无人—有人机协同控制关键问题

牛轶峰*, 沈林成, 李杰, 王祥科

国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073

* 通信作者. E-mail: niuyifeng@nudt.edu.cn

收稿日期: 2019-01-11; 接受日期: 2019-03-10; 网络出版日期: 2019-05-14

国家自然科学基金 (批准号: 61876187) 资助项目

摘要 无人—有人机协同是适应无人机快速发展, 提升对抗条件下无人机实战化能力的必由之路; 是实现优势互补, 形成新型高效作战体系的有效途径; 也是确保武器控制在人手中的重要保障. 无人—有人机协同运用的核心是协同控制, 即通过人 (飞行员) 最小监督下无人机与有人机的自主协同, 达成“ $1+1>2$ ”的作战效能. 本文分析了无人—有人机协同控制的发展现状, 基于“观察—判断—决策—行动 (OODA)”任务回路, 针对内回路的多机自主协同、外回路的人机智能协同, 系统梳理了协同控制技术体系, 并展望了下一步的研究重点.

关键词 无人—有人机系统, 协同控制, 自主协同, 智能协同, 分布式体系架构

1 引言

当前, 军用无人机系统所承担的任务正在由安全空域执行情报、监视与侦察 (intelligence, surveillance, and reconnaissance, ISR) 任务向战场对抗环境下执行对地打击、空战等作战任务方向扩展, 无人机系统已开始加速向主战装备发展, 并将继续改变战争面貌, 从而引起战争形态和制胜机理的深刻变革. 但从国内外经验来看, 目前所有现役无人机自卫和空中对抗能力不足, 不适合在战场对抗环境下使用. 一旦环境存在对抗, 乃至失去制空权等优势, 无人机就面临被干扰、诱骗和打击的危险.

由于技术水平的限制, 高端无人机系统目前还不具备意外事件实时响应和处理能力, 因此, 今后相当一段时期内不可能在战场对抗环境中实现完全自主作战, 其执行任务时还需要由人通过数据链进行操作和控制, 以确保任务完成和使用安全. 由于现有“地面站远程异地控制无人机”的模式^[1], 存在数据链中断和指挥控制延时等缺陷, 难以支撑无人机在战场对抗环境下遂行作战任务, 采用有人机指挥控制模式, 可以实现对无人机的就近指挥, 通过两者优势互补, 可有效提高无人机对作战环境变化的应对能力, 弥补无人机在复杂环境下自主能力的不足, 是短期内无人机在战场对抗环境下形成作战能力的有效手段.

引用格式: 牛轶峰, 沈林成, 李杰, 等. 无人—有人机协同控制关键问题. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 538-554, doi: 10.1360/N112019-00008
Niu Y F, Shen L C, Li J, et al. Key scientific problems in cooperation control of unmanned-manned aircraft systems (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 538-554, doi: 10.1360/N112019-00008

图 1 (网络版彩图) 人在回路的无人机监督控制系统示意图

Figure 1 (Color online) Human-on-the-loop supervisory control system of UAVs

而无人机与有人机在平台能力(隐身性、机动性、滞空时间、作战半径等)以及机载传感器性能、机载武器性能等方面存在能力互补的天然优势,实现高端无人机和先进有人机协同作战是一种优先可发展和可实现的作战样式,是弥补有人机和无人机能力不足的重要途径,将极大地提高协同系统的作战效能和战场生存能力,是未来空中作战模式创新发展的重要方向^[2]。

无人-有人机的协同重点要针对无人机与有人机混合编队,研究具有不同自主能力的多无人机(如离线重规划、机载实时重规划、协同规划)与有人机协同的基础问题。其中,包含了较低等级的协调问题(如同构无人机之间)。随着无人机能力的不断发展,无人机将逐步能够与有人机进行协作,达到对等地位。

无人-有人机协同控制(cooperative control, CC):以无人-有人机协同系统为研究对象,在有人机飞行员最小监督下,多无人机、有人机以集中/分布的方式配合完成“观察-判断-决策-行动”,使各平台“在正确时间到达正确地点执行正确任务”,获得“ $1+1>2$ ”的协同作战效能,如图1所示。无人-有人机协同控制面临的挑战包括:

- 环境的高度非结构化、高度对抗性和高度不确定性;
- 目标具有复杂空地背景,处于严密防空网络防护下;
- 平台具有高速、高隐身、高机动和高智能;

- 载荷包括多型传感器、多型武器, 其成像条件和制导方式各异;
- 任务具有高度复杂特点, 协同突防、搜索、跟踪、定位、攻击、评估等任务在空 – 时 – 频域高度耦合.

