



DOI: 10.12382/bgxb.2023.0794

基于无人协同博弈数字孪生的系统模型构建

李正军, 邓长明*

(沈阳航空航天大学 设计艺术学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 基于无人协同博弈快速发展并临近实战的背景下, 结合数字孪生技术构建无人协同博弈数字孪生系统模型, 搭建无人智能博弈的系统结构体系, 从而推进无人协同博弈孪生仿真的研究实践。基于 KJ 法, 对相关战例进行归纳分析, 进而对未来战争样式进行推演、对无人协同博弈系统要素和组织关系进行演绎推理。通过构建无人协同博弈矩阵、无人协同博弈函数、无人协同博弈优化方程矩阵, 完成无人协同博弈态势感知及博弈方案优化模型构建, 实现阶段博弈方案全局最优, 结合数字孪生技术, 从物理层、虚拟层、服务层、数据层、数据连接 5 个方面构建出无人协同博弈数字孪生结构模型, 并梳理此模型的技术体系。为实现无人协同博弈的虚实同步, 交互运行, 智能决策优化提供理论框架, 为未来无人作战体系构建提供参考。

关键词: 无人协同博弈; 系统分析; 数字孪生; 技术体系

中图分类号: E919

文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2023)S2-0209-14

A Digital Twin System Model of Unmanned Cooperative Game

LI Zhengjun, DENG Changming*

(School of Design and Art, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China)

Abstract: Based on the background of the rapid development of unmanned cooperative game and approaching to the actual combat, a digital twin system model of unmanned cooperative game is constructed by combining the digital twin technology, and a system architecture of the unmanned intelligent game is built, so as to promote the research and practice of unmanned cooperative game twin simulation. The relevant war cases are inductively analyzed based on KJ method, and then future war styles are deduced, and a deductive reasoning is carried out on the elements and organisational relationships of the unmanned cooperative gaming system. The game matrix, game function and optimization equation matrix of unmanned cooperative game are constructed to establish an optimization model of unmanned cooperative game situational awareness and game scheme, for achieving the global optimum of the stage gaming scheme. Combined with the digital twin technology, a digital twin structure model is constructed from the physical layer, virtual layer, service layer, data layer and data connection. and the technology system of this model is sorted out. It provides a theoretical framework for the real-virtual synchronisation, interactive operation, visual interface and intelligent decision-making of unmanned cooperative game, and provides a reference for the construction of unmanned cooperative game system in the future.

Keywords: unmanned cooperative game; system analysis; digital twin; technology system

0 引言

进入 21 世纪,军事装备智能化的步伐明显加快,智能化作战将成为未来战争的基本形态,无人协同博弈是智能化战争至关重要的一环节。在人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术、虚拟现实技术、大数据技术、智能装备技术等高技术的迅猛发展下,无人协同博弈毋庸置疑将成为未来战争的主要战场形态^[1],据此本文开展基于无人协同博弈数字孪生的系统模型构建研究。

针对研究主题相关文献的整理,归纳相关研究成果并综合述评。首先是无人协同博弈的相关研究述评:1)无人作战体系标准的研究。初军田等^[2]和宓铁良等^[3]提出无人作战标准体系,以实现无人作战系统技术、生产、管理的规范化、标准化。该研究保障了单体无人作战装备快速聚合形成杀伤链、杀伤网完成博弈任务的能力。2)无人作战系统中不同子系统间协同问题研究。范博洋等^[4]提出无人系统协同任务分配模型,结合密度值最大聚类 and 混合粒子群优化算法,以实现不同环境下的任务分配。魏强等^[5]构建一种中心式的多无人系统协同视觉 SLAM 算法,以实现在 GPS 拒止的情况下的自主导航。该研究为实现陆、海、空、天一体化联合作战提供了基础支撑。3)单体无人作战装备的研究。张建东等^[6]、Pope 等^[7]、赵明皓等^[8]利用 AI 技术来对作战单体的功能进行优化。4)无人作战智能决策研究。苏思等^[9]、靳崇等^[10]提出了无人作战智能指挥模型,使作战资源实现最优化配置,确保各作战要素都能充分发挥最大效能,但是智能决策效果严重依赖于输入现实战场数据的准确性和实时性。

其次是数字孪生技术在军事领域应用的相关研究述评:1)面向作战指挥的数字孪生系统研究。周芳等^[11]和王旭东等^[12]提出作战指挥的数字孪生系统架构,支持物理战场资源配置、行动方案的迭代优化、辅助指挥员进行高效决策。但是该研究的对象均为有人作战,数字孪生指挥系统无法进行自主决策,未给出决策方案的优化机理。2)数字孪生战场的研究。邓焯等^[13]对数字孪生战场进行了初步探讨,提出 4 种体系框架,但未给出具体的理论模型。3)数字孪生在无人作战单体的应用研究。纪广等^[14-15]、Yang 等^[16]开发了无

人机数字孪生系统,并通过实验验证了无人机作战数字孪生系统的基本可行性,但是仅实现了对无人机的实时精准控制,未对作战态势评估、作战方案优化决策进一步探索。

综上所述,无人作战体系标准、无人作战系统协同、单体无人作战装备优化、作战智能决策的相关研究为本文的研究提供了相应的借鉴,但是已有文献成果总体看,缺乏对战场实时映射的具有智能决策能力的无人作战数字孪生指挥控制系统体系研究。同时数字孪生技术在军事领域的应用缺乏数字孪生指挥系统的作战方案优化及智能决策的深入研究。相关的研究总体缺乏无人作战体系的智能大模型。

依据相关研究现状整理本文研究结构:系统分析相关战例,对无人协同博弈的要素和组织关系进行演绎推理,依托于数字孪生相关技术,提出无人协同博弈态势感知及博弈方案优化模型和无人协同博弈数字孪生系统结构模型,并梳理无人协同博弈数字孪生的技术架构,为未来无人作战相关研究提供理论参考。本文涉及的理论和概念如下:

亲和图法(KJ-Technique, KJ 法)。日本人类学家川喜田二郎(Kawakita Jiro)发明了 KJ-Technique,也称 KJ 法,是一种建立共识的方法,可将复杂的信息清晰地提炼出来并归类^[17]。具体操作分为四个步骤,即选取案例进行分析、制作信息卡片、整合信息分组、构建 KJ 图。这种方法可将杂乱的作战信息通过相互之间的潜在关联性进行整合,帮助作战要素的提取。

侦察、判断、决策、行动(Observe-Orient-Decide-Act, OODA)理论。OODA 理论由美国军事理论家、空军上校约翰·博伊德(John R. Boyd)提出,目的是准确系统地描述战场上指挥员的指挥控制过程,该理论包括 4 个步骤的循环过程:侦察、判断、决策、行动。侦察是从外部环境中获取有助于判断的信息;判断是将侦察获取的信息进行数据加工和处理,为决策提供必要的态势情报;决策是基于侦察和判断结果,生成有利于完成任务的博弈方案;行动是对决策方案的执行,并在其过程中不断反馈和接收最新动态发展信息。其具有的循环特性、强时效性和嵌套性等特点,适用于动态、复杂的无人协同博弈过程。利用 OODA 理论对无人协同博弈系统结构进行分析,厘清其要素和组织关系^[18-19]。

数字孪生。数字孪生由 Grieves 教授于 2003 年在产品全生命周期管理课程中提出,称之为“镜像空间模型”,2011 年美国空军正式确定“数字孪生”概念^[20];以数字化的方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型,用来仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等^[21]。对于无人协同博弈数字孪生的系统模型而言,数字孪生技术内涵是指利用战场传感器、大数据、互联网、虚拟现实、人工智能等技术对无人协同博弈中各要素的行为、特征、性能等进行实时镜像的

过程和方法,实现对无人协同博弈系统复杂行为的镜像描述。

1 基于 KJ 法的相关战例分析与归纳

1.1 相关战例的选取原则

基于前期的文献梳理,采用文献资料分析方法,对世界战争史进行深入研究,并提出相关战例选取原则:典型性原则、代表性原则、全面性原则、信息完整性原则^[22]。基于以上战例选取原则,本文共选择 16 个战例进行相关战例分析,如表 1 所示。

