了一定的理论与技术支撑。

**关键词:**无人集群;体系设计;仿真评估;一体化闭环设计;集成验证

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

**文章编号:**1001-2486(2024)03-126-11



与作者互动  
听语音  
聊科研

## Design, simulation and evaluation method for unmanned swarm system-of-system

YANG Song, WANG Weiping, LI Xiaobo\*, ZHOU Xin, JING Tian

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Unmanned swarm operation is becoming a new operation style that changes the shape of warfare. In response to the current problem that unmanned equipment experiments are relatively independent and lack of integrated closed-loop design and integrated verification means, a SoS (system-of-system) design, simulation and evaluation method was proposed. The method contains five stages: operational concept modeling and requirement analysis, SoS design concept and SoS design, infield simulation experiment and scheme exploration, SoS prototype development and evaluation optimization, and outfield integrated test and comprehensive decision. It innovates and develops theoretical methods, tool chains, and integrated environment for SoS design, simulation test, and evaluation optimization, which provides certain theoretical and technical support for the systematization intellectualization and actual combat of unmanned swarm.

**Keywords:** unmanned swarm; system-of-system design; simulation evaluation; integrated closed-loop design; integrated verification

无人集群技术<sup>[1-2]</sup>作为改变未来战争规则的颠覆性技术,近年来在世界范围内得到了飞速发展,已经成为国家间军事博弈的重要力量。随着人工智能、机器学习、计算能力等技术的发展,未来战场智能化程度将极大提高,进而促使无人体系的深入发展<sup>[3]</sup>。人机混合增强智能、自主无人操控、群体智能决策等先进技术将成为军队战斗力跃升的新的引爆点。

相比于单个无人平台,无人集群具有更强的环境适应能力和更高的效费比,对未来战争可能产生重大影响<sup>[4]</sup>:第一,改变对抗形态<sup>[5]</sup>。无人集群的广泛运用,促使信息化战争对抗形态呈现智能对抗、群体对抗、全域对抗、多维对抗等特

点<sup>[6]</sup>。第二,变革作战样式。科学技术催生出新的兵力编制和武器装备,进而导致作战样式和作战理念的变革。无人集群的应用,也将进一步提高无人装备的比例,逐渐呈现“人机一体”“无人引导”“饱和和打击”等的作战形式<sup>[7]</sup>。第三,创新战法战术。军事技术的发展直接影响战法战术,而无人集群的应用将催生出更多全新的战法战术,甚至颠覆传统观念。

无人集群体系是以数量优势弥补单一平台功能或能力不足的一种无人作战体系,其核心思想是将传统昂贵的大型有人平台分解为数量更多、尺寸更小、成本更低的分布式无人作战平台。本文以无人集群空地联合反击作战体系为

收稿日期:2022-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(72101263)

第一作者:杨松(1991—),男,四川成都人,博士研究生,E-mail:ysxwc@163.com

\*通信作者:李小波(1983—),男,湖南衡阳人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:lixiaobo@nudt.edu.cn

例进行研究,综合运用部署于空中、地面的无人作战平台,以智能化协同的无人集群作战为典型作战运用方式,通过群间信息共享与交互,加快“观察—判断—决策—行动”链路,构成侦、控、打、评一体的联合体系,根据上级意图,以较低附带损伤对蓝方装备和固定设施实施打击。

不少学者开展了关于无人集群体系的研究。伊山等<sup>[8]</sup>提出了一种智能无人集群体系的仿真实验框架,通过演示无人集群体系作战概念,验证无人集群关键技术,评估无人作战自动化等级和贡献率。郭永金等<sup>[9]</sup>通过分析海上无人装备体系,提出了若干开展无人装备体系建设的意见和建议。在文献[10]中,针对智能化多无人集群体系典型特征,提出了一种基于模式切换的动态自适应机制,为敏捷自适应提供方法支撑。为满足未来无人作战需求,宓铁良等<sup>[11]</sup>研究了无人体系设计

的标准规范,提出了基于 DoDAF 的无人体系架构及开发流程。对于集群任务规划,在文献[12 - 14]中,根据特定场景提出了无人集群智能规划算法,有效解决无人集群底层行动序列生成问题。

体系设计与仿真评估的研究与相关行业中,当前普遍面临诸多挑战:第一,在体系总体设计方法方面,主要基于 UAF、DoDAF<sup>[15]</sup>等具有强约束的架构框架进行体系设计,缺少柔变机制的研究;第二,在效能评估与优化技术方面<sup>[16]</sup>,相关评估方法、算子模型理论与仿真研究较多,还需要加强理论和实践相结合的评估研究;第三,在集成试验与验证技术<sup>[17]</sup>方面,在传统单装战术、技术性能验证基础上,亟须开展体系集成层面的能力、效能、性能综合评估,并形成内场理论分析、仿真实验与外场实装试验结合的可操作性验证流程。

为了解决上述问题,本文提出了一种无人集群体系设计与仿真评估方法。该方法结合了无人系统的特点,研究建立了一体化联合试验体系架构框架和支撑技术,规范了无人装备作战体系集成试验与验证工作。

### 1 方法流程

无人集群体系设计与仿真评估方法分为体系工程过程和系统工程过程,故又称为“双 V”总体研究框架,如图 1 所示。

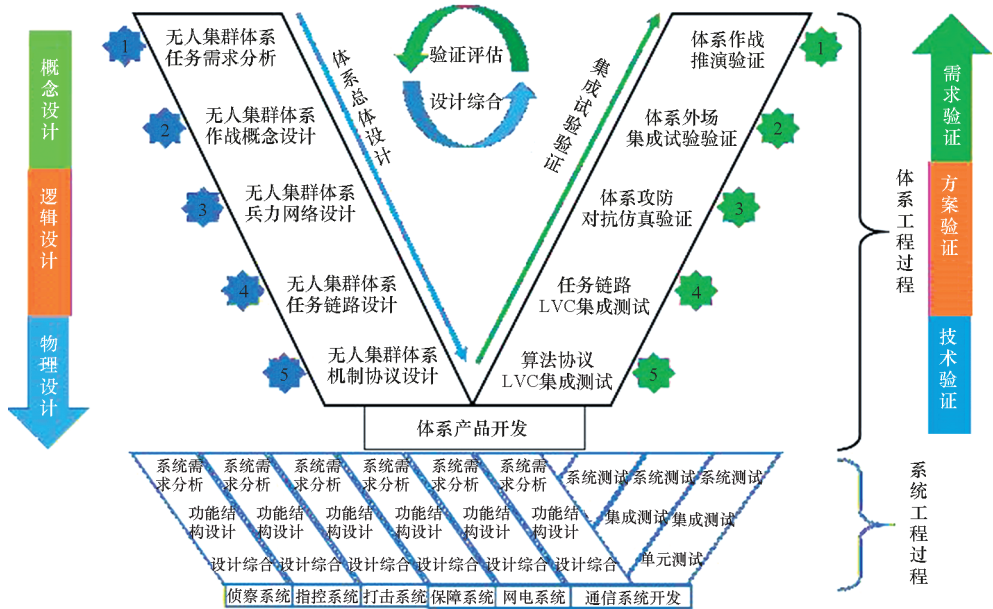


图 1 “双 V”总体研究框架

Fig. 1 The “V-V” overall research framework

体系工程过程分为体系总体设计和集成试验验证,自顶向下的体系总体设计包括概念设计、逻辑设计、物理设计三个阶段,自底向上的集成试验验证包括技术验证、方案验证、需求验证三个阶段。考虑到无人集群体系是以无人平台为主要装备的新式作战体系,现有作战体系难以提供可行方案,因此需要着重考虑体系总体设计阶段。概

