

覃睿, 陈子健, 闫玲. 有人/无人机协同森林灭火作战体系结构设计[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 165–170. [QIN Rui, CHEN Zijian and YAN Ling. Architecture Design for Cooperative Forest Fire Fighting Combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 165–170. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.028.]

有人/无人机协同森林灭火作战体系结构设计*

覃睿, 陈子健, 闫玲

(中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 有人/无人机协同灭火作为森林航空消防的全新模式是一项复杂的系统工程, 以其为研究对象进行体系结构设计具有重要意义。该文以消防无人机、有人机行为模式和灭火能力分析为基础, 综合考虑有人/无人机编队方法和控制流程, 主要应用美国国防部架构框架的作战视点模型, 重点分析各节点之间的交互关系及状态变化, 创造性地构建了有人/无人机协同森林灭火作战体系。最终, 运用体系结构验证软件 Rhapsody 对模型进行仿真验证。结果表明, 该模型执行情况与预期流程高度一致, 有人/无人机协同森林灭火作战体系结构设计合理, 有助于提高森林消防队伍联合灭火能力。

关键词: 森林灭火; 有人机; 无人机; 美国国防部架构框架; 体系结构

中图分类号: X43; X915.5; X954; S762 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)01-0165-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.028

在传统森林航空消防体系中, 有人机(manned aerial vehicle, MAV)通常负责执行日常巡护、火场侦查、空中灭火等多项作战任务。但由于目前存在飞机机源总量不足、机型单一、空中直接灭火能力不足等问题, 飞行员在执行任务时往往要承担较大的安全风险和工作负荷。而无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)具有成本低、费效比高、生存能力强、机动性能好、环境生存能力强等诸多优势, 可辅助或代替有人机在复杂严峻的火场环境下执行多项灭火任务, 这不仅可以减少有人机执行任务的风险, 还可以一定程度上降低任务成本, 因而备受森林消防队伍青睐^[1]。

现阶段, 关于 MAV 与 UAV 协同的研究主要集中在军事作战领域, 其重点研究方向主要包括: 系统架构设计^[2-4]、协同路径规划^[5-7]、协同编队控制^[8-10]、协同作战能力评估^[11-13]、协同作战决策^[14]等。针对 MAV/UAV 协同作战体系结构的相关研究较少, 将其应用于森林消防领域的研究更是几乎空白。随着 UAV 在森林消防领域的广泛应用, UAV 如何与 MAV 相互补充、相互配合形成整体灭火力量将成为拟解决的关键问题^[15]。

然而, MAV/UAV 协同森林灭火作战体系结构

复杂, 指挥节点繁多。还涉及到飞行管制、气象条件、通信情况和火场态势等诸多影响因素。并随着体系内多种 UAV 智能化、自主化的发展, 其智能因素与 MAV 驾驶员的人因因素也应被重点考虑。为了提高 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系结构的互操作性以及减少或避免多重指挥、单一指挥或无序指挥的现象发生, 亟需一种统一框架下的体系结构描述方法。

鉴于美国国防部架构框架(Department of Defense architecture framework, DoDAF)在复杂组织架构开发方面具有很强的规范性和指导性, 本文从顶层设计理念出发, 基于 DoDAF 作战视点设计了一种 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系结构, 全面描述了 MAV/UAV 协同森林灭火作战指挥控制关系, 深入剖析了该体系的运行机制。另外, 为满足多种机型联合灭火的需求, 在 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系结构设计过程中还重点考虑了 UAV 控制权转移、灭火策略与战术选择等对消防模式的影响。以期推进新型灭火力量融入传统的森林灭火指挥作战体系, 有助于提升多机协同联合灭火作战能力, 更好地应对森林火灾中瞬息变化的火场态势。

* 收稿日期: 2021-07-21 修回日期: 2021-09-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802601); 重庆市交通委员会委托项目(19C1043); 中国飞龙通用航空有限公司委托项目(20200106010400)

