

引用格式: 向锦武, 董希旺, 丁文锐, 等. 复杂环境下无人集群系统自主协同关键技术[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 527570. XIANG J W, DONG X W, DING W R, et al. Key technologies for autonomous cooperation of unmanned swarm systems in complex environments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 527570 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2022.27570

复杂环境下无人集群系统自主协同关键技术

综述

向锦武^{1,2,3}, 董希旺^{2,4*}, 丁文锐³, 索津莉⁵, 沈林成⁶, 夏辉⁷

1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191
2. 北京航空航天大学 人工智能研究院, 北京 100191
3. 北京航空航天大学 无人系统研究院, 北京 100191
4. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191
5. 清华大学 自动化系, 北京 100084
6. 国防科技大学 研究生院, 长沙 410073
7. 北京电子工程总体研究所, 北京 100074

摘要: 在高动态、不确定、资源受限等复杂环境下, 无人集群系统执行协同区域搜索、集群优化调度等任务将会面临“感知—判断—决策—行动(OODA)”回路各个领域的挑战。为了提升无人集群系统的任务场景适应能力, 必须突破复杂环境下无人集群系统自主协同关键技术。以复杂环境下大规模异构无人集群鲁棒自主协同理论为基础, 探讨了复杂环境下无人集群系统自适应异构体系架构设计与建模方法, 梳理了复杂环境下高维态势分布式感知与认知、可引导、可信任、可进化的智能决策、复杂环境下无人集群系统自主协同控制 3 个科学问题。首先综述了复杂环境下无人集群系统自主协同的研究进展; 其次, 分析了无人集群系统 OODA 任务回路面临的挑战; 然后, 初步梳理了复杂环境下无人集群系统自主协同涉及的各项关键技术及其进展; 最后, 给出了无人集群系统自主协同领域未来发展的思考。

关键词: 无人集群系统; 异构体系架构; 分布式感知与认知; 智能决策与规划; 协同控制; 仿真应用验证

中图分类号: V279

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2022)10-527570-33

无人集群系统自主协同是 2017 年《新一代人工智能发展规划》核心内容和 2020 年新基建的关键支撑, 在国民经济和社会发展主战场中有广阔应用前景。无人集群自主协同是 Gartner 2020 年十大战略技术趋势, 是美国“第 3 次抵消战略”和“马赛克战”中的颠覆性前沿技术。无人集群系统通过异构无人平台之间的协同互补可显著提升任务执行效能, 在大规模协同区域搜索、集群优化调度等多种任务应用中展现出广阔的应用前景。在实际应用中, 无人集群系统需要满足环境开放、

态势多变、资源受限、响应实时等需求, 要求系统具备分布式协同感知、智能协同决策、鲁棒协同控制等核心协同能力。

目前, 国际范围内学术界和产业界尽管在复杂环境下无人集群系统自主协同相关理论和技术方面取得了一系列突破, 并在特定场景下开展了小规模无人集群技术验证试验, 但是仍然无法应对高动态、不确定、资源受限等复杂环境带来的技术挑战, 尤其是没有一套开放性异构无人集群体系架构作为支撑, 没有形成完整的任务链、杀伤链

收稿日期: 2022-06-04; 退修日期: 2022-06-17; 录用日期: 2022-07-07; 网络出版时间: 2022-07-15 16:32

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2022/V43/I10/527570>

基金项目: 2020 年度科技创新 2030-“新一代人工智能”重大项目(2020AAA0108200)

* 通信作者。E-mail: xwdong@buaa.edu.cn

闭环(即感知、认知、决策、执行、评估的全流程闭环)。

本文面向大规模无人集群系统在大气污染检测、园区无人物流、火灾救援等多任务应用需求,阐述了复杂环境下大规模异构无人集群鲁棒自主协同的基础理论与关键技术。通过对复杂环境下无人集群系统执行任务的场景及能力需求的分析,梳理出相关方向存在的挑战与难点。围绕目前学术界和工业界的研究进展,概述了无人集群系统自主协同的新理论、新技术和新进展。最后给出了复杂环境下无人集群系统自主协同领域未来的发展方向思考。

1 国内外研究现状

1.1 复杂环境下无人集群系统自适应异构体系架构和建模方法

无人集群通常是由大规模相对简单的无人平台组成的、通过无人平台个体之间的局部协作实现全局协同行为的群体系统。国内外针对无人集群领域做了大量探索性工作,例如编队飞行、任务规划、目标跟踪等,但是针对无人集群体系架构研究的报道相对较少。无人集群体系架构研究的目的在于采用何种方式将无人平台、载荷、功能模块等要素组织起来,从而发挥集群更大的效能,因此体系架构是构建集群系统首要解决的问题^[1]。

国外影响力较大的军事领域的体系结构框架有美国军方的信息通讯指挥攻击系统(Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, C4ISR)体系结构框架和国防部体系结构框架(Department of Defense Architecture Framework, DoDAF)、英国军方国防部体系结构框架(Ministry of Defense Architecture Framework, MoDAF)等,其中 DoDAF 影响和应用最为广泛。DoDAF 是由美国国防部根据多年研发军事系统的经验结合系统工程技术制定的一种结构框架(Architectural Framework, AF)。国内基于 DoDAF 定义的结构产品构建结构模型的研究成果包括:指挥控制、交战管理与通信(Command, Control, Battle Management and Communications, C2BMC)系统结构^[2],天基信息支援作战系统结构^[3],以及防

空反导作战体系结构^[4-5]等,但是用基于 DoDAF 框架的方法对无人集群执行任务概念和结构建模的研究鲜见报道。

根据信息交互的策略,现有集群架构通常分为集中式和分布式架构。分布式架构具有较好的扩充性和容错性,能够将突发影响限制在局部范围内,适宜于大规模系统。在项目开发方面,美国国防部高级研究计划局^[6](Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)发布系统集成技术和试验(System of System Integration Technology and Experimentation, SoSITE)项目,寻求开发并实现用于新技术快速集成的系统架构概念,无需对现有能力、系统或体系进行大规模重新设计,并在拒止环境中协同作战(Collaborative Operations in Denied Environment system, CODE)的项目^[7]。构造了一个综合真实/虚拟/构造环境的测试框架。美国海军研究生院建立了无人集群任务行动“使命—战术—行动—算法—数据”5层任务框架^[8]。美国国防部概括并抽象出了无人集群行动建模与仿真问题域框架“思考—观察—移动—会话—工作”,并给出解决这些问题的方案;中国有几家单位做过几十、上百架无人机飞行试验,如北京航空航天大学^[9]、中国电子科学研究院^[10]、国防科技大学^[11]等,但其飞行是分别对每架无人机进行控制的,并没有一套具备通用/开放性的体系架构作为支撑。

效能评估理论是随着航空科学技术的发展而逐步成熟起来的一门多体系交叉的学科,用来评价系统执行特定任务所能达到预期目标的有效程度。中国的效能研究起步比较晚,较系统地进行效能分析是20世纪80年代后期才开始的,历史虽然不长,但发展较快,在近几年已形成了基于模糊技术的方法,包括层次分析法、模糊综合评价法、灰色评估及分析法等^[12-13]。在无人集群效能评估研究方面,中国学者开展了部分研究,包括:文献^[14]围绕对地攻击型无人机群协同作战问题,引入了多机协同效能影响因子表示多载荷之间的影响关系,研究了以任务载荷为变量的无人机群的协同作战效能计算模型;文献^[15]建立了对敌攻击型无人机作战效能评估指标体系,在此基础上建立了综合指标模型,完善了效能模型中的各分项能力;文献^[16]基于“感知—判断—决

策—行动 (Observation–Orientation–Decision–Action, OODA)”循环分析了无人机协同作战各阶段的效能影响因素,设计了一套无人机协同作战效能评估体系与模型,并对模型进行了验证;文献[17]针对无人机空地作战效能评估问题,提出了基于自适应粒子群算法优化反向传播神经网络的无人机空地作战效能评估方法,对空地作战效能评估的主要影响因素进行了分析,总结了无人机空地作战效能评估指标体系;文献[18]以经典有效、可依赖、能力 (Avaliability, Dependability, Capacity, ADC) 模型为基础,考虑了保障度和突防因素,提出了适合体系作战条件下侦察无人机作战效能评估改进模型,建立了作战效能评估指标体系;文献[19]在分析未来智能无人机群体作战需求和特点的基础上,研究构建了一套通用的效能评估指标体系架构,为智能无人机群体效能的科学评估提供理论基础。中国目前有做过几十、上百架无人机集群飞行试验,但都没有一套开放性异构集群体系架构作为支撑。随着无人集群节点规模和构型的增加,异构集群体系架构设计难度呈指数上升;现有体系架构通常只关注特定领域,很少能够适应多种任务。为满足复杂环境下任务多样性需求,亟待建立一套大规模异构无人集群自适应开放式体系架构,并形成统一的标准规范。文献[20]指出无人集群的协同 OODA 框架是未来重要发展方向。

1.2 复杂环境下高维态势分布式感知与认知

无人集群协同感知主要包含协同定位技术、协同目标识别、多源传感器协同优化和协同目标跟踪等方面的内容。视觉同步定位与建图技术通过视频摄像头获取的环境信息对无人机的位置、姿态及其所处环境进行稀疏三维地图构建。面向无人集群的应用场景可分为多无人机场景和无人机与无人车协同场景。针对多个无人机协同的场景,扩展卡尔曼滤波-即时定位与地图构建 (Extended Kalman Filter–Simultaneous Localization and Mapping, EKF-SLAM)、粒子滤波-即时定位与地图构建 (Particle Filter–Simultaneous Localization and Mapping, PF-SLAM)^[21]、图-即时定位与地图构建 (Graph–Simultaneous Localization and Mapping, Graph-SLAM)^[22] 技术均在不同的

使用场景下实现了协同定位,其中,EKF-SLAM 更适用于图像特征点明显的环境,PF-SLAM 的检测完整性相对更好,Graph-SLAM 的计算量相对较小,适用于高动态的场景。无人机与无人车协同感知架构可以实现对环境更精确的地图构建,一方面无人机通过摄像头扩大视野范围,另一方面无人车使用激光雷达等传感器实现精准定位,从而得到的全局地图既涵盖了较大的探测范围,又实现了高精度探测^[23–24]。

协同目标识别通过多无人机之间充分关联目标之间的信息,得到共同提升的目标识别结果。FAST-RCNN^[25]、Yolo^[26] 等算法均提供了较好的单目标检测率,实现了在不同场景下的目标跟踪。文献[27]提出了一种简单高效的数据关联方法用于多目标跟踪,利用检测框和跟踪轨迹之间的相似性,在保留高分检测结果的同时,从低分检测结果中去除背景,挖掘出真正的物体,从而降低漏检并提高轨迹的连贯性。

由于单一传感器无法满足全天候、全天时、全地域、高精度感知等方面的要求,需要多源传感器的部署满足无人集群的感知认知任务。然而,复杂环境的多源传感器往往极难实现同步,因此需要对无人集群的多源传感进行进一步优化。传感器同步问题往往转换成基于概率图模型的估计算法,将状态估计问题表示成因子图,并对因子图进行分解求解。Chen 等^[28]提出一种基于因子图的多源融合算法,解决了分布式导航中的多源传感器异步的问题,张靖等^[29]将因子图转换成概率模型,以解决传感器异步带来的拟合误差。

受到单传感器探测范围和探测精度的制约,利用多源传感器组成分布式传感器网络,可以对大机动目标进行分布式估计,获得目标精确的位置、速度、加速度等关键状态信息。在实际复杂环境中^[30–35],多传感器多为异质异构的,首先需要解决多源异质传感器的分布式融合问题,相关学者开始研究基于一致性的分布式跟踪算法来对异质传感器探测信息进行有效融合^[36–39]。其次,考虑到能量消耗和对抗干扰场景,Li 等^[40]提出一种基于事件触发的分布式状态估计算法在实现大机动目标准确状态估计的同时引入事件触发机制,有效节省能量并减小被地方探测到的概率。考虑到部分传感器节点失效的问题,Dong 等^[41]提出

一种切换拓扑下的分布式估计算法,通过有效的拓扑切换,时刻以最佳的观测阵位获取到目标的有效观测信息,实现鲁棒协同跟踪。

无人集群协同认知技术包含多源协同威胁判定、协同态势图生成等方面的内容。协同威胁判定采用多层次的评判方法,兼顾无人集群的风险因素,对当前无人集群所处环境的威胁进行判定。考虑到相对距离、相对方位、速度等方面的因素,判定某一目标是否会对无人集群的正常行驶造成威胁。现有的协同威胁判定算法往往应用在空战、无人车自主避障等场景。例如,据空战效能、空战态势及作战意图所建立的目标威胁评判模型。吴亚辉等^[42]依据视觉深度学习方法研究了机器人环境感知及自主避障方法,为机器人仅依赖视觉和惯导传感器就可以实现障碍物识别和自主移动避障提供了依据和参考。无人集群的协同认知技术目前还存在较大的发展空间,在面向不同的应用场景下,需要进一步对无人集群面临的威胁进行精确的定义,以支撑后续的威胁判定和避障算法。

1.3 可引导、可信任、可进化的无人集群系统智能决策与规划

多变任务类型和复杂动态环境下大规模飞行器集群协同决策规划的整体架构包含决策层与规划层。决策层在宏观层面上进行集群内各智能体的任务分配或行为决策,规划层在动力学层面上为每个智能体设计状态转移的轨迹^[43]。

集群协同决策是实施编队协同作战的关键支撑,通过对战场环境、作战需求以及各种约束条件的综合分析,在任务决策层面对多个飞行器的作战任务进行合理规划,可以提升飞行器集群协同效能^[44]。任务分配问题本身也是一个离散整数规划问题^[45],典型方法包括匈牙利算法、拍卖算法、粒子群算法^[46]等。从求解策略上来看,基于启发式的生物群体智能算法(如狼群算法^[47]等)在解决小规模飞行器集群系统的任务分配问题具有良好的应用效果。然而随着约束的复杂化、集群的大规模化,经典的算法求解时间的局限性将会不断凸显。因此,基于强化学习的方法强调在与环境的交互中学习,最贴近人类的学习模式,在求解多约束条件下任务分配问题有潜在

的应用前景。文献^[48]构建面向数量可变的无人机集群自主协同任务的网络,通过回报组合、参数调整、观测空间设计,进一步实现无人机集群自主协同任务优化与分配。还有一些工作^[49-50]将强化学习应用于无人机的决策中,并拓展到了移动边缘计算等多种应用场景。尽管基于学习类的智能任务分配方法有一定优势,然而其对环境的复杂性和任务场景的多样性较为敏感,而且训练的过程不易收敛,尚存在一些有待突破的难题。

协同规划的核心任务则是规划集群内各个智能体状态转移的轨迹^[51]。一般情况下,智能体的运动须保证不与障碍物发生碰撞,满足自身动力学的约束,而且实现任务层的特定需求^[52]。在未知环境下部署多智能体的困难主要包括障碍物参数化困难、感知距离有限、通信可靠性低以及不一致的定位引起的定位漂移^[43]。与单机轨迹规划^[53]相比,协同规划面临的两大额外挑战是集群个体间的拓扑规划与相互避障。在拓扑规划方面,文献^[54]提出了一种拓扑规划方法,在复分析中二维曲面的同源等价关系的基础上,将Voronoi图与采样式全局路径规划方法,以及TEB(Timed-Elastic-Bands)局部轨迹规划方法相结合。此外,在文献^[55]研究的基础上,香港科技大学^[56]提出了一种高效的拓扑等价性检查方法,实现了实时拓扑规划。在相互避障方面,速度障碍法可用于以点描述的机器人^[57],完整约束智能体^[58]以及非完整约束智能体^[59]。卡内基梅隆大学的研究者^[60]提出了一种分布式的异步规划方法,使无人机能够躲避静态与动态障碍,并保证集群内不发生碰撞。然而,目前大部分研究仍无法应用于自然环境下的全自主集群系统。总体来说,飞行器集群在线决策规划方法的实时性和精确性之间存在着严重矛盾,这也是集群协同规划研究的重点和难点。

1.4 复杂环境下无人集群系统自主协同控制

自然界中的生物个体,可以通过局部交互,形成复杂的群体行为,实现相互配合,弥补自身的不足。例如鱼群长途迁徙^[61]、蚁群协同搬运^[62]、狼群协同捕食^[63]等。从宏观系统的角度来看,集群系统具有自适应高、鲁棒性强、应用前景广等特点^[64]。

作为实现群体智能的重要手段之一,无人集群的协同控制问题受到了国内外研究学者的广泛关注,其主要的协同控制应用主要包含:一致性控制^[65-67]、编队控制^[68]、编队跟踪控制^[69]、编队-合围控制^[70]等。实际上,根据多领导者和跟随者在状态/输出空间中的相对位置差异,无人集群编队跟踪控制问题可以转化为编队-合围控制。集群系统的编队-合围控制可以定义为,跟随者的状态/输出进入领导者状态/输出形成的凸包的内部。编队-合围控制可以广泛应用于有人/无人战斗机协同攻击的过程中。文献^[71]等给出了编队-合围的充分条件。文献^[72]研究了一阶与二阶集群系统的编队-合围控制,同时给出了编队-合围的充分条件。国内外研究学者研究了高阶系统的编队-合围控制,进一步研究了多源干扰下,具有时变输入的跟踪-领导者下的编队-合围控制问题^[73]。随着一致性理论的快速发展,不少学者提出了一些重要的基于一致性的协同控制策略。

