

引用格式:辛斌,虞睿,张佳.有人/无人系统协同作战任务规划方法:综述与展望[J].电光与控制,2024,31(11):1-9. XIN B, YU R, ZHANG J. Task planning methods for manned/unmanned system cooperative combat:review and prospect[J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31(11):1-9.

## 有人/无人系统协同作战任务规划方法:综述与展望

辛 斌, 虞 睿, 张 佳  
(北京理工大学自动化学院,北京 100000)

**摘 要:** 综述了有人/无人系统协同作战任务规划方法。首先介绍了研究背景,从有人/无人系统的人机关系和任务规划流程2个方面对问题进行了分析,进而引出任务理解、任务分解、任务分配、行动序列生成和方案评估等5个方面的关键技术,并分别对相关研究进行全面综述。最后综合对有人/无人系统协同作战任务规划的研究现状进行了总结和分析,并对该领域的未来提出展望。

**关键词:** 有人/无人系统; 任务规划; 协同作战; 人机协同

**中图分类号:** TP18 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2024.11.001

## Task Planning Methods for Manned/Unmanned System Cooperative Combat: Review and Prospect

XIN Bin, YU Rui, ZHANG Jia  
(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100000, China)

**Abstract:** This paper provides a comprehensive review of the task planning methods for manned/unmanned system cooperative combat. It begins by introducing the research background and analyzing the problem from two aspects of the human-machine relationship within manned/unmanned systems and the task planning process. This analysis leads to the identification of five key technical areas: task understanding, task decomposition, task allocation, course of action generation, and plan evaluation. Each of these areas is then comprehensively reviewed, with a focus on the relevant research. Finally, the paper summarizes and analyzes the current research status of task planning for manned/unmanned systems cooperative combat as a whole, and provides the prospects for the future of this field.

**Key words:** manned/unmanned system; task planning; cooperative combat; human-machine collaboration

### 0 引言

随着人工智能和人机共融技术的快速发展,有人/无人系统协同作战成为作战研究领域的一大热点,正在加速改变体系作战模式和战争形态。无人系统因低成本、无伤亡、高机动的特性,能够在恶劣的环境下代替人类执行危险、繁琐的任务,但其当前的智能化水平还无法适应战场环境的动态不确定性以及任务的复杂性,而融入人的智慧和综合判断能力的有人系统能有效弥补这个缺陷。将二者有机结合,有人/无人系统协同作战理念应运而生,将逐渐成为未来战争中的主流样式。

近年来,世界各军事强国充分利用有人系统和无人

系统的优势,围绕最大发挥有人/无人系统综合作战效能的目标开展了大量研究。在政策层面,美国国防部在2014年发布了《无人系统综合路线图(2013-2038)》,把有人/无人系统编组(Manned-Unmanned System Teaming, MUM-T)列为重点关注的5个主题之一。在项目实施层面,英国国防部和QinetiQ公司于2007年用1架“狂风”综合航空电子研究样机(TIARA)作为指控飞机与3架仿真无人机进行编队飞行实验,实现了有人战机中1位飞行员直接控制4架飞机对地攻击的过程。而最具代表性的研究始于2015年美国国防部提出的“忠诚僚机”概念,针对这一概念,美国空军研究实验室和克雷托斯防务公司联合开发了XQ-58A“女武神”无人机,并于2020年成功与F-22和F-35有人机一起进行了半自主飞行试验。

从作战过程的主要阶段进行分析,有人/无人系统协同作战研究涉及到协同感知、认知、决策和控制等方

收稿日期:2024-04-20

修回日期:2024-06-01

基金项目:国家自然科学基金(62088101)

作者简介:辛 斌(1982—),男,山东海阳人,博士,教授,博导。

通讯作者:虞 睿(2000—),男,云南保山人,博士生。

面,其中,任务规划作为协同决策技术的中心环节和发挥协同作战效能的关键环节,能够衔接作战构想与作战任务的落实执行,实现对作战资源的配置优化,提供科学、准确的作战方案与计划<sup>[1]</sup>。与纯无人系统相比,有人/无人作战体系规模大、成员异构多样,特别是有人平台的加入增强了系统之间的耦合性,其任务规划建模过程需考虑人机配比、人机分工等因素,使得问题更加复杂。只有将人和机器的能力、有人系统和无人系统的能力以及其内部的相互关系充分体现出来,才得以更好地契合实际作战场景。

各军事强国对有人/无人系统协同作战的任务规划能力高度重视,将其视为实现杀伤链快速闭合的关键力量。当前与有人/无人系统协同作战任务规划相关的文献主要以研究类论文为主,而综述类论文鲜有发表。鉴于此,本文从概念分析、协同模式和关键技术 3 个方面对有人/无人系统协同作战的任务规划方法进行了全面综述,对已有研究成果进行综合分析并提出未来展望,旨在为该领域的研究人员提供参考。