无人 – 有人机协同控制可理解为智能系统技术和平台控制技术的有机结合, 是两者的高度综合, 涉及到自动控制、人工智能、运筹学、信息论、系统论、通信理论等众多学科领域^[3]. 该问题可详细描述为: 在执行对地打击任务之前, 假设已经获得一定层次的信息, 例如无人机、有人机的数量, 环境, 空域等信息. 位于特定作战空域的每架飞机平台都有其固有的动态特性 (如气动力系数、飞行性能、机动性能等)、机载计算机、传感器、武器、数据链等机载设备. 给定预先定义的一个整体目标列表, 这些目标需要以一定的顺序, 在一定的约束条件下 (包括时间、位置、燃料消耗约束等) 执行, 另外已知信息还需包含每架飞机上机载设备内嵌的关于环境和其他飞机的有限知识. 为了保证成功完成协同打击任务, 协同控制首先要建立面向非结构化动态战场环境的无人 – 有人作战飞机系统协同控制体系, 支持对系统内无人机和有人机的飞机平台以及机载传感器和武器等任务资源的管理控制; 在此基础上, 研究对抗条件下人机协同和多机协同的基础理论与方法, 解决无人 – 有人机系统在对抗环境下人 – 机系统能力匹配, 按需即时信息传递与智能化信息分发, 人 – 机协作的态势感知与理解, 对抗条件下意外事件响应与不确定性实时规划, 多平台协同行为自同步等基础性问题, 达成无人 – 有人机系统“ $1 + 1 > 2$ ”的协同探测与攻击效能, 实现对抗条件下协同系统的能力涌现.

2 无人 – 有人机协同的发展现状及趋势

2.1 发展现状

国外早期对无人 – 有人机协同主要集中在人机交互方面, 主要目的是通过合理的界面设计减少操作员的工作负载. Mansur 等^[4] 设计了统一的无人 – 有人机控制界面, 并探讨了无人 – 有人机控制界面中的关键要素. Levulis 等^[5] 采用多模态交互方法对无人 – 有人直升机编队进行控制, 取得了比传统交互手段更加出色的效果. Lim 等^[6] 总结了目前有代表性的无人 – 有人机系统交互界面, 并指出认知交互是无人 – 有人机系统交互技术的未来发展方向.

随着无人机系统技术的发展, 人们开始对无人机系统赋予越来越多的信任, 无人 – 有人机系统能够参与到越来越多的任务类型中, 人机协同方面的研究开始得到普遍重视. 混合主动 (mixed-initiative) 是实现人机协同的必要手段, 目标是达到“人在回路之上”的监督控制. Cummings 等^[7,8] 研究了在多机协同执行任务过程中, 操作员的监督控制模型, 并指出单操作员能够控制无人机的最大数量不仅仅取决于智能组件系统的自主级别, 还取决于作战速度和作战需求. 从作战速度和工作量上考虑, 针对压制敌防空系统 (suppression of enemy air defences, SEAD) 任务, 操作员的最大能力是控制 5 架无人作战飞机. Schmitt 等^[9] 研究了无人 – 有人机协同的混合主动规划方法, 该方法利用无人机在计算能力上的优势, 使无人机参与无人 – 有人机系统的规划与决策环节, 有效提升了无人 – 有人机系统执行任务的能力. Bevacqua 等^[10] 将混合主动规划与执行应用于多无人机目标搜索任务. 北约 HFM-170 项目针对多无人系统的监督控制开展了方法和使能技术研究^[11], 通过不同成员国参与的 15 个技术演示验证项目, 验证了单操作员对多无人系统监督控制的方法和人机接口设计, 解决了监督控制中的多机控制、有人/无人编队、人机交互与情景遥现界面、操作员负载智能自适应系统、态势感知与认知能力估计、自主等级变化与切换控制、动态任务管理等关键问题, 并且实现了同时对不同自主等级无人平台的监督控制.

2017年7月,国务院出台的《新一代人工智能发展规划》中将人机协同的混合增强智能作为人工智能2.0的一个重要方向,旨在通过人机交互和协同,提升人工智能系统的性能,使人工智能成为人类智能的自然延伸和拓展,通过人机协同更加高效地解决复杂问题.2017年7月底,中国自动化学会在西安召开混合智能专委会成立大会,学会理事长郑南宁院士做了“混合增强智能-协作与认知”的主题报告,指出将人的作用或人的认知模型引入人工智能系统,是人工智能可行的、重要的成长模式.

美国空军《自主地平线》报告^[12]中指出,人机共生/共融是自主系统的未来发展方向.自主等级自适应调整是目前常用的无人-有人协同方法,将无人机的能力大小映射到不同的自主等级,随着有人机负载和工作环境的变化,无人机通过动态的调整自主等级改变参与任务的程度,从而实现无人-有人机系统能力的最大化^[13,14].

目前,以美、欧为代表的无人机强国在大力发展无人作战飞机平台和系统技术,取得了以X-47B和“神经元”为代表的先进成果的同时,也相当重视无人-有人机系统协同控制技术的研究.大多数已经装备的无人机系统以及正在研制的无人机(包括无人作战飞机)系统都将无人-有人机协同作为重点研究和发展的能力,进行了多次无人-有人机协同概念演示和多机型典型任务能力的综合演练^[15,16].其现役无人机系统自主能力为3级以上,在研自主能力为6级(技术成熟度为6级).技术成熟度逐步提高,有些装备甚至已经具备列装能力,但是相关应用都是在取得制空权或者弱对抗条件下使用的.