无人集群(无人机、无人车等)在实际执行协同任务时,会受到外部复杂环境的约束。例如,在无人物流场景中,送货无人机在城市执行协同任务时往往受到外部电磁设备的干扰造成无人机之间通信的中断;森林灭火无人机在执行森林协同灭火与救援时候,恶劣的外部环境往往对无人机的控制协议的鲁棒性提出了更高的要求;在大气监测场景,领航多旋翼无人机进行环境监测时候,外部的干扰往往造成领航无人机存在着未知外部控制输入的情况发生,这就导致无人集群采用常规的控制协议时,无法能够保证集群实现最终的协同任务。面对不同约束条件下衍生出的无人集群系统协同控制问题,国内外的一些学者得到了非常重要的理论结果。例如:利用一致性理论,研究学者在文献^[74-75]中分别研究了切换拓扑、多领导者、输入饱和、非线性约束等条件下的编队跟踪控制问题,但是无人集群在实际执行协同任务时受到的外部扰动情况更加复杂,现有控制方法并不能准确地消除其影响。

在更多实际应用场景下,无人集群可能存在不同的动力学,例如无人机与无人车组成的空地协同搜索场景,因为无人机具有视野范围广、灵活性高等特点,可以为无人车提供通信中继的功能。对于异构集群系统,国内外研究学者首先针对一

阶和二阶多智能体所组成的特殊异构集群系统,考虑多约束条件,给出了实现一致性的控制方法^[76]。进一步基于内模原理与输出调节理论,异构集群系统的研究逐渐由低阶系统转到一般系统,由无领导者转向有领导者的控制^[77]。在机器人控制领域,Duan等^[78]研究了由一组无人机与无人车所组成的异构多机器人系统的编队控制问题。考虑无向联合连通拓扑、离散时间、非线性、输入饱和和约束的影响,众多文献提出了对应的异构集群编队跟踪方法。进一步针对高阶异构集群系统,国外学者研究了高阶异构集群系统的编队-合围跟踪控制问题,利用跟踪-领导者来刻画集群整体的宏观运动,基于输出调节策略构造了间歇通信条件下的编队-合围跟踪协议。文献^[79]基于自适应控制理论设计了完全分布式的编队-合围跟踪控制器。为了有效控制整个集群系统的宏观运动轨迹,利用输出信息构造观测器,Li等^[80]提出了一种全分布式控制器,实现异构集群的编队合围跟踪控制。目前国外的无人集群仿真越来越贴近实际场景,当前集群系统的研究仍然以实验室等理论环境为主,尤其针对复杂异构集群系统,关于实际任务场景的研究很少,缺乏针对实际应用场景的验证。

1.5 复杂环境异构无人集群自主协同技术应用验证

无人集群具有廉价、小型、便于大规模运输和部署的特点,近些年在火灾救援、大气监测、物流运输等方面发挥出越来越重要的作用。在森林火灾扑救场景中,多旋翼无人机的应用较为广泛^[81]。通过高空勘察可以协助消防人员动态掌握火势发展蔓延方向及现场灭火力量分布情况,发现被困人员,以及锁定明火目标和探测残火^[82]。无人机集群在空地协同搜救活动中,可以有效规避危险,并且提高搜救效率,在地震、火灾等场景中都能发挥巨大作用^[83]。

无人配送不仅可以降本增效,还能缓解劳动力短缺问题,市场空间极大,是无人集群在复杂环境应用验证的重要场景。中国无人配送市场空间可达到7 500亿元,预计2030年无人配送市场可达到万亿级。近些年全球各大电商或物流巨头正投入大量人力、物力发展无人机物流。以无人仓、

无人车、无人机为代表的各项无人技术迅猛发展,加快了智慧物流发展的步伐。美国网络电商公司亚马逊,将大数据、人工智能和云计算等技术运用于仓储和物流管理,开创了一整套以高科技为支撑的电商仓储物流模式。中国京东、顺丰、菜鸟等物流公司近些年也在进行无人机物流研发,并取得了一些显著的成果,无人集群进行协同转运与配送货物更能提高物流工作效率。例如:以无人机协同配送货物时,单个无人机的载重量较小,通过多个空中无人机组成小规模集群系统进行协同配合,将货物空中搬运到目的地,可以有效地提高工作效率。由无人车-无人机高低搭配的异构无人集群系统进行无人配送货物时,当地面无人车遇到山陵等障碍导致路面交通不便时,空中无人机可以将货物进行空中运送,实现货物的快速送达。因此,无人集群在现代无人物流中有着广阔的应用前景。

在环境监测方面,利用新型传感技术、卫星遥感监测、无人机航测等科技手段开展无人机、无人车等设备的气体环境监测,为大气污染防治提供了新思路^[84-85]。利用无人机、无人车等非接触设备协同作业的方式,能够同时从高空俯瞰和深入烟雾与有毒气体、污染气体的区域,拓展了信息监测维度,能够在更短的时间里更加高效地获取更为全面的信息。

目前对无人集群建模与仿真的研究,主要聚焦机器人操纵系统、无人系统任务规划、编队控制、自组网通信、智能算法等技术层面。当前,国内外关于无人集群系统协同技术的面向特定场景和半开放环境下的单项技术仿真验证取得了一定成果^[86-88]。美国海军研究生院以无人集群ISR以及空战任务为例给出了其作战行动军事概念模型示例,并建立了无人集群作战行动“使命—战术—行动—算法—数据”5层任务框架仿真平台。清华大学提出了一种在实验室环境下低成本的人工智能无人机集群控制演示验证系统。国防科技大学围绕无人集群体系仿真试验床,提出了基于复杂系统的体系理解、面向整个武器装备体系等8条新理念。

进行无人机集群协作完成任务实物试验,不论是发挥无人机在未来军事还是民用中的广泛作用都有着显著优势。美国国防部战略能力办公室

开展了“山鹑”微型无人飞行器项目,进行了“山鹑”无人飞行器空中发射试验、发射机编队试验,用来研究无人飞行器集群的群体决策、编队飞行和协同侦察等能力。北京航空航天大学通过无人机集群飞行试验,对无人机集群自主飞行控制、仿生视觉认知与智能感知、飞行器智能决策与智能控制等技术进行探索验证。中国电子科学研究院开展了200架固定翼无人机集群飞行试验。国防科技大学研制了20架规模的小型固定翼无人机集群飞行验证系统。在“无人争锋”无人集群智能挑战赛中,空天神剑队将异构集群系统控制技术攻关和集成验证系统成果应用于比赛中,并获得多个比赛的冠军。

在体系架构方面,随着无人集群节点规模和构型的增加,异构集群体系架构的设计难度呈指数上升,现有体系架构通常只关注特定领域,很少能够适应多种任务,复杂环境下无人集群系统任务对系统架构的适应能力和异构节点间的互操作能力要求更高,因此亟需开展自适应异构体系架构和建模方法研究,并形成统一的标准设计框架与规范。此外,中国对无人集群效能认知与评估方法依然存在局限,受国外研究影响较大,在结合实际情况进行分析时适配性不足,亟待建立一套适用于多任务场景的无人集群效能评估体系。

在感知认知方面,基于多源信息融合的分布式协同目标跟踪技术,在国内的研究中目前已经形成一套完成的体系架构,一些基础性的研究已经非常成熟并大规模地应用,例如多传感器时间同步技术,多传感器空间对准技术。然而,现有的算法架构针对一些极端光照及恶劣气候条件无法实现鲁棒的感知认知。例如,在夜间等弱光照射的场景,感知算法无法精准捕捉到目标物体,导致认知算法不能对物体目标物体进行检测和高精度追踪;降雨、雾霾等气候均会对感知能力造成影响,从而影响认知算法的精确度。在实际应用中,现有的算法需突破以上瓶颈,从而实现高效鲁棒的无人平台全天候全场景感知认知技术。

在决策规划方面,国内在小规模集群系统协同决策规划领域已取得较为扎实的研究基础,算法的理论性强,在适应动态任务与环境、小规模集

群协同、同构智能体协同优化等挑战性问题取得了一定的进展。但面对大规模的集群协同问题,首先,由于集群规模的增长,集群协同决策规划问题复杂度呈指数级增长,解决小规模问题的方法不再适用;其次,集群协同通常依赖于组网,客观存在的时延、丢包、误码、拓扑快变,使得集群协同决策规划更加困难,一旦遇到复杂电磁环境,更是难上加难;第三,大规模集群往往可能伴随着异构组成,需要技术方法能够适应集群异构性质。

在协同控制方面,目前国外学者开展无人集群协同控制方面的研究比较深入,集群的仿真也越贴近实际场景,而当前中国学者对于集群系统的研究仍然以实验室等理论环境为主,尤其针对于复杂异构集群系统,关于实际任务场景的研究很少,缺乏针对实际应用场景的验证。虽然一部分学者得到了复杂环境下无人集群实现协同任务的结果,但无人集群在实际执行协同任务受到的外部扰动情况更加复杂、物理安全与信息安全受到不同类别的威胁,现有得到的控制方法并不能准确地进行刻画并消除其影响。

在验证方面,通过对国内外现有无人机集群相关技术仿真试验及应用现状进行分析,无论是无人集群仿真试验还是军事民用应用国内尚处于探索、试验、验证等初级阶段。国内异构无人集群实际应用中任务场景简单且呈现“静态化”。无人机平台多为单一机型,且多为中小型无人机,尚无异构无人集群在典型场景中的应用。限于无人机平台、监管政策及法规、航线因素等,支线无人机

物流和干线无人机物流开展较少,处于理论探索阶段。在智能仿真系统验证中,基于分布式学习迭代集成仿真实理论的研究与仿真平台的建立还不完善,亟需能够给予更好的可视化、模块化的仿真结果。在无人集群飞行器试验中缺乏针对异构无人集群分布式并行感知、认知、控制及决策综合能力的试验验证。

2 存在的挑战与难点

2.1 复杂环境下无人集群系统自适应异构体系架构和建模方法

集群体系架构领域还存在如下几方面挑战,如图 1 所示。

- 1) 规模可扩展性。随着规模增加,不论在理论还是系统实现上,集群系统体系结构设计的难度指数上升。
- 2) 多样性。高度自治化的集群系统需要支持多样化任务。
- 3) 影响因素复杂性。影响无人集群系统任务能力的因素多、规模大、因素间关系复杂并存在组合约束。
- 4) 涌现效果复杂性。无人集群一般采用分布式控制原理,在演化过程中产生整体的涌现性效果,这些效果体现在系统的结构、功能和行为等方面,难以进行分析评估。
- 5) 时空演变性。在利用集群执行任务时,由于信息不确定性、不完全等,集群编队会根据感知到的任务目标状态采取不同的协同策略。

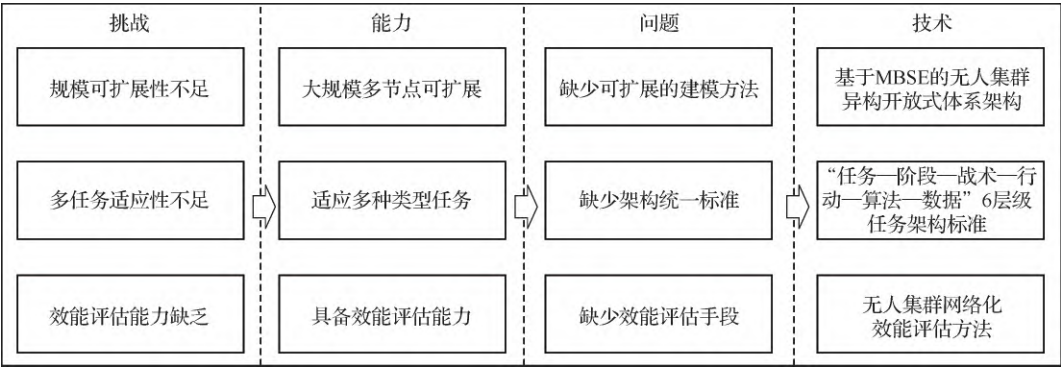


图 1 无人集群体系架构研究的挑战与难点

Fig. 1 Challenges and difficulties of research on unmanned multi-agent system architecture

2.2 复杂环境下高维态势分布式感知与认知

无人集群系统在灾害救援、区域物流等重大应急事件和经济民生中能够发挥不可替代作用。集群分布式感知与认知领域还存在如下几方面挑战,如图2所示。

1) 当前,国内外关于无人集群态势感知尚未开展基于分布式多源传感器信息融合的感知与认知方面的研究,无人集群在实际应用中无法适应复杂不确定的环境,亟需将高维态势感知与认知作为无人集群导航研究的重要探索方向。

2) 在面向高动态、不确定、资源受限等复杂环境,协同区域搜索、集群优化调度等多任务应用需求,需考虑不确定和资源受限条件下高质量异构异质传感数据处理、具备条件触发机制的融合框架及动态场景下的自适应切换拓扑技术,提升无人集群系统的分布式态势感知与认知能力。

2.3 可引导、可信任、可进化的无人集群系统智能决策与规划

集群系统协同控制的快速发展,为大规模无人系统智能控制打下了良好的基础,但是集群系统协同控制还存在如下亟待解决的问题与挑战,如图3所示。

1) 多源扰动存在下系统的鲁棒性还需要进一步提高。随着无人集群规模的增大,传统的协同决策规划架构无法适应大规模信息传输导致的通信时延,复杂环境下存在黑暗、拥堵、潮湿等问题,给强鲁棒协同决策规划带来了困难。

2) 无人集群环境下包括远距离无法感知的空间障碍、突发或消失的任务目标、复杂的电磁环境在内的问题对集群协同决策规划的鲁棒性带来极大挑战。针对任务场景的一体化结构尚未建立。面向复杂的任务场景,单一的结构降低了集

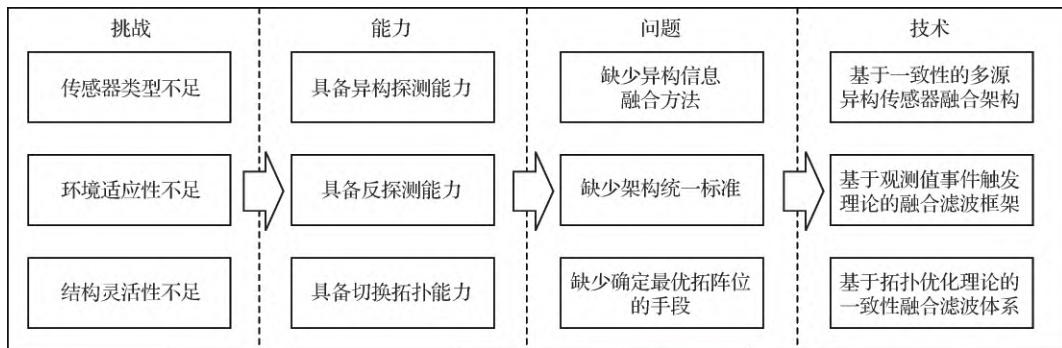


图2 无人集群协同感知认知技术存在的挑战与难点

Fig. 2 Challenges and difficulties in collaborative perception and cognition technology for unmanned multi-agent system

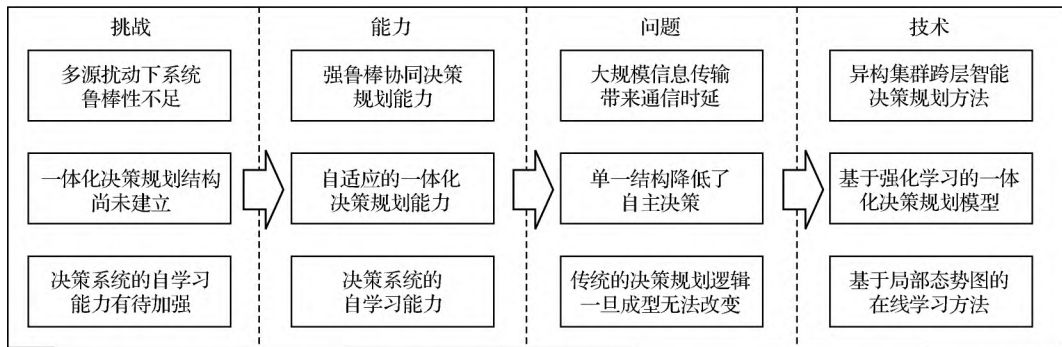


图3 无人集群协同决策规划存在的挑战与难点

Fig. 3 Challenges and difficulties in cooperative decision planning of unmanned multi-agent system

群系统自主决策和学习的能力,同时也无法根据实际的需求进行自适应转换。

3) 决策系统的自学习能力有待加强。决策规划系统不具备自主学习与迭代更新的能力,而复杂任务场景可能随时提出新的要求,给决策规划的设计带来困难。

2.4 复杂环境下无人集群系统自主协同控制

无人集群系统协同控制还存在如下亟待解决的问题与挑战,如图 4 所示。

1) 多源扰动存在下系统的鲁棒性还需要进一步提高。复杂环境下存在黑暗、拥堵、潮湿等问题,给强鲁棒协同控制协议设计带来了困难。

2) 无人集群系统执行协同任务时候,面临信息安全与物理安全问题,如电磁环境下通信链路层面包括 Dos 在内的攻击容易造成数据包的丢失或错误数据的注入,造成无人集群系统的通信

受到干扰,通信数据的完整性与正确性得不到保障;集群系统面临外部动态障碍物与静态障碍物对集群系统造成的物理威胁,而采用传统基于人工智能的防碰撞协同控制方法仍需要突破。

3) 现阶段集群传统的协同控制算法,无法适应大规模异构集群系统的计算需求。针对任务场景的一体化结构尚未建立。面向复杂的任务场景,单一的结构降低了集群系统自主决策和学习的能力,同时也无法根据实际的需求进行自适应转换。适用大规模实际应用场景的集群系统实验亟需开展。