第一作者简介: 覃睿(1974-), 男, 汉族, 四川阆中人, 教授, 主要从事航空应急救援、通用航空飞行组织与实施等研究。

E-mail: qrlw2006@vip.sina.com

1 基于 DoDAF 的体系结构设计

1.1 DoDAF 概述

DoDAF2.02 版本是在自动化指挥系统(C4ISR)框架的基础上,借鉴了英国国防部体系结构框架(MoDAF)、北约体系结构框架(NoDAF)和开放团体体系结构框架(TOGAF)中的优秀成果,经历了DoDAF1.0版、DoDAF1.5版不断地继承、完善和发展形成的。可以为集成体系结构的开发提供重要指南和标准,旨在提升能力之间和被集成的体系结构之间的互操作性,实现有序的信息共享,提高关键决策的能力^[16]。DoDAF2.02版以数据为中心,可遴选8个视点(图1)。从不同层次、对象、因素对研究对象体系结构进行了分析,可对复杂系统的体系结构进行规范化的描述。尽管模型众多但并不强制性使用,开发者可根据任务需求及自身目的,结合“适用”原则,裁剪选择合适的视图。



图1 DoDAF 2.02 体系结构视点

其中作战视点是其他视点产品的基础,它以任务或作战过程等为基础,集中反映实施作战所需的任务、活动、作战要素以及资源流交换,详细描述信息交换的种类和性质等,其基本构成和简要概述如图2所示^[17]。

作战视点模型	
顶层作战概念图 (OV-1)	以图形或文本的形式来描述顶层作战概念
作战资源流表述模型 (OV-2)	描述作战活动中各节点之间的资源交互
作战资源流矩阵 (OV-3)	对资源交互的相关信息及属性进行详细描述
组织关系图 (OV-4)	阐述各节点以及组织之间的指挥结构或关系
作战活动分解树 (OV-5a)	按照层次结构组织的能力和活动
作战活动模型 (OV-5b)	描述作战能力和作战活动背景,展示活动、输入、输出之间的关系
作战规则模型 (OV-6a)	确定限制活动的业务规则
作战状态转换模型 (OV-6b)	确定业务过程(活动)对事件的响应
作战事件跟踪模型 (OV-6c)	跟踪想定或时间顺序中的行为

图2 作战视点构成及概述

为进一步描述和构建 MAV/UAV 协同森林灭

火作战体系结构框架,明确 MAV/UAV 协同森林灭火作战使命和作战任务,描述灭火作战过程与各作战节点之间的连通性。本文将从作战视点角度,对 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系进行可视化建模分析,构建的作战视点模型在下一节会详细介绍。

1.2 设计流程

结合 MAV/UAV 协同森林灭火的特定作战任务背景,按照 DoDAF 作战视点对该体系结构的分析逻辑顺序,设计流程如下:

(1)界定 MAV/UAV 协同森林灭火顶层作战概念。基于 MAV/UAV 协同森林灭火作战使命,分析 MAV/UAV 协同森林灭火作战概念与功能需求,以图形和文本描述直观描绘顶层作战设想,展现协同灭火作战目的和架构,分析体系结构和外部系统之间的相互作用。

(2)厘清 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系各作战节点之间的组织指挥关系。梳理 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系的功能关系、组织关系,确定各个作战节点之间的指挥层级,明确隶属关系。

(3)探究 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系中各节点的链接关系与信息交互情况,建立作战资源流表述模型。详细描述灭火作战任务中的资源交换以及各作战节点间信息的流动情况。

(4)剖析 MAV/UAV 协同森林灭火作战过程。考虑不同作战阶段和节点间功能的差异,采用作战活动模型描述 MAV/UAV 协同森林灭火作战活动的先后顺序和相互关系,建立作战状态转换模型反映节点内部状态的转换关系。建立作战事件跟踪模型表示节点间因果顺序关系对外界触发的响应。