## 1 有人/无人系统协同作战任务规划

### 1.1 有人/无人系统协同的基本概念

#### 1.1.1 人机关系分析

有人/无人系统是系统之系统,由若干有人系统和无人系统构成,本节以单个有人系统和无人系统构成的有人/无人系统为研究对象,对其人机关系进行分析。如图 1 所示,有人系统和无人系统都包含人和机器,从物理域上对其进行划分:二者的本质区别即是否装载人员。有人系统的人和机器都位于有人平台空间内部,可进行近距离的人机交互;无人系统中也有人,但存在于无人平台空间外部,与平台搭载的机器进行远程信息交互。有人系统注重发展智能增强(Intelligence Augmentation, IA)技术,以人为中心,主要特征为“人主机辅”,即人为决策主体,机器进行辅助决策。无人系统注重发展人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术,以机器为中心,主要特征为“机主人辅”,即机器为执行任务主体,人类辅助执行任务。

从微观到宏观层面对整个有人/无人系统进行分析,人和机器好比“原子”,通过多样的组合方式形成性质各异的“分子”级结构——有人系统和无人系统,有人/无人系统即为两种分子的“混合物”。在混合物内两种分子优势互补,分工协作,充分发挥各自的能力,形成“ $1+1>2$ ”的效果,可以归结为一种“协同”关系<sup>[2]</sup>。在协同过程中,有人系统和无人系统之间通过人—人、机—机和人—机进行交互,特殊情况下有人系统中的“人”和无人系统中的“人”可以为同一个个体,例如有

人战机内的操作员同时操控自身战机并指挥另一架无人战机作战。随着机器智能化水平提高,人参与交互的方式将从“人在环内”、“人在环上”进化到“人在环外”,作战对人的依赖性逐渐降低,可见有人/无人系统协同作战仅是传统的有人作战向未来的纯无人作战过渡的模式。同时,有人系统与无人系统的协同作战样式、协同形态也在不断演化,形成统一规范化的协同模式已成为现阶段的重要任务。

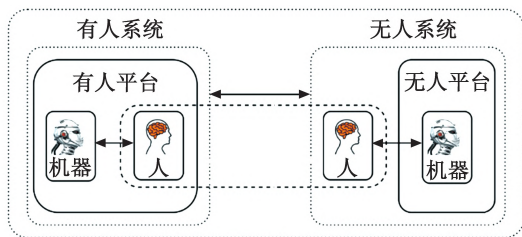


图 1 有人/无人系统的人机关系

Fig. 1 Human-machine relationship within manned/unmanned system

#### 1.1.2 协同模式

本节提出了一种规范化的有人/无人系统协同模式定义,包括有人系统和无人系统之间的协同模式,以及两个系统内部的人机协同模式。

OODA 环将作战过程分为观察—判断—决策—行动 4 个环节,将其分别记为 Ob、Or、D、A。在战前准备阶段,从“原子”层面分析,人与机器是否适合协同工作取决于彼此的相互适应,例如,人需要能操作机器和解读机器的信号的专业能力,机器也需要理解人的指令信息的能力,故需要对人和机器的能力进行双向协同建模,包括感知、执行、计算、通信等方面,从而综合判断哪些任务必须由人执行,哪些任务必须由机器执行,哪些任务需要人和机器协同执行;同样,应在“分子”层面对有人系统和无人系统的能力进行建模,以此为依据判断哪些任务必须由有人系统、无人系统分别执行,或者必须由有人系统、无人系统协同执行。将 OODA 环每一阶段的任务对应合适的有人/无人系统协同模式,才能保证战斗过程中各项任务有秩序地进行。本文以 OODA 环为基本模型分别对人机协同模式、有人/无人系统的协同模式进行描述。

##### 1) 人机协同模式。

无人系统和有人系统内部的人机关系都由机器的智能化水平决定。当机器智能化水平高时,可单独执行 OODA 环的某一阶段工作,人作为监督者;当智能化水平较低时,需要与人共同执行任务,人作为合作者。例如一些需要复杂社会知识支撑的决策工作,机器目前的智能化水平还无法胜任,必须由人执行。目前,Ob 和 A 环节的大部分工作可以由机器执行;而 Or 和





5 个方面论述有人/无人系统协同作战的任务规划关键技术。

## 2.1 任务理解

任务理解是任务规划的开端,在有人/无人系统协同作战的背景下,任务理解的研究聚焦于如何使有人/无人系统理解指挥官发出的指挥控制指令,得到明确的作战任务,从而传递给后续步骤执行战术行动以满足指挥官的战术意图,达到相应的作战效果。

任务理解主要涉及到认知能力,人和机器均可执行,人的任务理解更多涉及到心理学、社会经验等范畴,而机器的任务理解往往与机器学习联系起来。由于单个无人系统或有人系统得到的任务理解结果完整性、准确性不足,通过两个系统之间的协同能充分体现人的参与度与机器的分布式计算能力,从而有效提高任务理解质量,因此,有人/无人系统任务理解对应协同模式的  $D^{SOS}$  阶段的系统级执行体通常为 MS&US。在有人系统中,机器主要作为辅助理解工具,将上级指令转化为更直观的作战领域专业术语,以便操作人员进一步理解上级意图;在无人系统中,机器作为任务理解的主体,重点将上级指令转化为机器语言,以便进行下一步的任务分解操作。