4) 针对于复杂异构集群系统,实际任务场景结合很少,缺乏针对实际应用场景的验证。

2.5 复杂环境异构无人集群自主协同应用验证

无人集群自主协同应用验证领域还存在如下几方面挑战,如图 5 所示。

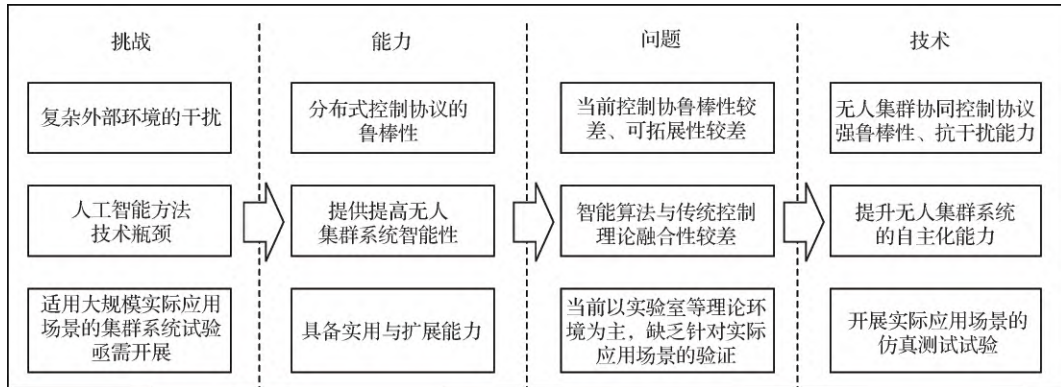


图 4 无人集群系统协同控制技术挑战与难点

Fig. 4 Challenges and difficulties in cooperative control of unmanned multi-agent system

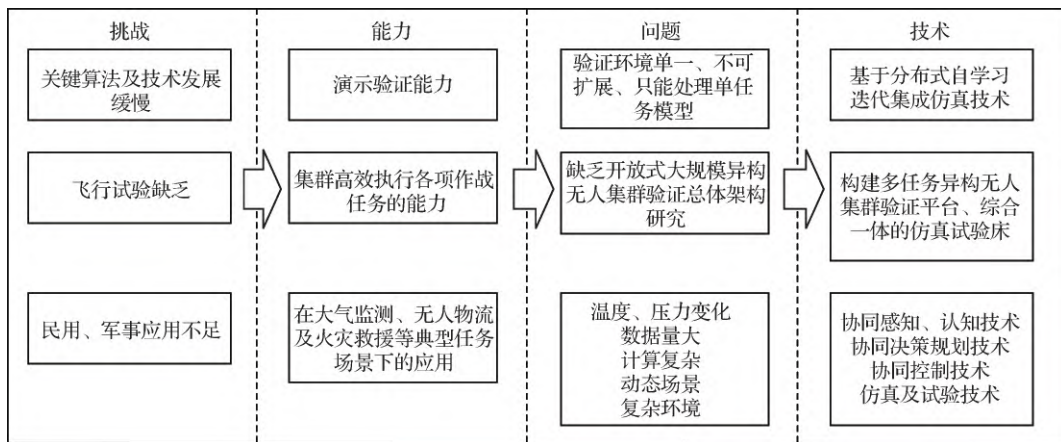


图 5 无人集群仿真试验及实际应用存在的挑战与难点

Fig. 5 Challenges and difficulties in simulation test and practical application of unmanned multi-agent system

1) 无人集群仿真试验在中国尚处于探索、试验、验证等初级阶段,缺乏基于分布式自学习迭代集成仿真理论的研究与仿真平台的构建。

2) 目前中国没有建立一套标准的多任务异构无人集群验证平台,不能满足无人集群飞行试验的场所及设备需求。

3) 在实际应用方面,无人集群技术在大气监测、物流配送及火灾场景救援等典型领域的应用尚处于技术论证和探索阶段。大规模无人集群系统需要更加科学的路径规划,科学的决策规划能力使得集群能够自动规划与实时调整任务路径,保证集群内各智能体的安全稳定。

4) 在有人无人协同合作的情况下,需要更敏捷的有人无人协作能力来保证异构集群在不同环境中的任务可执行性。

3 关键技术及进展

围绕高动态、不确定、资源受限等复杂环境下强鲁棒、高智能的无人集群自主协同控制技术,从面向大规模无人集群系统协同区域搜索、集群优化调度等多任务应用需求,建立复杂环境下大规模异构无人集群鲁棒自主协同理论,形成分布式“感知—判断—决策—行动”OODA 循环自主协

同全过程方法体系,如图 6 所示。提出开放式无人集群系统架构设计与效能评估方法,解决复杂环境下高维态势分布式感知与认知、可引导、可信任、可进化的智能决策、复杂环境下无人集群系统自主协同控制 3 个科学问题,突破非结构化协同互补采集与融合、无中心自组织集群任务规划、分布式强鲁棒安全协同控制 3 项关键技术。综述大规模集群系统验证平台的进展,聚焦大气污染监测、园区无人物流、火场灾害救援 3 个典型场景,给出典型场景的任务需求以及技术解决方案。

3.1 复杂环境下无人集群系统自适应异构体系架构和建模方法

在无人集群系统自适应异构体系架构和建模方法研究方面,以无人集群自主协同基础理论框架为指导,提出无人集群系统自适应异构体系设计方法,开展面向任务效能的集群网络效能评估、集群结构与行为建模和系统互操作性研究,实现无人集群系统效能试验评估。

3.1.1 基于 MBSE 的集群系统集成方法

采用基于模型的系统工程(Model-Based

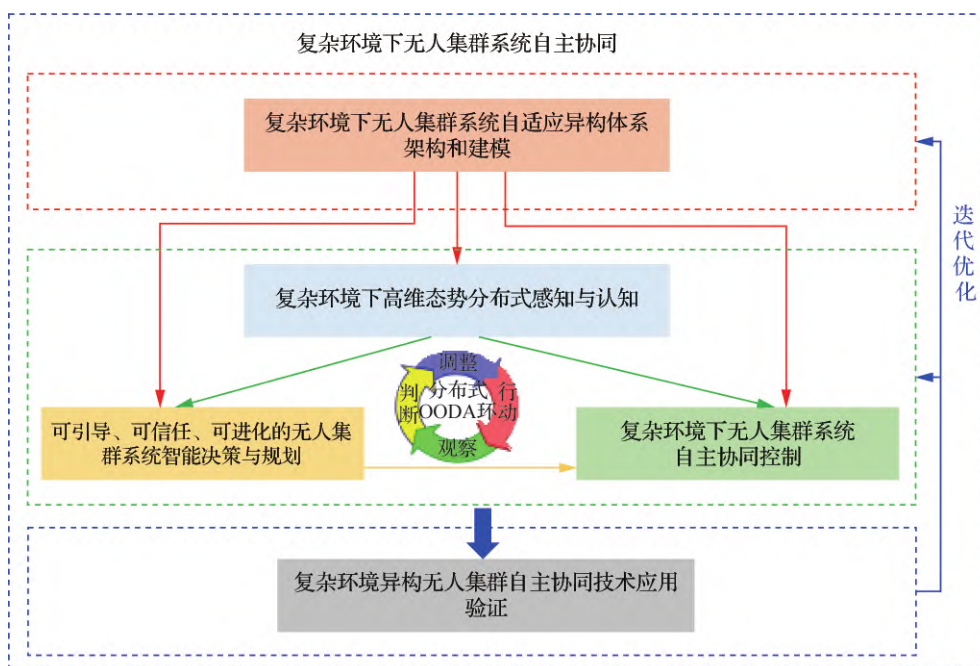


图 6 研究进展总体架构

Fig. 6 Framework of research progress

Systems Engineering, MBSE)方法和工具研究空基异构无人集群系统,使用自顶向下的解析方法逐级分解集群系统结构,通过自底向上的反馈方法进行迭代改进,形成清晰的群系统模型、子系统

模型、单元模型和对应的结构、流程、用例。以模型为基础,以 MBSE 方法为手段,开发多层次仿真平台工具,形成开放式系统仿真构架。提出的设计与系统集成方法如图 7 所示。

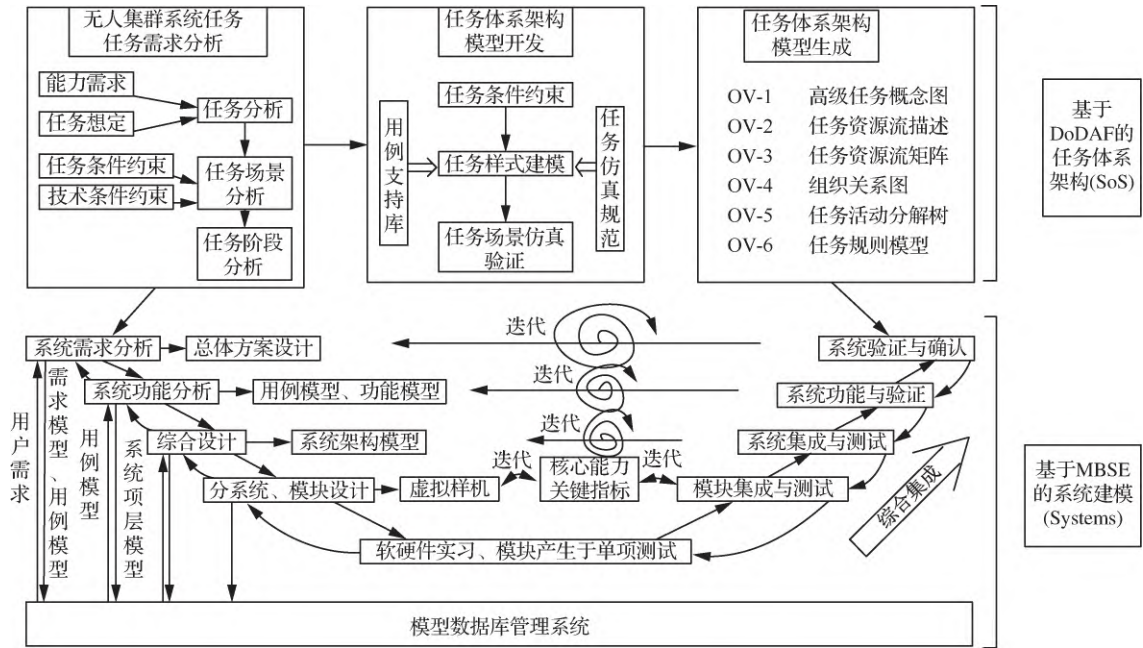


图 7 无人集群系统架构设计与集成方法

Fig. 7 Architecture design and integration methods of unmanned multi-agent system

3.1.2 基于 MBSE 的集群系统建模方法

MBSE 是一种以模型为中心的系统工程层次设计方法,MBSE 以模型为驱动方式,代替传统设计中的文档驱动模式,通过对型运行测试分析和

验证系统设计方案,在系统工程层面保证设计方案的正确性和最优化。重点是通过解构方法明晰整个系统架构的详细结构,即任务、阶段、战术、行动、算法和数据 6 层。图 8 为无人集群 6 层级任务架构。

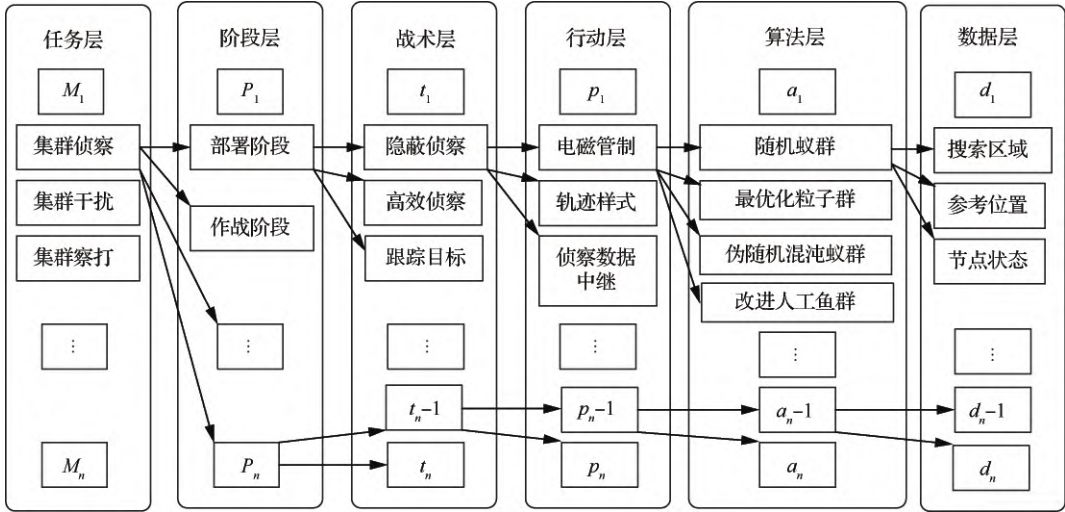


图 8 细化的无人集群任务 6 层级架构

Fig. 8 Refined 6-tier architecture for unmanned multi-agent system tasks

3.1.3 无人集群行为建模研究

在集群自主协同行为的要素认知层面,结合现有的生物群体行为涌现性以及机器人智能集群系统的涌现性行为研究,并充分考虑集群自主协同系统的分布式、自组织、协作性、稳定性等典型

特点,提出集群群体涌现性行为的4类基本行为模式:空间组织行为、导航行为、集群信息交互与决策行为和其他集群行为,如图9所示。针对考虑集群特征和任务功能动态演化规律的认知框架问题,基于以上集群自主协同任务—结构—行为要素认知及数学规范化表达的研究。

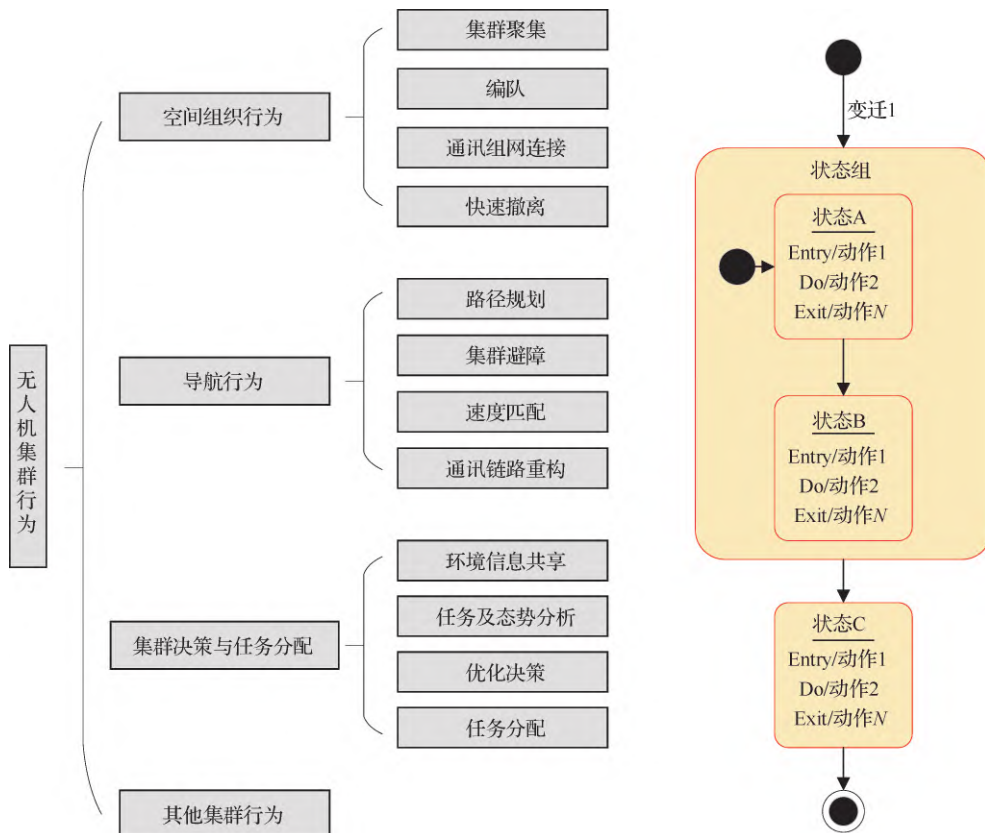


图9 无人集群行为与状态机图

Fig. 9 Behavior and state machine diagram for unmanned multi-agent system

3.1.4 无人集群网络化效能评估方法

1) 效能评估指标体系的建立。建立效能评估指标体系是对集群进行效能评估研究的基础,针对无人平台典型任务流程分析各个任务阶段的任务需求,基于对无人集群特性及任务功能演化规律的多尺度认知结果选取了相关指标项;针对无人集群各效能影响因素之间存在复杂关联关系而非彼此独立的特点,建立了网络化效能指标体系框架,如图10所示。

2) 无人集群网络化效能评估方法。在指标体系的基础上,结合OODA任务过程分析,建立了考虑无人平台效能的网络模型,如图11所示。

基于模型对单机—集群涌现性能力进行分析,实现“点”—“链”—“网”效能突破评估,通过指标体系结合集群任务链路分析模型实现对集群多层次的效能分析评估。

3.1.5 无人集群体系架构虚拟验证

在无人集群系统效能预测与评估优化模型建立的基础上,为验证效能评估的准确性与准确性,同时分析无人集群系统行为的运行机理与技术架构,提出无人集群系统行为虚拟验证仿真模块,分为多智能体仿真推演与三维展示2部分。

