

# 基于 DoDAF 的有人/无人机协同作战体系结构建模

王新尧<sup>1</sup>, 曹云峰<sup>1</sup>, 孙厚俊<sup>2</sup>, 韦彩色<sup>1</sup>, 陶江<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航天学院, 江苏 南京 210016;

2. 洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 有人/无人机(manned/unmanned aerial vehicle, MAV/UAV)协同作战是未来战场中重要的空中作战模式。由于 MAV/UAV 协同作战体系系统复杂、涉及作战节点多,需从系统工程的角度对整体作战体系进行顶层设计,并采用统一的结构框架对该体系结构建模。首先,引入美国国防部体系结构框架(Department of Defense architecture framework, DoDAF),提出一种体系结构快速开发方法,并给出开发步骤。然后,利用视图模型,对 MAV/UAV 协同作战体系的系统功能、作战任务活动、各作战节点的信息交互及组织关系等建立模型。最后,通过动态仿真对模型进行验证。结果表明,所提作战体系的执行状态与预期的作战流程一致,体系结构设计合理,系统内各作战节点定义及信息体系结构描述具备一致性和协调性。

**关键词:** 美国国防部体系结构框架; 有人/无人机; 协同作战; 体系结构

**中图分类号:** TP 302, V 219

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2020.10.15

## Modeling for cooperative combat system architecture of manned/unmanned aerial vehicle based on DoDAF

WANG Xinyao<sup>1</sup>, CAO Yunfeng<sup>1</sup>, SUN Houjun<sup>2</sup>, WEI Caise<sup>1</sup>, TAO Jiang<sup>1</sup>

(1. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Luoyang Institute of Electro-optic Equipment, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Manned/unmanned aerial vehicle (MAV/UAV) cooperative combat is an important air combat mode in the future battlefield. Due to the complexity of the system and many involved operational nodes for the MAV/UAV cooperative combat system, it is necessary to carry out top-level design for the entire combat system from the perspective of system engineering and adopt a unified structural framework to model the system architecture. Firstly, the Department of Defense architecture framework (DoDAF) is introduced. An system architecture rapid development procedure is proposed and the development steps are given. Secondly, the view model is used to model the system functions, operational mission activities, information interaction and organizational relationship of each combat node for the MAV/UAV cooperative combat system. Finally, the model is validated through dynamic simulation. The results show that the execution state of the proposed combat system is consistent with the expected combat flow. Moreover, the system architecture design is proved to be reasonable, which ensures the consistency and correspond performance of the information architecture description and the each combat node definition in the system.

**Keywords:** Department of Defense architecture framework (DoDAF); manned/unmanned aerial vehicle (MAV/UAV); cooperative combat; system architecture

收稿日期:2020-01-17; 修回日期:2020-04-11; 网络优先出版日期:2020-05-18。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20200518.1040.012.html>

基金项目:装备预研重点实验室基金(614250402020317);航空科学基金(20170752008)资助课题

引用格式:王新尧, 曹云峰, 孙厚俊, 等. 基于 DoDAF 的有人/无人机协同作战体系结构建模[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(10): 2265-2274.

**Reference format:** WANG X Y, CAO Y F, SUN H J, et al. Modeling for cooperative combat system architecture of manned/unmanned aerial vehicle based on DoDAF[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(10):2265-2274.

## 0 引言

在传统战场中,有人机(manned aerial vehicle, MAV)执行攻击、探测等作战任务时,操作员往往需要承担较大的人身安全风险。而无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)因其具有低成本、良好的隐身性能、强抗过载能力等优势,可以在恶劣环境下执行作战任务,进而消除 MAV 操作员执行任务的风险,该优势使其成为未来战场一种重要军事力量<sup>[1]</sup>。

对于 UAV 系统而言,为提高 UAV 系统性能和智能水平,使其能够脱离多个操作员控制一架 UAV 的控制模式,需大幅提高 UAV 自主控制水平。目前,UAV 自主化仍是 UAV 技术发展的主流方向之一<sup>[2]</sup>。然而,由于技术条件的限制,目前 UAV 的自主化程度还较低,根据美国国防部的《2005—2030 UAV 系统路线图》<sup>[3]</sup>给出的 UAV 自主等级划分方式,美军的“全球鹰”UAV 也仅达到 2 级自主程度。另一方面,UAV 自主能力的增强会导致更高的系统复杂度(如:脆性、不透明等问题),并由此可能引发更多的事故。同时,UAV 自主行为存在监督问题,违背机器伦理<sup>[4]</sup>。因此,在未来较长的时间内,MAV 与 UAV 之间必将是相互补充而非取而代之的关系。

当前,MAV 与 UAV 协同作战模式已成为 UAV 作战运用研究中的一大热点。美国国防部在《2013—2038 年无人系统综合路线图》<sup>[5]</sup>中强调了有人/无人系统在未来战场应用中的重要性。其重点研究方向主要包括:体系结构设计<sup>[6-9]</sup>、协同任务智能规划<sup>[10-15]</sup>、协同成像侦察<sup>[16]</sup>、作战效能评估<sup>[17-19]</sup>、协同作战网络系统<sup>[20]</sup>等。其中,体系结构设计是各国武器装备顶层设计的重要手段<sup>[21]</sup>。

目前,国内外针对 MAV/UAV 协同作战体系的相关研究较少,还处于起步阶段。文献<sup>[22]</sup>指出美军在无人系统投入使用的初期,有人/无人系统在协同作战中暴露出了行动盲目、组织混乱、控制不力等严重问题。为改善这一问题,在体系结构设计方面,国内外开展了大量研究。2015 年,美国国防部高级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)推进了“体系综合技术和试验系统(system of systems integration technology and experimentation, SoSITE)”项目<sup>[6]</sup>,该项目主要目的是重新整合空中作战能力,分解 MAV 功能至大量小型 UAV 并实现平台间的信息共享、协同配合等能力以形成分布式空中作战体系<sup>[7]</sup>,该项目聚焦灵活、开放的架构设计技术,开发用于新技术快速集成的体系架构设计工具,但具体方法未见发表。国内方面,文献<sup>[8]</sup>采用高层体系结构(high level architecture, HLA)作为 MAV/UAV 协同对地攻击指挥决策的标准开发环境,从交互通信角度,建立 MAV/UAV 指挥决策体系结构,主要用于系统建模与仿真应用中。文献<sup>[9]</sup>采用北约指挥控制通信系统体系结构框架,从指挥、控制和通信角度描述 MAV/UAV 协同作战体系结构,设计了通信拓扑