表 1 战例信息
Table 1 War case information

阶段	典型战例信息
机械化战争时代	1) 朝鲜战争—仁川登陆(1950 年 9 月 15 日~9 月 26 日)。联合国军使用坦克、步枪等装备进行了在仁川的登陆行动,打破朝鲜军的固守防线。
	2) 朝鲜战争—长津湖战役(1950 年 11 月 25 日~12 月 4 日)。中国人民志愿军使用坦克、冲锋枪等装备在长津湖地区对联合国军进行攻击,使联合国军撤退 ^[23] 。
	3) 越南战争—奠边府战役(1963 年)。南越政府军和美国特种部队使用通用步枪、直升机等武器装备对抗越共游击队。
	4) 越南战争—总统山战役(1969 年)。美军试图进入越南境内摧毁越共军队的指挥中心。
	5) 中印边境战争(1962 年 10 月 20 日~1962 年 11 月 21 日)在中印边境印度军队和中国人民解放军进行交战,武器装备主要涉及火炮和迫击炮、坦克 ^[24] 。
	6) 中越边境战争(1979 年 2 月 17 日~3 月 16 日)中国人民解放军广西、云南边防部队对侵犯中国领土的越南军队进行自卫还击作战,武器装备主要涉及装甲车辆、战斗机。
	7) 两伊战争—科尔德海战(1984 年 4 月 17 日~1988 年 6 月)。伊朗海军舰艇试图通过海上封锁来打击伊拉克经济。
	8) 两伊战争—卡尔巴拉之战(1986 年 1 月~1987 年 3 月)。伊朗军队试图夺回被伊拉克占领的城市。伊朗军展开了大规模的人海战术,最终伊拉克保卫了卡尔巴拉 ^[25] 。
	9) 马岛战争—圣卡洛斯登陆战役(1982 年 5 月 21 日~5 月 25 日)。这是英国军队在福克兰群岛进行的第一场大规模地面战役。英军成功地登陆并推进到福克兰群岛内陆,与阿根廷军队发生激烈的战斗。
	10) 马岛战争—博利瓦尔角海战(1982 年 5 月 28 日~6 月 4 日)。在福克兰群岛周边海域,英国和阿根廷的海军和空军展开了一系列激烈的战斗 ^[26] 。
信息化战争时代	11) 海湾战争—沙漠风暴行动(1991 年 1 月 17 日~2 月 28 日)。沙漠风暴是海湾战争的空袭阶段,科威特在卫星导航系统的精确引导下使用直升机摧毁了伊拉克的军事基础设施。
	12) 俄罗斯—格鲁吉亚战争(2008 年 8 月 8 日~8 月 10 日)。俄罗斯和格鲁吉亚双方在兹纳赫基附近爆发了激烈的战斗,双方使用火炮、坦克进行交战。
信息化+智能化战争时代	13) 叙利亚内战—俄驻叙基地遇袭(2018 年 1 月 6 日)。俄叙无线电技术联合侦察中心遭到 13 架无人机攻击。俄军用卡格努克地区的停车场电子战系统控制了其中 6 架,剩余 7 架被铠甲 S 防空系统击落 ^[27] 。
	14) 纳卡冲突(2020 年 10 月 11 日~2020 年 11 月 3 日)。亚美尼亚防空系统、装备和基础设施受到阿塞拜疆无人机、战斗机、攻击机、直升机、火炮等多种空袭武器的打击,其中涉及到智能化装备的作战活动有:阿方使用大型无人机精确打击亚方多辆近程防空武器系统,阿方中小型无人机配合有人战斗机摧毁了武器系统雷达、导弹发射车等作战车辆 ^[28] 。
	15) 俄乌战争(2022 年 4 月 17 日)。俄罗斯利用卫星网在乌克兰近海俄军黑海舰队发现乌军无人机在对黑海舰队进行持续侦察,俄军护卫舰发射 2 发无风防空导弹击落了乌军无人机。
	16) 俄乌战争(2022 年 3 月 23 日)。乌军基于天基侦察网报利用导弹袭击了位于别尔江斯克港正在卸载弹药和燃油的俄军登陆舰 ^[29] 。

1.2 基于 KJ 法的相关战例归纳分析

本节依托于 KJ 法对相关战例进行归纳分析。

首先,对 16 个相关战例进行归纳分析,得到从 1950~2022 年的战场博弈演进状态,如图 1 所示。

从 KJ 法的相关战例研究显示:1950 ~ 2022 年的 16 个相关战例大致可以分为 3 个阶段:机械化战争时代、信息化战争时代、信息化 + 智能化战争时代。从作战资源要素、战场环境要素、博弈目标要素的比较分析,作战资源要素和博弈目标要素发展变化明显。20 世纪 50 年代至 20 世纪 80 年代中期,基本处于机械化战争时代,作战资源要素基本为空基作战资源要素、陆基作战资源要素、海基作战资源要素、人力作战资源要素;博弈目标要素基本为天空目标要素、陆地目标要素、海洋目标要素。20 世纪 90 年代开始凭借着太空技术的发展,战争的形态开始进入信息化战争时代,作战资源要素、博弈目标要素在机械化战争时代的基础上增加了天基作战资源要素、太空目标要素,并在战争中发挥着重要的作战效率。21 世纪 10 年代以后,战争形态逐渐向智能化战争时代过渡,大量的

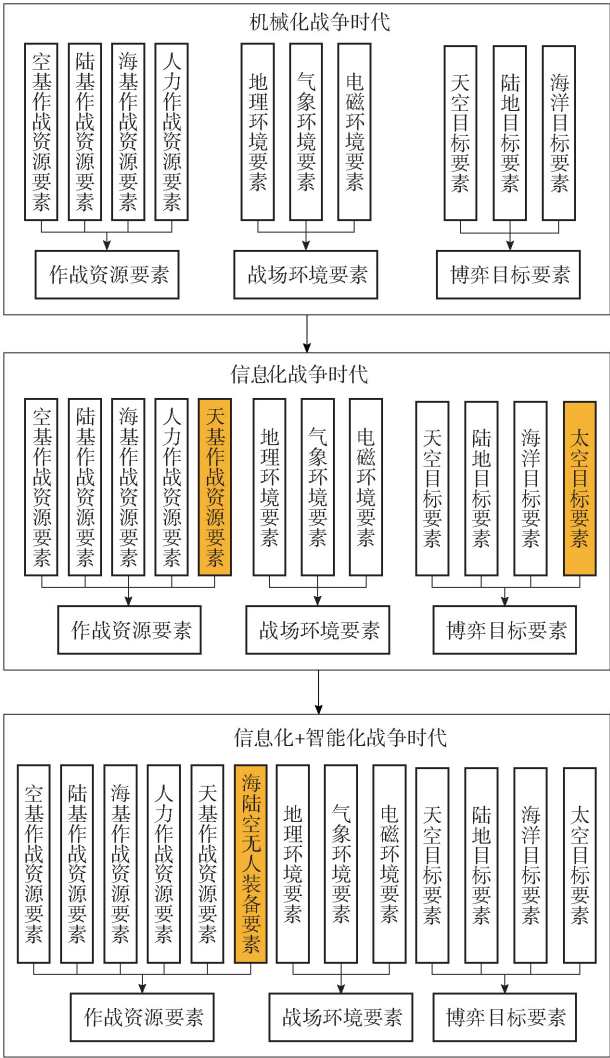


图 1 KJ 图

Fig. 1 KJ-technique diagram

无人装备投入到作战博弈中,发挥极大的作战效益。从战例信息的演化脉络分析,未来战争随着人工智能、大数据、物联网、云计算等高新技术的快速发展和深入应用,战争形态将逐步由信息化向智能化、无人化加速演进,因此,未来无人作战将取代传统作战样式,为此展开本研究。

1.3 无人协同博弈系统结构

无人协同博弈系统结构是指无人协同博弈系统内部各个组成要素及其相互之间的稳定关系。首先基于相关战例的归纳结果进行演绎,推理出无人协同博弈系统的结构要素,其次,在要素梳理的基础上,结合 OODA 理论,进行要素之间的组织关系分析,厘清无人协同博弈系统内部要素间的技术连接结构以及信息、能量的流转关系。