2 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系结构模型

本文以某地高山林区发生森林火灾为例,受地形地貌、森林面积及林内复杂环境等多方面因素限制,仅考虑采用 MAV 与 UAV 协同执行森林灭火作战任务。通过对任务执行过程中 MAV/UAV 的动态行为和体系结构特征进行分析,建立如下模型。

2.1 顶层作战概念图

森林火灾场景下 MAV/UAV 协同参与灭火作战任务流程是:林火发生后,总指挥调度中心向 MAV 与 UAV 地面控制站下达灭火任务,UAV 地面控制站控制小型 UAV 编队搭载光电吊舱等探测设备前出火场开展侦查,并控制重型 UAV 编队装载灭火弹飞至火场附近某聚集点汇集待命。小型 UAV 编队在抵达火场后,获取森林火灾现场实时图像,第一时间上报火场地理坐标、过火面积、火场蔓延趋势等火场态势信息,同时对火头、火翼、火尾保持监测。

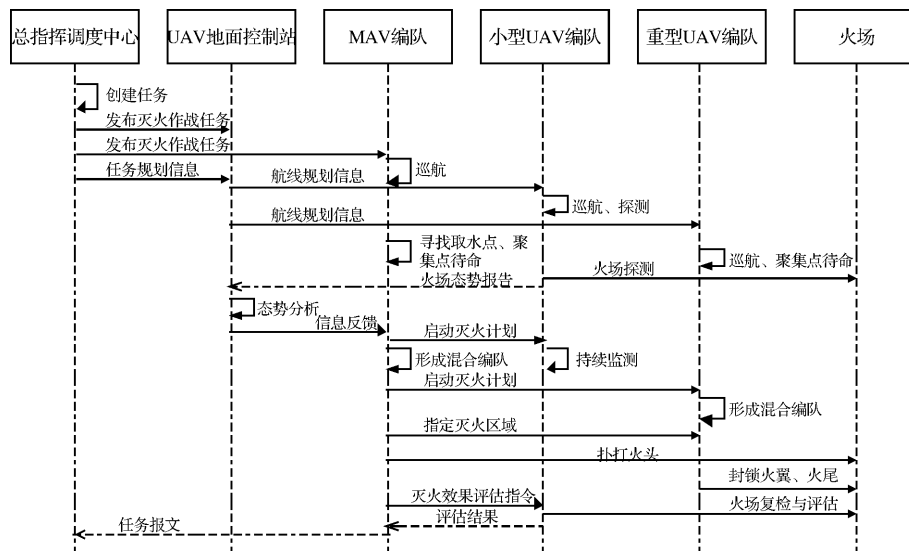


图7 作战事件跟踪模型

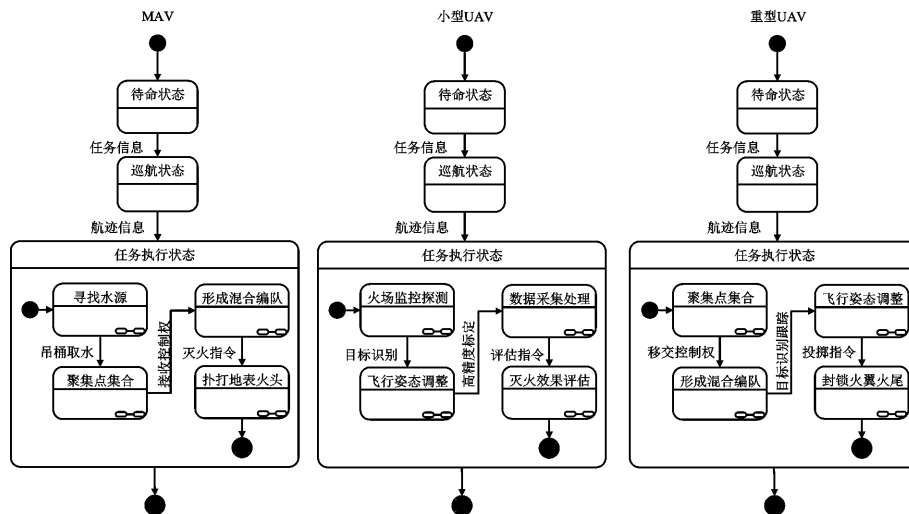


图8 作战状态转换模型

本文模型执行验证结果如图9所示，主要反映了在MAV/UAV协同森林灭火作战过程中总指挥控制中心、UAV地面控制站、MAV编队、小型UAV编队和重型UAV编队之间的动态行为和响应顺序。将图9的模型执行验证结果与图7的作战事件跟踪模型(OV-6c)进行进一步比较，可以看出：

(1)在任务规划阶段，图7中总指挥控制中心首先创建任务、规划任务，并向UAV地面控制站及MAV发布灭火作战任务，MAV编队开始巡航；UAV地面控制站向小型、重型UAV编队发送航线规划信息，引导小型、重型UAV编队进入巡航状态。图9中总指挥控制中心执行创建任务，随后向UAV地面控制站及MAV发布灭火作战任务，MAV编队起飞进入巡航状态；UAV地面控制站在接到任务之后向小型、重型UAV编队发送不同的航线规划信息，进入各自任务巡航状态。由此可见，在该阶段二者流程一致。