结构和指挥控制结构。

然而,MAV/UAV 协同作战体系组织复杂,包含了作战人员、MAV 系统和 UAV 系统。同时,MAV/UAV 协同作战体系需要考虑许多要素,例如作战、指挥、控制、通信等。此外,随着现代战场无人系统智能化和 UAV 种类多样化的发展,MAV/UAV 协同作战体系至少还需要考虑两点要素:无人系统的智能因素和作战人员的人因因素。然而,上述文献只专注于各自单一角度,所提出的 MAV/UAV 协同作战体系的体系结构难以涵盖所有要素,尤其是无人系统的智能因素和作战人员的人因因素,因此缺乏扩展性和适用性。另一方面,MAV/UAV 协同作战体系日益庞杂的趋势和对协同作战的要求也导致了对其互操作性的需求<sup>[23]</sup>,上述文献提出的方法均难以满足。而美国国防部体系结构框架(Department of Defense architecture framework, DoDAF)为建立统一的 MAV/UAV 协同作战体系结构提供了可能。

因此,本文从顶层设计理念出发,设计一种基于 DoDAF 的 MAV/UAV 协同作战体系结构,该设计将作战体系统一在同一个体系结构框架下,给出 MAV/UAV 协同对空作战指挥控制链的顶层、全面的描述。结合 DoDAF 的元模型(DoDAF meta-model, DM2)提出一种快速开发体系结构的方法,并基于 DM2 编写综合字典,解决了内/外部理解不统一的问题,以提高不同系统、不同部门的互操作性,实现高效联合作战的目的,为未来实现跨域作战打下基础。此外,为了满足不同自主等级的 UAV 和操作员状态的作战需求,在设计体系结构时考虑了 UAV 的自主程度和操作员状态对作战模式的影响,对传统的指挥作战体系结构进行了扩展,以适应未来智能化战场需求。

## 1 基于 DoDAF 的体系结构建模方法

### 1.1 DoDAF 概述

自 2003 年,自动化指挥系统(command、control、communication、computer、intelligence、surveillance and reconnaissance, C4ISR)架构规范 2.0 版重新改写为 DoDAF 1.0 版后,得益于该架构的适用性不再受限在 C4ISR 范围,而是扩大至所有任务领域,使得 DoDAF 在军事系统得到了广泛应用<sup>[24-25]</sup>,并逐渐成为武器装备需求描述的建模标准<sup>[26]</sup>。2010 年,颁布了最新的 DoDAF 2.02 版本,相比于早年的 1.0 版和 1.5 版,2.02 版的核心从架构产品转移到架构数据,并将核心架构数据模型替换为 DM2<sup>[27]</sup>。DM2 主要提供逻辑数据模型、物理交换规范和概念数据模型,根据用户需求收集组织数据,并以此数据群为牵引,开发与数据映射的产品模型,为实现体系结构数据的集成和描述系统内部之间信息的语义一致性奠定了基础<sup>[28]</sup>。

DoDAF 2.02 版是一种顶层的框架,在该框架中定义了一种表示联盟体系结构的方法——视图模型。视图模型有 8 个,如图 1 所示。

全景视图	数据与信息视图	标准视图	项目视图
AV-1: 概要信息 AV-2: 综合字典	DIV-1: 概念数据模型 DIV-2: 逻辑数据模型 DIV-3: 物理数据模型	StdV-1: 标准概览 StdV-2: 标准预测	PV-1: 项目组合关系 PV-2: 项目时间进度表 PV-3: 项目-能力映射
作战视图	能力视图	服务视图	系统视图
OV-1: 高级作战概念图 OV-2: 作战资源流描述 OV-3: 作战资源流矩阵 OV-4: 组织关系图 OV-5a: 作战活动分解树 OV-5b: 作战活动模型 OV-6a: 作战规则模型 OV-6b: 状态转移描述 OV-6c: 事件跟踪描述	CV-1: 构想 CV-2: 能力分类 CV-3: 能力阶段规则 CV-4: 能力依赖 CV-5: 能力-组织开发映射 CV-6: 能力-作战活动映射 CV-7: 能力-服务映射	SvcV-1: 服务环境描述 SvcV-2: 服务资源流描述 SvcV-3a: 系统-服务矩阵 SvcV-3b: 服务-服务矩阵 SvcV-4: 服务功能描述 SvcV-5: 作战活动-服务追踪矩阵 SvcV-6: 服务资源流矩阵 SvcV-7: 服务度量矩阵 SvcV-8: 服务演化描述 SvcV-9: 服务技术与技能预测 SvcV-10a: 服务规则模型 SvcV-10b: 服务状态转移描述 SvcV-10c: 服务事件跟踪描述	SV-1: 系统接口描述 SV-2: 系统资源流描述 SV-3: 系统-系统局长 SV-4: 系统功能描述 SV-5a: 作战活动-系统功能追踪矩阵 SV-5b: 作战活动-系统追踪矩阵 SV-6: 系统资源流矩阵 SV-7: 系统指标矩阵 SV-8: 系统演讲描述 SV-9: 系统技术与技能预测 SV-10a: 系统规则模型 SV-10b: 系统状态转移描述 SV-10c: 系统事件跟踪描述

图 1 DoDAF 2.02 视图

Fig. 1 DoDAF 2.02 viewpoint

该模型包括全景视图(all viewpoint, AV),数据与信息视图(data and information viewpoint, DIV),标准视图(standards viewpoint, StdV),项目视图(project viewpoint, PV),作战视图(operational viewpoint, OV),能力视图(capability viewpoint, CV),服务视图(services viewpoint, SvcV)和系统视图(systems viewpoint, SV)<sup>[27]</sup>。

### 1.2 基于 DoDAF 的体系结构建模步骤

本文采用 7 个 DM2 数据组设计了 MAV/UAV 协同作战体系结构,主要包括:活动(Activity),能力(Capacity),信息(Information),资源流(Resource),执行者(Performer),规则(Rule)和度量(Measure)。分别简称为: A, C, I, R, P, Ru, M。每个视图均为一个集合,其元素是 DM2 数据组,例如:MAV/UAV 协同作战体系结构视图模型的 OV-1 和 OV-2 视图集合表示为  $OV-1 = \{P, I\}$  和  $OV-2 = \{P, I, R\}$ 。

为得到 MAV/UAV 协同作战体系结构的视图模型建模步骤,在建立 MAV/UAV 作战的 DoDAF 体系结构视图产品过程中需遵循以下 4 个原则,其优先级按以下顺序排列。