(1)在无人-有人机协同作战概念设计方面,国外针对无人机、有人机如何有效地在同一空域共存,并充分发挥各自的优势进行了大量的想定设计和理论研究.代表性研究主要包括美空军实验室AFRL提出的无人-有人协同空域作战(cooperative airspace operations, CAO)^[17]概念、洛克希德·马丁(Lockheed Martin Space Systems Company)提出的无人-有人作战飞机交战管理(fighter engagement manager, FEM)作战概念^[18]、通用原子公司“复仇者”无人机集群与F/A-22战斗机协同技术研究项目,以及德国慕尼黑联邦国防军大学(Universität der Bundeswehr München)的“有人-无人编队”(manned-unmanned teaming, MUM-T)项目^[19]等.其中,FEM是一种战术集成空战的作战应用,利用2架具有高隐身、强渗透、高机动、超声速、传感器丰富等性能的先进有人战斗机(F/A-22)来管理的4架小型、低成本、传感器少但多用途的无人作战飞机,以从事危险和充满挑战的反应型SEAD任务.有人战斗机上的任务战斗管理系统提供关键辅助决策和通信管理功能,为复杂的SEAD任务提供近实时的最佳分布式多机协同策略,并指挥每个作战单元的行动.通过与地面站远程指挥控制的方式比较,有人机指挥引导多无人作战飞机协同作战的FEM方式,在缩短时限和提供更有效的多机协作策略以压制或摧毁综合防空系统的威胁等方面具有较大改善.MUM-T项目旨在利用无人机“无人化”的优势提高有人机的态势感知能力、缩短任务完成时间、降低有人机风险,设计了1架“勇士”有人直升机和1~3架无人机的前置侦察和SEAD任务想定,解决了有人机、无人机协同编队所需的互操作集成和航电系统综合等问题,使协同编队达到5级互操作能力,即有人机能够操控无人机的平台和传感器,并能够控制其起降^[20].

(2)在无人-有人机系统协同控制演示验证方面,国外主要通过将无人-有人机混合编组演练协同概念和技术的有效性.典型项目包括美国国防预先研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)和空军的软件使能控制(software enabled control, SEC)项目,实现了1架有人战斗机F-15E对T-33改装无人机的语音指令控制;波音公司的“机载有人-无人系统技术”(airborne manned-unmanned system technology, AMUST)演示验证项目^[21],实现了1架AH-64D“阿帕奇”直升机和1架“猎人”无人机的协同作战;美陆军的“有人机-无人机通用体系架构计划”(manned/unmanned common architecture program, MCAP)项目^[22]、有人与无人系统集成能力(manned unmanned systems

integration capability, MUSIC) 综合演练项目^[15], 实现了多型有人直升机 (“阿帕奇”、“吉奥瓦”) 和多型无人机 (“大乌鸦”、“影子”、“火力侦察兵”、“灰鹰”) 的协同控制, 研制了无人机控制最佳角色分配管理控制系统 SCORCH, 实现了 1 名操作员能够有效控制 3 架无人机; 美海军组建了有人 – 无人直升机混合编组飞行中队. 英国奎奈蒂克公司 (QinetiQ) 完成了 1 架 “狂风” 战斗机引导 1 架无人机替代机和 3 架仿真无人机的模拟攻击试验验证. 2014 年 3 月, 法国完成了安全空域内 “神经元” 无人作战飞机与 “阵风” 战斗机、“猎鹰” 公务机的三机编队飞行试验. 2015 年 4 月, 美军 X-47B 与波音 707 加油机首次以编队形式完成空中自主受油飞行试验. 2017 年 3 月, 美国洛 · 马公司与美空军联合开展了基于无人化 F-16 的新一轮有人机/无人机编组技术演示试飞, 对美空军 “忠诚僚机” (loyal wingman) 的关键技术进行了验证, 包括开放式系统架构的软件集成环境、僚机自主规划并适应对地打击任务, 以及意外事件处置 (失去武器、路径偏离、失去通信联络) 等能力^[23]. 2018 年 11 月, 美军 “拒止环境下无人机协同作战” (collaborative operations in denied environment, CODE) 项目以 RQ-23 “虎鲨” 无人机为平台开展技术验证, 实现单操作员指挥无人机编队执行目标战术侦察、反水面战、压制/摧毁毁防空系统等任务, 重点解决协同自主、飞行器自主、监控界面和分布式系统开放架构等问题^[24].