(2)在火场探测阶段，图7中，MAV编队进入

寻找水源状态并完成吊桶取水，前往聚集点待命；小型UAV编队前出火场探测，将火场情况反馈给UAV地面控制站，UAV地面控制站综合林火行为、强度等信息进行态势分析并反馈给MAV编队。图9中，MAV编队进入寻水状态，完成取水后前往聚集点集合待命；小型UAV编队前往火场进行持续探测，不断调整飞行状态以采集高精度火场数据，并将火场情况传递给UAV地面控制站，待其分析后获得下一步指令；重型UAV编队在此阶段巡航至聚集点与MAV编队集合待命。由此可见，在该阶段二者流程一致。

(3)在编队构成阶段，图7中，MAV编队收到火场态势信息反馈后开始启动灭火计划，接收重型UAV编队控制权形成混合编队，接收小型UAV编队控制权令其继续跟踪监视火势。图9中，MAV编队向小型、重型UAV编队发送灭火任务启动指令，重型UAV编队移交控制权与MAV编队形成混合灭火编队并等待下一步任务指令，MAV编

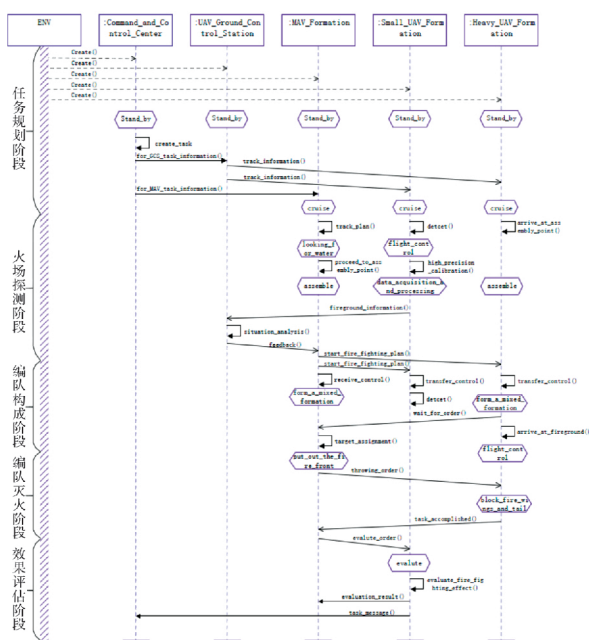


图9 模型执行验证结果

队控制小型 UAV 编队继续保持对火场情况的监视探测。由此可见,在该阶段二者流程一致。

(4)在编队灭火阶段,图7中,MAV 编队执行火头扑灭任务,向重型 UAV 编队发出指令,分配目标区域;重型 UAV 编队执行火翼、火尾的封锁任务。图9中,MAV 编队向重型 UAV 编队提供目标分配信息并发出任务指令,重型 UAV 编队负责火翼、火尾的封锁,MAV 编队负责火头的扑打,共同减缓火势蔓延。由此可见,在该阶段二者流程一致。