**原则 1** 先活动后系统。本文将 DoDAF 的 8 个视图划分为 3 大类:活动类,系统类和辅助类,如图 2 所示。其中,本文建立 MAV/UAV 协同作战的 DoDAF 体系结构主要涉及到活动类视图和系统类视图,按照先建立活动类视图再建立系统类视图的原则进行开发。

**原则 2** 由静态到动态再到映射。DoDAF 模型可划分为 7 种类别:表格型、结构型、行为型、映射型、本体型、图片型和时间进度型。其中,行为型模型是对体系结构的动态行为特征进行描述。映射型模型提供了两种不同类型信息间的映射。其他类型的模型主要对体系结构元素及其关系的静态结构特征进行建模。本文主要将模型分为静态模型、动态模型和映射模型,按照先建立静态模型再建立动态模型,最后建立映射模型的原则开发 MAV/UAV 协同作战的 DoDAF 体系结构,如图 2 所示。

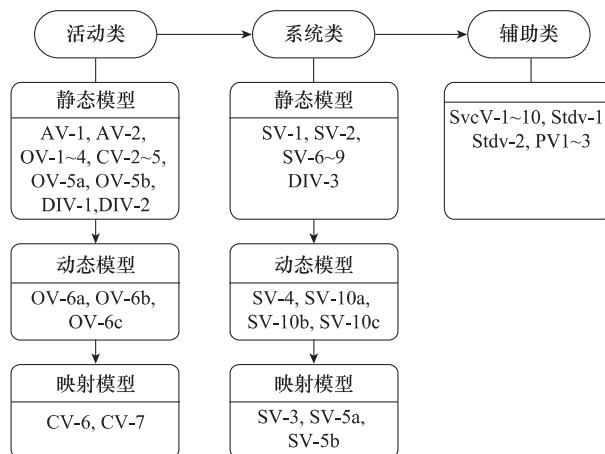


图 2 DoDAF 模型分类

Fig. 2 DoDAF model classification

由于图 2 中辅助类未包含在本文研究范围,因此辅助类中的视图模型不作详细分类,仅在活动类和系统类视图中进一步将视图模型进行分类。

**原则 3** 模型关系约束。文献[29]给出了模型的约束关系,主要由 DM2 决定。本文为实现快速建模,避免复杂耦合关系,只考虑其中两种显而易见的情况:当视图集合中没有元素重叠时,认为视图之间无明显关联,此时不考虑其开发顺序;当视图 B 依赖于视图 A 时,则先开发视图 A,例如 OV-2 视图均依赖于 OV-1,因此首先开发 OV-1。该原则的主要目的是在已分类模型组的基础上进一步确定该类模型的开发顺序。

**原则 4** 协同关系反复迭代构建。当模型之间存在互相协同的关系时,则同时开发并迭代修改,如 AV-2 与 CV-1、OV-1 和 AV-1,该反复迭代贯穿整个开发过程。

**步骤 1** 依次建立 AV-1、CV-1、AV-2 和 OV-1,明确体系总体框架。

步骤 2 建立 OV-4,明确组织背景、成员和之间关联。

步骤 3 建立 OV-2,描述作战活动的资源交换;同时建立资源和资源交换的相关属性描述矩阵模型 OV-3。

步骤 4 建立 CV-2,给出体系结构需要的所有能力;在此基础上建立 OV-5a,将作战活动标识和分解。

步骤 5 建立 CV-3 和 CV-4,规划实现的能力,定义能力与逻辑分组间的依赖关系;建立 CV-5,给出阶段性的能力部署和互连,形成该阶段的规划方案;建立 OV-5b,基于能力与活动、输入、输出间的关系建立作战活动模型。

步骤 6 建立 OV-6a,确定作战约束规则;建立 OV-6b 和 OV-6c 描述作战活动对时间序列的响应。

步骤 7 建立 CV-6,通过建立映射矩阵实现能力需求到作战行动的追踪,以展示特定作战行动需要哪些具体的能力元素。

步骤 8 建立 SV-4 对系统功能和系统功能间的数据流进行描述。

最终,得到如图 3 所示的 MAV/UAV 协同作战体系结构开发序列。

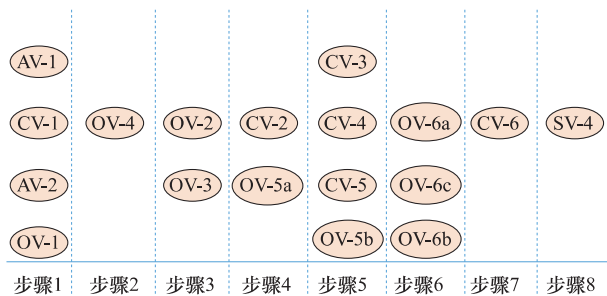


图 3 MAV/UAV 协同作战体系结构开发序列

Fig. 3 Architecture development sequence of MAV/UAV cooperative combat system

## 2 MAV/UAV 协同作战体系结构模型

MAV/UAV 执行的协同空空打击任务是具有多控制节点、多阶段协同行动特点的一种典型任务,本文以协同作战这一新的作战形式为背景,分析 MAV/UAV 完成对空作战任务所需的动态行为和结构特征,建立体系结构模型。由于篇幅限制,本文只展示部分关键体系结构模型。

### 2.1 构建综合字典

综合字典 AV-2 是体系结构数据存储库,以分层方式采用文本的形式对体系结构数据和术语进行定义。本文的 AV-2 包括 DM2 中的元素,以及由体系结构描述引入的新元素,实现了跨体系结构描述的一致性,以便体系结构模型的开发、验证、维护和重用。构建 MAV/UAV 协同作战体系的综合字典过程中,对 MAV 控制 UAV 的能力和 UAV 自主性能数据的收集和定义是有别于其他作战体系的重要要素。

(1) 能力。针对 MAV/UAV 协同作战的作战任务要求,确定和分析系统核心能力,主要包括:数据处理能力、通

信能力、航迹规划能力、态势感知能力、任务管理能力、资源管理能力、飞行员作战能力和 MAV 控制 UAV 的能力。

(2) 人员。在 MAV/UAV 协同作战任务中,主要包含:总指挥控制所,负责整体统筹规划和协调、制作总体作战计划,为飞行员及其他协作人员和部门发布作战任务和指令,拥有最高指挥控制权限;地面控制站,与 MAV 协同控制 UAV,主要负责控制 UAV 起飞和降落过程;通信部门,包括地面通信站和通信卫星,保障各部门的通信链路;UAV,负责执行探测和攻击任务。

