

基于PREA环的平行无人指挥控制系统

李雪松^{1†}, 李清伟¹, 罗子娟¹, 王飞跃^{2,3}, 费爱国¹

(1. 中国电子科技集团公司第二十八研究所 信息系统工程重点实验室, 江苏 南京 210007;

2. 中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100080;

3. 国防科技大学 军事计算实验与平行系统技术研究中心, 湖南 长沙 410073)

摘要: 无人作战表现出高动态性、高复杂性和不确定性的特点, 传统指挥控制系统难以满足无人作战全自主、自适应、抗毁伤的需求. 在平行军事和作战指挥控制活动的筹划-准备-执行-评估(PREA)环理论的指导下, 本文基于无人作战体系, 对无人系统的指挥控制架构进行研究, 提出了基于PREA环的平行无人指挥控制系统. 基于观察评估活动实现物理战场描述和作战效能评估; 基于预测规划活动实现作战决策规划和方案仿真推演; 基于计划指导活动实现计划指令生成和作战行动准备; 基于执行监控活动实现自主控制执行和作战行动监控. 通过对观察评估智能、预测规划智能、计划指导智能和执行监控智能相关技术和方法进行研究, 实现无人作战的信息化、自主化、智能化指挥控制.

关键词: 指挥控制系统; PREA环; 无人作战; 平行军事体系

引用格式: 李雪松, 李清伟, 罗子娟, 等. 基于PREA环的平行无人指挥控制系统. 控制理论与应用, 2025, 42(3): 627 – 634

DOI: 10.7641/CTA.2023.30234

Parallel unmanned command and control system based on PREA loop

LI Xue-song^{1†}, LI Qing-wei¹, LUO Zi-juan¹, WANG Fei-yue^{2,3}, FEI Ai-guo¹

(1. National Key Laboratory of Information Systems Engineering,

The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing Jiangsu 210007, China;

2. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

3. Research Center of Military Computational Experiments and Parallel Systems, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Unmanned combat shows the characteristics of high dynamics, high complexity and uncertainty, and the traditional command and control system does not satisfy the full autonomy, self-adaptation and damage resistance of unmanned combat. Under the guidance of parallel military and planning, readiness, execution and assessment (PREA) loop theory, this paper studies the command and control architecture of unmanned system, and proposes a parallel unmanned command and control system based on PREA loop. Observing and assessing enable physical battlefield description and operational effectiveness assessment; Planning realize decision-making and scenario simulation deduction; Directing and Readiness enable planning instruction generation and combat operational readiness; Supervisory control enable autonomous control of execution and monitoring of combat operations. Through the research on observing and assessing intelligence, planning intelligence, directing intelligence and supervisory control intelligence, the informatization, autonomy and intelligent command and control of unmanned combat are realized.

Key words: command and control systems; PREA loop; unmanned combat; parallel military system of system

Citation: LI Xuesong, LI Qingwei, LUO Zijuan, et al. Parallel unmanned command and control system based on PREA loop. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(3): 627 – 634

1 引言

无人作战是指在网络信息体系支撑下,以无人装备为主要作战力量的作战行动样式。从近期全球局部冲突的战争形态来看,无人作战已逐渐成为未来战场基本作战形态,各型军用无人装备被广泛用于侦察监视、空中预警、目标指示、诱饵欺骗等方面,成为智能化军事对抗中的核心力量,直接决定新质作战能力的生成。

指挥控制系统是无人作战战斗力的倍增器,将成为体系对抗的重点。目前无人作战主要以传统指挥控制模式为主,依赖于作战人员的地面指挥控制,在通信干扰、导航拒止等情况下,基本丧失作战能力。因此,在高动态、高复杂和不确定的强对抗战场环境下,传统指挥控制系统难以满足无人作战全自主、自适应、抗毁伤的需求。

美陆、海、空各军种,在多域作战、分布式作战等新式作战概念的牵引下,面向无人作战积极开展指挥控制系统设计、研发、集成、验证等全流程科研机制的改进^[1-2]。美海军基于动态分布式作战模式提出了综合火控-防空(naval integrated fire control-counter air, NIFC-CA)项目,发展综合指挥控制系统,核心思想是通过增强各无人平台之间的联系,构建完整的战场态势感知和目标协同定位,提升体系综合作战能力。美空军公布了体系综合技术与试验(system of systems integration technology and experimentation, SoSITE)项目,该项目的发展重点是将杀伤链的职能分散到有人和无人平台构成的作战网络中,采用开放系统架构将人机物系统快速集成到有人和无人平台上,运用受控的自主性协调分布式效应,支持异构系统并具有自适应能力,降低脆弱性。美陆军启动战斗管理指挥与通信(battle management command and contro, BM-C2)项目,该系统旨在整合地面、空中及天基传感器,寻求新型深度感知能力,为多域作战和远程精确火力提供支持。

从美军的无人作战指挥控制系统来分析,传统的系统工程理论及顶层设计方法无法有效指导未来无人作战复杂开放式指挥控制系统体系结构设计,应着眼发挥体系需求的牵引作用,深入研究复杂开放式指挥控制系统体系运行机理和智能设计技术,提升体系结构设计及验证能力,形成智能化、敏捷化、可组态、可重构的指挥控制系统。

