

# 基于 PCTBTA 的有人/无人协同作战交互任务建模

焦浩洋, 瞿珏, 王庆力\*, 王 崑, 党思娜

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 针对当前有人/无人协同作战任务的复杂化、交互界面的信息量剧增等问题,提出了一种基于 PCTBTA 的有人/无人协同作战交互任务模型。该模型关注有人/无人协同作战中外部环境因素对操作员进行人机交互带来的影响以及在這些影响下操作员的缺省任务。首先,综合分析有人/无人协同作战任务流程及其特点,构建交互任务概念模型;其次,确定有人/无人协同作战中 5 个典型作战任务,对各任务的目标、序列、显示变量、影响因素、操作等概念元进行研究分析,最后,根据有人/无人协同作战概念模型及对概念元的分析,建立动态环境下有人/无人协同作战交互任务模型。相较 CTT、GOMS 等模型,该模型融入作战中时刻变化的外部因素,能够更好地描述在动态战场环境下有人/无人协同作战交互任务流程,在有人/无人协同作战中为操作人员高效完成交互任务提供理论模型,为未来各类有人/无人协同作战信息系统人机界面的优化设计和研制奠定基础。

**关键词** 有人/无人协同作战;任务模型;交互任务

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.04.013

**中图分类号** TP301.4;E837 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)04-0085-07

## A Model of Interaction Mission in Manned and Unmanned Cooperative Combat Based on PCTBTA

JIAO Haoyang, QU Jue, WANG Qingli\*, WANG Wei, DANG Sina

(Air and Missile Defense School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract** Aimed at the problems that the current manned/unmanned cooperative combat mission is complex, the complexion of weapons and battlefield situation is changed increasingly, and the amount of information at the interactive interface increases rapidly, a model of manned/unmanned cooperative combat interactive mission based on PCTBTA is proposed. The model focuses on the influence of external environmental factors on the operator's human-computer interaction in manned/unmanned cooperative combat, and the default tasks of the operator under conditions of these influences. On the basis of comprehensively analyzing manned/unmanned cooperative combat mission process and its characteristics, constructing the conceptual model of interactive mission, and then determining five typical combat missions in manned/unmanned cooperative operation, and studying and analyzing the conceptual elements such as objectives, sequences, display variables, influencing factors, and operations of each task, an interactive mission model of manned and unmanned cooperative combat in a dynamic environment is established according to the con-

**收稿日期:** 2022-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(52175282)

**作者简介:** 焦浩洋(1998-),男,河南开封人,硕士生,研究方向为人机界面设计。E-mail:2954452030@qq.com

**通讯作者:** 王庆力(1990-),男,安徽萧县人,硕士,讲师,研究方向为机械工程。E-mail:w154106563@163.com

**引用格式:** 焦浩洋,瞿珏,王庆力,等.基于 PCTBTA 的有人/无人协同作战交互任务建模[J].空军工程大学学报,2023,24(4):85-91. JIAO Haoyang, QU Jue, WANG Qingli, et al. A Model of Interaction Mission in Manned and Unmanned Cooperative Combat Based on PCTBTA[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(4):85-91.

ceptual model and conceptual element analysis of manned/unmanned cooperative combat. Compared with the CTT, GOMS and the other models, this model is capable of integrating external factors to change all the time in combat, and to further describe the interactive task process of manned/unmanned collaborative combat in a dynamic battlefield environment, providing a theoretical model for operators to efficiently complete interactive tasks in manned/unmanned collaborative combat, and laying a foundation for the optimization design of man-machine interface of various manned/unmanned collaborative combat information systems in the future.

**Key words** manned aerial vehicles coordinate combat; task model; interactive tasks

无人机具有低成本、可消耗、智能化、可有效延伸有人机作战范围等特点,被广泛应用于战场当中。但随着技术发展和作战任务的复杂化,无人机智能水平低,应变能力不强,且易受到干扰,无法完全代替人来进行战斗<sup>[1-2]</sup>。基于此,无人机与有人机在战争中协同作战已经成为未来重点作战模式。通过体系内各平台间的系统工作,一方面使作战能力倍增,另一方面通过使用无人机实现对有人机的保护,大幅提高体系的抗毁伤能力和鲁棒性。有人/无人协同作战能够实现有人和无人平台间的优势互补,分工协作,充分发挥各自平台能力,形成“1+1>2”的效果<sup>[3]</sup>。而在有人/无人协同作战过程中,有人/无人协同作战信息系统的人机交互界面,是作战人员和无人平台以及指挥中心沟通的重要媒介,随着作战任务的复杂化,交互界面的信息量剧增,给操作员的认知、决策、指挥带来了巨大的挑战,从而导致操作员完成作战任务准确率以及效率大大降低。