(3) 活动。作战活动主要包括:UAV 起飞、UAV 巡航至作战区、UAV 协同探测、MAV 巡航至作战区、作战计划离线制定、作战计划在线制定、UAV 协同攻击、作战效果评估、UAV 返航等。

(4) 资源流。资源流是活动之间暂时的且会引起信息、数据、物资、执行者等对象的流动或互换。主要包括:作战计划信息指令、指挥指令、情报信息、态势信息共享、UAV 指挥控制信息、导航信息、攻击指令等。

(5) 规则。本文的规则数据主要针对 UAV 的活动约束,包括 UAV 飞行速度、故障情况下的飞行策略等。

(6) 度量。度量数据主要包括:UAV 成本、UAV 能力等级、UAV 与 MAV 互操作性、传感器性能,武器性能、UAV 性能、通信链路性能等。

(7) 信息。对活动实施过程中相关和所需事物的表述。例如:红蓝双方数量信息等。

至此,已经初步得到了 MAV/UAV 协同作战体系结构数据。值得注意的是,每个模型并不需要包含所有的元素,一般情况下,模型中只有一部分元素是必须包含的,其余元素均是可选的。

### 2.2 高级作战概念图

高级作战概念图 OV-1 以图像和文字的形式直观描绘顶层作战设想,展现了作战目的和架构,以及体系结构和外部系统的相互作用。本文 OV-1 的主要元素包括人员和资源流,明确了作战概念,强调了 MAV/UAV 与外部环境和其他系统的相互作用。OV-1 是 AV-1 概览和摘要信息书面内容的图形化表示,根据 AV-1 的综合描述,绘制高级作战概念图 OV-1,如图 4 所示。

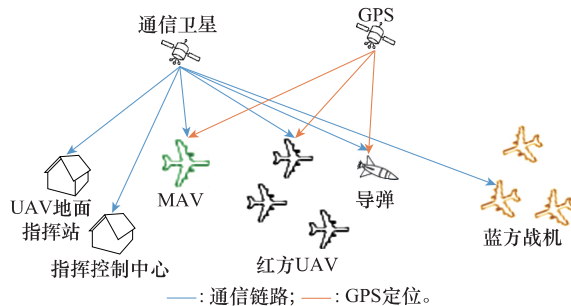


图 4 高级作战概念图 OV-1

Fig. 4 OV-1: high-level operational concept diagram

总指挥控制站指挥引导 MAV 飞行,发布总任务给 MAV 和其他系统。UAV 地面指挥站控制 UAV 飞至聚集点汇集,将 UAV 指挥控制权限转交给 MAV 指挥员,并保留对 UAV 工作状况和飞机路径的监视权。在作战任务执行过程中,MAV 与 UAV 需要执行协同探测(协同态势感知、协同目标跟踪、协同目标定位)、协同攻击(协同火力攻击、协同路径规划)、核实评估(协同战场评估)等多个任务。

### 2.3 组织关系图

组织结构图 OV-4 用于描述作战节点、组织和人员之间的指挥结构、指挥关系或其他关系。图 5 给出了 MAV/UAV 协同作战体系的组织关系。根据综合词典 AV-2 关于执行者的体系结构数据,作战组织节点主要包括 UAV 地面指挥站、预警系统、情报支援系统、通信保障系统、总指挥控制中心、MAV 和 UAV 平台,其关系用连接线标记,主要是协同关系和指挥控制关系。

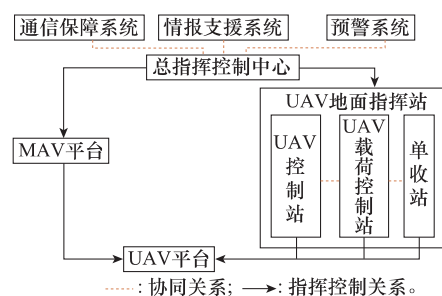


图 5 组织关系图 OV-4

Fig. 5 OV-4: organizational relationship diagram

### 2.4 资源流图

资源流图 OV-2 是用来描述资源流的逻辑模式,资源流可包括信息流、资金、人员和物资流。本文资源流图 OV-2 如图 6 所示,主要描述了 MAV/UAV 协同作战过程中数据、信息、物流和作战人员的逻辑模式,展示了执行作战活动的结构。资源流图 OV-2 中节点和节点之间用需求线连接。其中,需求线表明系统之间资源交换的需求和资源流向。