如图12所示,首先分析典型任务场景,针对无人集群任务—结构—行为映射交互机理进行认

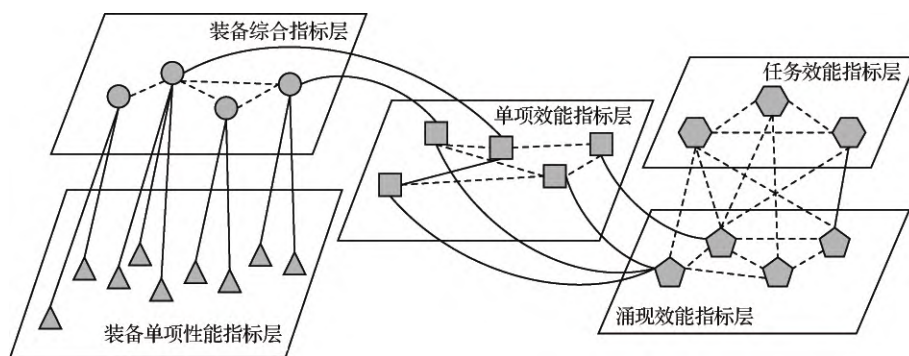


图 10 网络化效能指标体系框架

Fig. 10 Framework of networked effectiveness indicator system

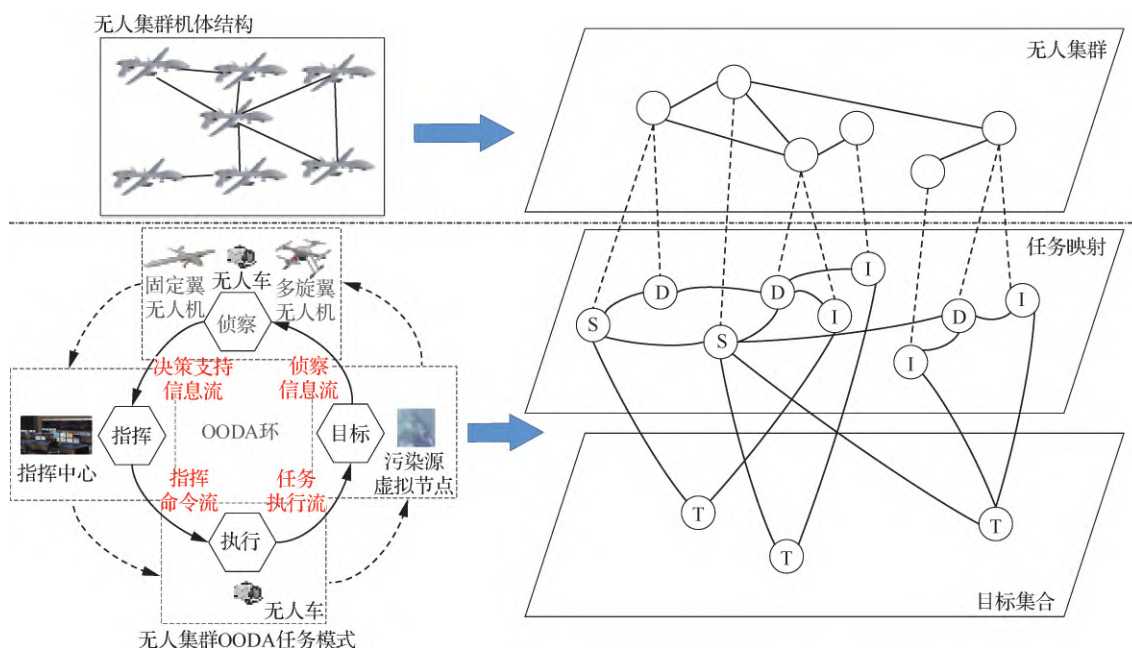


图 11 无人集群多层网络示意图

Fig. 11 Schematic of multilayer network of unmanned multi-agent system

知,根据任务需求提出效能指标体系。基于底层效能评估指标体系,对多智能体进行初始数据赋值。根据具体场景任务,利用多 Agent 仿真软件进行全过程仿真推演,在推演过程中,考虑任务过程中智能体与环境的交互,如电磁干扰,设备失效等情况。将整个过程中智能体推演数据进行采集,实时反馈给效能评估模型,有效实现效能预测与评估优化。

3.2 复杂环境下高维态势分布式感知与认知

在复杂环境下,无人集群需要通过信息交互实现对高维态势的分布式感知与认知。研究弱光

场、高采样速率下的高维态势数据的编码采集机制、紧致表达与编码感知方法,设计高维态势分布式耦合机制,解决高通量态势与低传输带宽的矛盾,提出高效能解码方法;研究非结构化协同互补采集技术和多源异构融合算法,构建多源异构融合机制,从而进行多源传感数据处理、共享与信息融合,实现环境全方位感知与认知,为协同决策和协同控制提供信息支撑。

3.2.1 高速高分辨编码成像机制

为获得高速高分辨的编码成像机制,从最大化空间频谱利用率的角度,设计紧致编码空间频

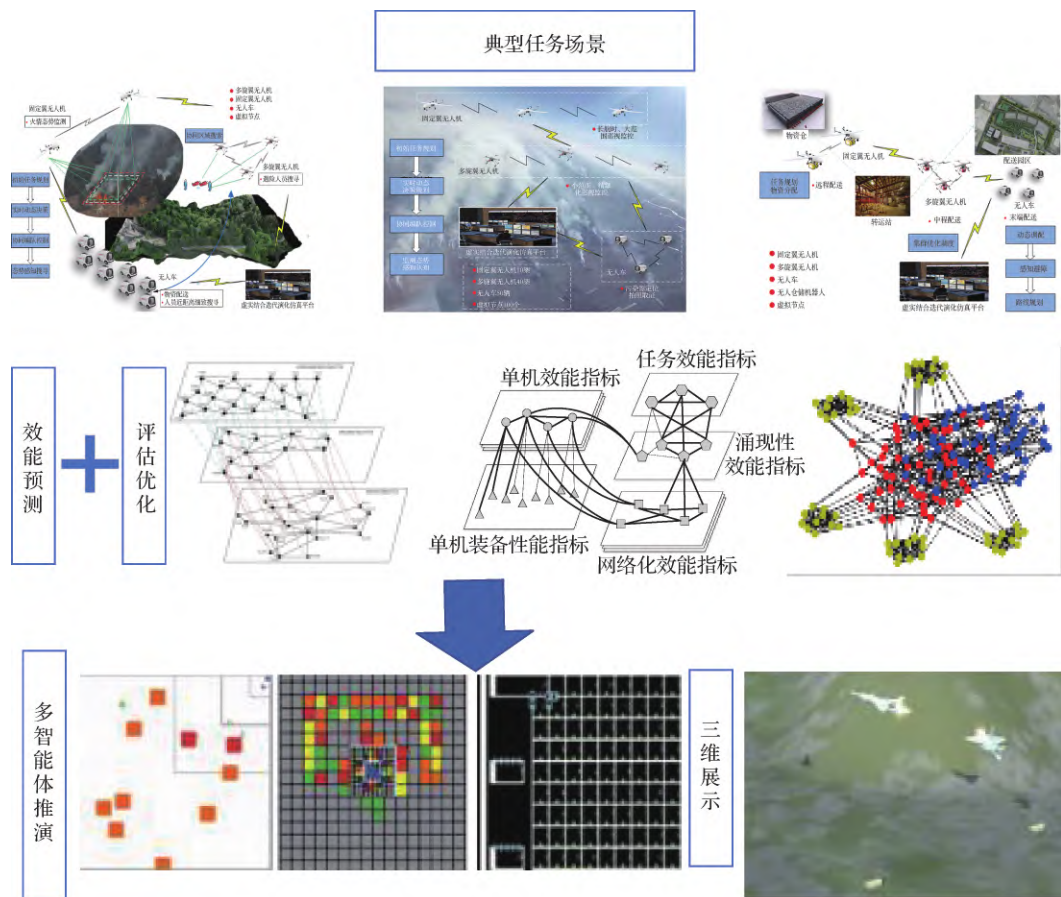


图 12 无人集群系统行为虚拟验证框架

Fig. 12 Behavioral virtual verification framework of unmanned multi-agent system

谱的成像机制,打破压缩感知的压缩率极限,提升系统采集通量。提出了一种新的混合编码孔径快照压缩成像方案,如图 13 所示。编码采集多张高速场景视频帧并被传感器耦合采集,得到一张编码快照。随后基于 PnP 算法框架进行迭代解码

重建,最终恢复出原始的高速视频。

3.2.2 弱光场景下的成像

传统成像无法实现在复杂环境下低照度下的成像与感知。开发了一种能够收集更多光子的成像系统,并提出在低照度下获取高质量视频的方法。构建一个三原色 (Red, Green, Blue, RGB) 和近红外 (Near Infrared, NIR) 光谱之间的相关性双传感器摄像机来额外收集近红外波长的光子,从噪声暗视频中对其执行高质量重建,如图 14 所示。通过使用基于物理过程的 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 噪声模型训练具有模拟噪声输入的双通道多帧注意力网络 (Dual-Channel Multi-frame Attention Network, DCMAN) 模型,在合成视频和真实视频上的实验都验证了这种紧凑型双传感器摄像机设计和相应的重建算法在暗视频中的性能。

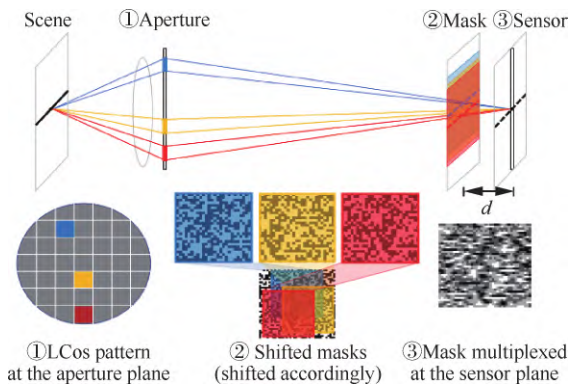


图 13 混合编码孔径快照压缩方案

Fig. 13 Hybrid coded aperture snapshot compression scheme

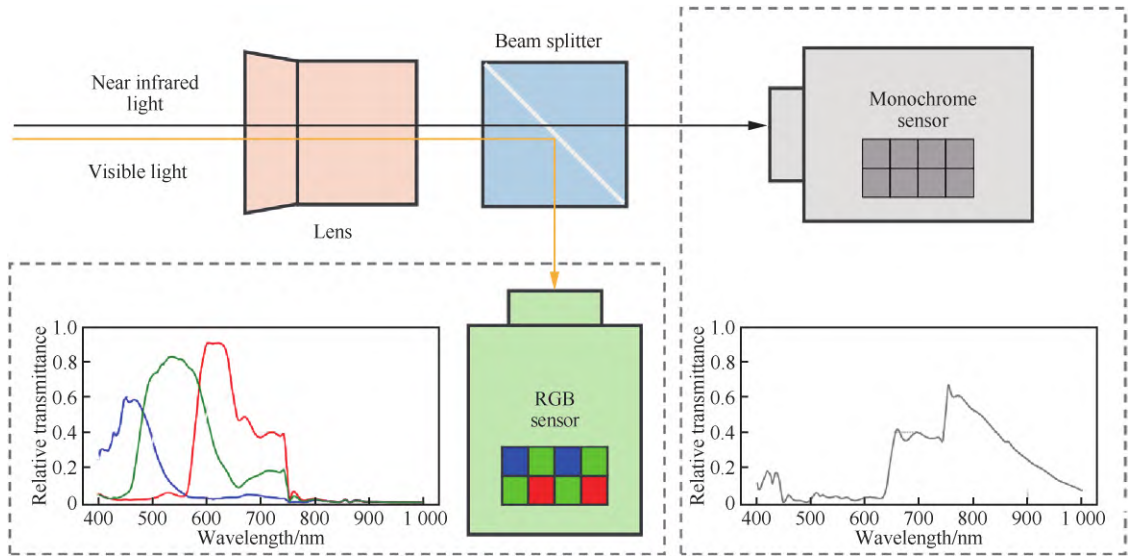


图 14 RGB-NIR 图像系统
Fig. 14 RGB-NIR imaging systems

3.2.3 多源点云融合

在三维环境重建的过程中,由于相机所处位置的限制,摄像头无法一次性完整采集物体表面的三维信息。因此,研究高动态异构集群个体的三维点云位姿匹配方法,以及大规模分布式配置下的局部地图实时鲁棒拼接方法。为构建环境全局三维结构,解决不同视觉维度、不同尺度、不同分辨率之间的配准问题,刻画目标场景中多源信息之间的耦合关系,如图 15 所示,在进行设计时需要将先对多个三原色深度(Red, Green, Blue Depth RGBD)对象单独处理,首先进行相邻两帧特征提取,利用 SIFT 算子对每个 RGB 单独提取特征,根据提取到的 SIFT 特征进行匹配。再将相同的位置索引到对应的点云,并将对应的点云对齐,从而获得融合的点云。

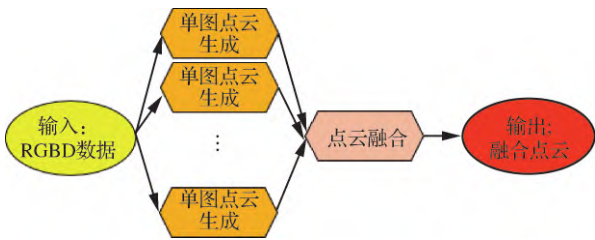


图 15 多个 RGBD 采集图像融合点云结构图
Fig. 15 Structure diagram of fusion point cloud of multiple RGBD images

3.2.4 协同态势图构建

态势图构建需要根据对无人集群场景中的各种信息进行解构,将环境信息、无人集群的单点运行信息、探测信息等进行分类,并对同类、相关性较大的信息进行融合。针对无人集群的单点运行信息,需要给出位置、姿态、速度、行驶状态等方面的信息;针对环境信息则需要给出温度、能见度、光照等描述天气的信息和描述不同环境的信息。在原始数据中提取语义信息,并进行离散分布,利用多通道态势图对场景的关键性信息进行表述,实现场景态势图的直观表达^[89],如图 16 所示。

3.2.5 协同目标识别

利用多传感器独立完成对目标属性的判断,即依次进行对观测数据的特征提取、属性判断,最后对各决策结果进行融合,可进行决策融合、决策可信度融合或概率融合。常见的融合算法有 Bayes 推断、专家系统、D-S 证据推理、模糊集理论等,最常用的是 Bayes 推断和 D-S 证据理论,分别基于可信度与概率的融合。利用决策级融合从而准确快速获取目标识别结果,如图 17 所示。

3.2.6 分布式融合

基于多源信息融合的分布式目标跟踪流程如

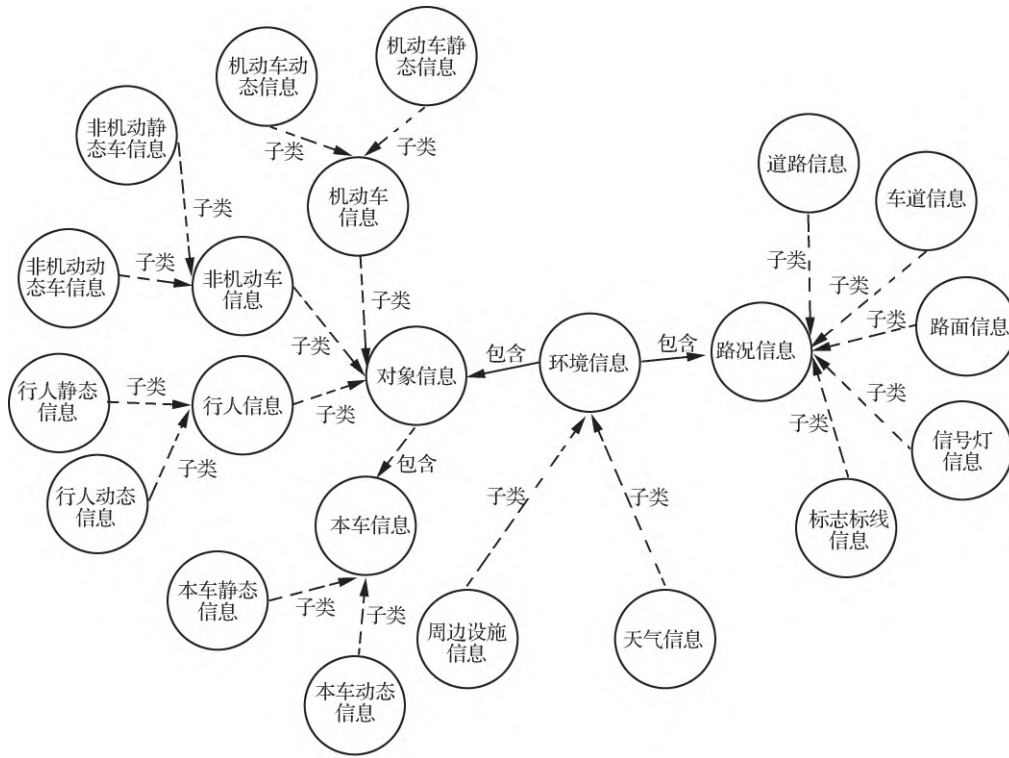


图 16 协同态势图构建

Fig. 16 Construction of collaborative situation map

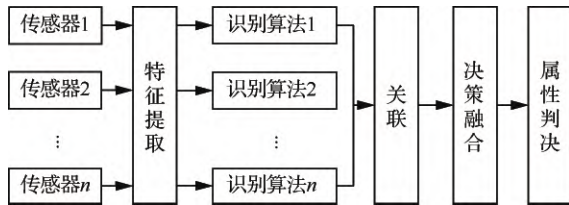


图 17 基于多源传感器的融合识别模型

Fig. 17 Fusion recognition model based on multi-source sensor

图 18 所示,通过每个传感器分别对目标进行观测,然后进行本地滤波过程获得本地滤波值,之后进行信息交互,最终基于一致性算法进行融合得到最终的目标状态的估计值。基于一致性理论的多源信息融合分布式目标跟踪算法由于其较强的鲁棒性和接近于集中式的效果,成为目前多传感器融合目标跟踪领域的主流算法,如图 18 所示。