念设计是对作战场景的设计,分为任务需求分析和作战概念设计;逻辑设计对无人集群体系的基本构成进行刻画,分为兵力网络设计和任务链路设计;物理设计为系统开发提供约束,包括机制协议设计。技术验证是对物理设计产品进行检验,包括算法协议 LVC<sup>[18]</sup>集成测试;方案验证是指通过体系攻防对抗仿真和 LVC 集成测试来验证逻

辑设计产品是否合适;需求验证是对需求设计产品的检验,包括体系作战推演验证和体系外场集成试验验证<sup>[19]</sup>。其中,体系产品开发阶段是对具体系统的开发,由组分系统需求分析、组分系统功能结构设计、单组分系统测试、组分系统集成测试等构成<sup>[20]</sup>。通过设计与验证相结合、体系与系统相结合的形式,完成无人集群体系设计与仿真评估。

### 1.1 作战概念建模与需求分析

作战概念建模与需求分析的目标是形成体系目标图像,作为下阶段体系逻辑设计的基本需求和输入,包括作战目标分析、静态博弈分析、介入条件分析、概念图像分析等部分。无人集群体系是具有敏捷能力和适应能力的多层次工程化复杂大系统,其特点是:①由空中、地面上大量的无人平台和智能打击弹药等平台组成;②采用开放式架构对组分系统综合集成;③以信息网络为中心;④以系统的跨平台互联和跨域协同性为基础;⑤以多种类型装备为基本节点,提供作战能力的支撑手段;⑥具有抗毁性、任务弹性、低成本、功能分布化等优势 and 智能特征的体系作战。由于战场态势瞬息万变,为了适应态势变化、内部抗毁变化要求,体系设计的起点是体系作战的使命任务流程和构型模式,即层次化智能适变无人集群体系,包括满足任务适变特性需求的捷变式打击、装备抗毁特性需求的可重构编组、指控柔性特性需求的云流化指控等能力。

### 1.2 体系设计理念与体系设计

在作战概念和需求分析的牵引下,完成体系架构设计,并生成方案空间,主要包括体系设计核心理念、体系架构设计流程与产品、体系架构设计规程、基于能力的体系兵力编成架构设计、适变机制和体系构型设计等阶段。

1) 体系设计核心理念。从军事领域的研究现状来看,体系架构设计可分为三个方面:一是聚焦静态兵力配系的效用性架构设计,二是聚焦外部态势变化的适应性架构设计,三是聚焦内部功能抗毁的弹变性架构设计。国外体系设计呈现以下几个方面的特征:①作战需求牵引,以作战概念牵引装备和技术的体系化发展;②装备与作战融合,兼顾装备体系的功能配系设计和作战体系的运用机制设计;③建设与运用耦合,设计理念由设计产品向设计能力转变;④损毁失效视为常态,将安全性和弹变性设计作为体系设计的重要环节。当前国内体系设计研究主要聚焦在效用性架构设

计方面,对于适应性架构和弹变性架构研究较少,尤其在智能化无人作战领域缺乏三者的综合研究。

2) 体系架构设计流程与产品。基于体系设计核心理念,定制研发面向任务的无人体系架构设计软件。依托该软件设计了兵力编成架构、作战运用架构、组分协议架构。共 11 类产品,包含 7 类视角 54 个可视化架构视图模型,形成了装备功能、作战任务、指控活动、兵力配属 4 个清单,形成了体系、集群、平台 3 个层次 14 个适变规则,如图 2 所示。

3) 体系架构设计规程。将体系架构设计分为兵力编成、作战运用和组分需求设计三个部分,按照任务活动、装备功能、组织指控、兵力组网、任务链路、构型机制、组分任务需求、组分协议需求和组分指标需求 9 个阶段,拟制设计规程(规范化流程),对每个阶段的详细流程步骤及其输入输出、产品规格、支撑方法技术和参与人员角色进行了规范。

4) 基于能力的体系兵力编成架构设计。体系兵力编成架构设计是从多使命任务要求出发,从军事力量建设的角度设计作战体系的结构形式、行为模式和集成方式。目前没有完全现成的合适兵力可用,需要开展兵力编成架构设计,作为军事力量运用的物质基础。兵力编成的核心是如何根据具体任务的需要,将装备资源和组织指控两个方面集成到兵力单元中,设计以兵力单元(即作战系统)为核心的作战体系集成架构。兵力单元是“使命任务—装备功能—组织指控”<sup>[21]</sup>三个方面的综合体,是体系运行和对抗机理的基本载体,是由静态装备体系设计转向动态作战体系设计的关键。

5) 适变机制和体系构型设计。体系作战运用架构设计是在体系兵力编成架构的基础上,从具体使命任务要求出发,从军事力量运用的角度设计作战体系的使命任务需求、行动计划和适变机制。兵力编成架构设计给出了初步的体系整体设计方案,回答了体系是什么的问题,但是并没有回答面向具体任务体系怎么用,即如何满足给定作战场景中的具体使命任务需求,以及如何从能力领域的角度提供遂行具体任务的运用方案等问题,因此需要聚焦具体使命能力需求进行任务链路和构型机制设计:

① 适变机制设计包括任务适变机制、指控柔性机制、功能抗毁机制。任务适变机制主要针对

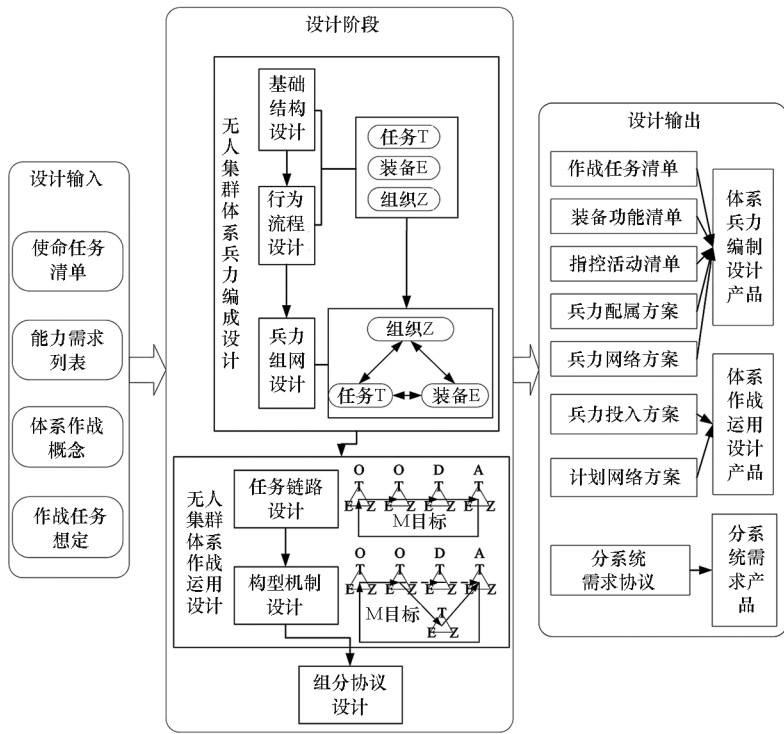


图2 体系架构设计流程与产品

Fig.2 Processes and products of SoS design

新增任务目标适变,通过实时动态的任务规划和链路重构,以及可能的相关指控组织构型和装备功能行为模式调整,支持捷变式打击;指控柔性机制是指在体系使命任务不变、战场态势变化的情况下,体系通过实时动态的组织指控构型调整,更为高效地完成使命任务;功能抗毁机制是指在使命任务不变和外部态势不变、装备损毁或者失效的情况下,体系通过功能构型调整,将受损的体系功能恢复到正常或者设定水平。

②构型机制设计主要描述体系运行过程中,其构型模式根据特定战场态势如何切换的问题,即从机制原理角度设计体系的任务流程适变、组织指控构型和装备抗毁模式切换规则。在无人化智能化作战背景下,体系构型设计的主要目标是设计体系级的智能来有效应对体系对抗的不确定性。

### 1.3 内场仿真实验与方案探索

1)方案空间寻优探索与权衡决策总体流程。体系设计是一个多阶段多层次迭代优化的过程,需要根据设计对象的特征遴选设计决策并生成设计方案空间,然后采用计算实验手段对备选体系方案进行评估优化,最终为设计决策人员提供“满意”设计方案。体系方案设计决策点是对形成体系方案具有重要影响又具备可变性的设计变量,是体系设计方案决策的主要对象,需要设计方

案决策人员综合成本、能效、技术难度进行权衡决策。实验探索总体流程主要是在基线设计方案的基础上,开展体系设计方案空间构建、方案空间寻优探索和决策权衡三个阶段的工作。总的来看,这部分是一个采用解析分析、仿真实验等方法手段完成由基线方案到备选方案(S\_AL),再到体系优选方案(S\_OP)和最终方案(S\_ED)的方案探索寻优与权衡决策过程。

2)体系攻防对抗仿真实验。在体系攻防对抗仿真实验中,按照任务活动、装备功能和组织指控等架构方案,在体系攻防对抗仿真软件中建立蓝方和红方任务流程、装备模型和组织编制,根据基线兵力配系方案,进行兵力部署,完成实验想定设计与仿真运行。

3)集群协同性能仿真实验。在集群协同性能仿真实验中,按照任务活动、装备功能和组织指控等架构方案,在集群协同打击仿真软件中编辑蓝方和红方任务流程、装备模型和组织编制,并根据体系攻防对抗实验形成的基线兵力配系方案,进行兵力部署,完成实验想定设计与仿真运行。

### 1.4 体系原型研发与评估优化

在体系原型研发阶段,根据体系集成需求协议开发无人集群系统原型,其中需开发集群任务规划智能组件,完成虚拟仿真验证,再嵌入指控席

位进行半实物验证。在评估优化阶段,主要是针对系统原型中的关键装备、关键技术设计方案,运用集群 LVC 仿真工具,完成模型构建评估分析、实验评估和分析、优化方案生成。

在该阶段最为关键的是评估体系指标的设计,该过程需遵循整体-局部综合、结构-行为结合、战术-技术统合的思想,分体系层、集群层和

平台层三个层次,结合决策变量、约束、结果三类设计变量,设计了 9 种评估指标,如图 3 所示。其中,决策变量与设计决策点紧密相关,主要是属性指标;约束变量对设计决策有边界约束作用,主要是体系资源、成本、技术能力和时间进度等变量;结果变量主要是能力、效能、贡献率、效费比、贡价比等方案评价指标。

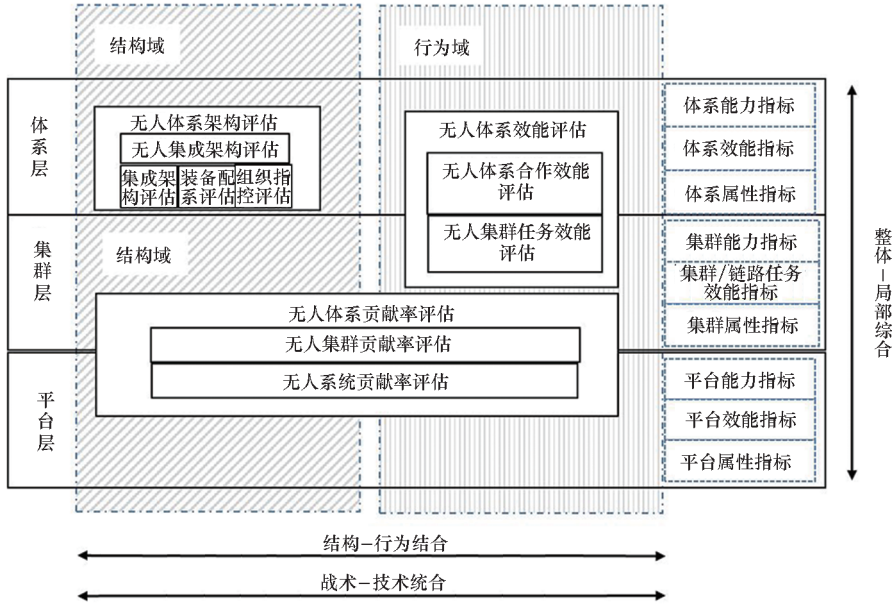


图 3 评估指标体系设计

Fig. 3 Design of evaluation index system

### 1.5 外场集成试验与综合决策

在上述四个过程基础上,开展外场集成试验与综合决策。围绕典型任务场景,在试验场地开展空地异构无人平台的外场实装集成试验,验证体系方案中的兵力配系、任务链路和关键支撑技术,得出若干决策建议。