目前,针对有人/无人协同作战任务这一类多系统、多任务、多通信交互问题的研究较少,并未建立适用于有人/无人协同交互的任务模型,基于有人/无人协同作战的相关实验研究无法有效开展。因此,本文开展基于 PCTBTA (perceptual-control-theory-based task analysis) 的有人/无人协同作战交互任务模型研究,首先,分析有人/无人协同典型任务流程和特点,构建符合有人/无人协同作战交互需求的概念模型,其次,将概念模型具体化,对有人/无人典型协同交互任务和任务过程中所存在的各种影响因素进行分析,最后建立动态环境下有人/无人协同作战交互任务模型。

## 1 PCTBTA 任务建模方法

现有国内外关于任务建模的方法已有很多,例如作为一种面向活动的任务模型 CTT,能够描述系统运行时各个相关实体的活动过程,具有层次结构,丰富的暂态关系等特点<sup>[4]</sup>, DynaMo-AID 模型在 CTT 模型的基础上引入设备感知等技术,使系统能够适应用户的个性化需求和应用环境改变<sup>[5-6]</sup>,

GOMS 模型作为一种预测模型,可用于系统的设计、评估、检测过程中,用来描述用户在实践中执行任务的过程<sup>[7]</sup>。虽然上述模型都能够很好的描述用户与系统间的交互过程,但都对外部环境影响缺乏一定的考虑,而有人/无人协同作战时刻处于动态战场环境,外部影响是进行交互任务建模不可或缺的因素。因此,上述典型的任务建模方法无法适用于有人/无人协同作战交互任务模型的建立。

李娟妮等人<sup>[8]</sup>为了更好地描述动态环境下的用户任务,提出 PCTBTA 用户任务建模方法。PCTBTA 建模方法的流程如图 1 所示,该方法通过观察用户的工作环境,来获取与用户环境和任务描述相关的需求,为任务建模提供数据支持,再对获取的数据进行系统分析和抽象建模,选择合适的技术提供可用的设计解决方案。

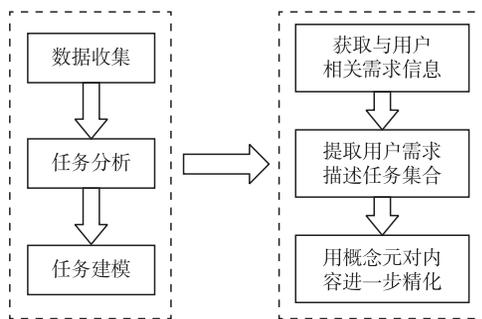


图 1 有人/无人 PCTBTA 建模流程

PCTBTA 任务建模内容包括: ①建模任务结构。从目标层面来建模系统的功能和子功能;从用户目标层面,建模特定用户在特定环境中实现特定目标的任务。②任务分配。根据可用的技术手段,对任务进行重新分配和重组。将用户执行的部分任务由机器自动执行,从而简化任务操作,减轻用户认知负荷。③建模具体的用户任务,包括任务描述维度和任务之间的关系。

与其他方法相比较而言,该方法将外部信息引入任务模型,拓展了任务模型描述范围,不仅能描述静态环境中用户与系统的交互过程,还能够描述任务执行过程的动态方面,在任务分析和建模过程中,始终以用户目标为导向,收集并组织任务相关信息,通过分析外界环境信息,引导设计者在初始阶段考

考虑各种可能影响目标状态的因素,结合移动环境下用户任务的特征,将“环境影响因素”显示地表示在任务模型中。

本文通过使用PCTBTA方法来构建有人/无人协同作战交互任务模型,描述用户在执行典型作战任务过程中具体的交互任务,以及在进行交互任务过程中外界环境因素带来的环境影响,并提出相对的解决措施,解决作战交互任务复杂等问题带来的用户交互困难等作战难题。

## 2 有人/无人协同作战交互任务概念模型

概念模型是指对真实世界中问题域内的事务的描述。本节通过对有人/无人协同作战典型任务流程及其相应特点分析,获取与用户相关的需求信息,来建立合适的概念模型,为后文建立有人/无人协同作战交互任务模型打好基础。