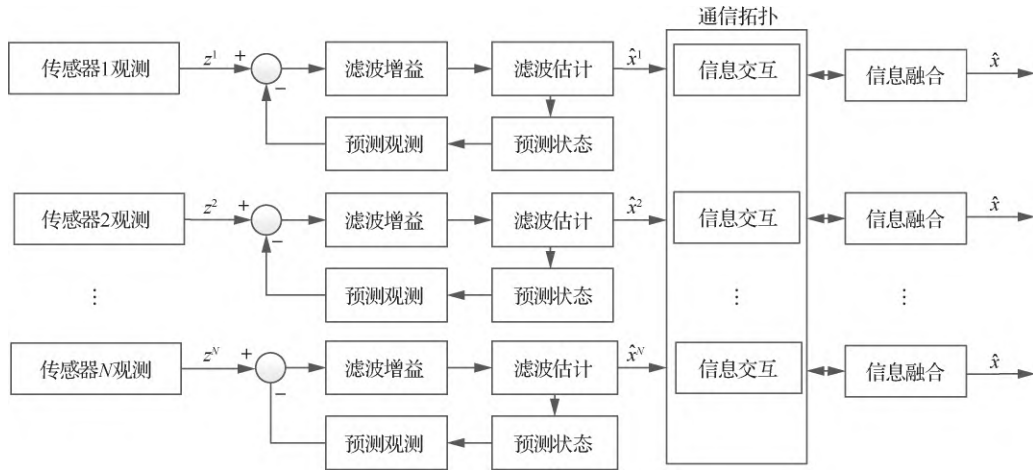


图 18 多传感器信息融合分布式目标状态估计

Fig. 18 Distributed target state estimation based on multi-sensor information fusion

3.2.7 多传感器威胁估计

利用多传感器系统对探测数据融合进行威胁要素提取,然后对探测要素进行融合以及进行威胁度计算。利用态势评估的结果(敌军作战意图、作战能力),进行加权处理,完成敌方各威胁要素对我方目标威胁程度的定量描述。最后利用贝斯特网络确定威胁等级。由威胁程度定量描述作为贝叶斯网络的输入,按照威胁源产生的威胁对我方可能造成的破坏程度进行分类排序,从而得到威胁级别的输出,如图 19 所示。

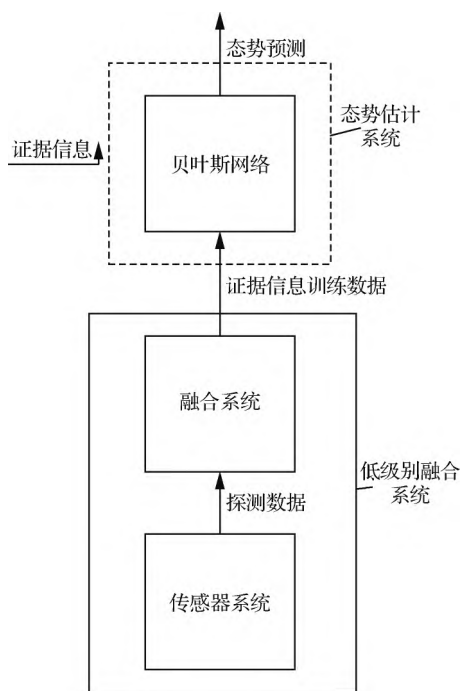


图 19 多传感器贝叶斯网络态势预测与威胁估计

Fig. 19 Situation prediction and threat estimation based on multi-sensor Bayesian network

3.3 可引导、可信任、可进化的无人集群系统智能决策与规划

无人集群自主任务协同强烈依赖于集群智能决策与规划技术,大规模异构集群问题中主要包括:① 如何适应大规模集群或者集群规模可扩展的问题;② 如何解决异构集群的智能决策规划问题。为此,提出具有可引导、可信任、可进化的集群决策规划架构,并以此为支撑,重点围绕规模无关性、集群决策规划的自学习等问题开展研究。

分别提出了兼顾指挥人员的引导接入、基于模型的可信任决策、及学习环境支撑的异构集群智能决策规划架构;提出了规模无关的任务调度与路径规划方法。

3.3.1 异构集群智能决策规划架构

围绕大规模异构无人集群自主协同决策科学问题,设计了一种异构无人集群跨层智能决策与规划架构。在可引导方面,设计接入集群指挥员的指令接口,对全局任务进行自动分解,从而支持指挥员可引导的任务决策规划;在可信任方面,将模型检验理论作为集群策略合成的理论支撑,在生成策略的同时给出策略置信度;在可进化方面,构建集群分布式学习及训练环境,由智能学习进化设计混合离线在线学习进化方法,实现决策规划能力的学习进化,如图 20 所示。

3.3.2 规模无关的基于平均场理论多智能体分布式任务调度

由于集群执行任务时动态感知环境、动态获取目标,任务的注入呈现随机性和不确定性,需要进行实时动态任务分配,针对大规模异构无人集群任务分配中,智能体通讯拓扑多变,任务随机动态注入,智能体数目不定,即规模不定问题,设计了一种基于平均场理论的多智能体分布式任务调度算法(如图 21),建立了多智能体任务流模型,在协同任务分配时不仅考虑任务到达个体本身,还充分考虑任务流对其他智能体的影响,实现了集群任务调度算法不受群体规模影响。

3.3.3 基于 Dubins 曲线的分布式协同路径规划

异构无人集群协同不仅仅需要任务调度,还需要相应的路径规划。提出了一种基于 Dubins 曲线的分布式协同路径规划方法,不仅满足集群中个体的动力学约束,同时也能实现对动态目标和动态障碍物的实时分布式路径规划,具有较高的集群运动适应能力和实用价值,如图 22 所示。

3.3.4 基于模型的离线学习方法

智能体探索的困难很大程度上来自于无效的探索,即由简单经验即可判断的错误情况往往需要大量探索才能排除,这严重降低了学习效率。

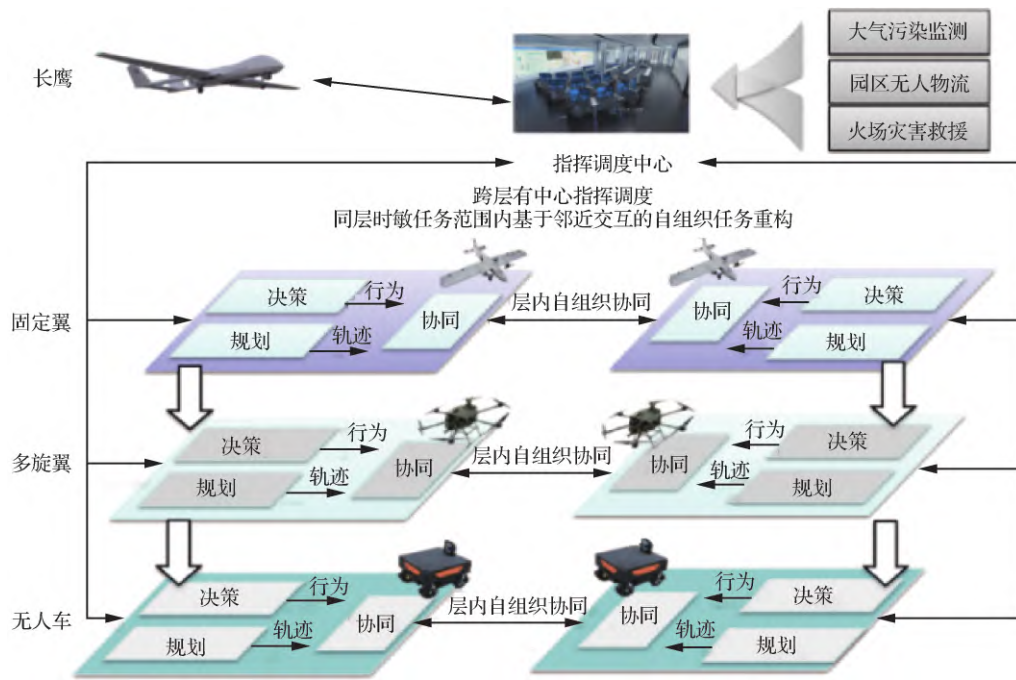


图 20 异构无人集群跨层智能决策与规划架构

Fig. 20 Cross-layer intelligent decision-making and planning architecture of heterogeneous unmanned multi-agent systems

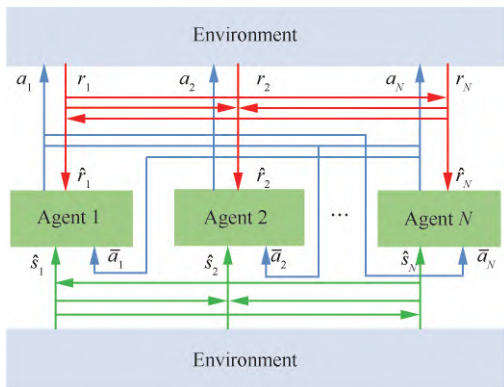


图 21 多智能体任务流模型

Fig. 21 Multi-agent task flow model

因此利用知识影响动作选择过程,使智能体倾向与探索知识认为正确的行为,可通过累计经验,改善网络学习速度。设计了如图 23 所示的 COG-DQN 算法,基于“信念—愿望—意图 (Belief-Desire-Intention, BDI)”模型和 马氏决策模型,将探索性行动规则引入深度强化学习机制,提升策略学习效率。BDI 模型以意图系统和行为推理为理论依据,将人的感知、信念、意图、事件、愿望和行动等功能要素进行模块化构建,并

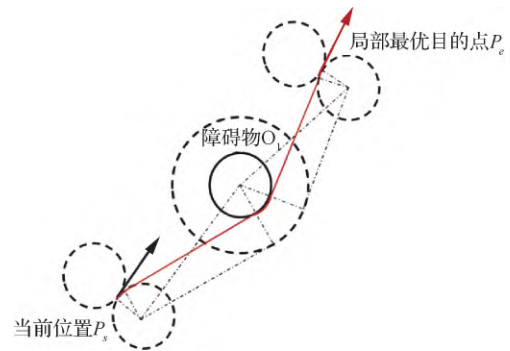


图 22 基于 Dubins 的避障路径规划

Fig. 22 Dubins-based barrier-resistant path planning

有机融入到智能体模型中,构建出逻辑行为智能体。

3.3.5 基于模型的在线学习方法

通过设计集群局部态势表示机制,实现了规模可扩展的集群策略学习和演化,提出了一种基于局部态势图的无人集群避障飞行策略深度强化学习方法,如图 24 所示。在领导者—跟随者拓扑下,领导者将自身位置和姿态信息广播给跟随者,

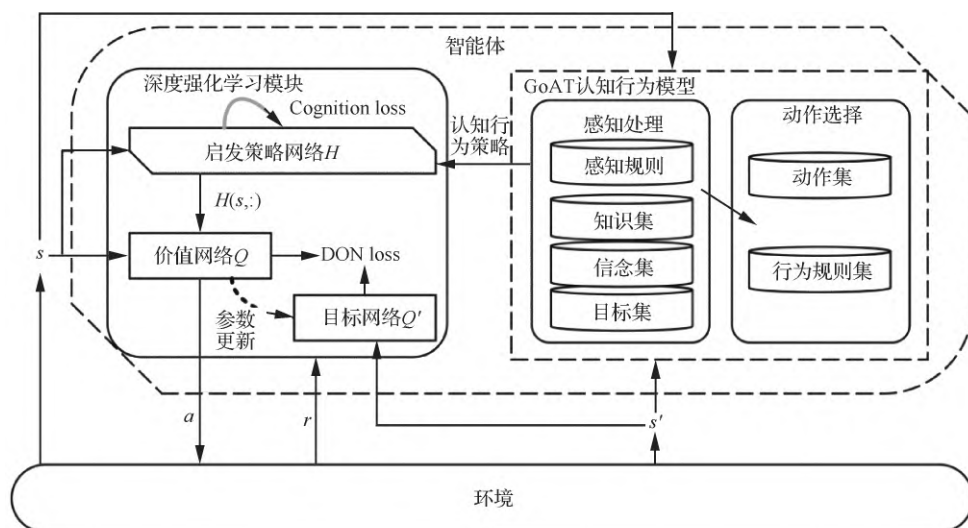


图 23 融合 BDI 模型与 MDP 模型的 COG-DQN 算法框架

Fig. 23 COG-DQN algorithm framework of BDI model and MDP model

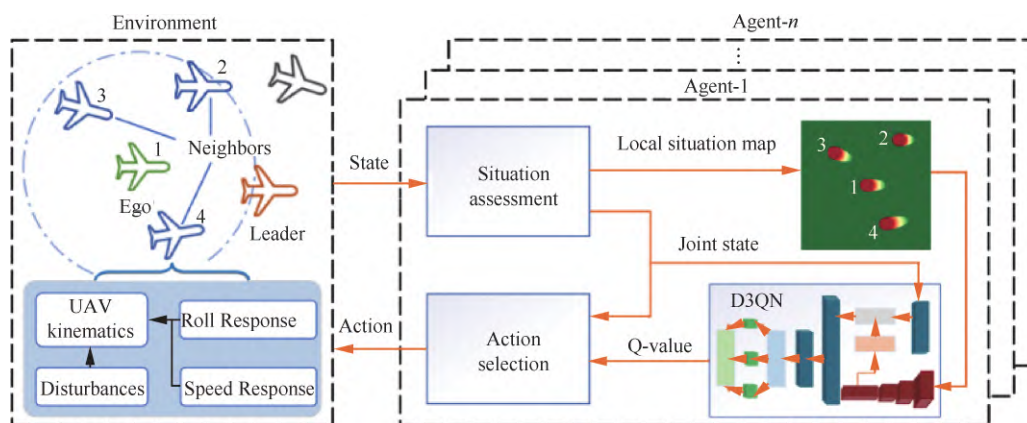


图 24 基于局部态势图的无人集群避障飞行策略深度强化学习系统

Fig. 24 Deep reinforcement learning system for obstacle avoidance flight strategy for unmanned multi-agent system based on local situation graph

跟随者获取领导者及邻近跟随者的状态信息,包括位置、姿态和速度信息,与其自身状态信息联合组成状态;以系统状态为输入,执行器网络输出最佳动作。训练结束后,保存执行器网络参数。在执行阶段,每架跟随者根据其自身状态、领导者状态和邻近跟随者状态独立地使用训练得到的控制策略选择其滚转角和速度控制。

3.4 复杂环境下无人集群系统自主协同控制

无人集群系统协同控制需研究多源扰动存在下系统的鲁棒性,首先在复杂环境下,设计强鲁棒

协同控制协议设计。随后针对现阶段集群传统的协同控制算法,无法适应大规模异构集群系统的计算需求,研究基于人工智能的协同控制方法。针对任务场景的一体化结构建立问题,提高集群系统自主决策和学习的能力,开展复杂环境下深度强化学习的自主协同控制。

3.4.1 无人集群系统一致性共识控制与任务耦合的框架

在无人集群系统协作过程中,无人集群个体之间需要通过相应的协同控制方法来共同实现指

定的全局目标。无人集群的一致性控制问题是无人集群系统协同控制众多问题中一个十分基础和重要的问题。为了实现一致,无人集群系统中的节点之间通常存在着局部的相互作用关系。根据不同的任务场景,基于一致性协同控制方法的设计也就不同。针对无人物流、火灾救援及大气监测,无人集群系统需要设计基于一致性理论的异构编队控制与编队跟踪控制、无人集群分组编队与编队合围控制、无人集群编队跟踪与分组编队控制问题。综合上面 3 大典型应用的实际场景,得到复杂环境下无人集群系统任务集合与控制方案的映射关系如图 25 所示。

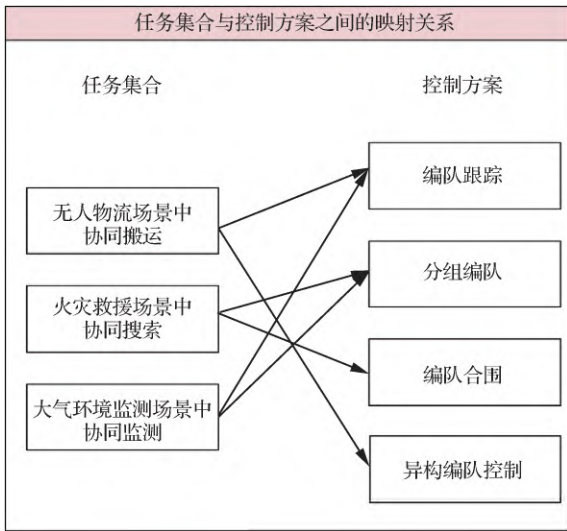


图 25 复杂环境下无人集群系统任务集合与控制方案映射关系

Fig. 25 Mapping relationship between task set and control scheme in unmanned multi-agent system in complex environments

3.4.2 无人集群系统分布式一致性共识协同控制方法

根据任务的不同,协同控制方法可分为编队控制、跟踪控制、合围控制等,如图 26 所示。结合图论与控制理论对协同控制问题进行分析。为实现期望时变编队跟踪的充要条件以及编队可行性条件,并提出了分布式时变编队跟踪协议,使跟随者能够形成期望的编队构型的同时跟踪领导者状态轨迹。此外合围控制也引起了极大关注,其目的是驱动所有跟随者进入由领导者生成的凸包。为了有效控制整个集群系统的宏观运动轨迹,在编队合围控制的基础上进一步提出了编队合围跟踪控制。在未知的控制输入下,领导者可以产生不可预测和可机动的轨迹。跟随者由各自子群的单个或多个领导者引导完成宏观移动,并同时保持期望的时变子编队。高阶集群系统中各智能体的全状态信息往往难以全部测量,而对输出信息的获取更容易实现。具有非自治领导者的异构线性多智能体系统在有向拓扑上的时变输出编队跟踪问题。