针对无人作战指挥控制的过程机理和关键问题,国内学者也提出了基于经典理论观察-判断-决策-行动(observe, orient, decide, act, OODA)环的无人作战指挥控制系统架构。根据实时接收的战场情报信息,对各作战阶段的子任务进行辅助决策,实时更新战场态势,生成指挥、支援、协同等关系并进行协同决策,最后向无人装备下达行动指令。于水星等^[3]基于无人集群作战体系,对无人系统协同指控的机制进行了研究。宋晓程等^[4]设计了知识和数据混合OODA循环驱动决策架构。黄美根等^[5]基于云协同理念提出前线无

人作战流与后方有人指控云有机融合的云流化指控概念,设计指控资源云服务模式。

虽然基于OODA环的无人作战指挥控制系统在一些特定作战场景下取得了不错的效果,但是它仍然存在以下不足:1)无人指挥控制主要是基于作战意图,主动作战的过程,而不是基于观察对态势做出判断,被动应战;2)无人作战存在不确定性,很难通过OODA环获取精准态势做出准确判断;3)在高动态复杂的无人战场环境下,OODA环离散的决策活动难以即时响应;4)通过无人集群的自主协同来塑造战场态势是制胜的关键,而不仅仅是介入对手的OODA环。

针对国内外相关无人作战指挥控制系统的启发和存在的主要问题,在平行军事和作战指挥控制活动的筹划-准备-执行-评估(planning, readiness, execution, assessment, PREA)环理论的指导下^[6-7],本文基于无人作战体系,提出了基于PREA环的平行无人指挥控制系统架构,实现在无人指挥控制领域平行军事智能和PREA环的融合及应用。

2 平行军事体系与PREA环

2.1 平行军事体系

如图1所示,平行军事体系是指利用实际军事组织及人员系统等和相应人工军事组织和代理系统等组合,通过实际与人工虚实互动的执行方式来完成特定军事任务及目标的一种组织与行动方法,其核心理念是人工系统(artificial systems, A)、计算实验(computational experiments, C)、平行执行(parallel execution, P)构成的ACP理论和平行数字四胞胎概念^[8-9]。

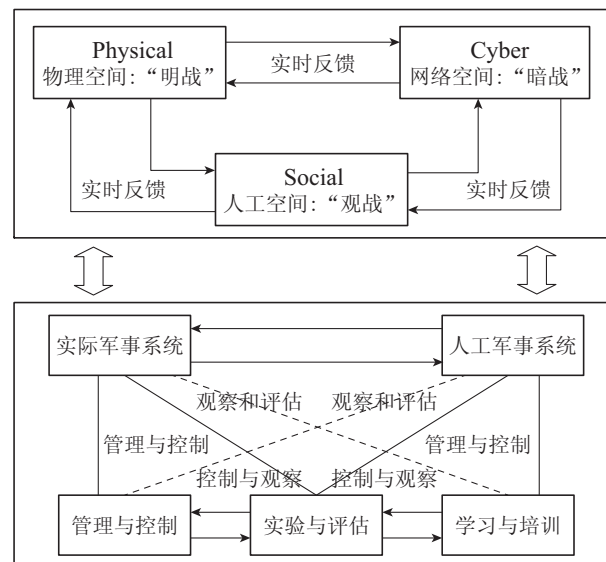


图1 平行军事体系的理论结构

Fig. 1 The theoretical structure of the parallel military system of system

基于平行军事体系的平行指挥控制通过闭环反馈式的军事知识自动化实现了“明战”、“暗战”和“观战”的有机融合,构造了实际军事组织与系统和人工军事组织与系统并行互动的平行军事系统,建立了新形势

下的指挥控制理论与方法,使得以无人作战为主线的军事资源规划、军事执行系统、军事过程控制等概念的落实和实施成为可能^[6]。

ACP理论是解决复杂系统问题的有效手段^[10],具体实施步骤包括:构建与实际物理系统相对应的人工系统,实现以实映虚;然后,在人工系统中进行计算实验,对复杂问题观察评估;最后,基于虚实结合的平行执行作用到实际系统和人工系统进行管理与控制。

平行数字四胞胎建立了物理域、信息域以及认知域的物理、描述、预测和引导4种状态^[11-12],从物理状态到描述状态的转换对应于物理域到信息域的映射,它体现了物理世界的抽象和表述;从描述状态到预测状态的转换对应于信息域到认知域的升华,它表示对抽象概念的预测和理解;从预测状态到引导状态的转换对应于认知域到信息域的指示,它体现了理解构想之后的指导和计划;从引导状态到物理状态的转换对应于从信息域到物理域的管理,它体现了对物理世界的执行和控制。

无人作战的指挥控制系统可以引入ACP方法和平行数字四胞胎来进行开放复杂问题的有效解决。一方面,ACP方法可以对军事数据、信息和知识进行有效描述和集成,再不断迭代计算实验,产生新的知识,最终实现对实际系统的指挥和控制,体现了综合集成论的思想;另一方面,平行数字四胞胎通过物理域、信息域和认知域的闭环处理过程很好的契合了无人作战的指挥控制流程。