1.3.1 无人协同博弈要素

无人协同博弈要素是维持无人作战体系的必要条件,通过相关战例的归纳结果,演绎出主要博弈要素:作战资源要素、战场环境要素、博弈目标要素,如图 2 所示。

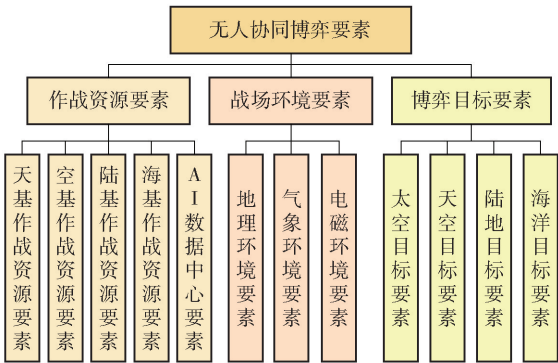


图 2 无人协同博弈要素组成图

Fig. 2 Element composition of unmanned cooperative game

作战资源要素。作战资源要素是无人作战的核心部分。分为 5 类:1)天基作战资源要素主要包括卫星、轨道飞行器;2)空基作战资源要素主要包括平流层浮空器、无人飞机;3)陆基作战资源要素主要包括无人车、仿生机器人、军事基地、人员;4)海基作战资源要素主要包括浮动标志物、无人舰艇、无人潜航器等^[30];5)AI 数据中心要素是一个集数据导入、清洗、存储和分析等功能的数据汇聚平台,主要包括各种数据库、知识库、算法模型库等要素。在天基、空基、陆基、海基资源要素和 AI 数据中心要素的博弈协同下形成侦察

感知、信息指挥、火力打击和综合保障 4 大作战功能,以实现 OODA 作战闭环,确保作战行动顺利实施。

战场环境要素分析。战场环境要素是指战场及其周围对无人作战活动和无人作战效果产生影响的各种要素。战场环境要素包括地理环境要素、气象环境要素和电磁环境要素^[31]。

地理环境要素主要包括:1)野外战场的地貌、植被、水系等;城市战场的道路、桥梁、建筑物等;海洋战场的海浪波型和海洋地形等;2)气象环境要素主要包括气温、气压、风、雨、雾、雪、雾霾等;3)电磁环境要素主要包括:人工辐射源和自然辐射源,无人作战的“侦察-判断-决策-行动”都依赖电磁环境。

博弈目标要素。博弈目标要素是指在无人作战行动中的毁伤对象,分为太空目标要素、空中目标要素、陆地目标要素和海洋目标要素^[30]。其中:太空目标要素主要包括各类航天器;天空目标要素主要包括各类飞行器;陆地目标要素主要包括指挥中心、军队、车辆、发射场、基地、仓库等;海洋目标要素主要包括舰船、潜航器等。

1.3.2 无人协同博弈组织关系

无人作战是一个复杂系统,厘清并优化其组织关系至关重要。其组织关系是指系统内部要素间的技术连接结构以及信息、能量的流转关系。依托于 OODA 理论,对无人协同博弈各阶段组织关系进行分析,如图 3 所示。

1) 侦察阶段。在侦察阶段通过具体的光学传感器、电子传感器、雷达、声纳等传感技术与手段,完成侦察监视、环境监测等任务,系统全面的获取作战资源信息、战场环境信息、博弈目标信息。

侦察阶段组织关系:1)通过天基作战资源对太空、天空、陆地、海洋目标实时的广域概略侦察,获得目标侦察信息,执行目标搜索与识别任务^[32-33];2)通过天基、空基、陆基、海基作战资源对气象、地理、电磁环境进行侦察,获得军事气象信息、军事地理信息、战场电磁信息,完成高程数字地图的绘制^[34];3)通过空基、陆基、海基作战资源对一定区域内的太空、天空、陆地、海洋目标进行跟踪侦察,获得目标侦察信息,实现目标的动态侦察监视^[35],将侦察阶段的作战资源信息、战场环境信息、博弈目标信息统一传输至 AI 数据中心,得到侦察信息

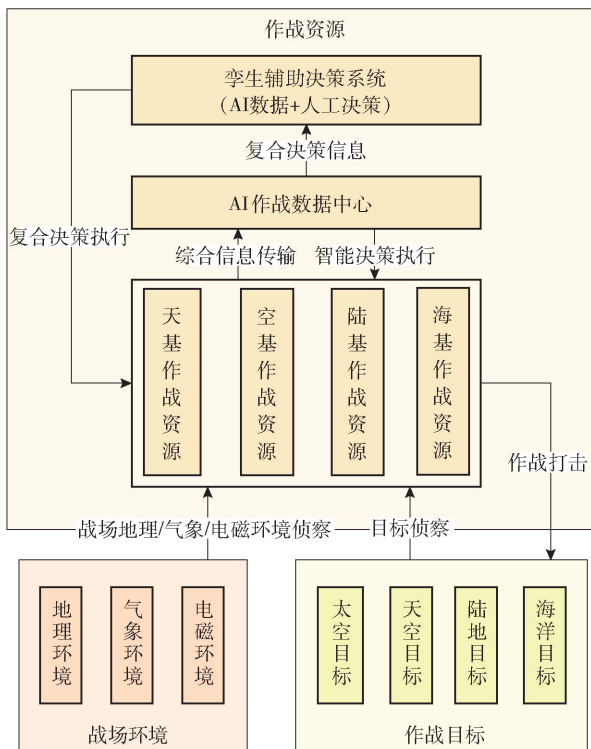


图 3 无人协同博弈组织关系图

Fig. 3 Organisational relationship diagram of unmanned cooperative game

集合。

2) 判断阶段。通过 AI 数据中心将数据预处理、态势理解和态势预测后,形成态势判断数据。首先 AI 数据中心将侦察信息集合进行检测、清洗、集成、归一化、正则化等预处理,以满足模型输入数据的要求,再利用支持向量机、K 均值聚类算法,将侦察信息集合分类成博弈目标信息集和战场环境信息集。通过利用基于深度学习的复合态势模型^[36](博弈目标感知模型、博弈目标关系判定模型、战场环境感知模型)的表征能力,挖掘出态势数据中的博弈目标的属性、状态、运动趋势等特征,及不同博弈目标间的关系,结合战场环境态势,形成战场态势感知表示。然后将态势感知表示结合 AI 博弈态势知识库(存储各种专家经验、态势判断规则、历史态势信息等态势知识,通过规则化、形式化的方式形成的知识集合^[37])得出态势研判。其主要分为 3 个层面:第 1 层是全局态势判断,即判定双方在战略层面的优劣——绝对优势、较大优势、微弱优势、势均力敌、微弱劣势、较大劣势、绝对劣势;第 2 层是博弈状态判断,即判定博弈目标是进攻、防御还是撤退;第 3 层是博弈目标行动判

断,即判定博弈目标的战术意图、博弈计划等。最后基于对当前态势的理解,利用多分支超实时态势推演模型^[38],预测出博弈目标下一步博弈行动及对我方兵力造成的影响、战场兵力布势变化等,得到判断信息集合。

3)决策阶段。在决策阶段根据判断信息集合,依托于决策知识库(存储各种历史作战案例、作战规则、行动原则、决策依据等战法知识),形成博弈筹划,制定博弈方案。AI 博弈数据中心将判断信息集合输入非合作有限博弈模型^[39],得到对抗策略。然后将对抗策略作为约束条件,根据博弈目的(博弈效果最好、己方损失最小、毁伤效果最大等),将判断信息集合输入多目标优化模型^[40],以找到 Pareto 最优解,实现限定约束下作战资源的最优编成组织,再转化为任务规划结果—博弈方案。然后将博弈方案传输至基于强化学习的 AI 决策系统^[41],结合攻防博弈技术,实现双方行动方案计划的仿真推演,完成对博弈行动方案可行性和完备性的检测,同时提高 AI 的对弈水平。同时将博弈数据传输至孪生辅助决策系统,对方案可行性与完备性进行复合决策(AI 数据+人工决策)。

4)行动阶段。作战资源接到行动方案后,立即展开博弈部署,进入指定的阵位,开始作战行动。

2 无人协同博弈数字孪生的系统模型构建

在数字孪生多维结构的基础上^[21],结合人工智能技术、虚拟现实技术、数据处理技术等,构建基于无人协同博弈的数字孪生系统模型。实现在虚拟空间真实还原实际无人协同博弈过程,通过实际无人协同博弈和虚拟仿真平台的双向映射、动态响应、数据交互,实现对全域作战资源的数据实时管控,同时,提供态势实时感知、博弈方案优化决策、博弈过程动态调控等高质量服务,以实现数智化无人作战,提高打赢未来战争概率。

2.1 无人协同博弈态势感知及博弈方案优化模型

首先,基于作战资源与博弈目标构建无人协同博弈博弈矩阵,反映博弈过程的战场复杂性,如表 2 所示。

其次,依据天基、空基、陆基、海基作战资源,对太空、天空、陆地、海洋目标的博弈状况构建无人协同博弈函数,反映 $[A_{11}, A_{12} \cdots A_{nn}]$ 的战场态势(n 为目标数量),如式(1)所示。