## 2 关键工作

为了完成上述方法流程,应在理论方法、工具链路、集成环境等方面开展攻关。

1) 突破体系设计与评估理论方法。无人集群体系的设计、验证、评估是一项复杂的系统工程。围绕体系设计、仿真、评估、优化一体化闭环设计,应采用一套支持流程、构型、组网、链路、协议等的柔性适变体系架构设计方法,构建无人集群体系作战效能仿真方法,形成支持多层次、多阶段综合评估和迭代优化的统一能力框架,从而实现无人集群体系“概念-逻辑-物理”全流程设计、验证、评估。

2) 打通一体化闭环设计工具链路。针对一体化闭环设计方法的各个环节,应提出一体化

工具链路,包括需求分析系统、架构设计系统、内场实验系统、体系研发系统、评估优化系统、综合决策系统。①在需求分析阶段,需求分析系统可以采用定制化的墨子联合作战推演系统,该系统支持战役战术等多类作战想定的快速构建和推演仿真,能够较好支撑作战概念建模与需求分析;②在方案设计阶段,可以采用定制化开发的架构设计平台,以支持 DoDAF 框架标准的可视化建模环境和代码生成、仿真运行能力,支持论证人员完成定制化体系架构设计和架构逻辑验证,对论证装备的作战过程进行分析;③在内场实验阶段,可以采用虚拟战场开发平台、系统效能分析仿真系统<sup>[22]</sup>、武器装备作战效能仿真系统<sup>[23]</sup>开展研究;④在体系研发阶段,可以采用 LVC 一体化平台 SimSwarm,该平台有助于各个分系统细粒度仿真实验;⑤在评估优化和综合决策阶段,可采用 AE Studio 体系效能综合评估工具,开展体系评估相关的策略设计、方案设计、流程设计、数据预处理、模型管理、指标设计、结果展现等具体业务,以实现无人集群作战方案优化评估、作战效能评估和作

战运用验证评估。

3)开发无人集群总体集成环境。为了支撑工具链路,应当将工具链扩展为贯通体系设计、仿真、评估、优化一体化闭环设计的无人集群体系总体设计综合集成环境。该环境包括资源层、数据通信层、支撑层和应用层,如图4所示。其中资源层提供硬件支撑环境,数据通信层用于保证硬件之间能够互联互通,支撑层为工具链提供基础工具,应用层是面向用户的服务软件。

### 3 案例研究

以无人集群空地联合反击作战体系设计与仿真评估为例,简要阐述所提出的核心思想和流程。

#### 3.1 作战概念建模

以无人集群空地联合反击作战为案例进行研究,该体系能够实现区域封控作战需求,应对可能出现的中小规模冲突,弥补现有作战体系的能力差距,图5给出了一个作战概念示意图。

| 无人集群体系总体设计综合集成环境 |                       |                      |                       |                         |        |
|------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|--------|
| 应用层              | 无人体系总体设计方案决策推演系统可视化展现 | 无人集群杀伤链方案决策推演系统可视化展示 | 异构无人集群原型方案推演与实战场景展现系统 | 无人集群系统作战实验仿真推演系统可视化展现   |        |
| 支撑层              | 无人体系总体设计方案决策推演可视化软件   | 无人集群杀伤链方案决策推演可视化软件   | 异构无人集群原型方案推演与实战场景展现软件 | 智能化无人集群作战体系动态适变机制设计支撑平台 | 高性能工作站 |
|                  | 区块链智能平台               |                      | 定制化无人车、无人机            |                         |        |
|                  | 高性能工作站                | 高性能移动工作站             | 高性能移动工作站              | VR中间软件                  |        |
| 数据通信层            | 互联互通硬件接口及设备           |                      |                       |                         |        |
| 资源层              | 基础支撑环境                |                      |                       |                         |        |

图4 无人集群体系总体设计综合集成环境

Fig. 4 Comprehensive integrated environment for the overall design of unmanned swarm system

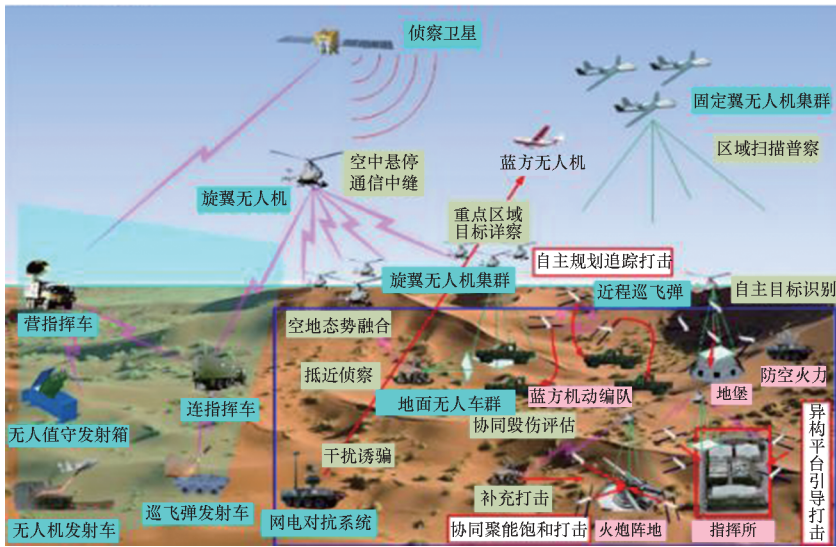


图5 无人集群体系作战概念视图

Fig. 5 Concept of unmanned swarm SoS operation

该概念主要是通过使用大量无人装备替代有人兵力,改善目前一线兵力数量不足和边防侦察管控手段少、能力弱的现状。通过卫星前期监视、固定翼无人机区域普察和旋翼无人机配合无人车抵近详察等方式提升侦察情报的完整性和实时性、借助巡飞弹群的自主协同规划能力、机动察打能力、反斜面打击能力等增强对蓝方防御工事、纵深兵力的打击能力。

通过作战概念建模与开发,能够获知作战的基本场景、兵力构成、目标、任务阶段等,从而支撑体系设计,为架构及组分需求设计提供基本约束。

#### 3.2 无人体系设计

在体系设计阶段,基于定制化体系设计工具开展架构设计。体系架构设计主要包括兵力编成架构、作战运用架构以及组分需求设计。

对于兵力编成架构,首先将作战体系使命分

解为可由装备系统执行的任务网络;其次,给出任务节点与系统节点之间的对应关系,并根据任务网络和该对应关系构建系统网络;然后,给出系统节点和指控节点之间的对应关系,并根据该关系建立指控网络。然而,指控网络与系统节点和指控节点之间的对应关系没有直接关系,它是根据指控节点之间可能的关系构建而成。每个超网络代表一个方案,所有超网络构成架构方案空间。对于作战运用架构,是在体系兵力编成架构的基础上,围绕 OODA 环节设计行动链路,链路中每