2.2 PREA环理论

PREA环一般是指军事指挥控制活动的筹划、准备、执行和评估4个环节^[13],它是一个闭环并且持续运行的过程,如图2所示。相较于OODA环^[14],它具有以下特点:1) PREA环从筹划环节开始,以主观作战意图为基础,更能将战略意图和战术行动紧密结合;2) 虽然态势具有很大不确定性,但是在PREA环执行过程中,态势会随着时间尺度的变小而消减,更遵循战争迷雾消散规律;3) PREA环的决策活动是连续的,在作战的不同阶段有不同的决策方式,更具自适应性;4) PREA环目的是设计战争,以初始态势开始,通过期望目标进行牵引,对战场态势进行塑造。

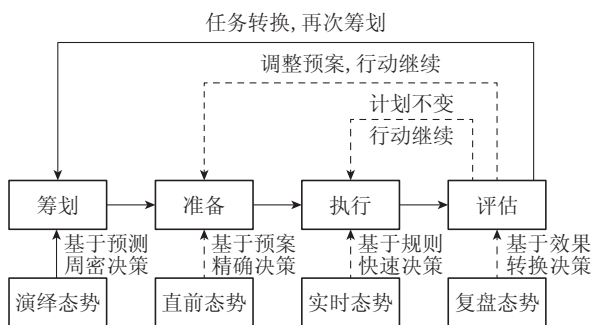


图2 PREA环的理论结构

Fig. 2 The theoretical structure of the PREA loop

PREA环可以应用于无人作战指挥控制系统,塑造4种态势和4个阶段的决策方式^[15]。基于历史信息和数据中获取演绎态势,然后,通过演绎态势和作战意图进行周密决策形成作战方案;基于实时战场环境信息和方案预测获取直前态势,基于直前态势和作战方案进行精确决策形成计划指导;基于战场传感器进行数据感知处理融合获取实时态势,基于实时态势和计划规则进行快速决策形成控制指令;基于作战过程回顾和行动分析获取复盘态势,基于复盘态势和作战效果进行观测评估。

3 基于PREA环的平行无人指控架构

随着信息化和智能化技术的发展,无人作战相较于传统有人作战系统,在作战模式和作战应用上发生了革命性的变化^[16]。无人作战主要表现出遂行任务多样化、指挥决策智能化、作战力量集群化、作战时空全域化的特点。无人作战的需求和能力变化也推动了无人作战指挥控制系统的体系结构变化。

要形成对敌非对称优势,实现无人作战指控对抗的压制,未来无人作战的指挥控制系统必须具备自主智能、即时决策、协同抗毁的特点。基于以上需求,本文提出了基于PREA环的平行无人指挥控制总体架构。

如图3所示,平行无人指挥控制系统包括无人作战在物理域、信息域和认知域的4种活动和4种状态。4种活动是指预测规划活动、计划指导活动、执行监控活动和观测评估活动,分别对应于PREA环的筹划、准备、执行和评估环节。4种状态是指物理状态、描述状态、预测状态和引导状态。无人作战的平行指挥控制过程是在上述4种活动的支撑下4种状态转换的过程。

平行无人指挥控制的预测规划活动主要是事件驱动,基于对事件的理解和作战意图的分析,开展作战筹划,形成无人作战行动方案,实现从描述状态到预测状态的转换;计划指导活动主要是方案驱动,基于既定作战方案和直前态势,开展直前准备,形成无人平台的行动控制指令,实现从预测状态到引导状态的转换;执行监控活动主要是指令驱动,基于实时战场态势和控制指令,开展无人平台的执行监控,实现从引导状态到物理状态的转换;观察评估活动主要是数据驱动,通过对数据分析和态势复盘进行无人作战效能评估和元战场同步,实现从物理状态到描述状态的转换。

3.1 预测规划活动

如图4所示,平行无人指挥控制从作战意图出发,基于预先从历史演绎态势构建的无人作战元战场开展作战筹划,设想从初始态势往最终态势转换的多种可能路径,生成可行的作战行动方案,基于元战场进行行动方案的平行仿真推演,选取出最合理的方案,实现描述状态到预测状态的转换,这一过程是无人作战行动的“谋势”阶段。