总体看来, 国外无人机使用和研发大国在无人 – 有人机协同作战使用模式、无人 – 有人机系统综合集成、无人 – 有人机协同体系结构、互联互通互操作、协同 “观察 – 判断 – 决策 – 行动” 回路等方面都开展了大量的理论和实验研究, 并且逐步推动无人 – 有人机混合编组走向实际作战应用. 目前, 各国都还在无人 – 有人机协同作战方向持续大规模追加研发资金和人力资源, 各研究机构都还在继续提高关键技术的成熟度. 但是, 目前现有人 – 有人机协同控制技术仍然离对抗环境中使用存在一定差距. 美国国防部《自主能力在无人系统中的地位》^[25] 指出要高度关注无人机系统所受到的对抗威胁、网络攻击等挑战. 目前, 开展的无人 – 有人机协同试验主要针对安全隔离空域, 在预先统一规划下按计划协同, 两者之间没有直接的指挥控制和信息交互. 这就导致无法进行精细化、精确化协同作战, 不能形成优势互补效应态势; 同时信息不能进入行动级, 任务决策周期过长, 不能适应快变的对抗性战场环境. 还需要研究人员持续创新, 深入探索动态对抗环境下无人 – 有人机能力互补机理、分布式感知信息的传递机制与态势演化的预测估计、应对意外事件的协同决策机制与自主行为的实时规划等基础理论, 为在可预见的未来实现无人 – 有人机混合编组和协同作战奠定理论基础.

2.2 发展趋势

当前无人机系统 (unmanned aircraft system, UAS) 的发展呈现 3 大趋势: 高能化、智能化和体系化^[3]. 无人机平台人机分离, 使得平台发展摆脱人的生理心理限制, 高能化成为高端无人机发展的重要方向. 高能化主要体现在平台的高隐身、超高速、超耐久、超机动, 以及微小平台的强能力; 武器的高动能、高聚能和高释能; 以及传感器的高分辨率和高度集成等. 智能化体现在无人机系统要具备更高的认知智能、群体智能和人机混合智能, 认知智能使得无人机系统具备环境感知、态势理解和意图推断能力; 群体智能使得无人机系统具备自组织、自演化能力; 人机混合智能使得无人机系统实现人机主从协同向人机对等协同转变. 体系化主要体现在作战运用从独立使用向有人 – 无人协同和跨域集群使用方向发展, 平台和体系结构由专用化、单一化向通用化、标准化、互操作方向发展.

对抗环境下无人 – 有人机协同有 3 种基本模式: 一是无人机配合有人机 (完全集中式); 二是有人机协助无人机 (有限集中分布式); 三是无人机与有人机双向互补互动 (无中心分布式). 美国 2013 年版《无人系统综合路线图》将无人 – 有人机编队作为未来无人机系统技术发展的重点方向之一^[15]. 路线图还明确了无人机与有人机协同编队的发展阶段 (图 2, 其中 MAV 指有人机, UAV 指无人机): (1) 载荷控制 (有人机遥控无人机上的载荷, 2014 年) → (2) 平台及载荷控制 (有人机制定基于导航点

图 2 (网络版彩图) 美国无人 – 有人机编队发展路线图

Figure 2 (Color online) The unmanned-manned teaming roadmap of USA

的任务计划, 无人机严格执行任务计划, 2016 年) → (3) 无人机作为僚机 (有人机指派目标或任务, 无人机自主完成目标或执行任务, 2020 年) → (4) 有人 – 无人编队侦察/攻击 (无人机与有人机具有对等地位, 2025 年) → (5) 无人机编队侦察/攻击 (无人机全自主作战, 2030 年后). 目前, 美国开展了大量第 1 和 2 阶段无人 – 有人机编队技术的演示验证, 技术趋近成熟; 同时, 将其重心转移到第 3 阶段的关键技术攻关, 预计在 2020 年初步形成无人 – 有人机协同作战能力, 并将研究重点进一步向人机智能协同聚焦^[26].

3 无人 – 有人机协同控制的技术体系

无人 – 有人机协同, 与现有有人机编队协同在指挥控制、协同策略、信息共享、态势理解、意外响应等方面有着显著不同, 如表 1 所示. 其中最大区别在于: 有人机编队协同是高智能体 (有经验的飞行员) 与高智能体之间的协同; 无人 – 有人机协同是低智能体与高智能体之间的协同, 本质上是机器的人工智能与人的自然智慧之间的协同.

无人 – 有人机协同面临的挑战来自两个方面, 一是“低智能”与“高智能”之间怎么实现协同, 即人机协同 (飞行员、无人机、有人机之间). 有人机飞行员之间可以良好地沟通, 而有人机与无人机之间交互方式、态势理解、决策判断不一样, 导致“高/低智能体”的沟通存在较大的困难. 二是战场对抗性导致意外事件频发多发, 实现机 – 机协同 (无人机、有人机平台/载荷、自主/辅助系统之间) 也面临巨大挑战. 掌握绝对制空权下的协同, 执行过程没有任何意外, 各种协同策略完全可以预先规划好, 实现协同不存在任何技术瓶颈. 但是无人 – 有人机协同作为一种全新的协同作战样式, 将其置身于对抗环境中使用时, 各种不确定性意外事件将导致预先计划的失效, 给无人 – 有人机协同带来新的挑战. 因此, 需要重点解决的问题前者可以归纳为“心往一处想”, 后者可以归纳为“劲往一处使”, 通过建立高效的协同控制策略, 提高无人 – 有人机协同系统的整体效能.