个节点都包括任务、装备、指控等要素。对于组分需求设计,是体系组分设计、实现、集成和运行所遵循的标准、规范、协议等的统称,使体系组分能够满足体系使命能力需要,保证各组分之间能够实现互联、互通、互操作。

兵力编成架构示意图如图 6 所示,每个大圆圈表示一个兵力节点,里面包含需要完成的任务、由什么装备构成、上下级指控关系等要素;中边表示节点与节点之间的某种要素是相互联系的,比如任务关系、指控关系等。

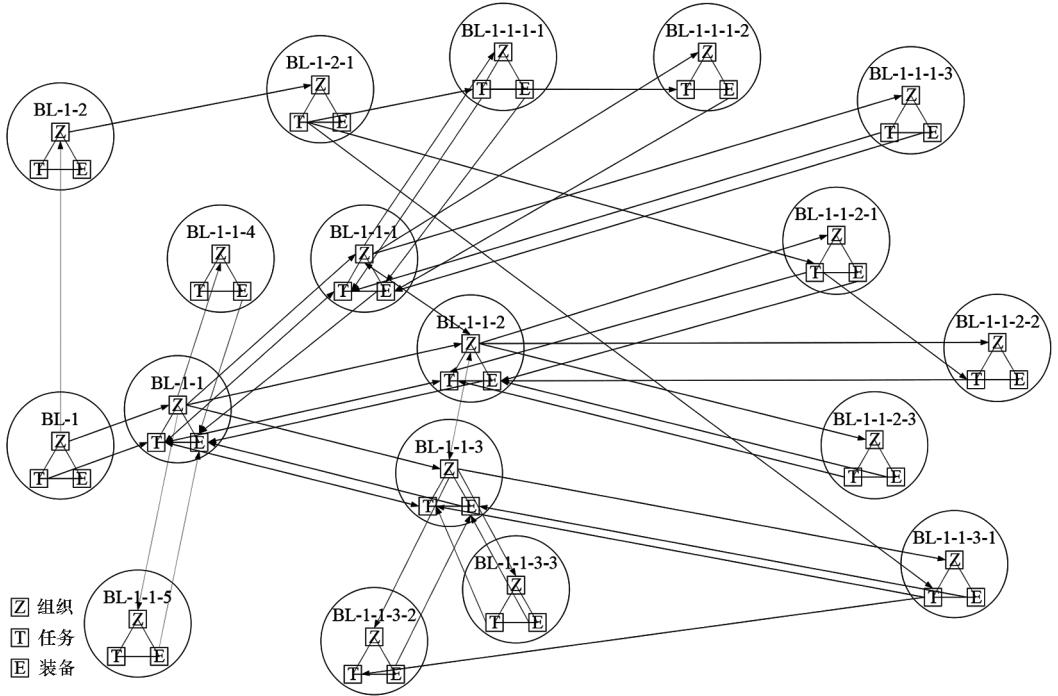


图 6 兵力编成架构示意图

Fig. 6 Concept of force architecture

通过体系架构设计,能够获知体系的基本构成要素、相互关系及具体的任务链路,从而指导和规范仿真实验。

### 3.3 内场仿真实验

仿真实验环节用于评估体系架构方案的具体效能,是对无人体系架构的具体化。

首先,给出仿真实验中红蓝方兵力编成。红方兵力编成如下:无人值守火箭发射箱、小型巡飞弹发射车、察打无人车、自行炮弹结合防空系统、雷达干扰系统、固定翼无人机运载车、旋翼无人机运载车、旋翼无人机、固定翼无人侦察机等,同时给定相应的战技指标,比如近程火箭弹射程 10 km。蓝方兵力编成如下:高射炮炮兵排、榴弹炮排、迫击炮排、通信节点、固定翼无人机运载车、旋翼无人机运载车等,并设定相应的战技指标。

然后,给出体系攻防对抗基线实验过程,也就

是红方蓝方基本的作战流程。例如: $t$ 时刻,红方出动固定翼无人机从二线地区出发前往蓝方前沿区域开展战场区域普察。 $t+t_1$ 时刻,红方一线地区作战单位发现了蓝方高射炮炮兵排、指挥车和多个不明型号目标。 $t+t_2$ 时刻,红方通过探测系统等发现并识别蓝方无人机阵,随即启动电抗侦察。 $t+t_3$ 时刻,红方无人值守火箭炮编组、察打无人车编组等向阵地实施机动,前方小型巡飞弹在上空盘旋实施引诱。 $t+t_4$ 时刻,红方根据目的对蓝方实施打击。

最后,对体系效能产生影响的因素开展实验,比如兵力装备配系实验方案、兵力运用流程实验方案、装备体系贡献率实验方案。兵力装备配系实验方案中可以考察有人/无人装备配比,通过对近程火箭弹、旋翼无人机、小型巡飞弹的用量配比调整,探索有人装备与无人装备配比对作战效果

的影响。兵力运用流程实验方案中,通过调整针对不同蓝方目标的红方兵力运用,研究不同兵力运用流程对作战效果的影响。装备体系贡献率实验方案,通过调整红方中型、小型巡飞弹的用量配比,研究该两型关键装备的体系贡献率。

### 3.4 体系评估优化

体系评估优化是以典型场景为主要现实场景,以实验运行结果为依据,对评估结果进行评估和优化。根据评估对象不同包括体系能力评估、体系效能评估、体系贡献率评估等体系层面评估,判断是否达到预定目标,并在评估结果基础上返回来分析和优化兵力装备配系方案、兵力运用流程方案、装备体系贡献率方案。

在基于 DoDAF 的传统体系架构框架开展体系设计的相关工作中,主要从任务分解和功能配置两个视角进行详细架构设计,而本文提出的体系架构设计方法,在“任务”和“功能(装备)”视角之外。首先,针对军事问题中显著的组织指控导向特点,引入了“组织指控”这一“方法域”视

角,明确了体系在具备达成目的(任务)的相关手段(装备)之后,在体系运用过程中还需要的组织架构、指控流程等方法层面的体系具体要求;然后,面向具体任务作用对象,新增了“链路”视角,明确了在处理具体作用对象时,如何依托一条闭合链路将前阶段设计的兵力单元分配到具体任务环节,保证各环节能力需求得到满足、各环节之间传递无阻,以及链路闭合后在作用对象上达成预期目标。以上架构设计方法弥补了原有方法较适宜“采办建设”类体系业务需求但在“作战运用”类体系业务需求方面存在的缺项和不足。在无人集群空地联合反击作战场景中,应用本文方法开展了无人集群规模(实验编号 S\_AL\_WJG)、任务链路闭合流程(实验编号 S\_AL\_ZFY)、装备体系贡献率(实验编号 S\_AL\_GZG)等体系效能评估实验。通过方案组合、调整形成的优化方案与基线方案(S\_AL\_YWP\_2\_1)相比,不仅提升了无人集群打击效果,而且增加巡飞弹群的兵力投入对体系效费比的提升更明显,相关实验评估结果如表 1~4 所示。