机器的任务理解主要通过机器学习类方法来实现。张佳等<sup>[5]</sup>构建了以有人/无人系统协同作战为背景的任务理解框架,并提出一种基于极限学习机的任务理解算法,能够快速、准确地理解指挥员意图;LIU 等<sup>[6]</sup>提出了一个基于深度学习的任务理解框架,包括输入处理、任务理解和任务执行计划等模块,能够分析处理从指挥官那里获得的模糊和不完整的指令;卢栋才<sup>[7]</sup>针对服务机器人的任务理解进行研究,提出结合 FrameNet 语义词典和 ASP 自动规划技术来增强机器人处理不完整知识的能力;CHEN 等<sup>[8]</sup>提出了一种监督学习的方法,将自然语言导航指令转换为可执行计划,通过训练英语导航语料库生成语义解析器;BRANAVAN 等<sup>[9]</sup>提出了一种强化学习的方法,将自然语言指令映射为动作序列,通过观察动作效果来优化指令的理解。

## 2.2 任务分解

经过任务理解的第一级处理,可以得到一个明确的粗颗粒度任务,此时需经过任务分解将其细化为一系列具体的可执行任务,从而匹配相应的有人系统和无人系统。作战任务的分解具有开放性、分散性、智能性和社会性等特点,有效的任务分解和分配策略将在很大程度上降低系统成本,提高执行效率。

为了提高任务规划效率,任务分解适合交给机器计算能力较强的系统单独执行,故其对应  $D^{SOS}$  阶段的系统级执行体通常为 MS&US。在实际作战场景下,传

统的作战任务分解主要依赖指挥者的经验知识,缺乏高效自动的辅助工具,难以处理高复杂度的任务且无法适应战场的高动态需求;当前的智能辅助机器基于已有的领域知识库可以实现结构化任务的全自动分解,但对于半(非)结构化任务,其求解过程必须依靠人的丰富社会经验和战略知识。因此需将人和机器的优势相结合,以任务目标为驱动,综合考虑人的认知能力、机器的计算能力、知识库的丰富度、待分解任务的结构特征以及具体战场态势等因素进行分解模式的创新。根据定性和定量划分,当前任务的分解方法主要分为层级式分解和模块式分解。

### 2.2.1 层级式分解

层级式分解为定性分析的方法,即按照某种标准将原始作战任务划分为级别更低、更具体的层级结构子任务<sup>[10-11]</sup>。黄孝鹏等<sup>[12]</sup>针对复杂决策任务分解问题,提出决策任务层级分解的基本思想,研究了基于人件服务的复杂决策任务层级分解动态控制策略与算法;邹志刚等<sup>[10]</sup>在基于角色的作战体系结构柔性设计框架下,提出了基于任务结构矩阵的作战任务变粒度角色柔性分解方法;杨学锋等<sup>[13]</sup>针对反潜直升机作战任务分解问题,分析其作战使命并以此为标准分解出更细致的作战任务;郭峰等<sup>[14]</sup>引入了工作分解结构的思想,依次按作战时序、作战空间、作战功能进行任务分解;而目前最主流的方法是基于层次任务网络(Hierarchical Task Network, HTN)的框架来进行作战的任务建模和分解<sup>[15-18]</sup>。

### 2.2.2 模块式分解

模块式分解为定量分析的方法,即将具有某种强关联的任务优化聚合为该类型的任务模块<sup>[10-11]</sup>。庞辉等<sup>[19]</sup>引用软件内聚度量的思想,提出了基于项目-任务-活动框架的网络化协作任务模块分解策略;董涛等<sup>[20]</sup>根据作战任务之间的输入输出关系,提出基于内聚度和粒度的方法定量评估任务分解方案;王伟等<sup>[21]</sup>从信息流、效果流和物质流 3 个方面对作战任务之间的协同关系进行度量,构造作战二元树进行任务聚类,最后转化为利用遗传算法求解任务模块内部协同度最大化和外部协同度最小化的优化问题;王伟等<sup>[22]</sup>通过设置任务协同度阈值的方法,从时间、逻辑、功能 3 个维度对作战任务进行聚合,实现基于协同相关度的任务分解优化;常青等<sup>[23]</sup>提出了基于霍尔三维结构的作战任务分解策略,从时间、逻辑、活动 3 个维度对作战任务进行分解。

## 2.3 任务分配

任务分配是任务规划的核心,在实现各技术、战术指标的前提下,根据敌我双方状态和战场态势实时地将任务分解得到的可执行任务分配给各有人、无人系

统,以最大化联盟整体作战效益,最小化代价<sup>[24]</sup>。任务分配问题的解空间随着参与系统的数量和活动规模的增加呈指数级增加,是一个多变量多约束的 NP-Hard 问题<sup>[25]</sup>。

在任务分配建模阶段,需要进行作战资源需求分析,即以能力为中心建立“任务-能力-有人系统(无人系统)”的映射关系。“能力-有人系统(无人系统)”在战前准备阶段已经完成,因此需根据共同的能力谱系,确定“任务-能力”的量化需求。在不同的问题背景下,有人/无人系统适用不同的任务分配架构,通常可分为集中式或分布式。