### 2.1 有人/无人协同作战典型任务流程及分析

在有人/无人协同作战过程中,将有人机与无人机的优势和特点都最大程度的进行保留是提高作战任务效率的核心,而一个完整高效的流程是发挥有人/无人作战编组优势和特点的关键。根据无人机自主等级不同,将协同作战的任务流程分为3类。

当无人机自主等级为无自主时,任务流程如图2所示。有人机接受任务指令启动编队,无人机对目标信息进行探测并回传侦察信息,根据侦察信息对目标进行任务规划并组建编队。有人机综合所有信息对目标进行分类识别,识别后进行战场态势评估以及威胁评估,通过威胁评估的结果进行目标分配,对无人机航路进行规划,执行作战任务。在执行任务时,出现特殊情况操作人员需及时根据战场态势进行航路再规划,有人机对任务执行效果进行评估,根据执行情况选择继续执行任务或返回。当无人机自主等级为半自主时,流程同无自主等级时基本一致,由于自主等级的提升,使得在执行目标侦察、目标识别及攻击等任务时,任务主体由有人机变为无人机。当无人机自主等级为全自主时,由于整个无人机自主水平较高,当有人机操作人员接受任务启动无人机编队后,目标侦察、共享态势信息、制定攻击计划等作战任务全部由无人机自主完成<sup>[9]</sup>。

有人/无人协同作战任务繁杂,执行任务难度较高,尽管深度学习等人工智能领域技术的快速发展一直在加快无人机自主水平的提升,但当前的无人机技术尚未达到全自主水平<sup>[10]</sup>。因此在分析任务

流程时,主要以无自主等级的无人机与有人机协同作战任务流程为分析对象。根据图2中无自主等级典型任务流程,可将整个流程分为3个阶段<sup>[11]</sup>。

第1阶段:任务准备阶段。有人机接受地面指挥站的任务指令,开始启动有人机、无人机编队,提前进行任务想定,对无人机执行任务航线、作战任务分配、总体任务规划等相关任务进行提前预想,由有人机指挥,与无人机前往任务执行区域。

第2阶段:任务执行阶段。有人机根据无人机反馈的战场态势信息进行态势信息融合,根据融合后的态势信息进行目标识别、态势评估、威胁评估,基于第1阶段的预想及当前作战态势,进行目标分配、航路规划。还需考虑特殊情况如障碍规避和威胁规避的处理决策,需要进行航路重规划。

第3阶段:完成任务后,对任务完成效果进行评估,确定是否继续执行或返回。无人机控制权限交还地面指挥站,有人机、无人机返回地面。

通过对有人/无人协同作战典型任务流程的3个阶段进行分析,发现对于操作人员在执行任务的过程中,需要具体完成的典型交互任务有5个,分别是目标识别、态势评估、威胁评估、目标分配、航路规划。而在执行这些任务时,不同任务的应用技术、外部天气环境、地理条件等因素都将影响任务的完成效率和准确率。

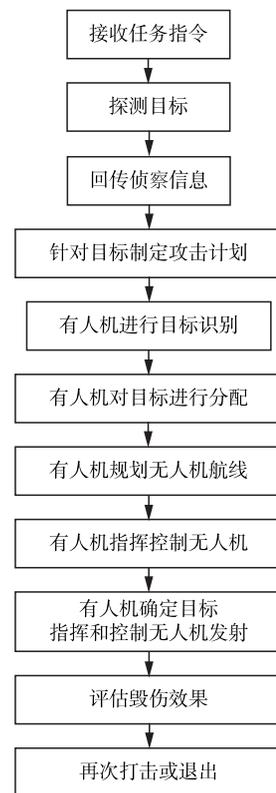


图2 典型任务流程

### 2.2 建立有人/无人协同作战交互概念模型

概念模型关注的是军事行动和任务,分别依赖于作战装备,作战人员和作战环境等军事行动因素<sup>[7]</sup>。通过上文对有人/无人协同作战典型任务流程的分析,结合 PCTBTA 理论方法,对其建立概念模型,定义为以下 6 元组:任务目标、任务集合、显示变量、操作、任务序列、影响因素。如图 3 所示。