表 1 无人集群规模实验结果

Tab.1 Experimental results of manned and unmanned forces deployment scale

| 实验编号         | 旋翼无人机平均<br>损耗总数/架 | 小型巡飞弹平均<br>损耗总数/枚 | 蓝方平均损耗<br>装备总数/件 | 旋翼无人机群<br>效费比/(1/万元) | 小型巡飞弹群<br>效费比/(1/万元) |
|--------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| S_AL_WJG_1_1 | 0.5               | 17.0              | 35.7             | 3.570 0              | 0.105 0              |
| S_AL_WJG_1_2 | 0.2               | 24.6              | 37.2             | 9.300 0              | 0.075 6              |
| S_AL_WJG_1_3 | 0.2               | 33.2              | 33.8             | 8.450 0              | 0.050 9              |
| S_AL_WJG_2_1 | 0.6               | 16.8              | 31.0             | 2.583 3              | 0.092 3              |
| S_AL_WJG_2_2 | 0.4               | 26.4              | 35.4             | 4.425 0              | 0.067 0              |
| S_AL_WJG_2_3 | 0.6               | 35.2              | 36.6             | 3.050 0              | 0.052 0              |
| S_AL_WJG_3_1 | 1.0               | 17.6              | 34.4             | 1.720 0              | 0.097 7              |
| S_AL_WJG_3_2 | 0.8               | 25.4              | 36.0             | 2.250 0              | 0.070 9              |
| S_AL_WJG_3_3 | 1.8               | 34.6              | 37.2             | 1.033 3              | 0.053 8              |

表 2 任务链路闭合流程实验结果

Tab.2 Experimental results of task chain closure process

| 实验编号         | 察打无人车<br>平均损耗<br>总数/辆 | 小型巡飞弹<br>平均损耗<br>总数/枚 | 蓝方平均<br>损耗装备<br>总数/件 | 察打无人<br>车体系<br>效能 | 察打无人车<br>效费比/<br>(1/万元) | 小型巡<br>飞弹体<br>系效能 | 小型巡飞<br>弹效费比/<br>(1/万元) |
|--------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| S_AL_YWP_2_1 | 4.00                  | 28.40                 | 40.40                | 1.00              | 60.600                  | 1.00              | 8.535 211               |
| S_AL_ZFY_1_1 | 20.00                 | 16.80                 | 35.80                | 0.89              | 10.740                  | 0.92              | 12.785 710              |
| S_AL_ZFY_1_2 | 12.00                 | 16.40                 | 34.00                | 0.98              | 17.000                  | 0.96              | 12.439 020              |
| S_AL_ZFY_2_1 | 28.00                 | 4.00                  | 27.00                | 0.96              | 5.786                   | 0.97              | 40.500 000              |



表 3 装备体系贡献率实验结果

Tab.3 Experimental results of the contribution rate of equipment

| 实验编号         | 中型巡飞弹<br>平均损耗<br>总数/枚 | 小型巡飞弹<br>平均损耗<br>总数/枚 | 蓝方平均<br>损耗装备<br>总数/件 | 中型巡<br>飞弹体系<br>贡献率 | 中型巡飞弹<br>贡价比<br>(每 100 万元) | 小型巡飞<br>弹体系<br>贡献率 | 小型巡<br>飞弹贡价比<br>(每 100 万元) |
|--------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| S_AL_GZG_0_1 | 0                     | 0                     | 18.0                 |                    |                            |                    |                            |
| S_AL_GZG_1_1 | 5.0                   | 16.8                  | 31.0                 | 0                  | 0                          | 0                  | 0                          |
| S_AL_GZG_1_2 | 6.8                   | 26.4                  | 35.4                 | 0                  | 0                          | 0.142              | 0.007                      |
| S_AL_GZG_1_3 | 6.2                   | 32.8                  | 36.2                 | 0                  | 0                          | 0.168              | 0.008                      |
| S_AL_GZG_2_1 | 10.4                  | 16.2                  | 34.4                 | 0.110              | 1.306                      | 0                  | 0                          |
| S_AL_GZG_2_2 | 11.6                  | 24.0                  | 37.0                 | 0.064              | 0.689                      | 0.129              | 0.006                      |
| S_AL_GZG_2_3 | 12.0                  | 32.0                  | 38.6                 | 0.049              | 0.506                      | 0.196              | 0.009                      |
| S_AL_GZG_3_1 | 16.2                  | 16.0                  | 35.0                 | 0.129              | 0.658                      | 0                  | 0                          |
| S_AL_GZG_3_2 | 17.4                  | 24.6                  | 36.0                 | 0.081              | 0.383                      | 0.081              | 0.004                      |
| S_AL_GZG_3_3 | 18.0                  | 32.0                  | 38.2                 | 0.084              | 0.385                      | 0.169              | 0.008                      |

表 4 方案组合优化后的体系效能评估实验结果

Tab.4 Experimental results of system effectiveness evaluation after scheme combination optimization

| 中型巡飞弹<br>平均损耗<br>总数/枚 | 小型巡飞弹<br>平均损耗<br>总数/枚 | 近程火箭<br>弹平均<br>损耗/枚 | 旋翼无人<br>机平均<br>损耗/架 | 蓝方平均<br>损耗装备<br>总数/件 | 旋翼无人<br>机效费比/<br>(1/万元) | 中型巡飞<br>弹效费比/<br>(1/万元) | 近程火箭<br>弹效费比/<br>(1/万元) | 小型巡飞<br>弹效费比/<br>(1/万元) |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 4.54                  | 38.67                 | 15.6                | 0.6                 | 44.26                | 3.688 33                | 0.097 49                | 0.354 65                | 0.057 23                |

### 3.5 外场集成试验

在典型现实场景中通过对通过四个步骤优化出的体系架构方案进行实地演示验证。首先,依据体系架构方案建立无人集群体系快速原型,无人集群作战系统原型组成如图 7 所示。然后,根据优化后的任务链路方案分解形成外场集成试验中各兵力单元的信息流程,其中反斜面目标打击链路信息传递流程如图 8 所示。根据内场仿真实验中的作战流程开展外场试验,对试验结果进行评估,最终形成综合决策。目的是回答诸如无人