表 2 无人协同博弈矩阵

Table 2 Game matrix of unmanned cooperative game				
类别	太空目标	天空目标	陆地目标	海洋目标
天基作战资源	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}
空基作战资源	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}
陆基作战资源	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}
海基作战资源	A_{41}	A_{42}	A_{43}	A_{44}

$$\int_a^b f(x_i) \mathrm{d} x =$$
$$f'(x_{A_{11}}) \mathrm{d} x_{A_{11}} + f'(x_{A_{12}}) \mathrm{d} x_{A_{12}} + \cdots + f'(x_{A_{nn}}) \mathrm{d} x_{A_{nn}}$$

(1)

式中: $[a, b]$ 表示某个博弈时间区间; $f(x_i)$ 表示*i*时刻博弈态势, $i \in [a, b]$ 。

然后,依据战场态势发展实时调整博弈方案,即基于当前博弈态势预判的博弈方案优化。设全局优化目标函数为 $\max F(x)$,使得 $\max F(x)$ 反映 $\int_a^b f(x_i) \mathrm{d} x$,构建无人协同博弈优化方程矩阵,如式(2)所示。确定式(2)中实时变化的博弈子函数 $\max f_i(x_{A_{nn}})$,使剩余博弈子函数向 $\max f_i(x_{A_{nn}})$ 依次优化,实现阶段博弈方案全局最优^[42],如式(3)所示。

$$\max F(x) = (f_1(x_{A_{11}}), f_2(x_{A_{12}}), \cdots, f_i(x_{A_{nn}}))^T$$

(2)

$$\psi_i^{(k)}(x_i) =$$
$$\max_{X_i x_i} ((1 - \lambda_k) f_i(x_{A_{nn}}) + \lambda_k \sum_j w_{ij} \psi_j^{(k-1)}(x_i))$$

(3)

式中: $f_i(x_{A_{nn}})$ 为表示某一项博弈子函数; x_i 中*i*取值范围为 $1 \sim n$; X_i 表示 $f_i(x)$ 的变量集; λ_k, w_{ij} 分别满足 $0 \leq \lambda_k, w_{ij} \leq 1$ 。

2.2 无人协同博弈数字孪生结构模型构建

无人协同博弈的数字孪生系统模型(DTM_{UC})由物理层(PE_{UC})、虚拟层(VE_{UC})、服务层(AS_{UC})、数据层(DD_{UC})及其数字连接(CN_{UC})共同建构,形成无人协同博弈的数字孪生多维模型,如式(4)所示。

$$DTM_{UC} = (PE_{UC}, VE_{UC}, AS_{UC}, DD_{UC}, CN_{UC})$$

(4)

式中: PE_{UC} 表示物理层; VE_{UC} 表示虚拟层; DD_{UC} 表示数据层; AS_{UC} 表示服务层; CN_{UC} 表示各层间的数据连接。

2.2.1 物理层

PE_{UC} 是战场客观实战,是 DTM_{UC} 的构成基础,依据无人协同博弈要素与组织关系分析,梳理 PE_{UC}

基础模型,如式(5)所示。

$$PE_{UC} = (CR_p, BE_p, CT_p, CN_p) \quad (5)$$

式中: CR_p 表示作战资源; BE_p 表示战场环境; CT_p 表示博弈目标; CN_p 表示物理层各要素间数据连接。 PE_{UC} 的构建可根据无人协同博弈体系结构自下而上由单元级、系统级、复杂系统级逐层级构建。其中:1)单元级,实现“侦察-判断-决策-行动”博弈活动的最小单元,通常指单体无人作战装备完成博弈任务;2)系统级,通过 AI 数据处理中心自主实现“侦察-判断-决策-行动”的智能博弈系统,由作战单体智能组合配置,构成智能的杀伤链、杀伤网,完成博弈任务;3)复杂系统级,通过 AI 数据处理中心与孪生辅助决策系统(AI 数据+人工决策)复合决策,实现“侦察-判断-决策-行动”的复合智能博弈系统,由作战单体智能组合配置,构成复杂的智能的杀伤链、杀伤网,实现复杂作战资源要素的协同,完成复杂的博弈任务。

2.2.2 虚拟层

VE_{UC} 是 PE_{UC} 在虚拟空间中的镜像,其本质上是模型的集合,通过 PE_{UC} 实时数据从数字模型库中调用相匹配的模型,并利用实例化技术、多细节层次技术^[43],完成模型的加载实例化,并进行组装融合,从而创建对应 PE_{UC} 的完整 VE_{UC} ,如图 4 所示。

VE_{UC} 如式(6)所示。

$$VE_{UC} = (CR_v, BE_v, CT_v, CN_v) \quad (6)$$

式中: CR_v 表示作战资源模型; BE_v 表示战场环境模型; CT_v 表示博弈目标模型; CN_v 表示虚拟层各模型

间数据连接。

CR_v 如式(7)所示。

$$CR_v = (P_{CR}, B_{CR}, R_{CR}) \quad (7)$$

式中: P_{CR} 表示几何模型,对作战资源几何参数、物理属性、约束及特征等物理信息进行虚拟刻画; B_{CR} 表示行为模型,为作战资源在博弈任务的驱动下,对无人协同博弈的顺序性、并发性、联动性等特征进行虚拟刻画; R_{CR} 表示规则模型,为依据无人协同博弈的运行及演化规律进行虚拟刻画,并将其映射到 P_{CR} 、 B_{CR} 上,使 VE_{UC} 具备评估、优化、预测、溯源的实时映射。

BE_v 如式(8)所示。

$$BE_v = (G_{BE}, W_{BE}, E_{BE}) \quad (8)$$

式中: G_{BE} 表示地理环境模型,为在集成空间地理数据、实时监测数据、国家地理知识的地理信息系统支撑下,对战场的地形、地貌等进行虚拟刻画; W_{BE} 表示气象环境模型,对无人协同博弈战场的降雨量、降雪量、风向等气象参数进行虚拟刻画; E_{BE} 表示电磁环境模型,对战场的电磁背景、电波传播、地海杂波进行虚拟刻画^[44]。

CT_v 如式(9)所示。

$$CT_v = (P_{CT}, D_{CT}) \quad (9)$$

式中: P_{CT} 表示几何模型,对博弈目标类型、型号、位置、形状、材质等信息以及目标与目标之间的从属关系进行虚拟刻画; D_{CT} 表示毁伤效应模型,对博弈目标受到打击时毁伤效果进行虚拟刻画。

2.2.3 服务层

AS_{UC} 是将 DTM_{UC} 的功能转换为以交互界面形式的服务,对外提供标准的输入输出。通过 VE_{UC} 模型完成界面中主体的显示,并将 PE_{UC} 的实时数据加载到 XCharts 插件,完成可视化图表的构建,其主要包括:作战资源种类、数量表格、地理高程数据表格、气象参数表格、电磁空间信息表格、博弈目标种类、数量表格、军力对比博弈折线图、博弈目标力量趋势预测图、博弈方案评估表格、无人装备基础信息表格、无人装备实时状态表格、无人装备预测状态表格等,实现对战场数据的实时感知与分析,使战场环境、博弈行动、情报数据更好地呈现,辅助态势预判与博弈决策^[45-47],如图 5 所示。

AS_{UC} 主要包括:1) 博弈态势实时感知。依托物理层和虚拟层,实现多域多维“立体式”实时博弈态势感知;2) 博弈方案优化决策。结合态势认

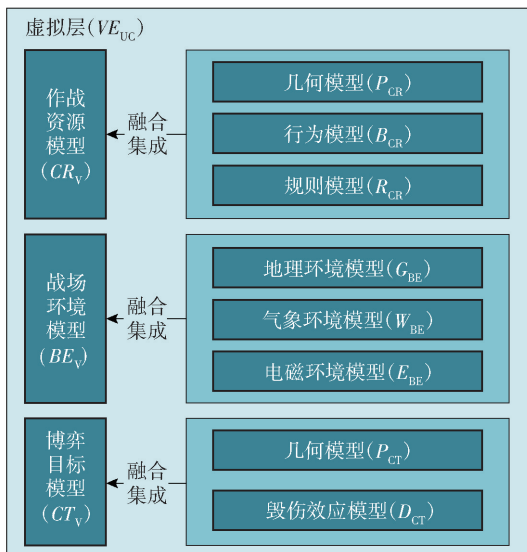


图 4 虚拟层概念图

Fig. 4 Conceptual diagram of virtual layer

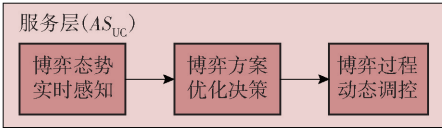


图 5 服务层概念图

Fig.5 Conceptual diagram of service layer

知,将决策知识库作为先验知识,引入 AI 决策算法模型,对博弈方案进行自主推演,评估博弈效果、验证是否可行;3) 博弈过程动态调控。通过态势实时感知与博弈智能决策,结合以虚制实和虚实互动,不断调控作战资源,提高战场态势发展的掌控能力^[48]。