### 2.3.1 集中式任务分配

在集中式架构下,有人系统通常作为中心节点,承担团队信息控制和决策的工作,它从各无人系统实时或周期性地收集态势信息,充分协调各类资源,再将任务分配结果指派给各无人系统,对应  $D^{SOS}$  阶段的战术级执行体为 MS&US。集中式的求解方法可以分为最优化方法和智能优化方法。

#### 1) 最优化方法。

最优化方法包括整数规划<sup>[26]</sup>、约束规划、穷举法<sup>[27]</sup>、图论<sup>[28]</sup>等,可以实现全局最优。但由于任务分配 NP-Hard 特性,目前的已知方法只适用于小规模问题。为了在求解速度和解的质量之间取得平衡,采用智能优化算法进行任务分配问题的求解已成为优选策略<sup>[29]</sup>。

#### 2) 智能优化方法。

与最优化方法不同,智能优化方法侧重于在可接受的时间内寻求问题的满意解,而非严格追求全局最优。主要包括遗传算法<sup>[30-31]</sup>、粒子群算法、蚁群算法和模拟退火算法等<sup>[25]</sup>,此类算法复杂度低且扩展性强,从而易于与其他算法结合以进一步提升算法性能<sup>[32-33]</sup>。

### 2.3.2 分布式任务分配

综合分析显示,集中式架构下的全局优化算法适用于战前的精细化任务分配,但其高计算代价无法满足任务执行过程中快速调整分配方案的需求。而分布式架构下,各个作战平台分担了中心节点的计算压力,能在短时间内根据实时态势调整作战方案,更适用于实时作战的高动态场景,其对应  $D^{SOS}$  阶段的系统级执行体通常为 MS&US。分布式任务分配方法包括市场机制、群体智能、分布式模型预测控制方法、分布式马尔可夫决策过程、博弈论<sup>[34]</sup>、Hopfield 神经网络<sup>[35]</sup>、满意决策理论等<sup>[25]</sup>,其中,市场机制方法和群体智能方法应用最为广泛。

基于市场机制的方法采用显式通信,有人系统和无人系统作为市场参与者,通过竞争和协商来分配任务,经典算法包括合同网算法<sup>[36-38]</sup>和拍卖算法<sup>[24,29]</sup>。而基

于群体智能的算法侧重对生物群体机制的学习,通常采用“刺激-响应”机制的隐式通信,通过个体与个体以及个体与环境之间的简单交互,涌现出被称为共识主动性的群体智能,从而自组织完成复杂任务<sup>[29]</sup>,通信负载较小,其经典算法包括遗传算法<sup>[39]</sup>、蚁群算法<sup>[40-41]</sup>、狼群算法<sup>[42]</sup>、粒子群优化算法等。

### 2.4 行动序列生成

任务分配实现了可执行任务与作战力量的匹配,即知道了“做什么”,至于“如何做”则需要以任务分配结果为基础制定完整的作战计划。作战计划的核心内容是作战行动序列(Course of Action, COA),传统作战行动序列通常由参谋人员依据首长作战意图和作战决心进行拟制,效率低下且耗时费力<sup>[43]</sup>。随着信息技术的发展,现代战争转变为依靠网络和科技的信息战,能否正确、高效地生成作战计划成为了战争胜负的关键。在有人/无人系统中,为了提高作战的成功率,通常需要生成众多行动序列从而选取最优,因此该工作适合多个系统并行完成,其协同模式对应  $D^{SOS}$  阶段的系统级执行体通常为 MS&US。制定作战计划需要准确、全面、形式化地表达作战知识,并匹配正确、高效的规划算法。本节将从 COA 的建模和生成方法两方面对其进行研究。

#### 2.4.1 COA 建模方法

COA 的建模方法包括本体建模、行为树建模<sup>[44]</sup>、知识库和知识图谱构建等<sup>[4]</sup>。在表达作战知识方面,本体因具有可维护、可扩展、可重用等优点,成为了研究者的关注热点<sup>[45]</sup>。COA 建模的约束条件通常可以分为时间、空间和因果,对于有人/无人系统需要充分考虑有人平台和无人平台的执行能力,例如移动速度、射程等。

#### 2.4.2 COA 生成方法

当前行动序列生成方法大致可分为模型分析法<sup>[46]</sup>、知识推理法、博弈论<sup>[47-49]</sup>和强化学习<sup>[50]</sup>。其中,知识推理法的研究最为广泛,因此本节重点对基于本体建模的知识推理法进行讨论。

SURDU 等<sup>[51]</sup>提出了一个打破 OODA 范式的系统——“深绿”,用来帮助指挥官创建 COA,为指挥官填写细节、评估选项、开发替代方案,并评估决策对计划其他部分的影响;DARR 等<sup>[52]</sup>提出了一个支持 COA 规划的本体,为美国陆军和海军陆战队的 COA 建模提供了一个可扩展的框架,该 COA 本体被构造成一个核心本体,包括常见的协同作战计划概念的定义,同时引入了多个特定领域的本体进行扩展,并且使用基于 SPARQL 规则的前、后向推理的方法支持深绿系统所进行的每一步模拟中的行动序列生成;赵英男<sup>[45]</sup>分析 COA 问题模型和 HTN 规划模型之间的联系,得出了二者的映射关系,提出并实现了一种本体推理与 HTN 自