集群作战能力生成的关键问题,给出无人集群作战效能制约因素及运用建议、无人集群体系关键构成及结构优化建议。以无人集群作战效能制约因素评估优化问题研究为例,通过前期体系设计阶段的实验分析,进一步为开展外场集成试验明确了具体制约因素:无人系统机动速度,确保战场态势快速感知生成;打击武器数量,确保火力打击效果;指挥战法运用,确保作战要素融合以及作战协同的高效。由此提出的试验方案无人集群运用建议包括:①突出高速无人系统(如快速投放的旋

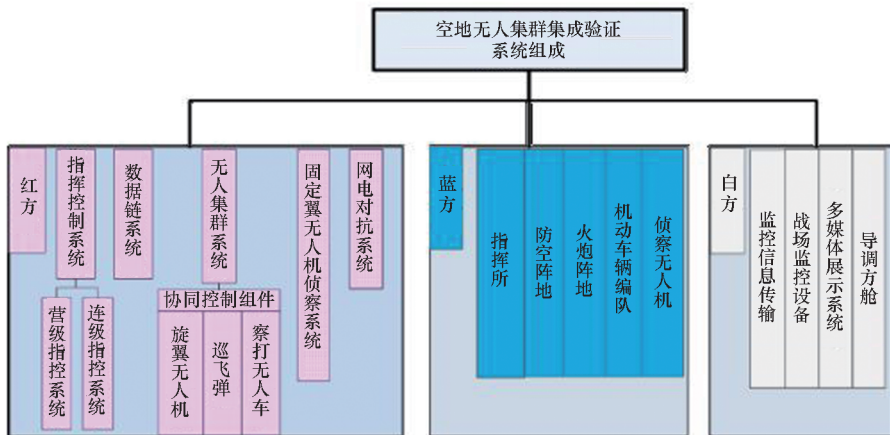


图 7 无人集群作战系统外场集成试验原型组成

Fig.7 External field integration test prototype composition of some unmanned combat systems

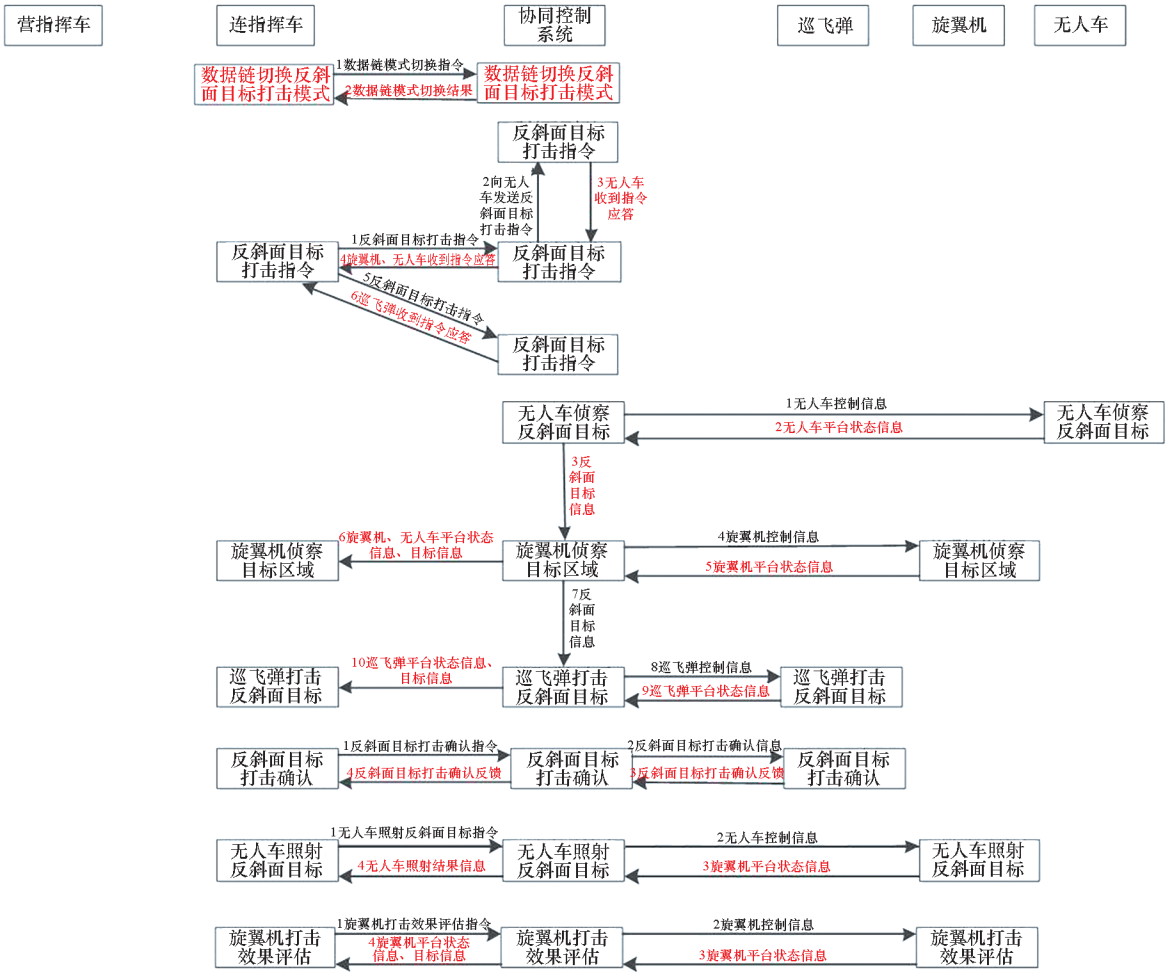


图8 集成试验反斜面目标打击链路信息流程方案

Fig. 8 Information flow scheme of the reverse-bevel-target strike chain in the integrated test

翼无人机)在战场态势感知过程中的作用;②在效费比允许情况下,尽可能增加巡飞弹等半自主式打击武器数量,确保一定冗余度;③提升己方“一人对多机”的无人集群组织结构稳健性和指控流程效率。

#### 4 结论

本文提出了一种无人集群体系设计与仿真评估方法。该方法致力于打通作战概念开发至外场综合试验的逻辑链路,创新提出了一种开展无人集群体系设计与优化的框架方法。该方法有效解决了无人集群体系设计与仿真优化问题,弥补了我国在体系总体设计方法、效能评估与优化技术、集成试验与验证技术等方面的不足,为装备体系化、体系智能化、智能实战化提供了一定的理论与技术支撑。在后续科研工作中,应瞄准“空天防御”“岛礁防控”“边境反击”等典型使命任务场景,将该体系设计与仿真评估理论方法进一步在具体体系问题需求中实践应用、深化落地,推动建立规范化、可推广的体系设计与仿真评估流程标准。

#### 致谢

外场集成试验工作是在四川航天技术研究院杨宇彬研究员、刘正敏研究员、李兵研究员等帮助下完成的,特此致谢!