(5)在效果评估阶段,图7中,MAV 编队向小型 UAV 编队发出评估指令,小型 UAV 编队前出火场进行火场复检与评估,并将评估结果传递给 MAV 编队。MAV 编队将评估结果进一步整理形成任务报文上交给总指挥调度中心,联合灭火作战任务结束。图9中,灭火任务完成后,MAV 编队向小型 UAV 编队发出评估指令,小型 UAV 编队采集火场情况并对灭火效果进行评估,之后将评估结果传递给 MAV 编队,经 MAV 编队确认无异常后形成任务报文传至总指挥调度中心并结束灭火。由此可见,在该阶段二者流程一致。

综上所述,该模型执行验证结果与预期作战流程保持一致,因此 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系结构设计合理。

4 结论

本文基于美国国防部体系结构框架,在分析 MAV/UAV 协同森林灭火作战流程的基础上,从作战视点角度构建了 MAV/UAV 协同森林灭火作战体系结构模型。该模型全面描述了 MAV/UAV 协同森林灭火作战的顶层概念,明确了 MAV/UAV

协同森林灭火作战系统节点的组成,厘清了作战活动之间输入、输出信息流的相互关系和信息动态的时序逻辑。这对实现人与灭火装备器材的最佳结合,实现高效联合灭火作战具有指导意义,可为森林灭火组织指挥与控制提供技术支撑。最后,基于模型验证工具 IBM Rational Rhapsody 验证了体系结构模型的逻辑关系和行为关系的正确性。

参考文献:

- [1] DENG L, HE Y, LIU Q. Research on Application of Fire Unmanned Aerial Vehicles in Emergency Rescue [C]//2019 9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering. Piscataway: IEEE, 2019: 1-5.
- [2] 胡嘉悦,李广文,章卫国,等.面向有人/无人机协同远程作战的 IVMS 架构[J].航空学报,2022,43(2): 625199.
- [3] 樊锐,张鑫龙,马磊,等.有人/无人机协同作战研究[J].中国电子科学研究院学报,2020,15(3): 230-236.
- [4] 王新尧,孙厚俊,王朝阳,等.有人机/无人机编队协同作战决策系统架构设计[J].无人系统技术,2020,3(4): 66-72.
- [5] 程先峰,严勇杰.基于 MAXQ 分层强化学习的有人机/无人机协同路径规划研究[J].信息化研究,2020,46(1): 13-19.
- [6] 李越,韩维,陈清阳,等.凸优化算法在有人/无人机协同系统航迹规划中的应用[J].宇航学报,2020,41(3): 276-286.
- [7] FAN J, LI D, LI R. Research on Mission Planning for MAV/UAV Cooperative Combat [C]//2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems, Piscataway: IEEE, 2019: 548-553.
- [8] 王大旌,刘颖.空中作战中有人/无人机混编协同运用研究 [C]//第八届中国指挥控制大会论文集.北京:中国指挥与控制学会,2020: 254-258.
- [9] XIE Y, HOU X, WANG Z, et al. Coordination Control Strategy Of MAV/UAV Based On Route Detection For Maritime Target [C]//2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS), Piscataway: IEEE, 2020: 435-438.
- [10] JIAO Z, YAO P, ZHANG J, et al. MAV/UAV task coalition phased-formation method [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(2): 402-414.
- [11] FAN J, DONG J, LI R, et al. Analysis on MAV/UAV cooperative combat based on complex network [J]. Defence Technology, 2020, 16(1): 154-161.
- [12] FAN J, DOG J, LI R. Evaluation of MAV/UAV collaborative combat capability based on network structure [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018: 1-12.
- [13] 万开方,张炜,高晓光.有人/无人机编队协同闪烁干扰策略优化与效能评估方法[J].电光与控制,2020,27(12): 1-5.
- [14] LI Y, HAN W, WANG Y. Deep reinforcement learning with application to air confrontation intelligent decision-making of manned/unmanned aerial vehicle cooperative system [J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 67887-67898.
- [15] SHERSTJUK V, ZHARIKOVA M, SOKOL I. Forest Fire Fighting Using Heterogeneous Ensemble of Unmanned Aerial Vehicles [C]//2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments, Piscataway: IEEE, 2019: 218-223.
- [16] 姚延军,王红,谭贤四,等.基于 DoDAF V2.0 的体系结构开发方法[J].火力与指挥控制,2013,38(3): 103-107.
- [17] 皇甫一江.基于 DoDAF 作战视图的美军海基反导体系结构模型[J].现代雷达,2018,40(11): 14-17.
- [18] 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.