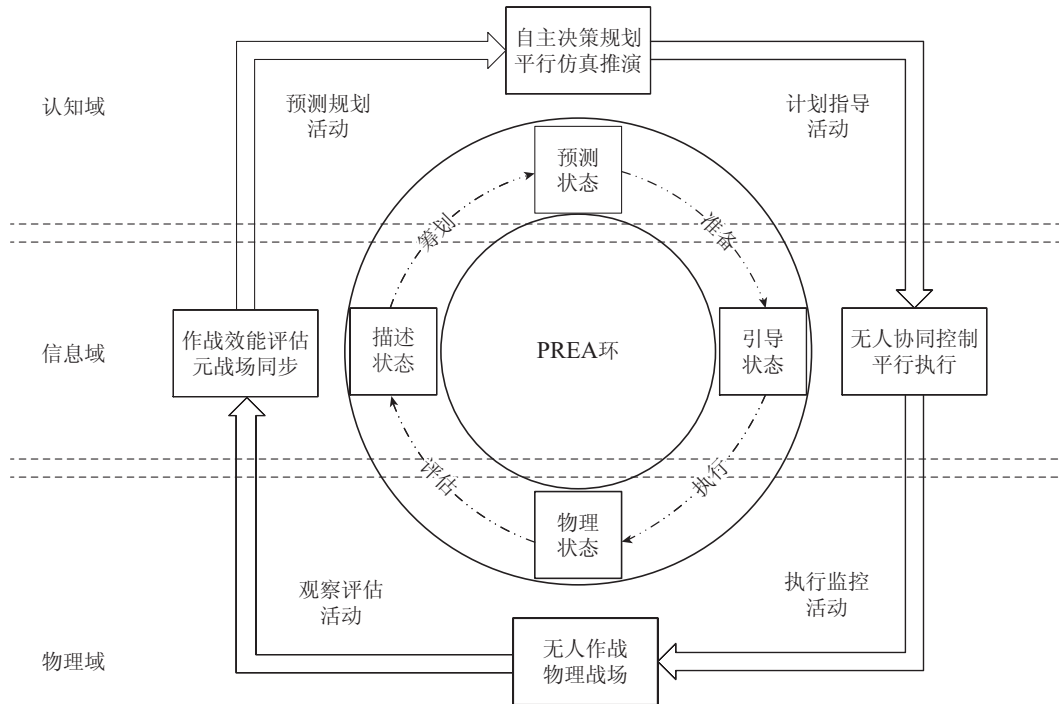


图3 基于PREA环的平行无人指挥控制总体架构

Fig. 3 Overall architecture of parallel unmanned command and control based on PREA loop

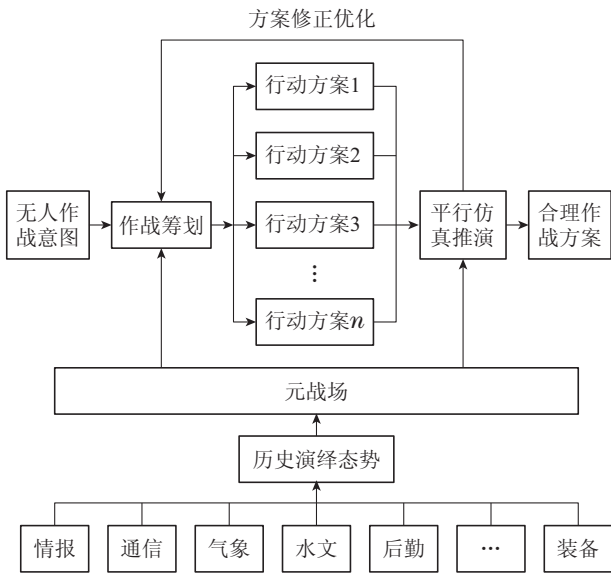


图4 平行无人指挥控制系统的预测规划活动

Fig. 4 Planning of parallel unmanned command and control systems

元战场是物理战场和虚拟战场共同构建的军事活动空间,其中虚拟战场包括虚拟的人机等。从物理战场扩展到元战场是无人作战设计战争、塑造态势、取得胜利的有效支撑手段。通过军事物联网、增强现实等前沿技术,对情报、通信、气象等历史演绎态势数据进行采集、处理和融生,构建元战场空间。

作战筹划是根据作战意图对无人作战的行动开始、行动过程和行动终止进行设计的过程,包括对初始态势、过程态势和终止态势的设计。它的目的是实

现无人自主决策和可行方案生成。具体实施过程如下所示:以作战意图为牵引,以可用兵力武器装备资源、敌情、战场环境以及交战规则等为约束,输出多种作战行动方案,它是一个周密的演进决策过程。无人作战筹划具有以下特点:现实针对性强,具有很强的指向性和目的性;时效性强,无人作战时间短,节奏快;关联性强,与作战任务、无人作战平台等衔接紧密,一体化程度高。

平行仿真推演是指基于元战场空间进行作战方案的演绎推理,筛选优化获取更合理作战方案的过程。它主要通过元战场空间中多智能体博弈对抗和实时评估分析来实现。

3.2 计划指导活动

如图5所示,平行无人指挥控制的计划指导活动包括基于部署转入的直前准备、基于直前态势的计划评估和对下级的计划指导3个方面。基于作战决策方案,进行部署转入,实现无人作战相关体系构建和不同无人平台的战斗等级转进,进而通过直前准备,生成各种作战计划;基于直前态势进行作战计划评估,实现作战资源和作战要素的协调规划;在作战计划确定之后,对下级实施计划指导工作,实现从预测状态到引导状态的转换。这一过程是无人作战行动的“布势”阶段。

直前态势包括实时态势和预测态势,预测态势是指基于实施态势进行的作战要素预测信息。相较于预测规划活动的演绎态势,直前态势更加的可靠、可靠。



图 5 平行无人指挥控制系统的计划指导活动

Fig. 5 Directing and readiness of parallel unmanned command and control systems

计划评估主要是指基于直前态势,发现行动计划中的作战资源不协调和作战要素冲突问题,其中作战资源包括武器、载荷等,作战要素包括电磁频谱、时空、航线等.然后通过自适应协同的方式进行协调分配,重新生成计划.

3.3 执行监控活动

如图6所示,平行无人指挥控制的执行监控活动主要是基于行动计划,通过行动指令自动生成相关技术生成多种行动指令,在元战场空间实现无人作战行动的平行执行;同时,基于战场实时态势更新进行实时状态的监控,通过战术、技术和程序调整手段,以期望态势为目标,进行实时态势控制,实现从引导状态到物理状态的转换,这一过程是“控势”阶段.