3.4.3 复杂多约束条件下的异构无人集群自适应协同控制方法

异构无人集群系统执行任务过程中,由于环境复杂,存在各种外部干扰因素,如在火灾救援场景中,电磁干扰会导致无人机与无人机、无人机与无人车之间的通信存在时延,中断等情况,导致协同控制难度增大。因此,非常有必要考虑复杂多约束条件下异构无人集群系统的协同控制问题。常见的多约束主要包括领导者含未知输入、系统存在外部干扰、信息攻击、通信时延、通信拓扑切

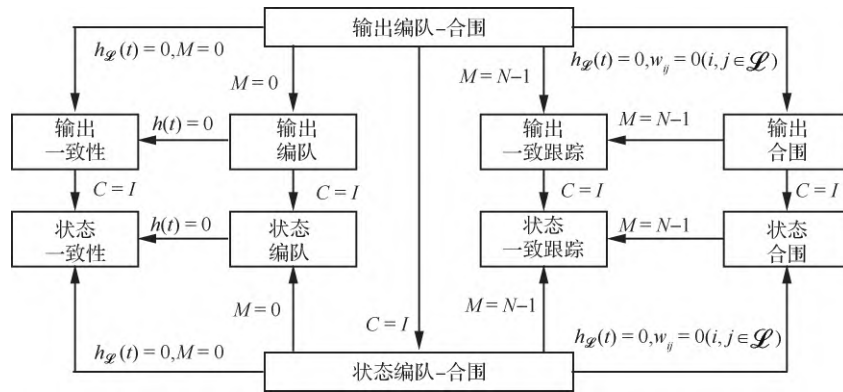


图 26 无人集群系统分布式一致性共识协同控制

Fig. 26 Distributed consensus cooperative control for unmanned multi-agent system

换等。针对领导者含未知输入约束,设计分布式观测器、本地状态观测器以及期望的编队向量,使得所有跟随者在领导者未知输入的影响下仍能够实现领导者状态的分布式估计。针对通信拓扑存在时延约束,构建 Lyapunov-Krasovskii 泛函,利用线性矩阵不等式设计控制器相关参数。针

对通信拓扑切换约束,设计分段 Lyapunov 函数,研究驻留时间对异构无人集群系统编队控制的影响。针对外部扰动约束,采用分布式扰动观测器对外部扰动进行观测估计,进而设计分布式鲁棒编队控制器抑制扰动影响,如图 27 所示。

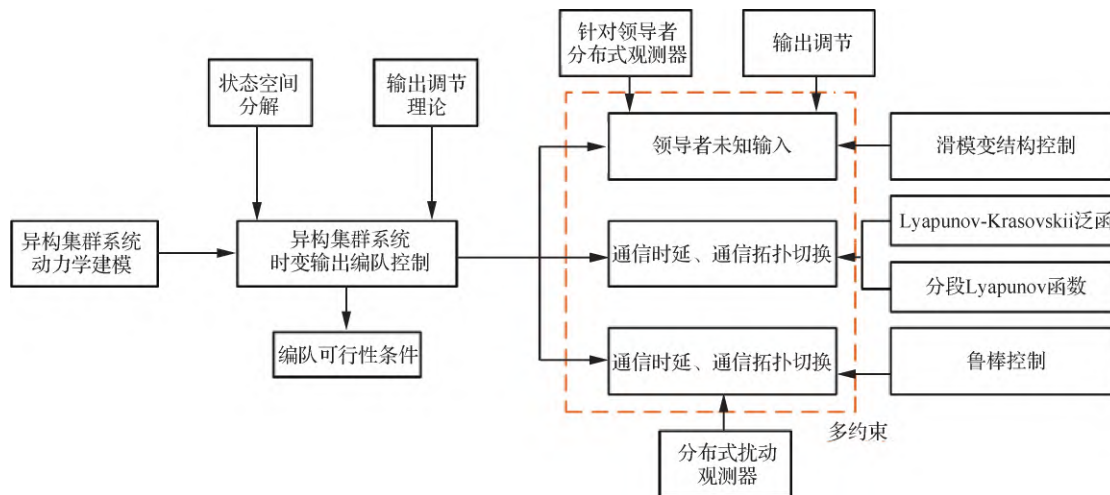


图 27 复杂多约束条件下的异构无人集群自适应协同控制

Fig. 27 Adaptive cooperative control of heterogeneous unmanned multi-agent system under complex multi constraint conditions

3.4.4 防碰撞约束下的无人集群安全协同控制方法

无人集群执行协同任务时,航迹规划上往往存在外部障碍物的干扰,同时无人车系统内部之间也要进行个体之间的防碰撞,使得无人集群系统的物理安全得不到保障。首先研究基于分布式估计的障碍物检测与预测方法。利用最优刚性图和最优持久图提出集群系统的最优持久图生成算法,给出资源合理分配的方法。给出同时满足时变时滞和切换拓扑同时存在的高通信安全无人集群协同控制方法。将防碰撞和连通性保持约束考虑到控制器设计中,首先构造控制协议中的防碰撞项,将梯度力融入控制协议当中,实现自主防碰撞和连通性保持机制下的协同控制方法,如图 28 所示。利用基于人工势能函数法的无人集群防碰撞与连通性实现和保持协同控制。

3.4.5 复杂环境下深度强化学习的自主协同控制

针对无人集群典型场景普遍存在的高动态、

不确定环境,集群系统需要高智能性及自主性以完成任务目标。本部分研究基于深度强化学习的分布式智能协同控制方法,满足无人集群系统高智能与强鲁棒性的控制需求。强化学习下的协同控制方法如图 29 所示。利用深度学习技术强大的表征能力,与强化学习方法搜索优化能力相结合,利用生成对抗网络解决在线学习时单一节点数据不足的问题,实现更加大规模、高维的实时协同控制和决策,完成复杂高动态环境下智能决策方法设计。对每个集群系统个体设计深度神经网络拟合的价值网络及策略网络估计函数,设置并调整深度神经网络结构增强博弈系统的性能。通过该方法提升对强干扰等环境的态势感知能力、增强深度神经网络对动态时变系统的估计和记忆能力、实现不依赖于群体规模的任务规划、减小分布式智能行为训练的学习方差,最终提升深度强化学习算法的收敛性和鲁棒性,实现协同决策与协同控制方法的融合。

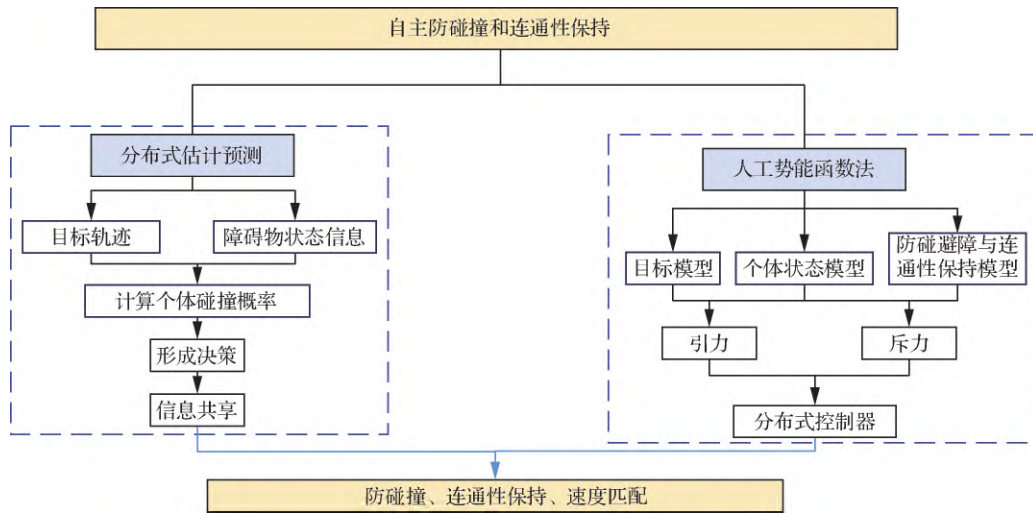


图 28 自主防撞和连通性保持机制下的安全协同控制技术

Fig. 28 Security cooperative control technology framework for autonomous anti-collision and connectivity maintenance mechanism

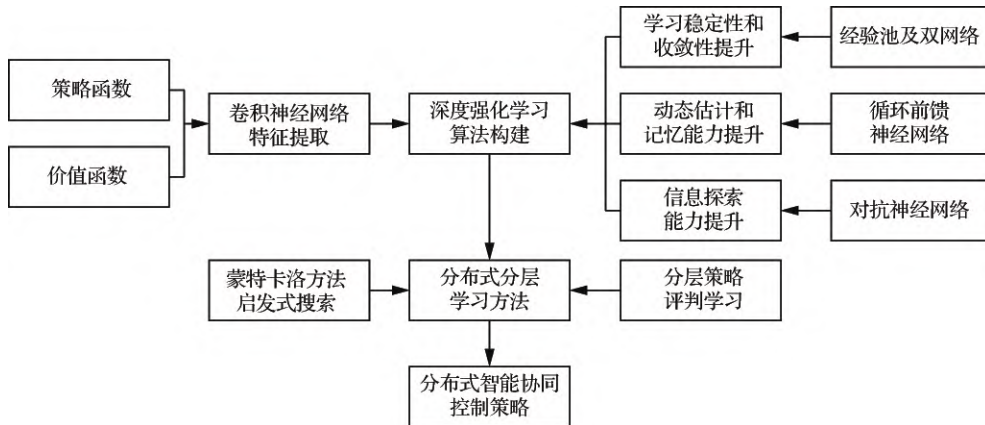


图 29 强化学习下的协同控制方法

Fig. 29 Cooperative control using reinforcement learning method

3.5 复杂环境异构无人集群自主协同技术应用验证

面向复杂环境下大规模无人集群快速应用需求,亟需研究大规模异构无人集群验证平台开放式总体架构与试验床集成技术,以支撑集群节点大规模弹性扩展能力。本部分研究开放式大规模异构无人集群验证总体架构研究及实验床技术、复杂环境无人自主系统虚实结合迭代演化仿真技术及复杂动态场景多任务集群自主协同验证试验技术,形成实际应用场景多任务扩展验证能力。

3.5.1 开放式大规模异构无人集群验证总体架构研究及实验床技术

以无人集群系统自适应异构体系架构及评估、无人集群系统分布式感知与认知、无人集群系统智能决策与规划、无人集群系统鲁棒安全自主协同控制技术为基础,引入通用化大规模异构无人集群总体架构,如图 30 所示。融合感知、决策、控制等专业技术,针对火场灾害救援、大气污染检测和园区无人物流 3 种典型应用场景,开展基于虚实结合的开放式大规模异构无人集群体系架构研究,设计基于迭代演化的验证方法,实现异构无

人集群验证平台集成与验证。以通用架构为指导,建立仿真试验验证框架,根据关键技术特点,细化应用场景方案,进而确立仿真和试验的任务剖面。通过搭建多任务异构无人集群验证平台,形成综合一体的仿真试验床,完成大规模异构无人集群自主协同技术的典型场景试验验证,满足无人集群飞行试验的场所及设备需求。

3.5.2 复杂环境无人自主系统虚实结合迭代演化仿真技术

针对应用场景验证需求,需要构建异构无人集群自主协同任务集,从而研究多任务场景构建技术。如图 31 所示。对复杂典型的应用场景进行大规模异构集群试验验证方案设计,搭建虚实

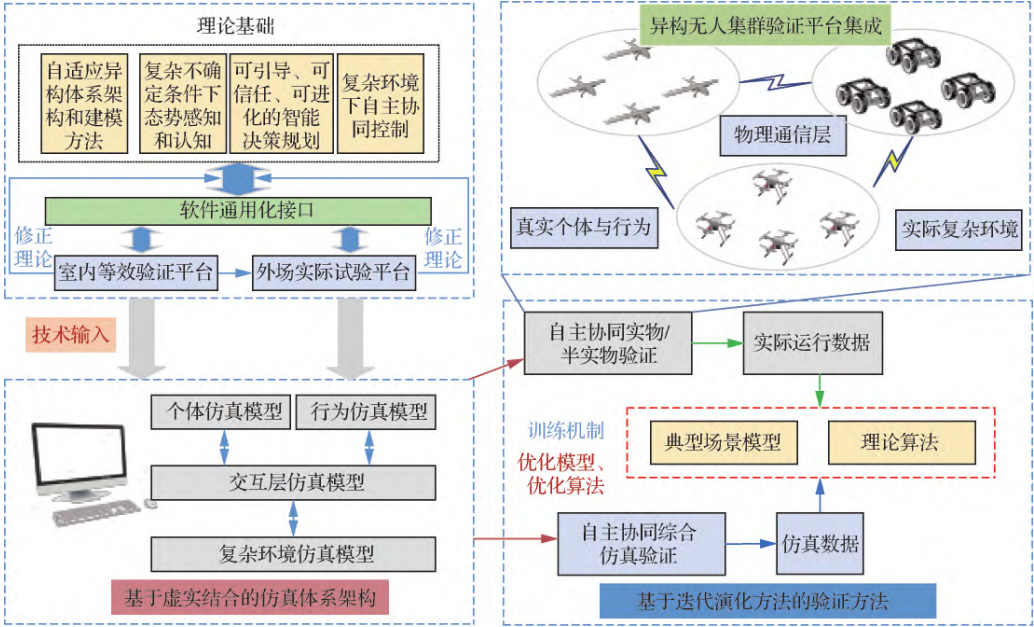


图 30 异构无人集群验证平台开放式总体架构

Fig. 30 Open overall architecture of verification platform for heterogeneous unmanned multi-agent system

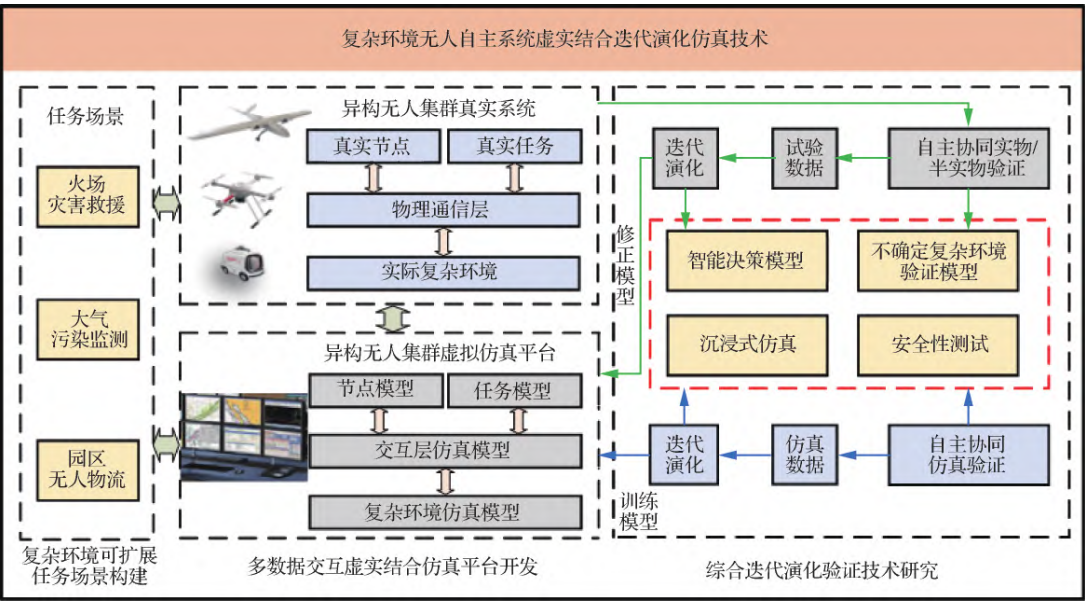


图 31 复杂环境无人自主系统虚实结合迭代演化验证技术

Fig. 31 Virtual-real integrated iterative evolution verification technology for unmanned autonomous system in complex environment

结合迭代演化仿真平台,用于大规模异构集群试验的沉浸式仿真及实际飞行验证。基于信息交互、顶层决策、模块化方法以及异构集群数据分析技术,利用虚实结合迭代演化仿真技术从顶层设计出发,基于复杂任务场景,研究可扩展动态任务场景构建技术。依据无人集群系统自适应异构体系架构及评估、无人集群系统分布式感知与认知、无人集群系统智能决策与规划、以及无人集群系统鲁棒安全自主协同控制等技术的研究进行技术引入,构建异构无人集群仿真架构。与异构无人集群算法引擎进行数据通讯,获取异构无人集群全过程的仿真数据,实时模拟仿真场景试验流程,通过虚实信息桥实现同虚拟展示平台的数据交互。最终为各个关键技术模块的融合和验证提供有力支撑,具备仿真场景与实际场景之间的映射更新能力,充分发挥异构无人集群的智能性及自主性。

3.5.3 复杂动态场景多任务集群自主协同验证试验技术

无人集群技术在火灾监测、伤员救援、物流运输及大气环境监测等复杂场景中的应用是当前无人行业的迫切需要。在未来无人集群技术规模化应用的情况下,势必引发新一轮产业模式的升级甚至颠覆性变革,因此需要研究复杂动态场景多任务集群自主协同验证试验技术,推动无人集群在无人物流、灾害监测、伤情救援等国民安全及经济领域的发展。

1) 火灾监测及救援活动

火灾救援场景下异构无人集群试验(图 32)主要针对复杂地形多点突发火灾情况下,通过固定翼无人机、旋翼无人机及无人车组成的异构集群进行火情侦查、信息收集、定点救援进行火场应急救援试验。