动规划相结合的混合推理系统。

## 2.5 方案评估

在作战行动序列下发给各个作战实体之前,指挥员需要在对任务和己方能力充分了解、对敌情判断、听取报告的基础上,对机器生成的多种作战方案的效益、成本等方面进行综合分析和评估,从中选择战斗力最佳、成本最低的方案作为最终的作战方案。方案评估需要尽可能发挥人的专家优势,即多个系统中的人员共同参与,故其对应  $D^{SOS}$  阶段的系统级执行体通常为 MS&US。

目前,常用的作战方案评估方法大致可分为专家评估法、解析法、机器学习评估方法、仿真实验评估法和其他评估方法。下文中将对以上 5 类方法进行综述。

### 2.5.1 专家评估法

专家评估法是根据专家自身经验和知识进行定性或定量评估的方法,应用最为广泛。最常用的方法包括多属性决策法<sup>[53-54]</sup>、层次分析法<sup>[55]</sup>、模糊综合评判法<sup>[56-58]</sup>和粗糙集理论法<sup>[59]</sup>。有一些文献结合了多种专家评估法进行评估,并获得了更优的性能。熊向明等<sup>[60]</sup>使用层次分析法确定指标权重,模糊综合评判方案得分,提供了一种可评价方案优劣等级和最终得分的新思路;同样,杨伟龙等<sup>[61]</sup>将多人层次分析法(GAHP)和模糊综合评判相结合对潜艇作战方案进行评估,提高了评估的合理性和科学性。

### 2.5.2 解析法

解析法是根据运筹学理论,将方案评估指标与给定条件用函数关系解析表达,通过数学方法对效能方程进行求解,得到评估结果。

### 2.5.3 机器学习评估方法

机器学习评估方法又可以分为支持向量机评估法和神经网络评估法。传统的方案评估主要由专家参与评定,其结果往往依赖于人的主观因素,且评估效率低。而基于支持向量机(SVM)<sup>[62-63]</sup>和神经网络<sup>[64-68]</sup>的作战方案评估方法旨在通过训练样本的学习获得专家的经验 and 知识,在统计学习理论的基础上解决相应问题,从而降低评估过程中人为因素,更具科学性和客观性。

### 2.5.4 仿真实验评估法

仿真实验评估法是通过评估对象的特点,采用建模仿真的手段建立仿真模型,通过研究模型的仿真过程和仿真结果,根据数理统计方法进行评估<sup>[69]</sup>。

文献[70-71]通过兵棋推演评估法,将作战方案录入模拟仿真平台,对不同方案的模拟对抗数据结果进行对比分析,从而选出最优。荆涛<sup>[72]</sup>将情景分析法应用于未来作战情景的规划与构想,提出了“顶层设计、先推后仿、反复迭代”的作战实验方法,在战略层面

为作战方案评估确定边界、明确范围,在作战层面提炼制胜机理;文献[73-75]构建了基于熵权法和 TOPSIS 方法的作战推演方案评估模型,并通过仿真实验验证了其可行性,思路清晰且计算便捷,合理分配了人为主观因素和客观因素。

### 2.5.5 其他评估法

随着各个学科领域知识的发展,出现了一些新兴作战方案评估方法,例如博弈论评估法<sup>[76]</sup>、物元模型法<sup>[77]</sup>、探索性分析法<sup>[78]</sup>等,为作战评估提供了新的解决思路。

## 3 总结、分析与展望

有人/无人协同作战任务规划属于任务规划和人机协同的交叉领域,实现了有人系统和无人系统的深度融合,对于应对未来智能化战争的需求具有重要的研究价值。本文首先介绍了研究背景,接着从有人/无人系统出发,针对其人机关系及协同模式,从微观到宏观对其各个组成要素和相互关系进行分析,然后梳理任务规划流程,引出 5 个关键技术并分别对其全面综述。

最后,提出以下 3 点关于有人/无人系统协同作战任务规划的分析与展望。

1) 考虑人机关系的因素。随着机器自主性和智能化水平的提高,机器获得了更高的可信度,从而能够承担更多危险复杂的任务,所需的人机配比、有人系统和无人系统的比例也随之减小,有人/无人系统将逐渐走向人机融合。最终,在有人系统中人负责的工作将收敛于决策层,只在重大决策点需要有人介入;而无人系统最终将无限趋近于“无人”,即非必要不需要人的参与,进化成一个高度自主的智能系统。

2) 考虑协同模式的因素。随着科技的进一步发展,人机协同模式和有人/无人系统协同模式的种类将日益丰富和成熟。人和机器在 OODA 环中往往需要适应不同的协同模式,因此需要加强无人平台、有人平台和控制站等节点的人机权限动态分配技术以及人机交互技术,以方便任务规划过程中人以对应的角色介入机器的工作,实现高效协同、有序交互。