无人机与有人机协同作战的具体任务包括编队飞行与避碰、编队突防与避障、协同搜索与识别、

表 1 无人 – 有人机自主协同与有人机编队协同之间的差异

Table 1 The cooperation differences between manned aircraft team and unmanned-manned aircraft team		
Item	Cooperation of manned aircraft team	Autonomous cooperation of unmanned-manned aircraft team
Command and control	The pilot needs only control own aircraft	The pilot controls own aircraft while supervises multiple UAVs at the same time
Information sharing	Less information to share	More information links, higher bandwidth requirements
Situation understanding	The pilot understands situation, the computer makes aiding decision	Vehicles understand situation and make mission decision
Cooperation strategy	Relying mainly on preplan while ground command subsidiary	Preplan + real-time inter-vehicle coordination
Contingency response	Alternative plan (event handling guidelines)	Cooperative contingency response from both human and vehicles

协同跟踪与定位、协同占位与攻击以及意外事件的管理等。根据这些具体任务,考虑有人 – 无人协同的难点,梳理出对抗环境下无人 – 有人机协同作战对协同控制共性技术的需求,如图 3 所示。具体来说,人机协同主要包括:协同控制体系结构、人 – 机系统能力匹配、人 – 机协作态势感知与理解、意外响应与不确定性规划等需求;机 – 机协同除了意外响应与不确定性规划、协同控制体系结构,还包括协同行为自同步与自学习、信息传递与信息分发等共性需求。

3.1 人在回路上的自主协同控制体系结构

无人 – 有人机协同控制体系是实现对抗环境下无人 – 有人机高效协同的基础。需建立“人在回路上”的自主协同控制体系,满足开放式、互操作、低人机比、有限资源等需求,发挥无人机与有人机能力互补的优势,适应飞行员 – 有人机 – 无人机多种类型角色协同感知 – 判断 – 决策 – 控制的要求。

无人机自主系统、有人机辅助决策系统及飞行员都具有一定自主性,相互之间协调工作。可采用多智能体理论对其进行描述,建立基于多智能体的分层自主协同控制体系结构,发挥“飞行员 – 有人机 – 无人机”系统能力互补优势。该结构如图 4 所示,主要包括无人机端的自主协同控制系统和有人机端的人 – 机混合主动监督控制系统。无人机和有人机、多无人机之间通过协同控制实现协调一致的行动(机 – 机协同),飞行员和人 – 机混合主动协同控制系统通过人 – 机系统交互接口实现人机协同,实现对多架无人机的监督控制。在有人机端的人 – 机混合主动协同控制系统中,为每架无人机映射一组智能体(称为离机自主代理),它与无人机端的自主协同控制系统并行工作,互为备份。这组智能体分 3 层。第 1 层为平台交互智能代理层,代表离机自主代理与无人机平台交互,主要完成两者之间控制权限的自适应切换。第 2 层为群组协调智能代理层,负责实现多无人机任务协调控制功能。第 3 层为人 – 机交互智能代理层,负责离机自主代理与飞行员的交互,发挥飞行员智能与经验优势。

3.2 人 – 机系统能力匹配

无人 – 有人机协同系统是典型的人 – 机系统。受机载资源限制,有人机能用来指挥无人机的“人力”明显小于地面站指挥的,即有人机指挥无人机的人 – 机比小于地面站指挥的人 – 机比。对抗环境与低人机比,导致飞行员工作量急剧增加:过度依赖人,远超出人可承受范围;过度依赖自主系统,适应性差、可信度低。人 – 机系统能力匹配是解决这一问题的关键。

图 3 (网络版彩图) 无人-有人机协同控制技术体系

Figure 3 (Color online) The technological system of unmanned-manned aircraft system cooperative control

无人-有人机协同系统在执行任务过程中, 飞行员-有人机辅助系统-无人机自主系统是相互作用甚至相互制约的. 如图 5 所示, 自主系统具有一定的推理、学习和环境适应能力, 但是当环境变化超出其可承受范围时, 无人机会将超出的任务转移给有人机. 有人机辅助系统能够处理的, 自动化处理, 不能处理的通过人-机交互系统向飞行员告警, 飞行员决策和处理. 反过来, 飞行员也可以根据态势和工作量, 将部分任务转移给有人机辅助系统或无人机. 因此, 无人-有人机协同系统中功能是可动态迁移的. 但是, 这种迁移是有限度的, 需要考虑人-机系统能力匹配问题. 飞行员不可能将所有任务转移给机器, 需要考虑机器的负荷程度和智能水平; 同样, 无人机过度频繁地对飞行员告警将显著增加飞行员的工作量, 可能导致更多的操作失误. 目前飞行员对无人机的操控过于微观, 导致飞行员的负担过大. 2013 年, 美国国防部一份调查报告显示, 30% 的无人机飞行员厌倦工作, 17% 的达到临床心理学界定的焦虑症标准. 因此, 需要考虑飞行员的工作负荷, 将飞行员的工作量控制在可接受范围.