2.2.4 数据层

DD_{UC} 是 DTM_{UC} 的驱动,结合数据处理技术,将 PE_{UC} 数据、 VE_{UC} 数据、 AS_{UC} 数据,通过数据通信转换装置,对不同通讯接口和通讯协议的数据进行统一转换,并通过数据的分类、关联、组合、封装等操作,实现 DTM_{UC} 多源多模态数据的集成,以消除“信息孤岛”,为 PE_{UC} 、 VE_{UC} 、 AS_{UC} 运行提供数据支撑,如图 6 所示。

DD_{UC} 如式 (10) 所示。

$$DD_{UC} = (D_P, D_V, D_S, D_K) \quad (10)$$

式中: D_P 表示 PE_{UC} 数据(包括作战资源数据、战场环境数据、博弈目标数据,其中作战资源数据包括作战资源的规格、功能、性能、关系等的静态物理数据与反映作战资源“侦察-判断-决策-行动”各环节的运行状况、实时性能等动态过程数据;战场环境数据包括地理信息数据、气象参数数据、战场电磁信息数据;博弈目标数据包括博弈目标目标类型、位置、携带载荷、目标与目标之间的从属关系等信息); D_V 表示 VE_{UC} 数据,主要包括 CR_V 数据、 BE_V 数据、 CT_V 以及基于 VE_{UC} 开展的过程仿真、预测等仿真数据; D_S 表示 AS_{UC} 数据,包括博弈任务数据、战场态势数据、博弈方案数据、评估数据等; D_K 表示知识数据,包括军事专家知识、战术战法、推理推论、常用智能算法库与数字模型库等;基于 D_P 、 D_V 、 D_S 、 D_K 形成融合衍生数据,将 D_S 作为约束,在 D_K 支撑下,通过加权平均法、卡尔曼滤波模型,将 D_P 、 D_V 中的关键信息进行提取、融合并整合为一个独立和灵活的分析数据集,将数据集作为参数输入态势算法模型,结合深度学习技术,实现战场态势的快速准确预测和滚动预测,解决在不完全信息对抗下的战场态势认知。此

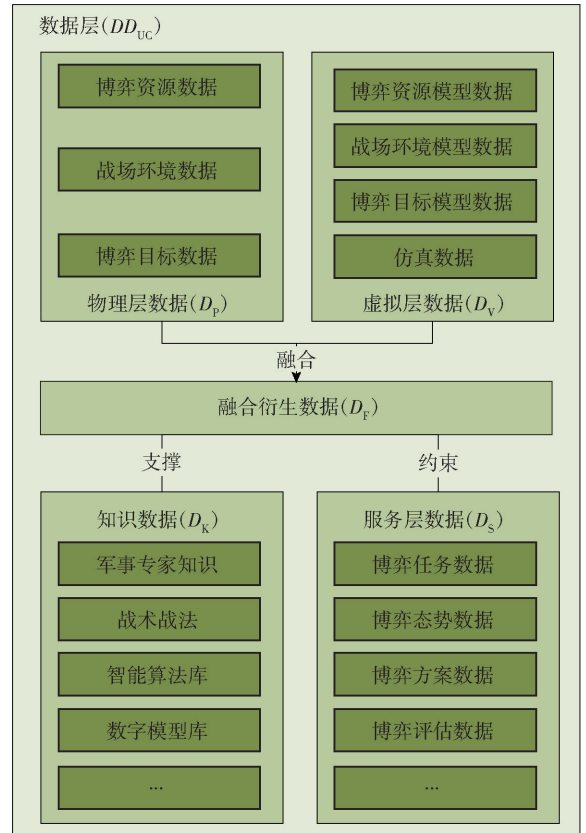


图 6 数据层概念图

Fig.6 Conceptual diagram of data layer

外,在 D_V 偏离现实的情况下,利用贝叶斯神经网络模型将偏离数据与 D_P 合并,以提高准确性和可靠性^[49]。

2.2.5 数据链接

CN_{UC} 是 DTM_{UC} 各层级间数据连接,通过 PROFINET、INTERBUS、MQTT 等传输协议;JDBC、ODBC 等数据库接口;AIP、RPC、Socket 等软件接口,实现各层级间实时传输、协同交互、迭代优化^[50-51],如图 7 所示。

CN_{UC} 如式 (11) 示。

$$CN_{UC} = (CN_{PV}, CN_{PS}, CN_{PD}, CN_{VS}, CN_{VD}, CN_{SD}) \quad (11)$$

式中: CN_{PV} 为 PE_{UC} 和 VE_{UC} 的交互: PE_{UC} 采集的数据经过处理后传输至 VE_{UC} ,作为数字模型的输入参数来驱动 VE_{UC} 运行,从而实现 VE_{UC} 对 PE_{UC} 精准描述; VE_{UC} 采集的仿真分析等仿真结果数据转化为控制指令下达至 PE_{UC} 的作战资源,实现对作战资源的实时控制,优化博弈行动。 CN_{PS} 为 PE_{UC} 和 AS_{UC} 的交互: PE_{UC} 采集的实时数据传输至 AS_{UC} ,实现对博弈态势的实时更新,从而优化博弈方案; AS_{UC} 生成的态势估