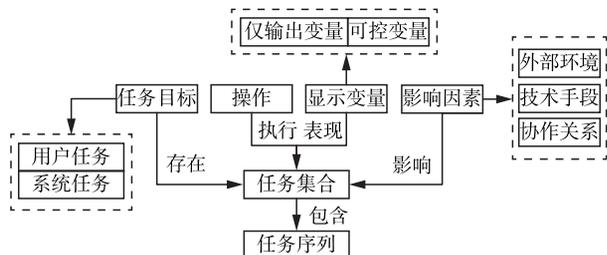


图 3 有人/无人协同作战概念模型

通过分析有利或不利影响因素,描述出在不同条件不同影响因素下操作人员所需执行的任务序列,把任务序列看为一个任务元,将增大操作人员交互任务的描述范围,降低模型复杂度,引入显示变量为本文建立的交互任务模型向用户界面转换提供保障。

- 1)任务目标:指作战活动中,操作人员进行人机交互活动时所有的交互任务。
- 2)任务集合:对每个任务目标进行合适的力度划分,将其划分为多个不同的子任务并进行子任务排序。
- 3)显示变量:指在任务目标实现的过程中,能够被用户感知或者控制的用户界面元素。用户通过控制显示变量使系统达到目标状态,可将显示变量划分为“可控变量”和“仅输出变量”,显示变量是用户操作的对象。
- 4)操作:指完成任务目标时,对可控变量进行的具体活动集合。
- 5)任务序列:指被划分的子任务的任务序列集合,其包含在任务集合中。
- 6)影响因素:根据影响因素对完成目标产生的积极或消极作用,将其分为有利影响因素和不利影响因素。

## 3 有人/无人协同作战交互任务建模

本节对有人无人协同作战的典型任务进行分析,基于上文提出的概念模型,对典型任务的 6 个概念元分别进行梳理分析,提取任务需求,为后文建立交互模型提供理论基础。

### 3.1 典型任务分析

#### 3.1.1 目标识别

目标识别是指综合各种目标特征信息实现对空中目标的分类识别,以此完成战场的态势威胁评估<sup>[12]</sup>。有人/无人机协同作战过程中,各参与协同的作战平台由于所带传感器的类型、能力不同,对同一个目标进行识别时,会产生不同的目标属性,得到不同的识别结论,将各平台级的信息进行决策融合,最终达到一致的综合识别结果,如图 4 所示。

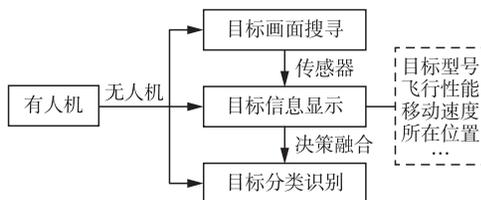


图 4 目标识别流程图

在“目标识别”任务中系统所携带本次作战相关情报数据库可帮助操作人员从数据库中查询情报,所得到的各类目标信息通过决策融合最终可对目标进行分类识别;恶劣的天气环境和敌方电磁干扰将阻碍任务的完成,不同传感器识别结果存在差异。

#### 3.1.2 态势评估

在信息化战争背景下,对战场态势进行准确评估是准备判断敌我态势进行科学决策的重要依据,是正确展开军事行动的先决条件,也是战场指挥官及士兵谋划和开展行动的基础。态势评估是指对各方力量、战场环境综合情况、事件等进行定性或定量描述,建立可预测目标作战意图的、动态的战场综合态势图,通过综合分析来自传感器和其他信息源的战场信息推断出战场上正在和即将发生什么,态势评估流程如图 5 所示<sup>[13]</sup>。

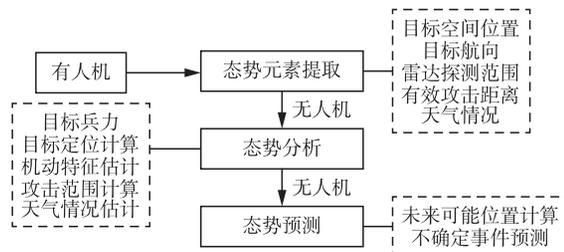


图 5 态势评估流程图

在“态势评估”任务中运用飞行传感器技术来获取战场态势信息,帮助操作人员能够快速获取态势信息,为飞行员制定合理的攻击策略和防御措施提供依据,通过采用先进智能算法,使态势评估系统具备自学习和自适应能力;战场环境存在敌方电子干扰,影响信息传达,应采用信息对抗技术确保己方准确获取敌方信息的能力。



威胁评估:操作人员选择并确定适合当下战场任务的威胁要素。当有利影响因素存在时,通过数据融合后的信息能够更准确地帮助操作人员选择合适的威胁评估要素;当不利影响存在时,系统可根据多种不同作战风格提供操作人员多种威胁评估要素方案。