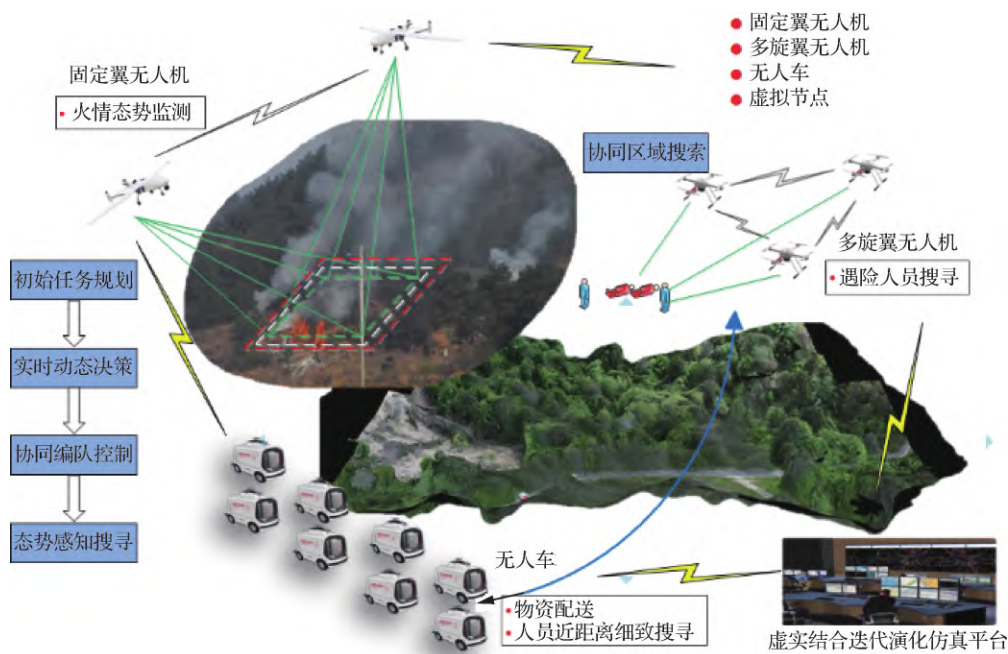


图 32 火场灾害救援应用下集群自主协同验证试验场景图

Fig. 32 Autonomous cooperative verification test for fire disaster rescue application

2) 园区无人物流场景

针对园区无人物流场景特点,建立验证场景方案(图 33)。以指挥控制中心为核心,搭建虚实结合的复杂动态场景多任务无人集群自主协同初步验证方案,实现虚实结合应用验证。

3) 大气污染监测

针对环境监测应用场景研究,如图 34 所示。进行基于无人集群自主协同的验证,利用无人机/无人车/无人集群搭载空气采集模块,快速锁定气体污染源的类型、位置与传输方向,为环保部门大气防治提供行动思路和依据,高效省时、节省人力成本。

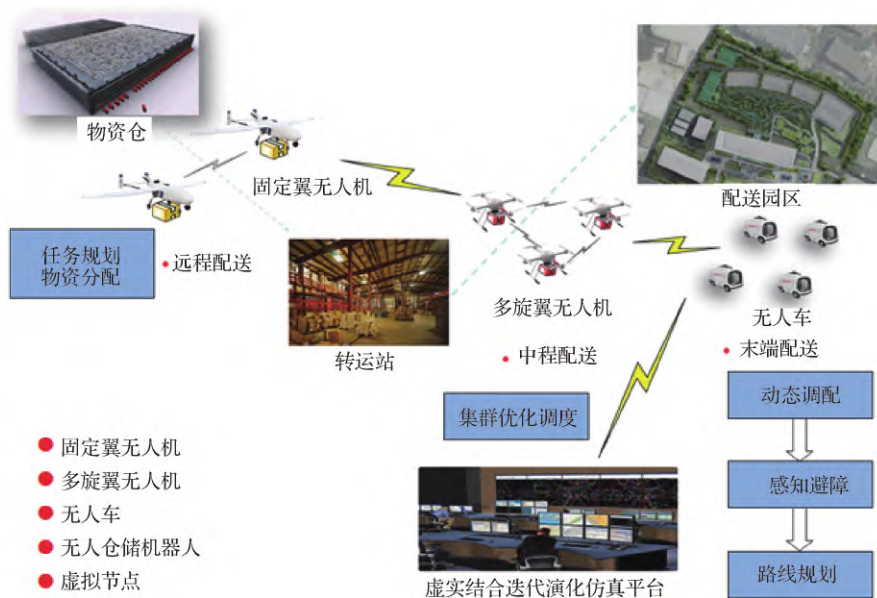


图 33 园区物流应用下集群自主协同验证试验场景图

Fig. 33 Autonomous cooperative verification test for logistics application in park

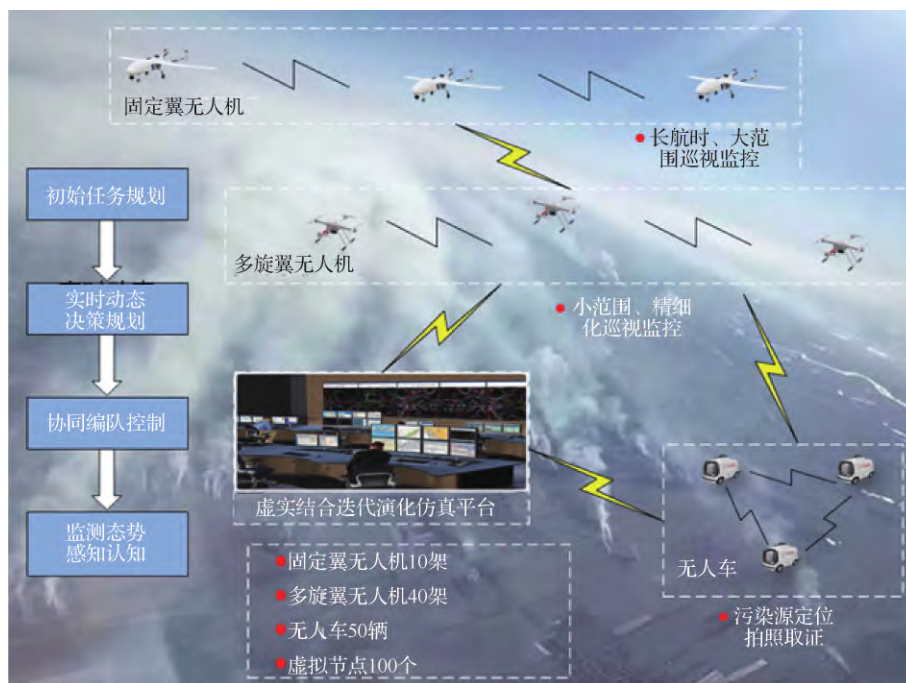


图 34 大气污染检测应用下集群自主协同验证试验场景图

Fig. 34 Autonomous cooperative verification test scenario for atmospheric pollution detection application

4 未来发展方向

4.1 复杂环境下无人集群系统自适应异构体系架构和建模方法

1) 面向应用需求的无人集群体系架构设计

基于 MBSE 的无人集群体系架构设计过程中,既要考虑架构设计的通用性,又要兼顾项目在实际应用验证方面的需求,因此在体系架构设计中已经开展了与应用验证相关单位的横向交流沟通,初步采用 MBSE 工具对应用验证的典型场景进行了需求分析和建模,取得了一定成果。同时,在

集群感知、集群认知、六层集群体系架构中的各层间接口设计,需要依托集群体系各层面设计方、参与方等利益相关单位的合作密集沟通、充分理解需求、深入解刨数据流、全链条整合业务环节,才能充分整合各方面信息,实现面向应用需求的无人集群体系架构设计。

2) 探索建立无人集群系统新国际标准体系

调研无人集群相关国内外标准体系,开展无人集群标准需求分析,目前国际上尚无无人集群相关标准,亟需建立标准体系指导集群相关技术发展。重点分析《适用于无人系统的命令和协议标准以及相关的开发工具》、《适用于集群无人系统的设计与演示》等^[90]文件对无人集群相关体系的适用性,并分析无人集群缺项标准需求。尤其针对无人集群系统通信互操作领域,参考了《适用于无人系统的命令和协议标准以及相关的开发工具》^[90],深入研究基于标准解决无人集群系统节点之间的互联互通互操作及协同等问题。因此,未来在无人集群系统通信互操作领域有望建立信道国际标准体系。

3) 基于集群效能评估的体系设计与运用

在未来复杂多变的任务环境下,在体系任务过程中高可靠效能的准确评估与有效运用是提升集群任务能力的关键手段。如果能够基于对未来状态演化情况的掌握,对无人集群的论证、设计、使用、保障等环节开展预先效能评估,将问题扼杀于萌芽之中,就能实现体系效能的最优化发挥。例如在复杂不确定因素影响下,无人集群可以基于实时效能评估结果和外界综合态势信息进行自主任务规划与系统重构,在降低因个体失效而导致的系统风险的同时优化配置体系效能。

4.2 复杂环境下高维态势分布式感知与认知

1) 不确定条件下高质量传感数据处理

无人集群在实际应用中无法适应复杂不确定的环境,亟需将高维态势感知与认知作为无人集群导航研究的重要探索方向,因此,需要以分布式集群的特点和复杂不确定环境的难点出发,以解决高维态势的高通量采集需求和分布式集群低带宽之间的矛盾为首要目标,研究高维态势数据的编码采集机制和非结构化互补采集技术。

2) 传感数据的共享及多源信息融合技术

针对无人集群的传感数据和信息共享,需提供方案解决异构无人平台的感知能力的尺度、维度、精度差异,提出非结构化协同互补融合方式,挖掘子平台观测信息时空耦合关系,通过多源数据跨尺度匹配,实现全方位的态势线索整合,进一步在计算资源受限的约束下开发低功耗感知与认知平台,支撑集群实时可靠的决策。

3) 低功耗鲁棒的集群感知方案设计

多源异构平台的低功耗态势感知与认知方法,适配高通量感知认知需求与低配置分布式计算资源。一方面,设计异构集群感知任务的非结构化分解和分布式部署策略,同时提出多源异构信息融合方法,解决集群信息整合中面临的维度、尺度、细节程度差异大、配准难的问题。另一方面,提出低功耗高鲁棒的感知与认知方法,开发满足资源约束条件的低功耗计算平台。从编码信号解析出高维态势数据与任务相关的语义信息,实现无人集群对复杂环境的高可靠高效能感知。该方面的技术突破,能够解决多源异构高通量数据感知认知复杂度和精度的提升,解决分布式无人集群感知与认知难题。

4.3 可引导、可信任、可进化的无人集群系统智能决策与规划

1) 异构无人机集群的协作策略学习研究

目前研究对象为同构小型固定翼无人机集群,所有的无人机可以共享通信策略和动作策略。在实际的应用场景中,组成集群的无人机可能是异构的,此时无人机的运动学模型、通信模型以及对目标的观测模型可能不完全相同,所以异构无人机之间无法直接共享经验和策略。如何将本文设计的多智能体深度强化学习协作策略算法扩展到异构无人机集群还需要进一步研究。

2) 对抗环境中的多目标搜索与跟踪问题

假设目标与无人机之间是非合作、非对抗的,目标不会主动向无人机发送自己的信息,也不会逃避无人机的跟踪。而在现实的对抗作战环境中,被跟踪的目标可能具有感知无人机并逃避跟踪的能力。此时,无人机之间不仅要密切合作保持对目标的搜索和跟踪,还要与目标进行博弈,甚至预判目标的预判,正确应对目标的逃避行为。因此,在对抗环境中的多目标搜索与跟踪问题中,

无人机的协作策略学习的难度上升,有必要结合其它理论和方法,如群体冲突理论、模型预测控制等方法设计学习方法学习无人机集群的协作策略。

3) 从仿真环境到现实世界的迁移

为了降低无人机集群协作策略的学习难度,本文采用简化的二维平面运动学模型对无人机进行建模,并设计了无人机集群多目标搜索与跟踪仿真环境进行算法的开发和测试。而现实世界中,无人机的运动学模型更加复杂,仿真环境与现实世界存在较大的差异,因此在仿真环境中学到的无人机的运动和通信策略可能无法直接在真实的无人机平台上执行。如何跨越从仿真环境到现实世界的鸿沟,将多智能体深度强化学习协作策略真正推向实际应用,仍然是一个开放的问题。

4.4 复杂环境下无人集群系统自主协同控制

1) 智能化协同控制

随着人工智能的飞速发展,神经网络等机器学习算法逐渐开始应用于集群系统。随着系统个体逐渐增多,传统的基于图论的控制方法不再适用于大规模集群,因此利用人工智能方法计算性能的优越性,结合传统控制理论的稳定性,融合多学科优势,使集群系统具备在线学习与自主决策控制能力,进一步实现群系统对多类任务场景的适应性和切换性。

2) 强鲁棒性高安全协同控制

由于实际任务场景的多样化性、系统的复杂化,研究多源干扰、多重威胁下的强鲁棒高安全控制算法和理论,提高无人集群系统在复杂任务环境下执行任务的能力和抗干扰能力,特别是针对不同平台下的异构集群系统协同控制问题,是未来研究的重要方向之一。

3) 最优协同控制

当前研究主要关注集群系统队形的形成、保持以及重构,重点在于分析系统的稳定性和收敛性。对于复杂任务场景,资源受限的条件下,如何实现最优控制,即实现集群系统收益最高,能耗最少,是随着集群数量增加而产生的一件亟待解决的问题。

4) 一体化协同控制

已有的研究工作表明,集群系统的研究主要

分散为感知、决策、控制 3 部分,然而由于集群数量的扩大,基于单一结构化的模式实现的结果往往是不够理想的。因此,建立感知—决策—控制为一体的系统架构,支撑高动态、大规模动态场景的,实现感知和信息共享,规划与控制结合,是实现理论落地的重要方向。

4.5 复杂环境异构无人集群自主协同技术应用验证

1) 面向产业模式的升级和变革

无人集群技术在复杂场景如物流运输中的应用是当前无人行业的迫切需要,其应用可以带来快递业务能力的指数增长,乃至全面智能化技术的增幅。在未来无人集群技术规模化应用的情况下,势必引发新一轮产业模式的升级甚至颠覆性变革。将相关技术拓展,可以在渗透侦察、察打一体、协同攻击等国防科技领域大显身手,还将在智能交通、灾害监测、农业植保等其他国民经济领域发挥巨大的推动力。

2) 立足应急通信保障等重点民用需求

异构无人集群可根据防灭火任务性质与地域不同,结合灭火现场地形地势、气候条件、环境影响等相关要素,在选择机型和无人机配备上构建“低、中、高空与近、中、远程科学搭配,固定翼、多旋翼与油动、电动合理编成”的无人机装备体系,再配合地面无人车的辅助,对应急场景进行全方位多维度的监测,节省勘察时间的同时也降低了勘察的难度。

3) 形成区域环境监测联合交互机制,解决传统监测痛点

传统环境监测具有“涉及区域范围较大、区域之间污染物传输量大、污染源种类多、污染因子相对复杂”等特点。采用异构无人集群监测方案,有如下优势:高效省时、灵活隐蔽、机动敏捷。未来可构建移动环境监测网,形成区域联合交互机制,协助有关部门了解监测物多维空间分布情况,判断污染原因及传输特点,为环境防治提供行动思路和依据。

参 考 文 献

- [1] 邹立岩,张明智,武剑. 面向体系仿真的智能无人机集群作战建模总体框架研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2021,

- 35(1): 64-72.
- ZOU L Y, ZHANG M Z, WU J. A study on the general framework of intelligent UAS swarm operation modeling oriented on so S simulation[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2021, 35(1): 64-72 (in Chinese).
- [2] 张青春, 张兴. 基于 DoDAF 的 C²BMC 系统体系结构建模[J]. 指挥信息系统与技术, 2019, 10(3): 50-56.
- ZHANG Q C, ZHANG X. Architecture modeling for C²BMC system based on DoDAF[J]. Command Information System and Technology, 2019, 10(3): 50-56 (in Chinese).
- [3] 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.
- LIU X Y, JIANG H Y, ZHAO H L, et al. Research on OV of air precision striking operation with space information support based on DODAF-OODA[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(2): 33-38 (in Chinese).
- [4] 戎光, 刘新发, 夏惠诚. 基于 DoDAF 的大型舰艇编队防空反导系统作战体系结构[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(6): 22-25, 39.
- RONG G, LIU X F, XIA H C. Operation architecture of air defense and anti-missile system of large warship formation based on DoDAF[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(6): 22-25, 39 (in Chinese).
- [5] 王洪胜, 禹大勇, 曲延明. 基于 DoDAF 的舰载弹炮结合防空武器系统模型[J]. 兵工自动化, 2014, 33(5): 28-31, 46.
- WANG H S, YU D Y, QU Y M. Shipboard missile Gun integrated air-defense weapon system model based on DoDAF[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(5): 28-31, 46 (in Chinese).
- [6] DARPA. System of Systems Integration Technology and Experimentation (SoSITE) [EB/OL]. (2016-10-27) [2022-06-04]. <https://www.darpa.mil/program/sytem-of-sytem-integration-technology-and-experimentation>.
- [7] DARPA. Collaborative Operations in Denied Environment (CODE) [EB/OL]. (2018-11-28) [2022-06-04]. <https://www.darpa.mil/program/collaborative-operations-in-denied-environment>.
- [8] DARPA. Distributed Battle Management (DBM) [EB/OL]. (2018-02-13) [2022-06-04]. <https://www.darpa.mil/program/distributed-battle-management>.
- [9] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- DUAN H B, QIU H X. Unmanned aerial vehicle swarm autonomous control based on swarm intelligence[M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese).
- [10] WANG X K, SHEN L C, LIU Z H, et al. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: Methods and experiments[J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(11): 212204.
- [11] 段海滨, 申燕凯, 王寅, 等. 2018 年无人机领域热点评述[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 82-90.
- DUAN H B, SHEN Y K, WANG Y, et al. Review of technological hot spots of unmanned aerial vehicle in 2018 [J]. Science & Technology Review, 2019, 37(3): 82-90 (in Chinese).
- [12] DONG Y X. Research on effectiveness evaluation methods [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 140-145.
- [13] 燕雪峰, 张德平, 黄晓冬. 面向任务的体系效能评估[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- YAN X F, ZHANG D P, HUANG X D. Mission oriented effectiveness evaluation and optimization of system of systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020 (in Chinese).
- [14] 李坎. 对地攻击型无人机群协同作战效能分析[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(6): 63-68.
- LI K. Effectiveness analysis of cooperative engagement for the ground attack Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) [J]. Command Control & Simulation, 2017, 39(6): 63-68 (in Chinese).
- [15] 屈高敏, 董彦非, 岳源. 对地攻击型无人机作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(4): 145-149.
- QU G M, DONG Y F, YUE Y. Operational effectiveness evaluation of ground attack UCAV[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(4): 145-149 (in Chinese).
- [16] 黄吉传, 周德云. 无人机协同作战效能评估指标体系设计与分析[J]. 西安工业大学学报, 2020, 40(1): 38-44.
- HUANG J C, ZHOU D Y. Design and analysis of an evaluation index system for UAV cooperative combat effectiveness[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2020, 40(1): 38-44 (in Chinese).
- [17] 陈侠, 胡乃宽. 基于 APSO-BP 神经网络的无人机空地作战效能评估研究[J]. 飞行力学, 2018, 36(1): 88-92.
- CHEN X, HU N K. Research on effectiveness evaluation of UAV air-to-ground attack based on APSO-BP neural network[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(1): 88-92 (in Chinese).
- [18] 陈亮. 体系作战条件无人机作战效能评估模型[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(7): 124-127, 160.
- CHEN L. UAV operational effectiveness evaluation model in system combat[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(7): 124-127, 160 (in Chinese).
- [19] 齐智敏, 张海林, 伊山, 等. 智能无人机群体作战效能评估指标体系研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(9): 1-5.
- QI Z M, ZHANG H L, YI S, et al. Research on the in-