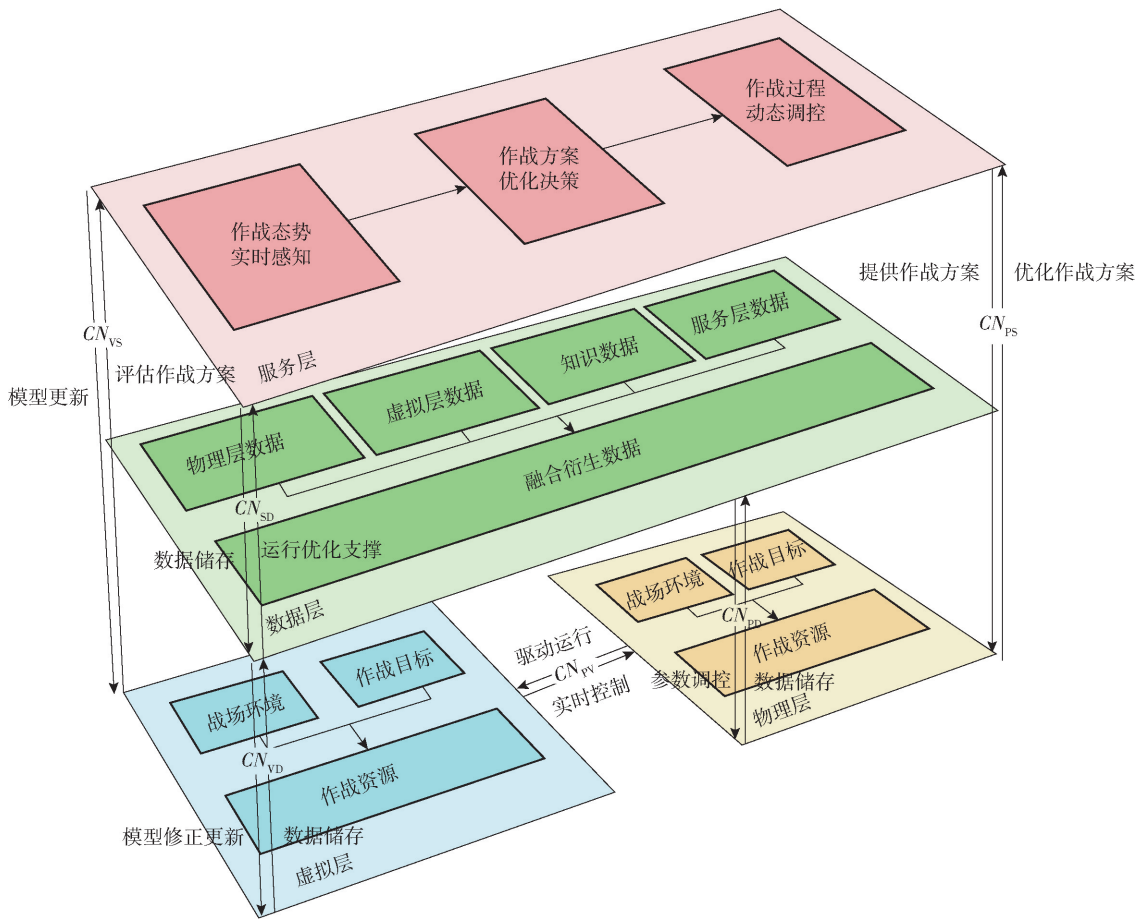


图 7 无人协同博弈数字孪生系统模型

Fig. 7 Digital twin system model of unmanned cooperative game

计、决策优化等结果提供给 AI 指挥官和孪生辅助决策系统,结合可编程控制技术,嵌入式控制技术、网络控制技术等分布式管控技术,为 PE_{UC} 提供的动态调控。 CN_{PD} 为 PE_{UC} 和 DD_{UC} 的交互: PE_{UC} 利用传感技术获取 PE_{UC} 数据并传输至 DD_{UC} 储存,同时不断累积经验知识,丰富 DD_{UC} ;相应地, DD_{UC} 中经过处理后的数据可传输给 PE_{UC} , PE_{UC} 的作战资源在数据的驱动下,将自身的参数调整到适合的博弈状态。 CN_{VS} 为 VE_{UC} 和 AS_{UC} 的交互: VE_{UC} 运行仿真结果的更新,可帮助评估 AS_{UC} 博弈方案的成效,以优化博弈方案;根据 AS_{UC} 博弈方案对 VE_{UC} 进行更新。 CN_{VD} 为 VE_{UC} 和 DD_{UC} 的交互: VE_{UC} 将产生的仿真及相关数据实时存储到 DD_{UC} ;相应地 VE_{UC} 实时读取 DD_{UC} 的融合衍生数据,实现数字模型的自更新、自修正。 CN_{SD} 为 DD_{UC} 和 AS_{UC} 的交互:将 AS_{UC} 的数据实时存储到 DD_{UC} ,相应地 AS_{UC} 实时读取 DD_{UC} 中的历史数据、规则数据、算法参数等支持 AS_{UC} 的运行与优化。通过数据连接实现物理层、虚拟层、服务层、数据层

的信息实时交换,构建无人协同博弈作战的数据孪生模型体系。

3 技术体系

DTM_{UC} 的实现需要综合运用多种先进技术,通过对数字孪生关键支撑技术的梳理和分析,将多种技术归纳在一个技术栈下,构建 DTM_{UC} 技术体系,主要包括感控协同技术、数据处理技术、建模仿真技术、通信交互技术、软件服务技术、人工智能技术、基础支撑技术^[52]。

1) 感控协同技术。感控协同技术主要包括传感技术(光学传感器、电子传感器、雷达、声纳等传感技术)、协同感知技术、分布式管控技术(可编程控制技术,嵌入式控制技术、网络控制技术等)、自主协同控制技术(自组织控制技术、多智能体一致性控制技术等)等,该类技术用于实现 PE_{UC} 各要素的状态和运行过程多维度、多层次的精准感知,以及对其的调度管理和协同控制^[53]。

2) 数据处理技术。数据处理技术主要包括数据预处理技术(数据标准化、数据清洗、特征提取、特征选择等算法)、数据存储技术(NoSQL、Apache Cassandra、MongoDB 等数据库)、数据挖掘技术(SVM、K-means 聚类、FP-Growth 等挖掘算法)、数据融合技术(最小二乘法、目标关联算法、Kalman 滤波模型、贝叶斯模型等融合算法)等,该类技术实现 DTM_{UC} 数据的高精、实时、鲁棒的虚实融合,为 DTM_{UC} 的仿真分析、态势认知、智能决策、方案优化等提供可靠、充分、简洁的数据^[54]。

3) 建模仿真技术。建模仿真技术主要包括模型构建技术(纹理技术、实体建模技术、有限元分析技术等建模技术,其可通过 3D Studio Max、SolidWorks、Unity3D 等建模软件工具实现数字模型构建)、模型校核、验证与确认技术(语义分析、结构分析、白盒测试、回归测试等验证方法)、实例化技术等,该类技术将 PE_{UC} 的全要素、全过程、全功能进行精准的虚拟刻画。当前的模型构建技术侧重于几何模型的构建,无法从不同时空尺度表征物理实体的行为、特征、规则以及动态过程。未来的模型构建技术是多学科和多功能的综合,通过跨学科建模以达到模型的高精度、高可靠性^[55-56]。

4) 通信交互技术。通信交互技术主要包括物联网技术、空天地海一体化组网技术、军用通信技术(5G 以上通信技术)、数据传输技术(光纤传输技术、超宽带技术、卫星通信技术等)等,该类技术通过数据传输、交互,确保数字模型、数据、服务等的有效性。相比于 5G 通信技术,正在研发的 6G 通信技术,指标显著提升,应用范围突破虚实空间的边界,更加符合 DTM_{UC} 的通信需求^[57]。

5) 软件服务技术。软件服务技术主要包括软件开发测试技术(单元测试、功能测试、安全测试等测试)、软件兼容集成技术、微服务技术等,该类技术满足 DTM_{UC} 仿真程序的服务质量要求,提供以交互界面形式的标准输入输出^[58]。

6) 人工智能技术。人工智能技术主要包括知识工程技术(军事本体构建技术、语义技术、推理引擎技术等)、机器学习技术、机器视觉技术(目标检测与识别技术、自主导航技术、目标跟踪技术等)、自然语言处理技术(情报分析技术、文本分类与主题建模技术、多语种处理技术等)等,该类技术是 DTM_{UC} 运行的保障,其赋予 DTM_{UC} 自主学习和进化

的能力。通过人工智能算法模型推演,形成对战场态势的智能化认知,实现对博弈目标动向征候预测、装备资源灵活调度、时敏目标精准识别、博弈方案动态生成、博弈方案评估优化,确保最优博弈策略。目前人工智能技术在军事领域的应用日益广泛,但仍然处于刚刚起步和不断完善的阶段。由于现实战场态势瞬息万变,预先建立的人工智能模型可能无法与实际情况完全一致,进而影响问题的求解和方法的应用效果。未来人工智能技术可结合博弈论、统计学、复杂网络、信息论等理论,同时从硬件的角度出发进行技术的突破,从而完成 DTM_{UC} 的迭代优化^[59-60]。

7) 基础支撑技术。基础支撑技术主要包括安全技术(量子密钥分发技术、量子安全直接通信技术、多因素认证技术等)、软硬一体化技术、高性能计算技术等,该类技术为 DTM_{UC} 运行提供通用支撑。当前在军事高性能计算领域,国外占据垄断地位,通过控制标准来控制技术,在 MPI(Message Passing Interface)接口、高性能文件系统接口、分布式计算和调度接口等关键技术接口规范上不得不向外界开放,使 DTM_{UC} 的安全性受到潜在威胁,亟需统一标准,同时无人协同博弈数据体量巨大且结构异质,这对高性能计算技术的算力、可并行度等性能指标提出了更高要求。未来高性能计算技术在统一的技术标准体系基础上,将朝可定制化趋势发展,采用更多符合军事需求的不同结构和范式的处理器,提高计算能力的同时实现多种计算资源比例灵活调整 and 性能功耗的平衡^[61]。

4 结论

本文数字孪生技术驱动军事的变革。本文梳理总结无人协同博弈系统结构,结合数字孪生技术,提出无人协同博弈态势感知及博弈方案优化模型与无人协同博弈的数字孪生结构模型。分析其关键技术体系。本文的主要贡献如下:

1) 提出无人协同博弈态势感知及博弈方案优化模型,明确作战方案的优化机理,实现阶段博弈方案全局最优。

2) 提出无人协同博弈的数字孪生结构模型,以“物理层、虚拟层、数据层、服务层”为体系架构,以“数据连接”为驱动,以期实现态势实时感知、博弈方案优化决策、博弈过程动态调控等高质量

服务。

3) 为未来无人协同博弈数字孪生系统的深入研究提供理论和技术路线参考,助力未来数智化无人作战研究,对未来战场数字工程具有一定的潜在推动作用。

参考文献 (References)