3) 对于任务规划的关键技术,在任务理解方面需要加深对机器学习领域,尤其是近两年飞速发展的大语言模型的探索,力求对上级指令实现高效、无误的理解;在任务分解方面可以从已有的定性和定量方法出发,充分利用人的作战经验和社会阅历,以任务为驱动开发更高效、智能的分解模式;任务分配在战前规划层面已发展较为成熟,现阶段应探究更快速的临机分配计算架构及其适配算法,以充分应对未来战争的高动态环境;在行动序列生成方面,需探究更全面的作战知

识表达方式以及快速的自动规划算法,并将二者有机结合以实现作战计划的高效制定;在方案评估方面应充分发挥人的“专家”优势,结合已有方法以及新兴的智能方法进行创新。

### 参考文献

- [1] 张宏宏,李文华,郑家毅,等. 有人/无人机协同作战: 概念、技术与挑战[J]. 航空学报,2023,40(1):296-313.
- [2] 陈杰,辛斌. 有人/无人系统自主协同的关键科学问题[J]. 中国科学:信息科学,2018,48(9):1270-1274.
- [3] 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.
- [4] 杜伟伟,陈小伟. 战术级任务规划方法研究综述[J/OL]. 兵工学报,2024:1-16[2024-03-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240102.1434.003.html>.
- [5] 张佳,刘清平,辛斌. 有人/无人系统协同作战的任务理解研究[J]. 火力与指挥控制,2022,47(10):52-58.
- [6] LIU Q P, ZHANG J, XIN B, et al. Overview of task understanding of unmanned combat systems[C]//2019 3rd International Symposium on Autonomous Systems (ISAS). Shanghai: IEEE, 2019:434-438.
- [7] 卢栋才. 服务机器人任务理解的关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.
- [8] CHEN D L, MOONEY R. Learning to interpret natural language navigation instructions from observations[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. San Francisco: AAAI, 2011:859-865.
- [9] BRANAVAN S R K, CHEN H, ZETTLEMOYER L S, et al. Reinforcement learning for mapping instructions to actions[C]//Proceedings of the Joint Conference of the 47th Annual Meeting of the ACL and the 4th International Joint Conference on Natural Language Processing of the AFNLP. Singapore: [s. n.], 2009:82-90.
- [10] 邹志刚,车万方,刘兴科,等. 基于角色的作战体系结构柔性设计方法框架[C]//第五届中国指挥控制大会论文集. 北京:电子工业出版社,2017:128-137.
- [11] 刘乾,鲁云军,陈克斌,等. 任务主体二元约束下作战任务分解 EVA 方法[J]. 系统工程与电子技术,2022,44(7):2201-2210.
- [12] 黄孝鹏,周献中. 复杂决策任务层级分解动态控制策略与算法[J]. 军事运筹与系统工程,2013,27(1):71-75.
- [13] 杨学锋,辛冀,孙强. 反潜直升机作战任务分解和攻潜技术指标研究[J]. 直升机技术,2017(1):39-44.
- [14] 郭峰,王树坤,孟凡凯. 基于任务分解的合成营作战编组规划模型[J]. 指挥控制与仿真,2017,39(5):18-21.
- [15] 俞锦涛,肖兵,崔玉竹. 基于扩展 HTN 的不确定作战任务分解[J]. 火力与指挥控制,2023,48(9):20-25.
- [16] 萧毅鸿,周献中,张铁. 扩展层级任务网络规划的变粒度作战任务分解策略[J]. 火力与指挥控制,2011,36(7):119-122.
- [17] 邸江芬,张勇,李晓琴,等. 基于元任务字典的无人集群作战任务分解技术研究[C]//2021 年无人系统高峰论坛(USS 2021)论文集. 长沙:[出版者不详], 2021:125-129.
- [18] 耿松涛,操新文,李晓宁,等. 基于扩展层级任务网络的联合作战电子对抗任务分解方法[J]. 装甲兵工程学院学报,2018,32(5):8-13.
- [19] 庞辉,方宗德. 网络化协作任务分解策略与粒度设计[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(3):425-430.
- [20] 董涛,刘付显,李响. 内聚度和粒度在作战任务分解评估中的应用[J]. 电光与控制,2012,19(12):14-17.
- [21] 王伟,刘付显. 基于任务关系矩阵的作战任务分解优化[J]. 军事运筹与系统工程,2017,31(4):9-14.
- [22] 王伟,刘付显. 基于协同相关度的作战任务分解优化[J]. 火力与指挥控制,2017,42(11):107-110.
- [23] 常青,刘德生,杨阳. 作战任务分解策略与规范化描述方法研究[J]. 指挥控制与仿真,2023,45(5):84-91.
- [24] 万路军,姚佩阳,孙鹏. 有人/无人作战智能体分布式任务分配方法[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(2):310-316.
- [25] 伏克松. 基于体系结构方法的有人/无人作战体系任务分配研究[D]. 长沙:国防科技大学,2019.
- [26] FUJITA S, MASUKAWA M, TAGASHIRA S. A fast branch-and-bound algorithm with an improved lower bound for solving the multiprocessor scheduling problem[C]//Ninth International Conference on Parallel and Distributed Systems. Taipei: IEEE, 2002:611-616.
- [27] 叶媛媛,闵春平,沈林成,等. 基于满意决策的多 UAV 协同目标分配方法[J]. 国防科技大学学报,2005,27(4):116-120.
- [28] LEVCHUK G M, LEVCHUK Y N, PATTIPATI K R, et al. Mapping flows onto networks to optimize organizational processes[C]//Proceedings of the 7th Command & Control Research & Technology Symposium. [S. l.]: [s. n.], 2002: 11-14.
- [29] 柳文林,潘子双,韩维,等. 有人/无人机协同作战运用研究现状与展望[J]. 海军航空大学学报,2022,37(3):231-241.
- [30] 王宇琦,张安,毕文豪. 有人/无人机编队打击时敏目标任务分配[J]. 电光与控制,2018,25(8):7-10.
- [31] SHU Z, WANG W P, WANG R. Design of an optimized architecture for manned and unmanned combat system-of-systems: formulation and coevolutionary optimization[J]. IEEE Access, 2018, 6:52725-52740.