图 4 (网络版彩图) 基于能力互补的无人 – 有人机自主协同控制体系结构

Figure 4 (Color online) The capability complemented autonomous cooperative control framework of unmanned-manned aircraft systems

图 5 (网络版彩图) 人 – 机系统功能动态迁移

Figure 5 (Color online) The dynamical function transfer of unmanned-manned aircraft systems

当功能迁移超出任何一方的限度时, 就有必要降低整个协同系统的任务目标^[24].

为实现人 – 机系统能力匹配, 需解决飞行员 – 有人机辅助系统 – 无人机自主系统之间的可变权

图 6 (网络版彩图) 人—机系统协同目标感知过程

Figure 6 (Color online) The cooperative target perception process of unmanned-manned aircraft systems

限自主控制,使得控制的权限在飞行员、辅助系统、自主系统之间动态转移;根据测量的人因要素(手眼移动、脑电波等)评估飞行员生理/心理水平或注意力,判断是否存在辅助或自主系统无法完成的任务或者对飞行员风险过高的任务,在线协调飞行员—辅助系统—自主系统的功能分配;通过视觉、听觉或者触觉等多模态告警和提示,实现多模态的人—机自然交互与飞行员注意力控制;提供可理解的无人机系统自主行为,一定范围内的可行解、解的注释及建议,以及选择每个可行解的理由。

3.3 人—机协作的态势感知与理解一致性

人—机协作的态势感知与理解一致是无人—有人机系统在对抗环境下协同执行作战任务的前提和依据,是实现高层次自主能力的基础。战场环境复杂性、动态性和不确定性给人或自主系统独立感知带来极大挑战。自主系统感知精度高、范围广、个体差异小,但理解能力弱、环境适应性差;人综合感知能力强,环境适应性好,但精度低、个体差异大、易疲劳。需要通过人—机协作,实现对战场态势的一致性理解。

目前,态势感知被分为人的感知和机器的感知两部分,并且认为两者不存在交叉,忽略了人机协同感知的协作及传感器处理算法的研究。将人的感知结合无人机自主系统的精确和一致性,将极大提高系统的态势感知能力,如图 6 所示。人—机协作的感知可分为 4 个阶段: (1) 完全由人判读(无辅助条件下由人检测与识别目标) → (2) 计算机辅助的人判断(在自动识别算法帮助下识别目标,忽略虚假目标和标记漏检目标) → (3) 人帮助确认的机器判读(主要是取消虚假目标和标记漏检目标) → (4) 人预先给出特征描述的无人机自主判读。

目前主要集中在前两阶段,正在发展第 3 阶段。例如,美国大力开发的人—机交互计算机视觉处理技术,也称为“人本计算”,即用人的处理能力解决计算机所不能解决的问题。利用该技术,不但可以减少人的辨识负担,而且可降低人为丢失目标或事件而导致的漏警概率。

对抗环境下战场态势是复杂、不确定、快速演化的,通信条件是时变的,面向时域(活动)的理解存在很大挑战,必须引入战场态势的预测估计,才能实现对不确定战场态势的实时把握。通过态势感

知获得目标状态和属性, 态势与威胁估计, 建立战场作战活动、事件、时间、位置和兵力要素组织的一致化视图, 并将相关作战力量 (敌/我/友) 的部署、活动、作战意图及机动结合起来, 估计敌方的兵力结构、使用特点, 最终形成对抗性战场的综合态势图. 主要包括: (1) 生成当前态势要素集合; (2) 生成态势假设集合; (3) 形成最小不确定性态势假设, 生成当前态势; (4) 估计当前态势对目标的支持程度; (5) 预测下一周期出现的可能战场态势.

自主系统逐渐演变为与人并肩作战的全功能队友. 它与人的交互频率越来越高, 不仅提供决策支持信息, 还能与人交流对态势的理解, 甚至可以接受人的意见. 其中自主系统和人共享的战场态势视图是关键. 难点在于: 如何在有限情报资源和受限通信下, 进行自适应的人 – 机协作感知和分布式一致融合估计, 实现战场态势演化的预测和估计, 完成对友机或者敌方的意图预测和推理, 最后形成人和机器能够共享的统一战场态势.