- [1] 王耀南,安果维,王传成,等. 智能无人系统技术应用与发展趋势[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 9–26.
WANG Y N, AN G W, WANG C C, et al. Technology application and development trend of intelligent unmanned system [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 9–26. (in Chinese)
- [2] 初军田,张武,丁超,等. 跨域无人系统协同作战需求分析[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(6): 1–8.
CHU J T, ZHANG W, DING C, et al. Requirement analysis on cross-domain unmanned system cooperative operation [J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(6): 1–8. (in Chinese)
- [3] 宓铁良,段方,郭育青. 基于 Do DAF 理论的无人作战体系标准化研究[C]//中国航天电子技术研究院科学技术委员会 2020 年学术年会. 北京:中国空间电子技术研究院委员会, 2020.
MI T L, DUAN F, GUO Y Q. Unmanned combat system standardisation study based on DoDAF theory [C]//Proceedings of the 2020 Academic Annual Meeting of Science and Technology Committee of China Academy of Space Electronics Technology. Beijing, China: Science and Technology Committee of China Academy of Space Electronics Technology, 2020. (in Chinese)
- [4] 范博洋,赵高鹏,薄煜明,等. 多目标空地异构无人系统协同任务分配方法[J]. 兵工学报, 2023, 44(6): 1564–1575.
FAN B Y, ZHAO G P, BO Y M, et al. Collaborative task allocation method for multi-target air-ground heterogeneous unmanned system [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(6): 1564–1575. (in Chinese)
- [5] 魏强,张冬梅,范勇生. 多无人系统协同视觉 SLAM 算法[J]. 载人航天, 2023, 29(1): 29–35.
WEI Q, ZHANG D M, FAN Y S. Collaborative vision SLAM algorithm for multiple unmanned systems [J]. Manned Space Flight, 2023, 29(1): 29–35. (in Chinese)
- [6] 张建东,王鼎涵,杨啟明,等. 基于分层强化学习的无人机空战多维决策[J]. 兵工学报, 2023, 44(6): 1547–1563.
ZHANG J D, WANG D H, YANG Q M, et al. Multi-dimensional decision-making for UAV air combat based on hierarchical reinforcement learning [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(6): 1547–1563. (in Chinese)
- [7] PPOPE A P, IDE J S, MIĆOVIĆ D, et al. Hierarchical reinforcement learning for air-to-air combat [C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Athens, Greece: IEEE, 2021: 275–284.
- [8] 赵明皓,张翠萍,李宝安. 基于深度强化学习的无人艇控制应用研究[C]//第八届中国指挥控制大会论文集. 北京:国防工业出版社, 2020.
ZHAO M H, ZHANG C P, LI B A. An applied study of unmanned boat control based on deep reinforcement learning: [C]//Proceedings of the 8th China Command and Control Conference. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [9] 苏思,周万宁,吕亚飞,等. 海战场无人平台作战指挥模型体系管理与检验研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(24): 87–90.
SU S, ZHOU W N, LÜ Y F, et al. Study on operation command and control system management and evaluation for sea battlefield unmanned platform [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(24): 87–90. (in Chinese)
- [10] 靳崇,张宾,麻志强,等. 面向无人化陆战的指挥控制系统智能化运用[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(11): 12–19.
JIN C, ZHANG B, MA Z Q, et al. Intelligent application of the command and control system for unmanned-oriented land warfare [J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(11): 12–19. (in Chinese)
- [11] 周芳,铁清木,丁冉,等. 面向指挥决策支持的数字孪生系统[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(4): 14–18, 39.
ZHOU F, TIE Q M, DING R, et al. Digitaltwin system for command decision support [J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(4): 14–18, 39. (in Chinese)
- [12] 王旭东,陈晔,宦国杨,等. 面向作战指挥的数字孪生应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2021, 12(6): 26–32.
WANG X D, CHEN A, HUAN G Y, et al. Application of digital twin for command and control [J]. Command Information System and Technology, 2021, 12(6): 26–32. (in Chinese)
- [13] 邓烨,奉祁林,赵健. 数字孪生战场建设探讨[J]. 防护工程, 2020, 42(3): 58–64.
DENG Y, FENG Q L, ZHAO J. Discussion on construction of digital twin battlefield [J]. Protective Engineering, 2020, 42(3): 58–64. (in Chinese)
- [14] 纪广,郝建国,张振伟. 面向无人机作战的虚拟孪生系统设计方案[J]. 兵工学报, 2022, 43(8): 1902–1912.
JI G, HAO J G, ZHANG Z W. Designscheme of virtual twin system for UAV combat [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(8): 1902–1912. (in Chinese)
- [15] JI G, HAO J G, GAO J L, et al. Digital twin modeling method for individual combat quadrotor UAV [C]//Proceedings of the 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Beijing, China: IEEE, 2021: 1–4.
- [16] YANG J F, HUANG C M, WANG J R. The study and development of UAV digital twin system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2366: 12038.
- [17] 邱保金,李学坤,帅敏. 基于 TRIZ 理论与 KJ 法的办公区域储

物柜创新设计[J]. 包装工程, 2022, 43(24): 385–391.

QIU B J, LI X K, SHUAI M. Innovative design of office lockers based on TRIZ theory and KJ method [J]. Packaging Engineering, 2022, 43(24): 385–391. (in Chinese)

[18] 赵柱, 王毅, 樊芮锋, 等. 基于多主体 NetLogo 平台的反无人机 OODA 体系对抗建模[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1791–1800.

ZHAO Z, WANG Y, FAN R F, et al. Modeling onanti-UAV system-of-systems combat OODA loop based on NetLogo[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1791–1800. (in Chinese)

[19] 陈黎, 李芳芳, 冯清江, 等. 一种基于 OODA-A 环的防空体系及其作战时效分析[J]. 指挥与控制学报, 2021, 7(4): 383–388.

CHEN L, LI F F, FENG Q J, et al. Combat timeliness analysis of air defense system-of-systems based on OODA-A loop [J]. Journal of Command and Control, 2021, 7(4): 383–388. (in Chinese)

[20] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1–18.

TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1–18. (in Chinese)

[21] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1–18.

TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1–18. (in Chinese)

[22] 阎劲松, 沙勇忠, 王峥嵘. 公共协商视角的网络问政规则要素提取及构建[J]. 图书与情报, 2022(2): 48–56.

YAN J S, SHA Y Z, WANG Z R. The elements extraction and construction of rules of network politics from the perspective of public deliberation[J]. Library & Information, 2022(2): 48–56. (in Chinese)

[23] 徐彤. 抗美援朝战争的出兵战机运筹研究[J]. 军事历史, 2023(1): 36–44.

XU T. Anoperational research on the timing to send the forces in the war to resist US aggression and aid North Korea[J]. Military History, 2023(1): 36–44. (in Chinese)

[24] 邵青. 中印边境战争史实辨析[J]. 军事历史研究, 1999(4): 148–154.

SHAO Q. A Debate on the historical facts of the Sino-Indian border War[J]. Military History Research, 1999(4): 148–154. (in Chinese)

[25] 龙沛. 两伊战争制空权争夺与战局联动关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.

LONG P. A Research on the relationships between the airpower struggle and the war situation in the Iran-Irag War [D]. Chongqing: Southwest University, 2018. (in Chinese)

[26] 大卫·威科勒, 张艳明, 周丽娅. 侥幸的胜利改变了海军的潮流——马岛战争: 美英现代海军发展的分水岭[J]. 国际展望, 2004(10): 38–41.

WINKLER D, ZHANG Y M, ZHOU L Y. A fluke fictory changes the naval tide-The Battle of the Isle of Man: a watershed in the development of the modern US and British navies [J]. Global Review, 2004(10): 38–41. (in Chinese)

[27] 朱涛, 李淋杰, 凌海风. 无人机在叙利亚战争中的作战运用与启示[J]. 飞航导弹, 2018(11): 31–34.

ZHU T, LI L J, LING H F. The operational use of drones in the Syrian War and implications [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(11): 31–34. (in Chinese)

[28] 吴静, 蔡海锋, 刘俊良. 纳卡地区冲突无人机攻防运用分析及地空反无人对策建议[J]. 现代防御技术, 2021, 49(3): 13–20.

WU J, CAI H F, LIU J L. Analysis on the operation of attack and defense of UAVs in Naka conflict and suggestions for ground-to-air anti-UAVs [J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(3): 13–20. (in Chinese)

[29] 宋洁璇, 杨航, 吴戈男, 等. 从俄乌冲突看典型陆战场天基信息战术应用[J]. 中国军转民, 2023(19): 146–147.

SONG J X, YANG H, WU G N, et al. Tactical applications of space-based information for the typical land battlefield in the light of the Russian-Ukrainian conflict [J]. Defence Industry Conversion in China, 2023(19): 146–147. (in Chinese)

[30] 杨斌. 空中分布式作战概念及关键技术分析[J]. 电讯技术, 2022, 62(6): 826–835.