- [32] 胡月,丁萌,姜欣言,等.一种面向有人/无人直升机协同打击的地面目标任务分配方法[J].航空科学技术,2019,30(10):64-69.
- [33] 王勋,姚佩阳,孙昱,等.文化算法在有人/无人机协同作战目标分配中的应用[J].空军工程大学学报(自然科学版),2016,17(2):21-25.
- [34] BAKOLAS E, LEE Y. Decentralized game-theoretic control for dynamic task allocation problems for multi-agent systems[C]//2021 American Control Conference (ACC). New Orleans:IEEE, 2021:3228-3233.
- [35] WANG J S, WANG J, HAN Q L. Multivehicle task assignment based on collaborative neurodynamic optimization with discrete Hopfield networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(12): 5274-5286.
- [36] 刘跃峰,张安.有人机/无人机编队协同任务分配方法[J].系统工程与电子技术,2010,32(3):584-588.
- [37] 刘宏强,魏贤智,付昭旺,等.有人机/无人机编队协同攻击任务分配方法研究[J].电光与控制,2013,20(6):16-19.
- [38] 万路军,姚佩阳,周翔翔,等.有人/无人作战智能体分布式协同目标分配方法[J].系统工程与电子技术,2014,36(2):278-287.
- [39] YANG Z R, BAI L T, CHE K, et al. Collaborative task allocation for multi-UAV based on genetic algorithm[C]//China Aeronautical Science and Technology Conference. Singapore:Springer, 2023:35-46.
- [40] KIM M H, BAIK H, LEE S. Response threshold model based UAV search planning and task allocation[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 75:625-640.
- [41] WU H, LI H, XIAO R, et al. Modeling and simulation of dynamic ant colony's labor division for task allocation of UAV swarm[J]. Physica A:Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 491:127-141.
- [42] 段海滨,张岱峰,范彦铭,等.从狼群智能到无人机集群协同决策[J].中国科学:信息科学,2019,49(1):112-118.
- [43] 曹占广,于屏岗,尹宗润,等.基于复合约束的作战行动序列生成与执行控制方法[J].火力与指挥控制,2021,46(9):105-112.
- [44] HUANG Q, MA X M, LIU K, et al. Autonomous reconnaissance action of swarm unmanned system driven by behavior tree[C]//2022 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Guangzhou: IEEE, 2022: 1540-1544.
- [45] 赵英男.行动序列本体的分层任务网络规划方法研究[D].长春:吉林大学,2023.
- [46] 董浩洋,张永亮,齐宁,等.基于综合势能的作战行动序列生成方法研究[J].军事运筹与系统工程,2020,34(3):11-18.
- [47] 殷阶,王本胜,朱旭.信息作战行动序列规划随机博弈模型及求解方法[J].指挥信息系统与技术,2016,7(2):7-12.
- [48] 杜正军,陈超,姜鑫.基于影响网络与序贯博弈的作战行动序列模型与求解[J].系统工程理论与实践,2013,33(1):215-222.
- [49] 杜正军,陈超,姜鑫.基于影响网络与不完全信息多阶段博弈的作战行动序列模型及求解方法[J].国防科技大学学报,2012,34(3):63-67,84.
- [50] 陈希亮,曹雷,沈驰.基于深度逆向强化学习的行动序列规划问题研究[J].国防科技,2019,40(4):55-61.
- [51] SURDU J R, KITTKA K. Deep green: commander's tool for COA's concept[J]. Computing, Communications and Control Technologies, 2008, 34(8):45-51.
- [52] DARR T P, BENJAMIN P, MAYER R. Course of action planning ontology[C]//Ontology for the Intelligence Community Conference (OIC 2009). Fairfax:George Mason University, 2009:17135422.
- [53] 潘泽东,刘付显.多属性决策的野战防空作战部署方案评估[J].现代防御技术,2018,46(1):115-119.
- [54] 杨利平,王颖龙,谢磊峰.多属性决策在防空作战部署方案评估中的应用[J].火力与指挥控制,2009,34(5):72-74.
- [55] 岳江锋,谢京华.反无人机作战方案评估方法研究[J/OL]. 现代防御技术, 2023:1-9 [2024-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3019.TJ.20231122.1151.008.html>.
- [56] 宋树成,刘刚,毛德军,等.基于模糊二元对比决策的联合作战对舰突击方案评估[J].指挥控制与仿真,2022,44(2):59-62.
- [57] 田福平,汶博,熊志纲.基于模糊综合评判与作战模拟的作战方案评估[J].指挥控制与仿真,2016,38(3):28-32.
- [58] 李恒,刘毅,运士伟.一体化联合作战条件下装甲机械化部队决策方案评估[J].洛阳工业高等专科学校学报,2006,(2):32-33,43.
- [59] 宫琳,徐任杰,谢剑,等.不确定信息下融入粗糙集理论的作战方案评估优选方法[J].兵器装备工程学报,2022,43(8):203-210.
- [60] 熊向明,严振华,郭小龙.空降作战中电子对抗作战方案评估[J].舰船电子对抗,2022,45(4):45-50.
- [61] 杨伟龙,纪金耀,唐春烨.基于 GAHP 的模糊综合评判法在潜艇作战方案评估中的应用[J].指挥控制与仿真,2009,31(4):68-72.