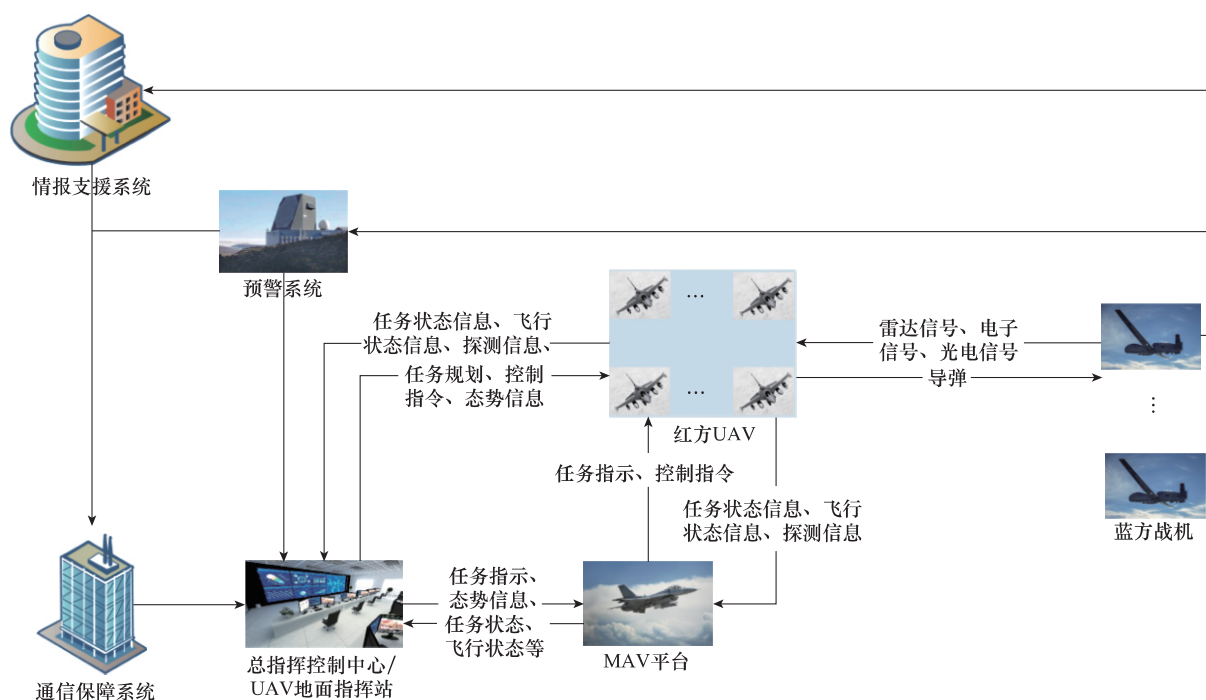


图 6 作战资源流图 OV-2

Fig. 6 OV-2: operational resource flow diagram

### 2.5 作战活动模型

作战活动模型 OV-5b 主要描述作战活动之间的关系和资源交换过程。如图 7 所示,基于 MAV/UAV 协同作战体系资源结构和能力的需求,创建作战活动图 OV-5b,通过描述活动间输入输出流,进一步明确了作战节点的职责,对作战活动和活动关系给出了规范性描述。总指挥控制中心发布总体任务给 UAV 地面指挥站和 MAV;UAV 地面指挥站提供 UAV 离线任务规划并控制 UAV 起飞;MAV 和 UAV 巡航飞至作战区时,MAV 开始在线任务规划,指挥

控制 UAV 协同探测和攻击,评估作战效果。

### 2.6 事件跟踪描述

为了充分描述体系结构的动态行为和事件特征,在 OV-5b 基础上,创建 OV-6a 作战规则模型,利用 OV-6c 和 OV-6b 描述作战活动的关键时序和行为顺序。其中,OV-6c 主要描述节点间因果顺序关系对外界触发的响应。本文采用顺序图来表示事件跟踪描述 OV-6c,如图 8 所示。节点包括:总指挥控制中心、UAV 地面指挥站、MAV、UAV 和蓝方战机。



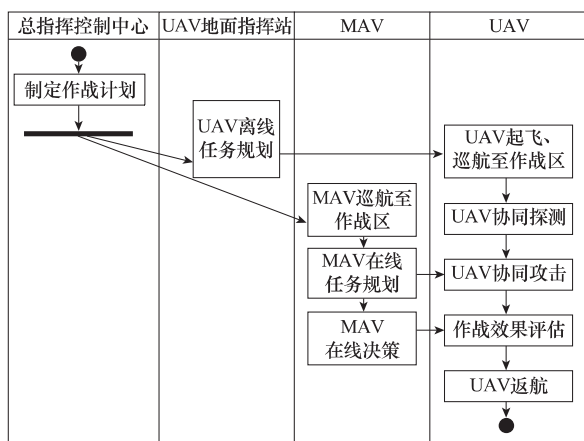


图 7 作战活动模型 OV-5b

Fig. 7 OV-5b: operational activity model

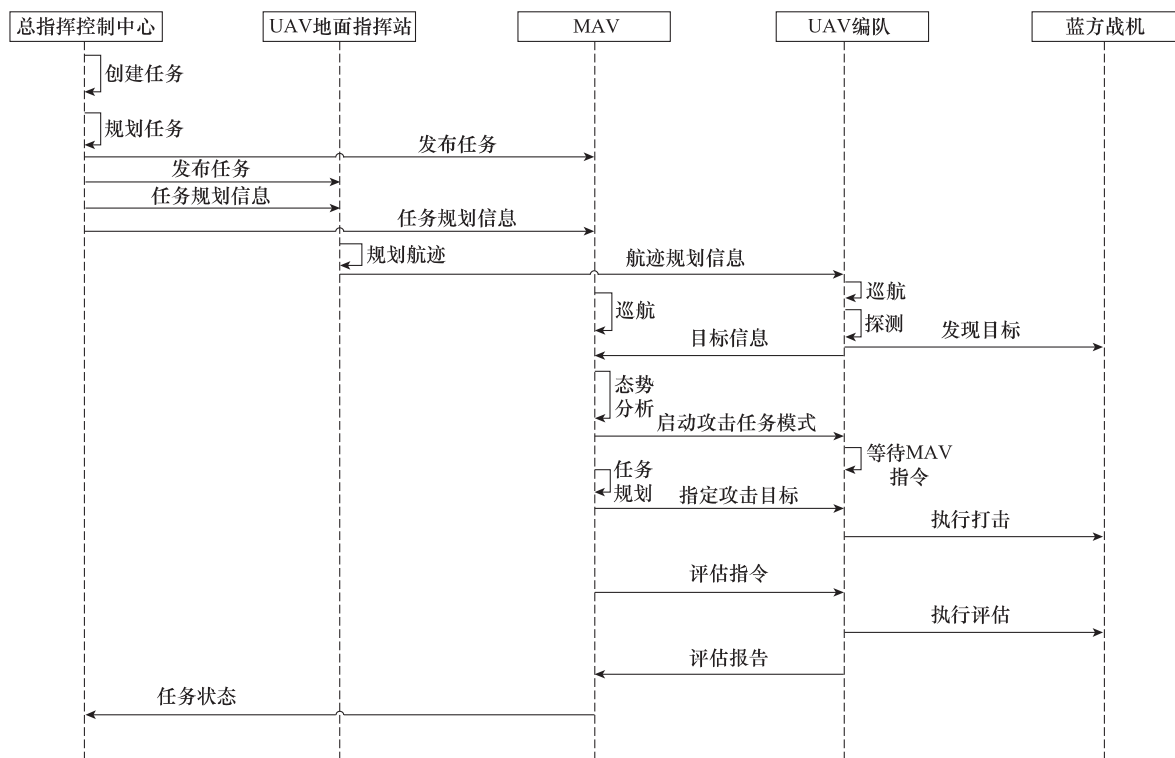


图 8 事件跟踪描述 OV-6c

Fig. 8 OV-6c: event-trace description

### 3 体系结构模型验证

本文仿真实验验证的目的,一是检测提出的各组件功能是否能够协同工作;二是在本文提出的应用背景下,检测体系结构模型功能的完整性。

基于以上目的,在仿真平台选择方面,鉴于 IBM Rational Rhapsody 平台可基于 UML/SysML 建模语言和国防统一建模平台配置文件建立可执行模型并运行,支持作战视图中用活动图、序列图、状态图实现 OV-5、OV-6c、OV-6b