目标分配:让系统自动生成分配方案或由操作人员根据战场态势及目标威胁等级制定组合方案,为各协同无人机分配适合攻击或规避的目标。当不利影响存在时,系统根据目标情况及时对其进行威胁再评估并反馈给操作人员,操作人员重新进行目标分配。

航路规划:生成多路径,选择最佳路径或在地图界面上自主进行路径规划;子任务“重新为无人机规划路径”,在无人机执行作战任务发现紧急威胁或障碍时,操作人员需要立即根据战场态势为无人机重新规划路线,选择新航路点,其缺省任务是选择路径再规划,手动为无人机重新规划航路。当有利因素存在时,系统可为操作人员自动生成多条航线路径,任其选择;当不利因素存在时,系统实时反馈无人机面临的气象变化或地形变化的威胁,操作人员重新规划无人机航路。

表 1 不同任务下显示变量元素

任务类型	交互任务	元素名称	元素类型
目标识别	进入“目标识别”界面	目标识别	可控变量
	搜寻目标画面	目标画面	可控变量
	目标信息呈现	目标信息	仅输出变量
	进行目标分类标记	目标标记	可控变量
态势评估	进入“态势评估”界面	态势评估	可控变量
	选择评估的态势要素	态势评估要素	可控变量
	获取战场态势信息	态势信息	可控变量
	系统进行态势分析	态势分析	仅输出变量
	系统进行态势评估预测	评估预测	仅输出变量
威胁评估	进入“威胁评估”界面	威胁评估	可控变量
	选择评估的威胁要素	威胁评估要素	可控变量
	态势评估结果	评估预测	仅输出变量
	系统进行威胁计算	威胁计算	仅输出变量
	系统确定威胁等级	威胁等级	仅输出变量
目标分配	进入“目标分配”界面	目标分配	可控变量
	查看目标威胁等级	威胁等级	仅输出变量
	生成最优方案	自动分配	可控变量
	自行分配目标	手动组合	可控变量
航路规划	进入“航路规划”界面	航路规划	可控变量
	查看战场综合态势图	战场态势	仅输出变量
	系统自动生成路径或操作人员规划路径	生成路径 规划路径	可控变量
	重新为无人机规划路径	更改路径	可控变量

### 3.2.4 影响因素

目标识别中有利影响因素包括:系统所携带本次作战相关情报数据库,操作人员从数据库中查询情报;不利影响因素包括:天气环境、电磁干扰<sup>[12]</sup>。

态势评估中有利影响因素包括:飞行传感器技术来获取战场信息,帮助操作人员能够快速获取态势信息;不利影响因素包括:战场环境下存在电子干扰,影响信息传达。

威胁评估中有利影响因素有数据融合系统可将高层次信息进行融合处理,帮助操作人员进行信息认知;不利影响因素有目标作战风格不确定性,不利于对目标威胁等级进行准确确定<sup>[17]</sup>。

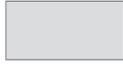
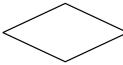
目标分配中不利影响因素有威胁评估阶段通过评估得到的目标威胁程度等级可能存在误差,动态战场环境中参战兵力会随时发生变化。

航路规划中有利影响因素有智能算法能够快速提供给操作人员多条无人机作战任务路线轨迹;不利影响因素有气象、地形威胁,以及自身特性如最小航迹长度、最大爬升角等约束<sup>[18]</sup>。

### 3.3 模型图像化表示

为了准确建立有人无人协同交互任务模型建立,本文对模型表示做出以下设计,见表 2。

表 2 模型图形含义

符号	名称	语义
	用户任务	由用户完成的任务
	系统任务	系统内部自行完成的任务
	影响因素	影响任务完成的条件
	任务序列	用户完成缺省任务的排序
	用户操作	不利影响因素的解决方案