3.4 按需即时信息传递与智能化信息分发

战场海量数据与通信受限和时变之间的矛盾, 导致态势信息实时共享日益困难. 对抗环境中, 通信资源紧张、带宽受限, 信息缺乏时, 各平台无法及时获取最急需信息; 获取手段多、维度大, 信息量呈几何数增长, 直接传递原始未处理信息, 会造成信息淹没; 同时, 受限于通信带宽、时延、拓扑变化等, 传递的信息也可能失效. 故而, 需将合适的信息在合适的时候传递给合适的使用者, 避免大量无关/无用信息对飞行员或自主系统造成的“信息淹没/迷茫”, 即需要按需即时的信息传递与智能化信息分发, 实现信息的供求平衡.

无人机传感数据的海量增长不但导致实时提取关键态势的日益困难, 也给机间数据链的通信带宽带来极大挑战. 目前, 高端无人机主要有可见光、红外探测器、合成孔径雷达/移动目标指示器等传感器, 性能不断提高, 如美国无人机最新配备的高清传感器可在 5000 m 高空看清地面手机品牌; “全球鹰”可提供 $7.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 范围内的光电/红外图像, 目标定位圆误差概率最小 20 m; 获得的图像通过卫星或微波接力通信, 以 50 Mbps 的速率实时传输到地面. 但是机间链带宽有限, 同时存在时延、干扰等非理想因素. 因此, 无人 – 有人机系统不可能随时获取全部的原始战场态势信息, 也不大可能接收原始侦察图像.

无人 – 有人机机间链网络如图 7 所示, 其挑战在于战场要素与任务关联性、态势信息挖掘与知识获取、态势信息传递决策机制和基于预测的智能化分发. 需要分析任务特点, 确定不同信息的通信需求. 例如, 话音传输时延不大于 0.5 s, 指控时延不大于 1 s, 协同搜索、跟踪、定位等信息时延为 10 ms 到 100 ms 级, 编队间协同攻击时延为 10 ms 到秒级. 建立战场要素与任务的关联性, 明确需要传递的战场态势要素最小集合和传输频率, 如协同探测主要传递目标信息和处理结果, 协同攻击主要传递制导和即时作战效能相关信息. 确定态势信息传递决策机制, 将原始传感数据处理成较高级别的信息, 如给拟发送的数据划分优先级, 进行目标或事件区域的提示或标定等. 基于当前数据链条件进行信息的智能化分发, 一是发布 – 订阅模式, 即谁提出信息需求就发给谁; 二是基于预测的分发模式, 由获取信息的飞机判断谁最需要该态势信息, 而后将信息发送给谁, 需要引入更高的决策机制.

3.5 对抗条件下意外事件响应与不确定性实时规划

意外事件响应是确保对抗环境下无人 – 有人机系统生存性和协同效能发挥的关键, 也是无人机系统自主性的重要表现^[27]. 对抗环境执行作战任务时, 不可避免地出现平台或载荷能力降级等各种意外. 它必须能够检测意外事件、评估其对任务的影响、决策和规划事件响应, 并快速精确地执行. 故而,

图 7 (网络版彩图) 无人 - 有人机间链网络

Figure 7 (Color online) The inner data link of unmanned-manned aircraft systems

图 8 (网络版彩图) 无人 - 有人机协同系统面临的典型意外事件

Figure 8 (Color online) The typical emergency events faced by unmanned-manned aircraft systems

意外事件更多更复杂与检测、评估、决策与规划的实时性之间的矛盾, 需要意外事件的实时响应和规划. 具体体现为意外事件检测、在线任务评估、在线协同决策和不确定规划.

意外事件检测是无人 - 有人机系统响应的前提^[28]. 典型意外事件可划分为 7 种, 如图 8 所示: 平台或任务载荷的能力降级 (被敌方武器击中或激光照射)、任务命令变更 (新的目标出现)、出现突发威胁 (预先未侦察到的地空导弹发射车)、机间通信链路中断 (由于敌方干扰)、支援保障条件变化 (失去预警机或卫星等情报支持等), 以及出现未预期的态势 (未建模和不可建模), 此外还包括突发的复杂

图 9 (网络版彩图) 多机协同行为自同步与自学习

Figure 9 (Color online) Self-synchronizing and self-learning of multi-platform cooperative behaviors

天气和气象等. 意外事件检测包含对平台、载荷 (传感器、武器、链路等) 健康状态的诊断、隔离和预测, 对复杂气象、突发威胁、机会目标的检测, 对计划变更的检测, 系统对编队期望偏差和变化趋势的检测等.

检测到各种意外事件以后, 无人 – 有人机系统需在线评估意外事件对任务效能的影响程度和对协同系统安全的威胁程度, 主要包括: 计划评估、能力评估、预测评估和编队评估. 无人 – 有人机系统需根据意外事件的类型、威胁程度、时间紧迫性以及处理复杂度等因素动态地决定: 哪些意外事件本机处理, 哪些需其他平台协助, 哪些需人的参与, 出现未建模的事件怎么办. 对于反应型意外, 要求响应时间短, 需要应急机动控制. 对于策略型意外, 需要多机协同决策, 实时评估系统能力, 采取谁有利谁行动的规则. 对于链路中断情况下, 一种方案就是按既定计划执行, 各机决策权限提升, 另一种就是返航. 对于未建模的意外, 需发挥人的决策能力.