#### 参考文献 (References)

[1] ZHOU X, WANG W P, WANG T, et al. Online planning for multiagent situational information gathering in the Markov environment [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14 (2): 1798 - 1809.

[2] 陶伟. 基于马赛克战的水下有人-无人集群控制结构[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(3): 264 - 270.

TAO W. Control structure of underwater manned and unmanned swarm based on mosaic warfare [J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(3): 264 - 270. (in Chinese)

[3] 高明, 周帆, 陈伟. 地面无人作战系统的发展现状及关键技术[J]. 现代防御技术, 2019, 47(3): 9 - 14.

GAO M, ZHOU F, CHEN W. Development status and key technologies of GUCS [J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(3): 9 - 14. (in Chinese)

[4] 孙浩惠, 钱宇滢, 李午申, 等. 作战无人化对未来战争的影响[C]//中国航天电子技术研究院科学技术委员会2020年学术年会, 2020.

- SUN H C, QIAN Y H, LI W S, et al. The influence of unmanned operation on future war [C]//Proceedings of the 2020 Annual Meeting of the Science and Technology Committee of the Chinese Academy of Aerospace Electronic Technology, 2020. (in Chinese)
- [5] 柴宇球. 军事谋略思想历史解析与时代发展[J]. 中国军事科学, 2009(1): 73-80, 99.
- CHAI Y Q. Historical analysis and current development of the thought of military strategies [J]. China Military Science, 2009(1): 73-80, 99. (in Chinese)
- [6] 赵先刚. 无人作战系统发展对未来战争的影响[J]. 国防科技, 2015, 36(5): 55-58.
- ZHAO X G. The impact of UAV system on future war [J]. National Defense Technology, 2015, 36(5): 55-58. (in Chinese)
- [7] 况阳, 顾颖闽. 基于几何力学的水面无人艇群控制方法[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(23): 123-126.
- KUANG Y, GU Y M. Control technology of USV group base on geometry mechanics [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(23): 123-126. (in Chinese)
- [8] 伊山, 黄谦, 杨鹏飞. 智能无人集群体系作战仿真系统功能与架构设计[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(5): 65-69.
- YI S, HUANG Q, YANG P F. Function and architecture design of intelligent unmanned cluster SoS operation simulation system [J]. Command Control & Simulation, 2020, 42(5): 65-69. (in Chinese)
- [9] 郭永金, 鞠鸿彬. 海上无人装备体系应用研究[J]. 测控技术, 2020, 39(10): 150-155.
- GUO Y J, JU H B. Application of maritime unmanned equipment systems [J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(10): 150-155. (in Chinese)
- [10] 王维平, 李小波, 杨松, 等. 智能化多无人集群作战体系动态自适应机制设计方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(5): 1096-1106.
- WANG W P, LI X B, YANG S, et al. A design method of dynamic adaption mechanism for intelligent multi-unmanned-cluster combat system-of-systems [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2021, 41(5): 1096-1106. (in Chinese)
- [11] 必铁良, 段方, 郭育青. 基于 DoDAF 理论的无人作战体系标准化研究 [C]//中国航天电子技术研究院科学技术委员会 2020 年学术年会, 2020.
- MI T L, DUAN F, GUO Y Q. Research on standardization of unmanned combat system based on DoDAF theory [C]//Proceedings of the 2020 Annual Meeting of the Science and Technology Committee of the Chinese Academy of Aerospace Electronic Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 王维平, 王涛, 李小波, 等. 一种基于模体的无人机集群智能任务规划方法 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4): 1211-1220.
- WANG W P, WANG T, LI X B, et al. Motif-based intelligent mission planning method for UAV swarms [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1211-1220. (in Chinese)
- [13] 王涛, 王维平, 李小波, 等. 一种多无人机集群持续侦察分层控制框架及关键算法 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4): 1221-1228.
- WANG T, WANG W P, LI X B, et al. A hierarchical control framework and key algorithms of multi-swarm persistent surveillance [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1221-1228. (in Chinese)
- [14] 张宇, 郭齐胜. 基于 DoDAF 的地面无人作战系统作战概念设计方法 [J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(5): 52-57, 63.
- ZHANG Y, GUO Q S. Operational concept design method based on DoDAF for ground unmanned combat system [J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(5): 52-57, 63. (in Chinese)
- [15] 张斌, 付东. 智能无人作战系统的发展 [J]. 科技导报, 2018, 36(12): 71-75.
- ZHANG B, FU D. Development of intelligent unmanned combat system [J]. Science & Technology Review, 2018, 36(12): 71-75. (in Chinese)
- [16] 宋敬华, 李亮, 郭齐胜. 武器装备体系贡献率评估方法 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(3): 107-111.
- SONG J H, LI L, GUO Q S. Research on weapon equipment system contribution rate evaluation method [J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(3): 107-111. (in Chinese)
- [17] 李超, 朱宁, 吴正雄, 等. 基于 LVC 仿真的资源描述方法与规范研究 [C]//2020 中国系统仿真与虚拟现实技术高层论坛, 2020.
- LI C, ZHU N, WU Z X, et al. Research on resource description method and specification based on LVC simulation [C]//Proceedings of 2020 China High-level Forum on System Simulation and Virtual Reality Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] DAVIS M T, PROCTOR M D, SHAGEER B. Disaster factor screening using SoS conceptual modeling and an LVC simulation framework [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 165: 368-375.
- [19] 陶璟. 面向方案设计阶段的产品生命周期设计方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- TAO J. Research on product life cycle design methods for scheme design phase [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [20] 束哲. 体系架构超网络建模与优化方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- SHU Z. Research on super-network modeling and evolutionary optimization method for system-of-systems architecture [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [21] 唐苏妍, 余文广, 朱一凡, 等. 基于 Agent 的网络化防空导弹体系仿真分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2632-2637.
- TANG S Y, YU W G, ZHU Y F, et al. Agent-based simulation and analysis of networking air defense missile systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2632-2637. (in Chinese)
- [22] 雷永林, 姚剑, 朱宁, 等. 武器装备作战效能仿真系统 WESS [J]. 系统仿真学报, 2017, 29(6): 1244-1252.
- LEI Y L, YAO J, ZHU N, et al. Weapon effectiveness simulation system (WESS) [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1244-1252. (in Chinese)
- [23] 王波兰. 智能博弈趋势下未来空天防御体系展望 [J]. 上海航天 (中英文), 2021, 38(3): 46-52.
- WANG B L. Outlook of future aerospace defense system under the intelligent game trend [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(3): 46-52. (in Chinese)