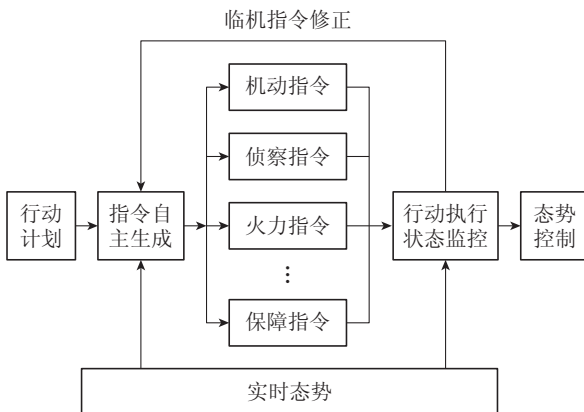


图 6 平行无人指挥控制系统的执行监控活动

Fig. 6 Supervisory control of parallel unmanned command and control systems

作战行动指令自主生成是指通过智能化手段对行动计划进行细化、分解、程序指令生成的过程.作战行动指令直接作用到物理世界的兵力实体上,进行行动的执行控制过程.

态势控制是指根据实时态势变化,对于作战资源、作战要素和作战效果的冲突问题进行临机协调控制,行动计划不发生改变,仅仅是对行动指令进行修正.如果需要对作战行动计划发生改变,则依据观测评估活动的结果转入新的PREA环对应过程.

3.4 观测评估活动

如图7所示,平行无人指挥控制的观测评估活动包括元战场数据同步、数据分析和评估转换3个方面.基于战场态势数据、武器装备状态数据等信息,实现元战场与物理战场的同步;基于行动效果和复盘态势进行数据分析,开展作战过程的综合评估,包括决策方案评估、行动计划评估、控制指令评估等,然后形成作战评估报告,基于评估结果进行无人作战转换决策.这一过程是实现从物理状态到描述状态的转换,是“度势”阶段.

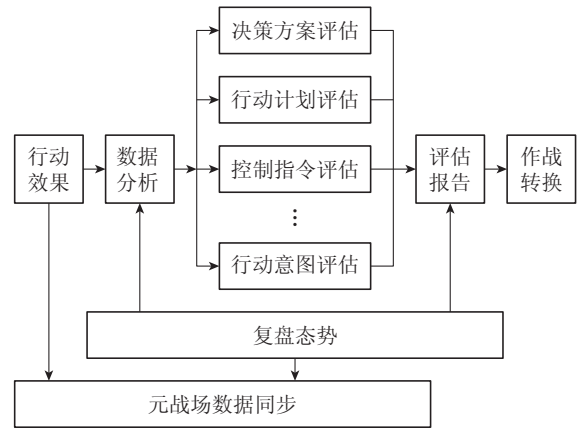


图 7 平行无人指挥控制系统的观测评估活动

Fig. 7 Observing and assessing of parallel unmanned command and control systems

基于虚实平行执行的行动效果和复盘态势进行作战效能评估,评估从作战行动开始的各个作战阶段,以及整个作战过程的综合评估.

作战转换是指基于评估活动进行的转换决策,包括以下3种情况:作战计划执行成功,达到期望态势,转入执行环节,继续执行作战计划;作战计划执行未达预期态势,出现较小偏差,转入准备环节,改变行动计划;态势变化结果与期望态势差距较大,转入筹划环节,重新制定作战方案.它体现了从描述状态往其他3种状态的自主选择过程.