YANG B. Concepts and key technology analysis for air distributed operations [J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(6): 826–835. (in Chinese)

[31] 张为华. 战场环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

ZHANG W H. Introduction to the battlefield environment [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)

[32] 李昌玺, 于军, 徐颖, 等. 联合作战条件下战场态势感知体系构建问题研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(6): 680–684.

LI C X, YU J, XU Y, et al. Construction problem study on battlefield situation awareness system under joint operation [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(6): 680–684. (in Chinese)

[33] 孙盛智, 侯妍. 太空信息对联合作战能力影响研究[J]. 飞航导弹, 2019(1): 64–68.

SUN S Z, HOU Y. Study of the impact of space information on joint warfighting capabilities [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(1): 64–68. (in Chinese)

[34] 张靓. 战场电磁态势生成内涵与体系架构综述[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(1): 6–10, 27.

ZHANG L. Overview of the connotation and architecture of battlefield electromagnetic situation generation [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2022, 45(1): 6–10, 27. (in Chinese)

[35] 全杰, 贺庆. 跨域融合机理与运用研究[J]. 中国电子科学研

- 究院学报, 2021, 16(12): 1205–1214.
- QUAN J, HE Q. Research on mechanism and application of cross-domain synergy [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(12): 1205–1214. (in Chinese)
- [36] 刘网定, 张国宁, 郑世明. 基于深度强化学习的作战实体智能感知与决策研究[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(5): 164–169.
- LIU W D, ZHANG G N, ZHENG S M. Research on intelligent perception and decision-making of combat entities based on deep reinforcement learning [J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(5): 164–169. (in Chinese)
- [37] 王亚儒, 张勇, 邸江芬. 基于知识图谱的战法知识库构建技术[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(6): 158–161, 170.
- WANG Y R, ZHANG Y, DI J F. Construction technology of knowledge base about operational methods based on knowledge graph [J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(6): 158–161, 170. (in Chinese)
- [38] 周芳, 毛少杰, 吴云超, 等. 实时态势数据驱动的平行仿真推演方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(4): 323–328.
- ZHOU F, MAO S J, WU Y C, et al. A parallel simulation deduce method based on real-time situation data driven [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(4): 323–328. (in Chinese)
- [39] 李智, 吕铁鑫, 潘艳辉. 联合全域作战智能博弈优化一体化决策问题[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(3): 1–8.
- LI Z, LÜ T X, PAN Y H. Research on integrated decision-making problems of intelligent game ptimization in JADO [J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(3): 1–8. (in Chinese)
- [40] 丁蕊. 复杂高维多目标优化方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- DING R. Complex high-dimensional multi-objective optimisation methods [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020. (in Chinese)
- [41] 李航, 刘代金, 刘禹. 军事智能博弈对抗系统设计框架研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 116–121.
- LI H, LIU D J, LIU Y. Architecture design research of military intelligent wargame system [J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 116–121. (in Chinese)
- [42] HUANG X F. A general framework for constructing cooperative global optimization algorithms [C] // FLOUDAS C A, PARDALOS P. Boston, MA, US: Springer, 2004: 197–221.
- [43] 饶小康, 马瑞, 张力, 等. 基于 GIS + BIM + IoT 数字孪生的堤防工程安全管理平台研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(1): 1–7.
- RAO X K, MA R, ZHANG L. Study and design of dike engineering safety management system based on GIS + BIM + IoT digital twin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(1): 1–7. (in Chinese)
- [44] 丁柏圆, 穆富岭, 李云鹏, 等. 面向复杂电磁环境的体系作战仿真平台设计[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(2): 330–338.
- DING B Y, MU F L, LI Y P, et al. Design of system combat simulation platform for complex electromagnetic environment [J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 330–338. (in Chinese)
- [45] 肖彬, 李琳琳, 张文瑾. 美军战术级指挥信息系统界面设计的发展及启示[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(2): 11–16.
- XIAO B, LI L L, ZHANG W J. Development and inspiration of interface design in tactical-C4ISR system of the U. S. Army [J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(2): 11–16. (in Chinese)
- [46] 刘岗, 陈超, 赵铁男, 等. 作战指挥控制系统人机交互设计流程研究[J]. 包装工程, 2020, 41(14): 85–91.
- LIU G, CHEN C, ZHAO Y N, et al. Human-computer interaction design process of command and control system [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(14): 85–91. (in Chinese)
- [47] 张祖磊. 基于强化学习的进攻防御作战辅助决策系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- ZHANG Z L. Design of reinforcement learning based aided decision making system for offensive and defensive operations [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
- [48] 于佳慧, 孙子祥, 项祺, 等. 元宇宙赋能指挥控制: 未来虚实融生的作战推演[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(3): 260–269.
- YU J H, SUN Y X, XIANG Q, et al. Metaverse enabling command and control: Combat deduction of virtual reality in the future [J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(3): 260–269. (in Chinese)
- [49] ZHANG M, TAO F, HUANG B Q, et al. Digital twin data: methods and key technologies [J]. Digital Twin, 2021, 1: 2.
- [50] 张晓芳, 程瑞龙, 张子瑜. 多机器人虚实一体化协作工作站设计与实现[J]. 现代制造工程, 2022(10): 27–33.
- ZHANG X F, CHENG R L, ZHANG Z Y. Design and realization of multi robot cooperative system with virtual-actual integration [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(10): 27–33. (in Chinese)
- [51] 曹小华, 李泊恒, 徐上尉. 基于 MQTT 协议的物联网岸电监控系统[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(3): 11–16, 27.
- CAO X H, LI B H, XU S W. Shore power monitoring system of internet of things based on MQTT protocol [J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(3): 11–16, 27. (in Chinese)
- [52] 陶飞, 张辰源, 刘蔚然, 等. 数字工程及十个领域应用展望[J]. 机械工程学报, 2023, 59(13): 193–215.
- TAO F, ZHANG C Y, LIU W R, et al. Digital engineering and its ten application outlooks [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(13): 193–215. (in Chinese)
- [53] 李博骁, 包钊源, 陆泽健, 等. 面向空天预警的多源异构装备一体化协同探测技术研究[J]. 现代雷达, 2023, 45(6):

51–56.

LI B X, BAO D Y, LU Z J, et al. A Study on integrated cooperative detection technology of multisource heterogeneous equipment for air-space early warning[J]. Modern Radar, 2023, 45(6): 51–56. (in Chinese)

[54] 李归, 伍光新, 薛慧, 等. 海战场态势生成技术发展综述[J]. 电讯技术, 2022, 62(5): 678–685.

LI G, WU G X, XUE H, et al. An overview of situation generation technology for sea battlefield[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(5): 678–685. (in Chinese)

[55] QI Q L, TAO F, HU T L, et al. Enabling technologies and tools for digital twin[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 3–21.

[56] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1–15.

TAO F, ZHANG H, QI Q L, et al. Theory of digital twin modeling and its application [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1–15. (in Chinese)

[57] 张子龙, 陈娟, 沈晓平. 5G/6G 推动下的数据链系统发展设想[J]. 指挥信息系统与技术, 2021, 12(5): 98–104.

ZHANG Z L, CHEN J, SHEN X P. Idea of data Link system development driven by 5G and 6G[J]. Journal of Command and Control, 2021, 12(5): 98–104. (in Chinese)

[58] 翟岩龙, 孙文心, 包天虹, 等. 基于微服务的边缘侧仿真方法及框架研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(12): 4536–4545.

ZHAI Y L, SUN W X, BAO T H, et al. Edge-side simulation method and framework based on micro-services [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4536–4545. (in Chinese)

[59] 武琼. 美国人工智能反恐: 路径、动因与挑战[J]. 新疆社会科学, 2022(3): 103–112.

WU Q. U. S. Artificial intelligence counterterrorism: Paths, motivations, and challenges [J]. Social Sciences in Xinjiang, 2022(3): 103–112. (in Chinese)

[60] 张梦钰, 豆亚杰, 陈子夷, 等. 深度强化学习及其在军事领域中的应用综述[J/OL]. 系统工程与电子技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20221025.1142.014.html>.

ZHANG M Y, DOU Y J, CHEN Z Y, et al. Deep reinforcement learning and its applications in military field[J/OL]. Journal of Systems Engineering and Electronics. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20221025.1142.014.html>. (in Chinese)

[61] 陆平静, 熊泽宇, 赖明澈. 高性能计算技术及标准现状分析[J]. 计算机科学, 2023, 50(11): 1–7.

LU P J, XIONG Z Y, LAN M C. Survey on high-performance computing technology and Standards [J]. Computer Science, 2023, 50(11): 1–7. (in Chinese)