### 3.4 基于不同任务的交互模型

通过上述对典型任务和各任务概念元分析,获取与用户相关的需求信息,提取任务需求,进行模型图像化设计,建立有人/无人协同交互任务模型。如图 9 所示。

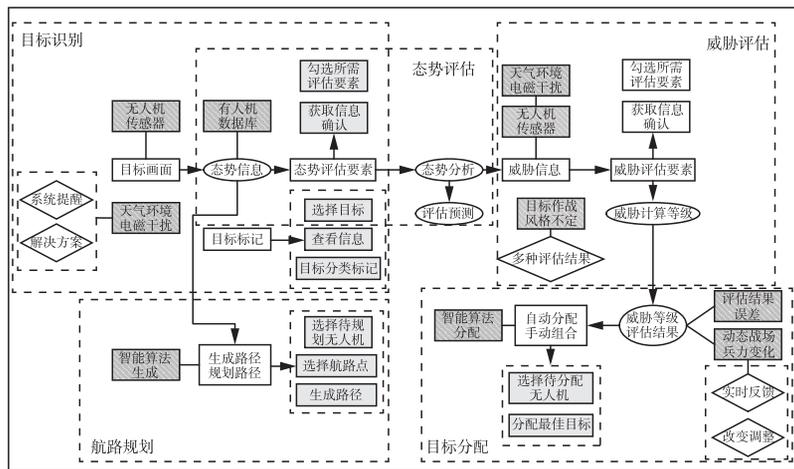


图 9 有人/无人协同交互任务模型

## 4 总结

本文针对操作员在有人/无人协同作战复杂的战场环境中,交互界面的信息量剧增,操作员的认知、决策、指挥受到了巨大的挑战等问题,利用 PCTBTA 用户任务建模方法,在模型内引入外部信息因素,拓展模型描述范围,构建有人/无人协同作战交互任务模型。分析了有人/无人协同作战任务流程,确定了五个典型作战任务,根据任务流程特点及 PCTBTA 理论方法,构建有人/无人协同作战交互任务概念模型。对其中概念元分别研究分析,建立有人/无人协同作战交互任务模型。该模型能够更好的描述在动态战场环境下有人/无人协同作战交互任务,模型中的任务序列、显示变量等元素作为关键要素,为日后实现任务模型向有人/无人协同作战用户界面原型转换打下基础,在有人/无人协同作战中为操作人员高效完成交互任务提供理论模型,为未来各类有人/无人协同作战信息系统人机界面的优化设计和研制奠定基础。

### 参考文献

[1] 樊洁茹,李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术,2019,2(1):39-47.  
 [2] HASSLER S C, BAYSAL-GUREL F. Unmanned Aircraft System (UAS) Technology and Applications in Agriculture[J]. Agronomy, 2019, 9(10): 618.  
 [3] 孙盛智,孟春宁,侯妍,等. 有人/无人机协同作战模式及关键技术研究[J]. 航空兵器, 2021, 28(5): 33-37.  
 [4] SEHABA K, ENCELLE B. Generation of Task Models from Observed Usage Application to Web Browsing Assistance[C]//11th International Conference on Knowledge Management and Information Systems. Setubal Portugal; SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2019: 74-82.

[5] AKIKI P, ZISMAN A, BENNACEUR A. SERIES: A Task Modelling Notation for Resource-driven Adaptation[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Enterprise Information Systems. Setubal Portugal; SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2022:29-39.  
 [6] MEZHOU DI N, VANDERDONCKT J. Toward a Task-Driven Intelligent GUI Adaptation by Mixed-Initiative[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2021, 37(5): 445-458.  
 [7] SUJITO F, ARIFUDIN R, ARINI F Y. An Analysis of User Interface and User Experience Using System Usability Scale and GOMS Method[J]. Journal of Advances in Information Systems and Technology, 2019, 1(1): 65-73.  
 [8] 李娟妮. 基于感知控制的任务模型及其在用户界面开发中的应用研究[D]. 西安:西北大学, 2017.  
 [9] 樊洁茹,李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术,2019,2(1):39-47.  
 [10] 丁达理,谢磊,王渊. 有人机/无人机协同作战运用及对战争形态影响[J]. 无人系统技术,2020,3(4):1-9.  
 [11] 贾轶杰,朱凝华,张舵. 颠覆未来战争:空中有人/无人平台协同作战二三谈[J]. 轻兵器, 2022(9):20-23.  
 [12] 朱杰,游雄,夏青. 面向 GeoBML 的作战任务建模与表达[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(3): 298-304.  
 [13] 王钧. 基于雷达数据的空中飞行目标识别和威胁度评估系统[D]. 南京:南京邮电大学,2022.  
 [14] 陈斌. 面向空中战场的态势评估关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.  
 [15] 朱宽宽. 空战威胁评估关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2021.  
 [16] 朱帅晖. 面向多目标的无人机任务分配与跟踪系统[D]. 南京:南京信息工程大学,2022.  
 [17] 郑都民. 集群空战中的群威胁评估及目标分配关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2020.  
 [18] 杨晨. 无人机对空目标自主航路规划技术研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2019.

(编辑:刘勇)