4 关键技术和方法

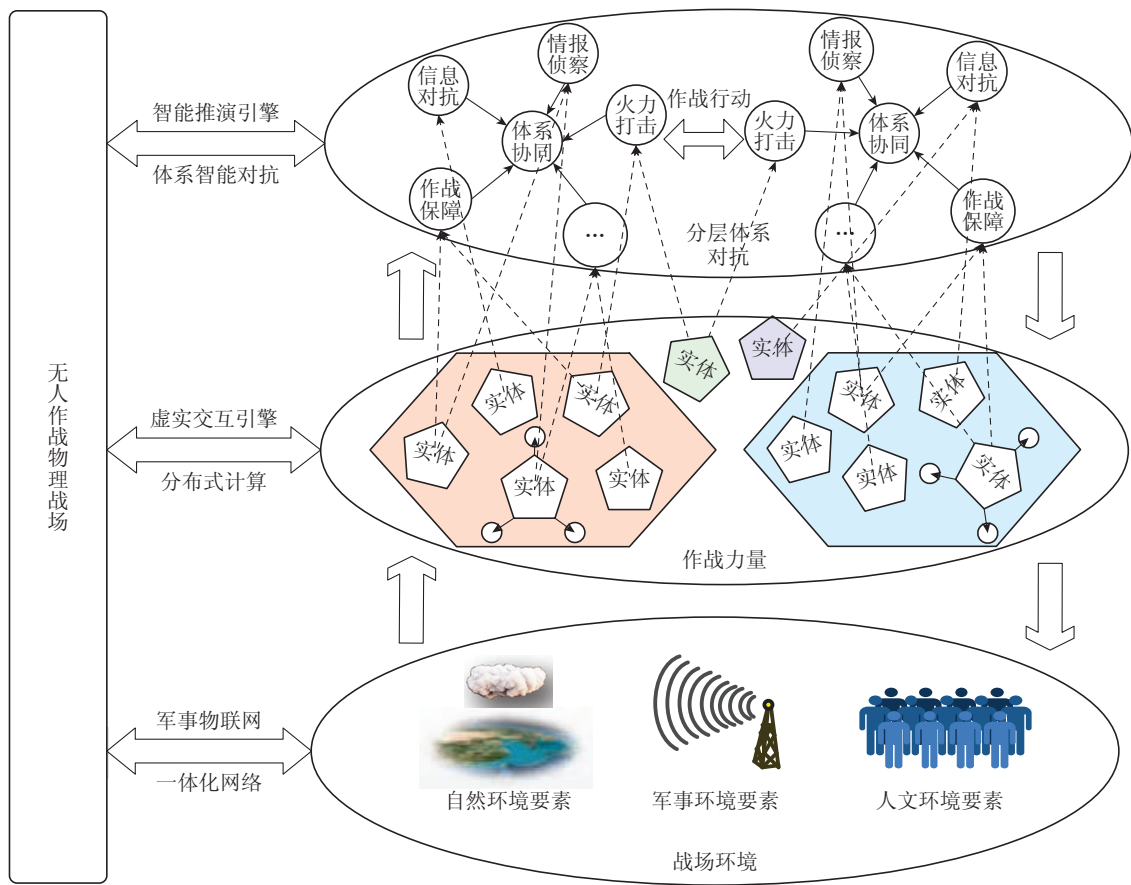
4.1 基于虚实融生的元战场构建与同步

元战场构建与同步融合了虚拟现实、大数据、物联网和人工智能等前沿技术,是构建平行无人指挥控制系统的关键技术^[17-18].通过元战场构建与同步,进行无人作战的各个阶段的态势描述和辅助决策,解决了复杂无人指挥控制系统可观测、可推演、可控制和

可求解的问题,主要体现在以下3个方面:第一,无人作战的物理战场空间实体对象构造的对抗体系具有高复杂性,元战场通过对战场对象和战场要素集合形成的状态空间进行描述,并跟随物理战场演进而同步变化,建立了战场各部分组成和整体战场空间的关联映射,可以有效降低系统的复杂性;第二,元战场还可以综合战场对象和战场要素的状态、行为、指控关系,通过博弈对抗模型,进行推演决策,实现不同作战阶段的自主决策;第三,元战场可以预测模拟智能蓝方模型,在不完全信息的条件下进行数据和知识的混合推理,减少部分由于战争迷雾造成的不确定性。

如图8所示,本文从战场环境、作战力量和分层体系对抗3个维度构建了基于虚实融生的元战场框架。

虚拟战场环境由军事环境要素、人文环境要素和自然环境要素构成,通过军事物联网接收物理战场的实时数据,并构建物理战场与虚拟战场的一体化网络,实现虚实同步。同时在虚拟战场环境上叠加作战意图、作战力量和作战威胁等信息,形成无人作战态势。实体是无人作战体系的最小作战单位,可以是单个武器或无人装备,用于构造红方、蓝方和第三方的作战力量。作战力量可以通过虚实交互引擎与物理战场的实际装备进行互联互通,并基于分布式计算具备自主协同对抗的智能化能力。基于作战力量中的不同实体可以组织形成情报侦察、火力打击、作战保障等能力要素,能力要素融合形成协同作战体系,通过智能推演引擎和体系智能对抗可以实现作战决策和作战行动。



基于虚实融生的元战场
图 8 基于虚实融生的元战场

Fig. 8 Meta-battlefield of virtual reality

4.2 基于多智能体对抗的平行仿真推演

平行仿真推演是指基于作战环境、作战目的和作战成员等约束条件,通过多智能体的博弈对抗挖掘致胜机理,获取胜利可能路径的知识,并基于复盘回溯进行自主决策能力提升的过程^[19]。

如图9所示,本文结合数据层、模型层、服务层和应用层,构建了基于多智能体对抗的平行仿真推演框架。平行仿真推演以作战数据和仿真模型为基础,以

博弈对抗引擎为核心,支持行动序列生成、方案效果评估和战法策略推荐等应用。

作战数据包括战场环境数据、作战基础数据、战法规则和裁决评估数据等,其中战法规则包括人工录入的专家经验知识和历史博弈对抗过程产生的战法规则;仿真模型包括红蓝多智能体模型、环境模型等;博弈对抗引擎包括过程驱动、状态监控、交互管理和回溯评估,负责多智能体对抗过程中的时间推荐、模

型调度、运动控制和管理。基于“数据+算法”实现无人作战的相关决策规划应用,通过作战意图分析和强化学习对抗,探索从初始态势到达期望态势的可能路径,实现行动序列生成;通过对多种行动方案进行动态推演评估,进行筛选优化,形成更合理的作战方案;通过行动空间搜索,发现动态推演过程中可能存在的事件发展,预测和了解敌方行动,形成战法策略推荐。