- dex system of intelligent UAV group combat effectiveness evaluation[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(9): 1-5 (in Chinese).
- [20] 祝学军, 赵长见, 梁卓, 等. OODA 智能赋能技术发展思考[J]. *航空学报*, 2021, 42(4): 524332.
- ZHU X J, ZHAO C J, LIANG Z, et al. Thoughts on technology development of OODA empowered with AI [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(4): 524332 (in Chinese).
- [21] SHI J J, REN M R, WANG P, et al. Research on PF-SLAM indoor pedestrian localization algorithm based on feature point map[J]. *Micromachines*, 2018, 9(6): 267.
- [22] WEN W S, HSU L T, ZHANG G H. Performance analysis of NDT-based graph SLAM for autonomous vehicle in diverse typical driving scenarios of Hong Kong[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3928.
- [23] 高宏伟, 于斌, 武炎明. 视觉 SLAM 的空地协同导航方法研究[J]. *沈阳理工大学学报*, 2022, 41(1): 7-13.
- GAO H W, YU B, WU Y M. Research on air-ground cooperative navigation based on VSLAM[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2022, 41(1): 7-13 (in Chinese).
- [24] ATTOUI I, FERGANI N, BOUTASSETA N, et al. A new time-frequency method for identification and classification of ball bearing faults[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 397: 241-265.
- [25] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1440-1448.
- [26] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016: 779-788.
- [27] ZHANG Y F, SUN P Z, JIANG Y, et al. ByteTrack: multi-object tracking by associating every detection box [EB/OL]. (2022-04-07)[2022-06-04]. <https://arxiv.org/abs/2110.06864>.
- [28] CHEN C, ZHANG X L, PENG X F, et al. Multi-sensor fusion technology in inertial navigation system using factor graph[C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 4575-4580.
- [29] 张靖, 王向东, 邓志宝, 等. 一种基于因子图的异步信息融合定位算法[J]. *导弹与航天运载技术*, 2019(3): 89-95.
- ZHANG J, WANG X D, DENG Z B, et al. An asynchronous information fusion positioning algorithm based on factor graph[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2019(3): 89-95 (in Chinese).
- [30] BATTISTELLI G, CHISCI L. Stability of consensus extended Kalman filtering for distributed state estimation [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 5520-5525.
- [31] ZHANG H, ZHOU X, WANG Z P, et al. Adaptive consensus-based distributed target tracking with dynamic cluster in sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(5): 1580-1591.
- [32] ZHANG C, JIA Y M. Distributed estimation for stochastic hybrid systems with event-triggered sensor schedule[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 11(2): 173-181.
- [33] KAMAL A T, FARRELL J A, ROY-CHOWDHURY A K. Information weighted consensus filters and their application in distributed camera networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(12): 3112-3125.
- [34] BATTISTELLI G, CHISCI L. Kullback-Leibler average, consensus on probability densities, and distributed state estimation with guaranteed stability [J]. *Automatica*, 2014, 50(3): 707-718.
- [35] VAHIDPOUR V, RASTEGARNIA A, KHALILI A, et al. Partial diffusion Kalman filtering for distributed state estimation in multiagent networks[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, 30(12): 3839-3846.
- [36] CHEN Q, YIN C, ZHOU J, et al. Hybrid consensus-based cubature Kalman filtering for distributed state estimation in sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(11): 4561-4569.
- [37] KLUGE S, REIF K, BROKATE M. Stochastic stability of the extended Kalman filter with intermittent observations [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 55(2): 514-518.
- [38] JI H H, LEWIS F L, HOU Z S, et al. Distributed information-weighted Kalman consensus filter for sensor networks[J]. *Automatica*, 2017, 77: 18-30.
- [39] ZHANG Y, SUN L C, HU G Q. Distributed consensus-based multitarget filtering and its application in formation-containment control[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2020, 7(1): 503-515.
- [40] LI L, YU D D, XIA Y Q, et al. Event-triggered UKF for nonlinear dynamic systems with packet dropout[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2017, 27(18): 4208-4226.
- [41] DONG H L, BU X Y, WANG Z D, et al. Finite-horizon distributed state estimation under randomly switching topologies and redundant channels[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(8): 2938-2947.
- [42] 吴亚辉, 刘春阳, 谢赛宝, 等. 基于视觉深度学习的机器人环境感知及自主避障[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(20): 99-106.

- WU Y H, LIU C Y, XIE S B, et al. Mobile robotic perception and autonomous avoidance based on visual depth learning[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(20): 99-106 (in Chinese).
- [43] ZHOU X, ZHU J C, ZHOU H Y, et al. EGO-swarm: A fully autonomous and decentralized quadrotor swarm system in cluttered environments[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2021: 4101-4107.
- [44] PARK J, KIM J, JANG I, et al. Efficient multi-agent trajectory planning with feasibility guarantee using relative Bernstein polynomial[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2020: 434-440.
- [45] ZHANG J, XING J H. Cooperative task assignment of multi-UAV system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(11): 2825-2827.
- [46] FU Y G, DING M Y, ZHOU C P. Phase angle-encoded and quantum-behaved particle swarm optimization applied to three-dimensional route planning for UAV[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics -Part A: Systems and Humans*, 2012, 42(2): 511-526.
- [47] CHEN Y B, YANG D, YU J Q. Multi-UAV task assignment with parameter and time-sensitive uncertainties using modified two-part wolf pack search algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6): 2853-2872.
- [48] YAO J J, ANSARI N. Task allocation in fog-aided mobile IoT by Lyapunov online reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2020, 4(2): 556-565.
- [49] ZHAO N, YE Z Y, PEI Y Y, et al. Multi-agent deep reinforcement learning for task offloading in UAV-assisted mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(9): 6949-6960.
- [50] WANG L, WANG K Z, PAN C H, et al. Multi-agent deep reinforcement learning-based trajectory planning for multi-UAV assisted mobile edge computing [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(1): 73-84.
- [51] ZHAO G X, ZHU M H. Scalable distributed algorithms for multi-robot near-optimal motion planning[J]. *Automatica*, 2022, 140: 110241.
- [52] QUAN L, YIN L J, XU C, et al. Distributed swarm trajectory optimization for formation flight in dense environments[EB/OL]. (2022-04-21)[2022-06-04]. <https://arxiv.org/abs/2109.07682>.
- [53] ZHOU X, WANG Z P, YE H K, et al. EGO-planner: An ESDF-free gradient-based local planner for quadrotors[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 478-485.
- [54] RÖSMANN C, HOFFMANN F, BERTRAM T. Integrated online trajectory planning and optimization in distinctive topologies[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 88: 142-153.
- [55] JAILLET L, SIMEON T. Path deformation roadmaps: compact graphs with useful cycles for motion planning[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(11-12): 1175-1188.
- [56] ZHOU B Y, GAO F, PAN J, et al. Robust real-time UAV replanning using guided gradient-based optimization and topological paths[C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1208-1214.
- [57] VAN DEN BERG J, GUY S J, LIN M, et al. Reciprocal n-body collision avoidance[M]. Berlin: Springer, 2011: 3-19.
- [58] VAN DEN BERG J, SNAPE J, GUY S J, et al. Reciprocal collision avoidance with acceleration-velocity obstacles [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2011: 3475-3482.
- [59] ARUL S H, MANOCHA D. DCAD: Decentralized collision avoidance with dynamics constraints for agile quadrotor swarms[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 1191-1198.
- [60] LIU Z X, CHEN B M, ZHOU H Y, et al. MAPPER: multi-agent path planning with evolutionary reinforcement learning in mixed dynamic environments[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 11748-11754.
- [61] PARRISH J K, VISCIDO S V, GRÜNBAUM D. Self-organized fish schools: An examination of emergent properties[J]. *The Biological Bulletin*, 2002, 202(3): 296-305.
- [62] POTTS W K. The chorus-line hypothesis of manoeuvre coordination in avian flocks [J]. *Nature*, 1984, 309(5966): 344-345.
- [63] OKUBO A. Dynamical aspects of animal grouping: Swarms, schools, flocks, and herds[J]. *Advances in Biophysics*, 1986, 22: 1-94.
- [64] BEARD R W, MCLAIN T W, NELSON D B, et al. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, 94(7): 1306-1324.
- [65] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1520-1533.

- [66] REN W, BEARD R W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [67] DENG C, WEN C Y, HUANG J S, et al. Distributed observer-based cooperative control approach for uncertain nonlinear MASs under event-triggered communication[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2022, 67(5): 2669-2676.
- [68] FAX J A, MURRAY R M. Information flow and cooperative control of vehicle formations[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2002, 35(1): 115-120.
- [69] YU J L, DONG X W, LI Q D, et al. Fully adaptive practical time-varying output formation tracking for high-order nonlinear stochastic multiagent system with multiple leaders[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(4): 2265-2277.
- [70] WANG Y W, LIU X K, XIAO J W, et al. Output formation-containment of interacted heterogeneous linear systems by distributed hybrid active control[J]. Automatica, 2018, 93: 26-32.
- [71] LIU H Y, CHENG L, TAN M, et al. Containment control with multiple interacting leaders under switching topologies[C] // Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2013: 7093-7098.
- [72] LIU S, XIE L H, ZHANG H S. Containment control of multi-agent systems by exploiting the control inputs of neighbors[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(17): 2803-2818.
- [73] DONG X W, HUA Y Z, ZHOU Y, et al. Theory and experiment on formation-containment control of multiple multirotor unmanned aerial vehicle systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(1): 229-240.
- [74] DONG X W, TAN Q K, LI Q D, et al. Necessary and sufficient conditions for average formation tracking of second-order multi-agent systems with multiple leaders[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(2): 611-626.
- [75] DONG X W, HU G Q. Time-varying formation tracking for linear multiagent systems with multiple leaders[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(7): 3658-3664.
- [76] ZHENG Y S, WANG L. Consensus of heterogeneous multi-agent systems without velocity measurements[J]. International Journal of Control, 2012, 85(7): 906-914.
- [77] YU J L, DONG X W, LI Q D, et al. Adaptive practical optimal time-varying formation tracking control for disturbed high-order multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2022, 69(6): 2567-2578.
- [78] DUAN H B, ZHANG Y P, LIU S Q. Multiple UAVs/UGVs heterogeneous coordinated technique based on Receding Horizon Control (RHC) and velocity vector control [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(4): 869-876.
- [79] JIANG W, WEN G G, PENG Z X, et al. Fully distributed formation-containment control of heterogeneous linear multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(9): 3889-3896.
- [80] LI W H, ZHANG H G, GAO Z Y, et al. Fully distributed event/self-triggered bipartite output formation-containment tracking control for heterogeneous multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, PP(99): 1-10.
- [81] 张晖. 无人机在消防灭火救援中的应用分析[J]. 消防界(电子版), 2022, 8(1): 51-53.
ZHANG H. Application analysis of UAV in fire fighting and res-cue [J]. Fire Protection Industry (Electronic Edition), 2022, 8(1): 51-53 (in Chinese).
- [82] 晏治. 无人机在消防灭火救援工作中的应用效果分析[J]. 消防界(电子版), 2021, 7(23): 51-52.
YAN Z. Analysis of application effect of unmanned aerial vehicle in fire fighting and rescue work[J]. Fire Protection Industry (Electronic Edition), 2021, 7(23): 51-52 (in Chinese).
- [83] 阚瓊珂. 复杂山地景区“空—天—地”一体化协同搜救平台研发与应用示范: CN106447579A [P]. 2017-02-22 (in Chinese).
KAN Y K. Research and application demonstration of "air-sky-earth" integrated cooperative search and rescue platform in complex mountain scenic spots: CN106447579A [P]. 2017-02-22.
- [84] 于斌. 消防灭火救援过程中无人机作用分析[J]. 中国科技信息, 2022(5): 76-77.
YU B. Analysis of UAV's role in fire fighting and rescue [J]. China Science and Technology Information, 2022(5): 76-77 (in Chinese).
- [85] 朱连熙, 颜康龙, 罗嘉俊. 基于森林火灾的多类型无人机布局与控制方法[J]. 科技与创新, 2021(23): 55-56.
ZHU L X, YAN K L, LUO J J. Layout and control method of multi-type unmanned aerial vehicles based on forest fire [J]. Science and Technology & Innovation, 2021(23): 55-56 (in Chinese).
- [86] 刘闯, 鱼小军, 张婷, 等. 无人集群装备仿真试验关键技术现状及趋势[J/OL]. 航空学报, (2022-03-14)[2022-06-04]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220311.0949.002.html>.
LIU C, YU X J, ZHANG T, et al. Research status and trend of key technologies of simulation test of unmanned swarm equipment[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 31-41 (in Chinese).

- tica Sinica, (2022-03-14) [2022-06-04]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20220311.0949.002.html> (in Chinese).
- [87] 王春艳, 任浩, 匡敏驰, 等. 基于军事规则的无人坦克集群协同作战仿真[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(8): 1691-1696.
WANG C Y, REN H, KUANG M C, et al. Simulation of unmanned tank cooperative combat based on military rules [J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1691-1696 (in Chinese).
- [88] 邹立岩, 张明智, 柏俊汝. OODA-L 模式下的智能无人集群作战仿真建模框架[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(4): 163-170.
ZOU L Y, ZHANG M Z, BAI J R. Modeling framework for intelligent unmanned swarm operation simulation under OODA-L pattern[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(4): 163-170 (in Chinese).
- [89] 朱波, 胡旭东, 谈东奎, 等. 基于多通道态势图的自动驾驶场景表征方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 204-214.
ZHU B, HU X D, TAN D K, et al. Automatic driving scenario representation based on multi-channel situation map[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(8): 204-214 (in Chinese).
- [90] 张斌, 林斌, 杨彦彰, 等. 国内民用无人机系统标准体系构建现状[J]. 中国标准化, 2019(S1): 122-125.
ZHANG B, LIN B, YANG Y Z, et al. Research on the current status of standards system construction for domestic civil UAV system [J]. China Standardization, 2019 (S1): 122-125 (in Chinese).

(责任编辑: 宋金超)

Key technologies for autonomous cooperation of unmanned swarm systems in complex environments

XIANG Jinwu^{1,2,3}, DONG Xiwang^{2,4,*}, DING Wenrui³, SUO Jinli⁵, SHEN Lincheng⁶, XIA Hui⁷

1. School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China

3. Institute of Unmanned System, Beihang University, Beijing 100191, China

4. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

5. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

6. Graduate School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

7. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100074, China

Abstract: In complex environments with high dynamics, uncertainty and resource constraints, the unmanned swarm system will face challenges in all fields of the "Observation-Oriented-Decision-Action (OODA)" loop when performing complicated tasks such as collaborative area search and swarm optimal scheduling. To improve the adaptability of unmanned swarm systems to different scenarios, it is necessary to break through the key technologies for autonomous cooperation of unmanned swarm systems in complex environments. Based on the theory of robust autonomous cooperation of large-scale heterogeneous unmanned swarm systems in complex environments, this paper gives a review of the design and modeling methods of adaptive heterogeneous architecture for unmanned swarm systems, and discusses three problems: high-dimensional situation distributed perception and cognition, intelligent decision-making with guiding, trusting and evolving ability, and autonomous cooperative control of the unmanned swarm system in complex environments. Firstly, the research progress of autonomous cooperation of unmanned swarm system in complex environment is summarized. Secondly, the challenges faced by OODA task loop of unmanned swarm system are analyzed. Then, the key technologies involved in autonomous cooperation of unmanned swarm system in complex environment and their progress are reviewed. Finally, the future development of autonomous cooperation of unmanned swarm system is given.

Keywords: unmanned swarm system; heterogeneous system architecture; distributed perception and cognition; intelligent decision making and planning; cooperative control; simulation and application validation

Received: 2022-06-04; Revised: 2022-06-17; Accepted: 2022-07-07; Published online: 2022-07-15 16:32

URL: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2022/V43/I10/527570>

Foundation item: Science and Technology Innovation 2030-Key Project of "New Generation Artificial Intelligence" (2020AAA0108200)

* Corresponding author. E-mail: xwdong@buaa.edu.cn