### 2.7 作战状态转换描述

作战状态转换描述 OV-6b 采用状态图来实现,其主要目的是强调各个作战节点的动态行为。在 MAV/UAV 协同作战的各个环节中,UAV 协同作战过程是整个作战的核心环节,本文以进入作战状态后的 UAV 作战状态转换描述和 MAV 作战状态转换描述为例,建立如图 9 和图 10 所示的 OV-6b。其中,UAV 自主能力是根据美国《UAV 系统路线图 2005—2030》定义的,UAV 自主等级分为 9 级:1 级-远程引导;2 级-实时故障诊断;3 级-故障自修复和飞行环境自适应;4 级-机载航路重规划;5 级-多机协调;6 级-多机战术重规划;7 级-多机战术目标;8 级-分布式控制;9 级-机群战略<sup>[3]</sup>。作战人员可根据作战任务对 UAV 自主等级的要求,确定 UAV 启动全自主模式的条件。

等模型的测试和仿真,为验证本文体系结构数据与模型提供良好的验证途径。因此,在前文体系设计基础上,利用 Rhapsody 验证 MAV/UAV 协同作战体系结构模型,设置环境为微软 VC 运行库(Microsoft Visual C++, MSVC)环境。

仿真中设置 MAV 与 UAV 作战模式为单架 MAV 携两架 UAV 执行攻击两个目标物的作战任务,且每架 UAV 分别携带两枚导弹。UAV 工作模式分为半自主模式与全自动模式。其中,全自动模式是指 UAV 自主能力等级足够支持其自主完成任务,UAV 将全自主完成作战任务;半

自主模式是 UAV 在 MAV 的指挥控制下完成作战任务, MAV 可根据 UAV 自主能力和作战任务需求,只发送必要指令。本实验假定作战任务要求 UAV 自主能力不小于

5 级,当 UAV 自主能力到达 6 级时,可实现 UAV 全自主完成作战任务。图 11 主要为操作员显示当前 UAV 携带导弹数量、攻击目标、态势信息<sup>[30]</sup>、任务状态等信息。

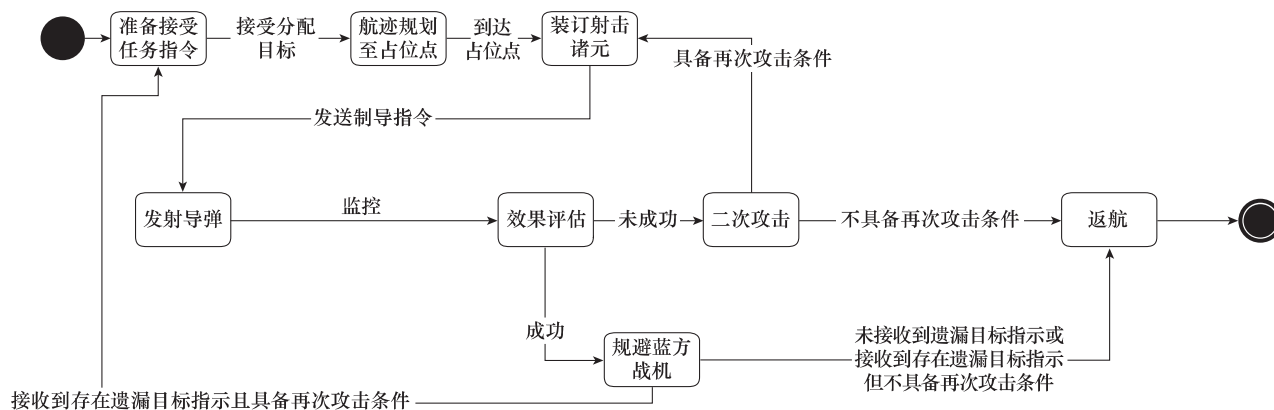


图 9 UAV 作战状态转换描述 OV-6b

Fig. 9 OV-6b: UAV combat state transition description

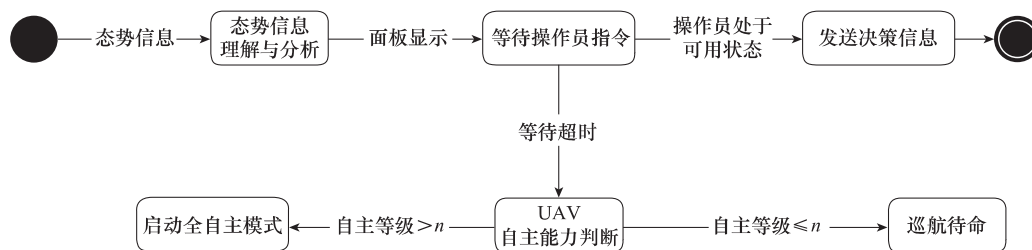


图 10 MAV 作战状态转换描述 OV-6b

Fig. 10 OV-6b: MAV combat state transition description

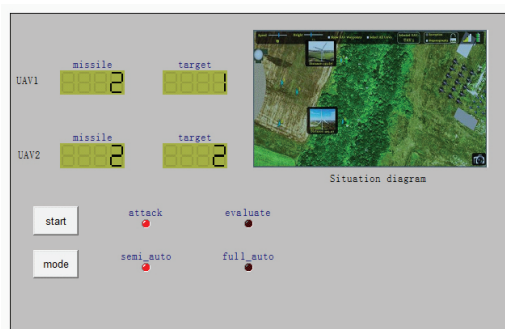


图 11 MAV 指挥控制界面

Fig. 11 MAV command and control interface

在模型可执行验证方面,对体系结构模型编译,利用代码生成、编译、运行方式检测设计的模型和数据的形式化语法,编译成功则表明语法正确,才能生成可执行程序。功能验证主要通过 OV-6b 和 OV-6c 的对比来检验,在状态图 OV-6b 运行的同时,打开事件跟踪描述 OV-6c 的仿真图,可得到 OV-6c 的仿真结果,如果该仿真结果与预期设计的 OV-6c 一致,说明了模型功能描述的一致性和正确性<sup>[31]</sup>。图 12 的序列图是由在 Rhapsody 平台编辑的各个状态图自

动生成,图 13 的 UAV 作战状态图是其中之一,主要反映 MAV/UAV 协同作战过程中总指挥控制中心、UAV 地面指挥站、MAU 和 UAV 之间的行为和响应顺序,其中六边形表示状态,实线表示信息。

通过图 12 的仿真序列图与图 8 的期望视图 OV-6c 对比,可以看到:

(1) 在初始规划阶段,图 8 中,总指挥控制中心执行了创建任务、规划任务动作,并分别发布任务和任务规划信息给 UAV 地面指挥站和 MAV,UAV 地面指挥站规划 UAV 航迹,MAV 开始巡航。图 12 中,总指挥控制中心执行创建任务,转入任务规划状态,分别发送任务及规划信息给 UAV 地面指挥站和 MAV,使得 UAV 地面指挥站转入航迹规划状态引导 UAV 进入巡航状态,MAV 进入任务执行状态。在该阶段,二者流程一致。

(2) 在探测阶段,图 8 中,UAV 开始探测并发现目标,将目标信息发送给 MAV,MAV 进行态势分析。图 12 中,UAV 在巡航过程中执行探测任务,当发现目标时,将目标信息反馈给 MAV,MAV 进入作战任务模式状态,执行态势分析。在该阶段,二者流程一致。

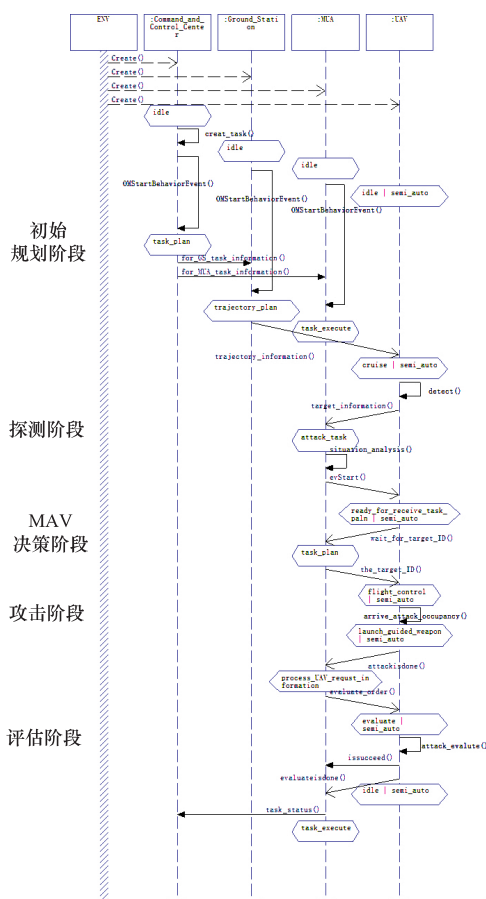


图 12 MAV/UAV 协同作战序列图

Fig. 12 MAV/UAV cooperative combat sequence diagram

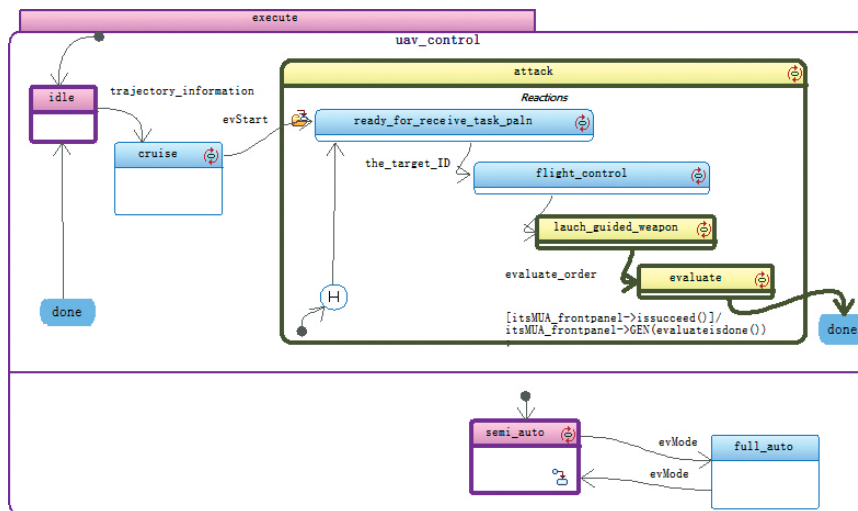


图 13 单架 UAV 作战状态图

Fig. 13 Single UAV combat status diagram

(3) 在 MAV 决策阶段,图 8 中,MAV 发给 UAV 启动攻击任务模式的信息,UAV 等待 MAV 进一步指令,MAV 进行任务规划并将结果发送给 UAV。图 12 中,MAV 发布

启动指令通知 UAV 从巡航转入攻击作战状态,UAV 此时处在攻击的子状态,即等待 MAV 目标分配结果状态中;MAV 进入任务规划状态,得到攻击目标指令发送给 UAV。在该



阶段,二者流程一致。

(4) 在攻击阶段,图8中,UAV接受攻击目标身份信息后,执行打击。图12中,UAV收到攻击目标指令后,开始飞行控制状态;达到占位点后,进入发射制导武器状态;发射完毕后,发送当前攻击结束信息给MAV。在该阶段,图12将图8的执行打击过程进一步细化,但二者流程仍保持一致。

(5) 在评估阶段,图8中,MAV发送评估指令给UAV,UAV执行评估,之后返回评估报告,MAV向总指挥控制中心报告当前任务状态。图12中,MAV处于处理UAV的请求信息状态,并发布评估指令通知UAV对攻击效果进行评估,UAV执行评估任务并返回评估报告和评估任务结束信息,MAV将任务状态信息发送给总指挥控制中心。在该阶段,二者流程一致。

综上所述,该仿真结果与设计的预期作战流程OV-6c保持一致,因此MAV/UAV协同作战体系结构设计合理。

## 4 结 论

本文基于以数据为中心的设计思想和DM2的开发方法,在DoDAF 2.02框架下,提出一种快速体系结构开发方法,确定了体系结构的开发步骤,并从作战角度构建了MAV/UAV协同作战体系结构模型。该模型能够全面地描述MAV/UAV协同作战系统顶层体系结构,可以提高不同系统、不同部门的互操作性,最终实现高效联合作战目的。此外,针对MAV/UAV协同作战体系的特殊性,建立的体系结构模型考虑了无人系统的智能因素和作战人员的人因因素,使其适应未来智能化战场的需求。最后,基于IBM Rational Rhapsody平台验证了作战活动的逻辑关系和行为关系的正确性。