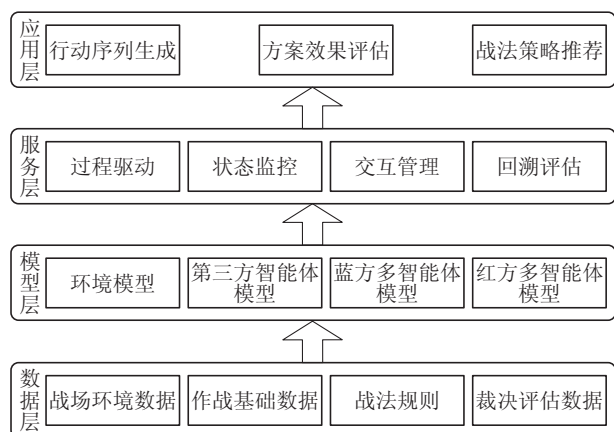


图9 基于多智能体对抗的平行仿真推演

Fig. 9 Parallel simulation deduction based on multi-agent confrontation

4.3 基于自适应协同的行动指令自主生成

无人作战行动指令自主生成是指对行动方案、行动计划细化分解的过程,一般在计划生成后开展,也可以在作战执行过程中根据战场态势变化临机生成指令。为了使无人作战指挥控制系统能应对高复杂、高动态的战场环境,构建基于自适应协同的行动指令自主生成框架,将作战意图、战场态势信息和作战方案计划作为输入,经过任务目标分解、需求能力匹配和行动链路优化等技术,不断细化形成满足作战约束可实施性和相关行动指令关联性的指令集,应用于各武器平台的行动控制指令需要经过协同战法的干预,使其具备协同特征;基于对战场环境的实时态势变化,对生成的行动控制指令进行评估,不断优化调整行动指令。

4.4 基于平行执行的作战效能评估

作战评估是实现作战期望态势、闭环控制作战过程的重要环节。传统作战评估方式大多数通过特定规则进行逻辑推理,不具备自适应重组的能力^[20]。因此,本文结合ACP理论提出了基于平行执行的作战效能评估方法,以适应无人作战指挥控制的需要。

基于平行执行的作战效能评估方法通过虚拟战场和物理战场的嵌入式实时智能交互进行互补作战能力验证,对复杂作战态势进行分析和评估,实现了物理域信息域和认知域的跨域评估效果。在无人作战评估指标体系的基础上,进行基于虚实混合数据的自动

方案计划评估,根据评估要求和作战意图,调用评估指标资源、评估模型资源、评估算子资源,进行数据的预处理以及方案的评估计算与分析,生成评估结果。

5 结论

瞄准未来无人作战跨域异构协同的需求和强对抗、高复杂、高动态的背景,本文介绍了基于PREA环的平行无人指挥控制系统框架,结合平行军事先进作战理念,从无人作战体系顶层设计出发,构建预测规划-计划指导-执行监控-观测评估为一体的闭环决策控制体系,实现无人作战指挥控制的平行智能。本文还概述总结了平行无人指挥控制系统的关键技术和相关方法,为平行无人指挥控制系统的发展提供了有益借鉴。

参考文献:

- [1] JIANG Peng, WANG Rui, ZHENG Lihui. Research status and development trend of manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat in foreign countries. *Ordnance Industry Automation*, 2023, 42(3): 84 – 89.
(姜鹏, 王瑞, 郑力会. 国外有人/无人机协同作战研究现状与发展趋势. *兵工自动化*, 2023, 42(3): 84 – 89.)
- [2] SUN Haoliang, LIANG Haijun, ZHANG Dongshun. Development and enlightenment of the U.S. military autonomous unmanned system. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(7): 1 – 4.
(孙浩亮, 梁海军, 张东顺. 美军自主无人系统发展及启示. *舰船电子工程*, 2022, 42(7): 1 – 4.)
- [3] YU Shuixing, PAN Qiufeng, ZHANG Xiangwen, et al. Research on cooperative mechanism of OODA unmanned C2 system. *International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2022)*. Xi'an, China: IEEE, 2022: 13 – 19.
(于水星, 潘秋丰, 张向文, 等. 基于OODA环的无人指控系统协同机制研究. 2022年无人系统高峰论坛(USS2022)论文集. 西安: IEEE, 2022: 13 – 19.)
- [4] SONG Xiaocheng, GAO Han. Intelligent parallel C2 system architecture for unmanned warfare. *The 7th China Conference on Command and Control*. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2019: 219 – 223.
(宋晓程, 高晗. 面向无人作战的智能平行指控系统架构研究. 中国指挥与控制学会. 第七届中国指挥控制大会论文集. 北京: 兵器工业出版社, 2019: 219 – 223.)
- [5] HUANG Meigen, WANG Weiping, WANG Tao, et al. EC2-based architecture design method of cloud-flow C2 for unmanned combat SoS. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(11): 3413 – 3422.
(黄美根, 王维平, 王涛, 等. 基于EC2的无人化作战体系云流化指控架构设计方法. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(11): 3414 – 3422.)
- [6] WANG Feiyue. CC5.0: Intelligent command and control systems in the parallel age. *Journal of Command and Control*, 2015, 1(1): 107 – 120.
(王飞跃. 指控5.0: 平行时代的智能指挥与控制体系. *指挥与控制学报*, 2015, 1(1): 107 – 120.)
- [7] YANG Dongsheng, JIANG Jun, WANG Feiyue. From platforms to systems of systems: On mechanism evolution of command confrontation and its PREA loop. *Journal of Command and Control*, 2018, 4(4): 263 – 271.
(阳东升, 姜军, 王飞跃. 从平台到体系: 指挥对抗活动机理的演变及其PREA环对策. *指挥与控制学报*, 2018, 4(4): 263 – 271.)
- [8] WANG Feiyue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 485 – 489.