- [62] 廖睿,唐灿华. 基于支持向量机的作战方案评估[J]. 电脑知识与技术,2010,6(10):2446-2448.
- [63] 丁晓剑,丁冉. 基于 SVR-RFE 的作战方案评估指标选择方法[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2015,33(4):43-48.
- [64] 王静岩,郑建军,吴裕树. 一种基于神经网络的作战方案评估方法[J]. 军事运筹与系统工程,2005,20(1):57-61.
- [65] 高桂清,施旭鑫,李治,等. 基于 BP 神经网络的导弹作战方案评估方法[J]. 四川兵工学报,2011,32(11):6-9.
- [66] 刘祖煌,程启月. 径向基神经网络的联合作战方案评估仿真[J]. 火力与指挥控制,2013,38(1):14-17.
- [67] 孔衍,刘学,杨建. 基于遗传神经网络的联合作战方案评估[J]. 火力与指挥控制,2019,44(5):22-25,30.
- [68] SUN X T, HU Y, QIN Y C, et al. Risk assessment of unmanned aerial vehicle accidents based on data-driven Bayesian networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 248:110185.
- [69] 刘翔宇,赵洪利,杨海涛. 作战方案评估方法综述[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(8):79-84.
- [70] 秦园丽,张训立,高桂清,等. 基于兵棋推演系统的作战方案评估方法研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(6):92-95.
- [71] 殷来祥,曹毅,李志强. 联合作战兵棋推演综合分析评估框架[J]. 系统仿真技术,2021,17(3):185-190.
- [72] 荆涛. 情景分析法在作战方案评估中的应用研究[J]. 系统科学学报,2019,27(4):65-69.
- [73] 汪汝根,韩晓明,刘洪引,等. 地空攻防对抗作战推演方案评估模型研究[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(10):39-43.
- [74] 刘子恒,赵彦东,孟丽洁,等. 登陆作战推演方案评估模型研究[J]. 火力与指挥控制,2023,48(5):116-123,129.
- [75] 李欣龙,郭圣明,贺筱媛. 基于作战实验的方案评估方法研究[J]. 指挥控制与仿真,2022,44(3):93-98.
- [76] 刘飞,张晓杰,闫石. 基于博弈理论构建作战方案评估方法[C]//第三届中国指挥控制大会论文集(下册). 北京:国防工业出版社,2015:336-340.
- [77] 王凤山,杨志宏,郭子曜. 基于改进熵权物元模型的作战方案评估[J]. 指挥控制与仿真,2021,43(2):82-90.
- [78] 耿松涛,刘雅奇. 基于探索性分析的电子对抗作战方案评估方法[J]. 军事运筹与系统工程,2013,27(2):34-38.

## 下 期 要 目

基于多智能体强化学习的防空编队部署方法

IRNet:基于 Anchor-Free 的地面红外目标检测方法

基于事件触发机制的随机时延无人机编队控制

偏振融合的红外船舶弱小目标跟踪算法

激光雷达与机器视觉融合的海面目标检测方法

基于 FACET 滤波加权局部对比度的红外小目标检测

基于数据驱动的红外弱小机动目标检测与跟踪

基于改进 YOLOv7 的 SAR 图像舰船目标检测方法

改进 YOLOv7 的无人机图像小目标检测算法

基于 AUKF-NMPC 算法的无人船轨迹跟踪控制

基于改进 YOLOv5 的无人机航拍图像目标检测

改进特征金字塔网络的小目标检测

基于 Transformer 的尺度自适应高光谱目标跟踪器

多尺度渐近特征融合的遥感目标检测算法研究

融合彩色增强信息的暗通道去雾方法

基于改进 YOLOv8 的无人机航拍目标检测算法