## 参考文献:

- [1] YU X, ZHANG Y M. Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: review and prospects[J]. Progress in Aero-space Sciences, 2015, 74:152-166.
- [2] VALAVANIS K P. Unmanned aircraft systems challenges in design for autonomy[C]//Proc. of the 11th International Workshop on Robot Motion and Control, 2017: 73-86.
- [3] CAMBONE S A, KRIEG K J, PACE P, et al. Unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030[R]. Washington D. C.: Office of the Secretary of Defense, 2005: 4-15.
- [4] WOHLER M, SCHULTE A. On board assistant system for UAS integration into civil airspace[C]//Proc. of the AIAA Infotech@ Aerospace Conference, 2013: AIAA 2013-5047.
- [5] JAMES W A, KENDALL F. Unmanned systems integrated roadmap FY2013-2038[R]. USA: Department of Defense, 2013:16-19.
- [6] 王恽, 严江江, 陈晓东, 等. 美军体系综合技术和试验(SoSITE)项目概况及启示[C]//第三届中国指挥控制大会, 2015: 122-126. WANG Y, YAN J J, CHEN X D, et al. Summarization and enlightenment of american system of systems integration technology and experimentation(SoSITE) program[C]//Proc. of the 3rd China conference on command and control, 2015: 122-126.
- [7] 李东兵, 申超, 蒋琪. SoSITE等项目推动美军分布式作战体系建设和发展[J]. 飞航导弹, 2016(9): 65-70. LI D B, SHEN C, JIANG Q, SoSITE and other projects promote the construction and development of the distributed air warfare system of the US army[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(9): 65-70.
- [8] 张安, 刘跃峰, 汤志荔, 等. 编队协同对地攻击指挥决策系统体系结构研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(29): 232-235. ZHANG A, LIU Y F, TANG Z L, et al. Research on command and decision system architecture of cooperative formation air-to-ground attack [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(29): 232-235.
- [9] 钟赞, 张杰勇, 邓长来. 有人/无人机协同作战问题[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(4): 19-25. ZHONG Y, ZHANG J Y, DENG C L. Cooperative combat problems about manned/unmanned aerial vehicles[J]. Command Information System and Technology, 2017, 8(4): 19-25.
- [10] JUN C, QIU X J, JIA R, et al. Design method of organizational structure for MAVs and UAVs heterogeneous team with adjustable autonomy [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 286-295.
- [11] ZHONG Y, YAO P Y, ZHANG J Y, et al. Formation and adjustment of manned/unmanned combat aerial vehicle cooperative engagement system[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4): 756-767.
- [12] ZHONG Y, YAO P Y, SUN Y, et al. Cooperative task allocation method of MCAV/UCAV formation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016: 6051046.
- [13] ZHONG Y, YAO P Y, SUN Y, et al. Research on command and control of MAV/UAV engagement from the cooperative perspective[C]//Proc. of the International Conference on Information System and Artificial Intelligence, 2016.
- [14] LI Y, HAN W, ZHANG Y, et al. Trajectory planning based on spatial-temporal constraints for MAV/UAV cooperative system[C]//Proc. of the Chinese Control Conference, 2019: 4011-4016.
- [15] ZHONG Y, YAO P Y, WAN L J, et al. Intervention decision-making in MAV/UAV cooperative engagement based on human factors engineering[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(3): 530-538.
- [16] MENG Z, LI X, LU C, et al. Collaborative forward-looking imaging and reconnaissance technology for manned/unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Engineering, 2019, 19: 6117-6121.
- [17] WU Y, LU Q H, QUAN J L, et al. A method for evaluating manned/unmanned aerial vehicle combat cooperative capability [C] // Proc. of the 15th International Conference on Control and Automation, 2019: 130-135.
- [18] FAN J R, LI D G, LI R P. Evaluation of MAV/UAV collaborative combat capability based on network structure[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018:5301752.
- [19] XIONG P S, LIU H, TIAN Y L. Mission effectiveness evaluation of manned/unmanned aerial team based on OODA and agent-based simulation[C]//Proc. of the 3rd International Conference on Command and Control, 2015: 122-126.

- rence on Artificial Intelligence and Virtual Reality, 2019: 31–37.
- [20] SHI G, ZHANG L, ZHANG J S, et al. Research on robustness of manned/unmanned aerial vehicle collaborative combat network[C]//Proc. of the 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2018: 503–508.
- [21] 梁振兴. 体系结构设计方法的发展及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 8–29.
- LIANG Z X. Development and application of system architecture design methods[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2012: 8–29.
- [22] WORK O R, BRIMLY S. Preparing for war in the robotic age[R]. Washington D. C. : Center for a New American Security, 2014: 28–72.
- [23] Unmanned systems integrated roadmap FY 2017–2042[R]. USA: The Office of the Secretary of Defense, 2017.
- [24] CAI C, CHEN J F, LEI J. A system modeling method of AUV swarms based on UPDM[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, 2019.
- [25] ZHAN Z J, WANG Y H, LI B F, et al. Architecture design of air-sea joint combat system based on DoDAF[C]//Proc. of the AI in Optics and Photonics Conference, 2019: 113–420.
- [26] YANG W J, YUAN C X, ZHAO J, et al. Research on weapon and equipment requirement analysis method based on DODAF[C]//Proc. of the International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems, 2019: 317–319.
- [27] DoD Architecture Frameworking Group. DOD architecture framework version 2.02. Change1 volume1: overview and concepts[R]. Washington D. C. : USA Department of Defense, 2015: 20–26.
- [28] HAO L J. Study on the DoDAF-based UUV formation system collaborative anti-submarine architecture modeling[J]. Revista de la Facultad de Ingeniería, 2017, 32(16): 947–951.
- [29] TONG Y, ZHANG J, XU M D, et al. Network security monitoring and defense system framework design using mobile agents based on DoDAF[C]//Proc. of the International Conference on Computer Science and Applications, 2015: 366–370.
- [30] ILBEYGI M, KANGAVARI M R. Comprehensive architecture for intelligent adaptive interface in the field of single-human multiple-robot interaction[J]. ETRI Journal, 2018, 40(4): 483–498.
- [31] 占国熊. 基于 MBSE 的武器装备体系元建模与分析方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- ZHAN G X. Research on meta-modeling and analysis method for weapons system of systems based on MBSE[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.

### 作者简介:

王新尧(1992–), 女, 博士研究生, 主要研究方向为复杂系统体系结构建模、多武器平台任务规划。

E-mail: 15150671776@163.com

曹云峰(1964–), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为无人机飞行控制、复杂系统体系结构数字化。

E-mail: cyfac@nuaa.edu.cn

孙厚俊(1979–), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为控制工程、火力控制。

E-mail: 77813052@qq.com

韦彩色(1994–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机系统体系结构数字化。

E-mail: 1551607869@qq.com

陶江(1991–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为飞行器模式识别。

E-mail: tjnuaa@nuaa.edu.cn