- (王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, 19(5): 485 – 489.)
- [9] YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2001 – 2031.
(杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001 – 2031.)
- [10] WANG Feiyue. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(5): 893 – 897.
(王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 893 – 897.)
- [11] SHEN Zhen, LIU Yating, DONG Xisong, et al. Parallel multi-UAV system: Concepts, framework and applications. *Journal of Command and Control*, 2018, 4(3): 201 – 212.
(沈震, 刘雅婷, 董西松, 等. 平行机群: 概念、框架与应用. 指挥与控制学报, 2018, 4(3): 201 – 212.)
- [12] XING Yang, LIU Zhongmin, LIU Teng, et al. Parallel tanks: Defining a digital quadruplet for smart tank systems. *Journal of Command and Control*, 2018, 4(2): 111 – 120.
(邢阳, 刘忠民, 刘腾, 等. 平行坦克的数字四胞胎结构及其核心技术. 指挥与控制学报, 2018, 4(2): 111 – 120.)
- [13] YANG Dongsheng, ZHU Cheng, XIAO Weidong, et al. Process mechanism for macro command and control: Coordinate conflicts and resolution model for multi-PREA loop in multi-domains. *Journal of Command and Control*, 2021, 7(1): 11 – 27.
(阳东升, 朱承, 肖卫东, 等. 宏观尺度C2过程机理: 多域多PREA环及其冲突协调模型. 指挥与控制学报, 2021, 7(1): 11 – 27.)
- [14] YANG Dongsheng, LI Qiang, LIU Yuchao, et al. Macro-scale C2 process mechanism: Revision and application of theory model of PREA loop. *Journal of Command and Control*, 2022, 8(4): 389 – 401.
(阳东升, 李强, 刘玉超, 等. 宏观尺度C2过程机理: PREA环理论模型修订及应用. 指挥与控制学报, 2022, 8(4): 389 – 401.)
- [15] YANG Dongsheng, ZHANG Weiming. PREA loop and its parallel intelligence. *Journal of Command and Control*, 2019, 5(4): 274 – 281.
(阳东升, 张维明. PREA环及其平行智能. 指挥与控制学报, 2019, 5(4): 274 – 281.)
- [16] CHU Juntian, ZHANG Wu, DING Chao, et al. Requirement analysis on cross-domain unmanned system cooperative operation. *Command and Control*, 2022, 13(6): 1 – 8.
(初军田, 张武, 丁超, 等. 跨域无人系统协同作战需求分析. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(6): 1 – 8.)
- [17] YU Jiahui, SUN Yuxiang, XIANG Qi, et al. Metaverse enabling command and control: Combat deduction of virtual reality in the future. *Journal of Command and Control*, 2022, 8(3): 260 – 269.
(于佳慧, 孙宇祥, 项祺, 等. 元宇宙赋能指挥控制: 未来虚实融生的作战推演. 指挥与控制学报, 2022, 8(3): 260 – 269.)
- [18] HUANG Songping, TANG Shu, JIANG Hua, et al. Command and control domain and situational awareness model in the perspective of metaverse. *Journal of Command and Control*, 2022, 8(3): 341 – 346.
(黄松平, 唐姝, 姜华, 等. 元宇宙视域下的指挥控制领域与态势认知模型分析. 指挥与控制学报, 2022, 8(3): 341 – 346.)
- [19] SUN Liyang, CHU Wei, MAO Shaojie, et al. Parallel simulation framework for C4ISR system command decision support. *Command and Control*, 2015, 6(3): 56 – 61.
(孙黎阳, 楚威, 毛少杰, 等. 面向C4ISR系统决策支持的平行仿真框架. 指挥信息系统与技术, 2015, 6(3): 56 – 61.)
- [20] LI Tao, LU Zhanyi, LIU Lei. Frontier theories, methods and prospects for operational assessment. *Military Operations Research and Assessment*, 2022, 37(5): 5 – 9.
(李涛, 卢湛夷, 刘磊. 作战评估前沿理论方法及展望. 军事运筹与评估, 2022, 37(5): 5 – 9.)

作者简介:

李雪松 工程师, 研究方向为无人自主与多智能体对抗, E-mail: lixuesong@cetc.com.cn;

李清伟 高级工程师, 研究方向为智能空战与智能筹划, E-mail: liqingwei@cetc.com.cn;

罗子娟 高级工程师, 研究方向为无人自主与多智能体对抗, E-mail: luozijuan@cetc.com.cn;

王飞跃 研究员, 博士生导师, 研究方向为复杂系统与智能控制, E-mail: wangfeiyue@nudt.edu.cn;

费爱国 中国工程院院士, 博士生导师, 研究方向为军用指挥信息系统与数据链技术, 是我国该领域学术带头人之一, E-mail: aiguo@bupt.edu.cn.