[19] 刘丽君, 涂天佳. 基于 DoDAF 作战视图的无人直升机协同对海作战建模分析[J]. 电子技术与软件工程, 2018(3): 129-131.

[20] 刘翔宇, 姜海洋, 赵洪利, 等. 基于 DODAF-OODA 的天基信息支援作战视图研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(2): 33-38.

Architecture Design for Cooperative Forest Fire Fighting Combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle

QIN Rui, CHEN Zijian and YAN Ling

(College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: As a new model of fire prevention of forest aviation, collaborative fire extinguishing by Manned/Unmanned aerial vehicle (MAV/UAV) is a complex system engineering, and it is of great significance to design the architecture based on it. This article is based on the analysis of firefighting drones, manned aircraft behavior patterns and fire-fighting capabilities, and comprehensively considers MAV/UAV formation methods and control processes. It mainly uses the operational viewpoint model of Department of Defense architecture framework (DoDAF), focusing on analyzing the interaction relationship and state changes between nodes, Creatively constructed a MAV/UAV cooperative forest fire fighting system. Finally, the model is verified by Rhapsody, an architecture verification tool. The results show that the implementation of the model is highly consistent with the expected operation process, and the architecture design of MAV / UAV cooperative forest fire fighting Combat System is reasonable, which is helpful to improve the joint fire fighting ability of forest fire fighting forces.

Key words: forest fire fighting; MAV; UAV; DoDAF; system architecture

(上接第 164 页)

Study on Risk Perception and Acceptable Risk of Debris Flow Disaster for Mountainous Farmers

MIAO Cheng¹ and LIU Xilin²

(1. Department of Geography, Ningxia Normal University, Guyuan 756000, China;

2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the analysis of a questionnaire on acceptable risk of debris flow disaster, this article expounds the farmers' risk perception and risk attitude to the acceptable risk of debris flow disaster from three aspects: attention degree and type, disaster acceptability and acceptable risk. The results show that: (1) Farmers are generally concerned about the debris flow disaster, the main concern of disaster consequence is property loss, and the further main concern of property loss is housing. (2) The farmers' acceptability of debris flow disasters are mainly: the distance is < 5 km, the frequency is once a century or longer time, the warning-time is < 1 h and the insurance-premium is < 100 CNY. (3) The acceptable disaster-affected toll, death toll, death rate, personal direct economic losses and total direct economic losses are mainly ≤ 100 persons, ≤ 1 person, $\leq 5 \times 10^{-7}/a$, $\leq 1\ 000$ CNY and $\leq 1 \times 10^5$ CNY respectively. (4) The demographic characteristics affecting farmers' risk perception, risk attitude and acceptable risk level of debris flow disasters are 36 ~ 45 years old, female, educational level of junior middle school and incomes < 1 000 CNY / month.

Key words: debris flow; risk perception; risk attitude; acceptable risk; mountainous farmers