为解决意外事件造成的态势不确定, 无人 – 有人机协同需具备不确定规划能力, 以适应环境、任务和态势的变化. 现有规划算法对确定态势具有很好的处理能力, 但是应对意外事件能力较差. 将规划算法分为最小功能“片元”, 并将其置于模块库中, 基于当前态势重组为一个具体的规划系统. 不确定规划需要考虑的因素有高层任务目标和约束、多机资源分配、不同任务目标的载荷配置等.

3.6 多平台协同行为自同步、自学习能力

多平台协同行为自同步和自学习能力是实现无人 – 有人机对抗环境高效协同作战的保障, 如图 9 所示. 战场对抗性和任务复杂多变对无人 – 有人机协同行为的一致性和智能性带来极大挑战, 包括: 建模不完整, 动力学耦合和欠驱动特性; 信息异步、异质、不一致; 通信时延、拓扑变化、噪声等; 策略集高维、量大且不完备. 故而, 为有效应对对抗环境和复杂多变任务, 无人 – 有人机协同行为需实现多机行为同步和自主能力进化.

协同行为主要包括协同飞行 (编队防撞)、突防 (规避威胁)、探测 (静止目标)、跟踪 (运动目标)、攻击 (高价值目标) 等. 挑战在于: 如何在强非线性动力学约束下实现无人 – 有人机的编队同步飞行与避碰; 如何实现异步异质信息的同步获取与一致性视图; 如何从实践中学习以提高系统的协同能力.

协同飞行是无人 – 有人机协同执行任务的基础. 它要求多机有相同运动速度, 相似运动轨迹, 且

在高速机动中实时避碰. 需研究多机实时速度自同步且避碰的控制方法, 即考虑非线性动力学在维数较低的“机动空间”中进行机动协调, 并建立“运动轨迹库”在线学习.

协同突防是尽可能利用地形遮蔽、雷达盲区等规划航线, 快速编队抵达预定位置. 当通信短时中断时, 无人机按计划飞行, 有人机和无人机间可采用姿态语言和空间关系等隐式通信静默协同, 直至通信恢复. 当防空严密时, 可能导致伤亡. 若无人机毁损, 评估毁损程度后继续任务或者自毁. 若有人机毁损, 重新指定长机与地面站建立联系, 由地面站接管控制权.

协同探测是综合利用雷达、光电等实现多传感器高精度的信息融合. 其精度取决于多机与目标的位置构型, 但是飞机和目标均处于运动状态, 如何在有限时间内实现对目标的最优协同探测, 需根据传感器感知能力、探测距离, 飞机运动能力和待探测目标的运动预估等, 设计优化的队形和路径规划, 实现多机协同行为的同步, 并从历史数据中学习以提高精度.

协同跟踪是指多机交替或同时持续跟踪地面固定/移动目标, 供后续态势推断或者协同打击使用. 协同跟踪需从已知固定障碍和威胁环境到动态障碍和威胁环境扩展到平台和目标不确定的环境; 从单机静止目标定位向多机机动目标跟踪发展. 需要考虑有人机、无人机的运动特性, 主动控制无人机获得期望的目标信息, 实现无人机、有人机行为的松散自同步.

协同攻击是无人-有人机抵达各自预定攻击位置, 统筹考虑武器、攻击位置和待攻击目标特性等, 对攻击目标发射武器. 无人-有人机协同攻击时, 如何实现在最佳的时间完成对目标的最有利攻击, 对系统的协调配合提出了挑战, 要求系统更关注无人-有人飞机之间的相对状态, 充分考虑飞机的动力学特性和武器载荷性能, 考虑协同行为的高度一致性.

4 下一步研究重点

目前国外在有人-无人机协同控制体系结构、人机协作与交互、协同感知与态势理解、协同决策规划与编队飞行等基础理论取得了大量研究成果. 国内研究正在奋起直追, 主要开展作战概念研究、技术需求分析、作战控制方案、作战样式等顶层概念研究和仿真验证, 协同控制, 特别是在对抗环境下的有人机和无人机协同控制基础理论与方法需要深入研究.

(1) 分布式体系架构. 需要研究建立面向无人-有人机协同的分布开放协同控制体系结构, 能够支撑有人机为主、无人机为主以及无人机和对等协同等多种使用模式, 能够兼容不同自主能力的无人机系统, 并进行对地任务、对空任务以及空地一体任务的演示验证, 以融入到有人作战系统. 进一步开展弱对抗、中等对抗、高对抗条件下的协同能力评估, 验证了协同体系结构的可用性和易用性.

(2) 人-机协作与交互. 需要加强多型无人机、有人机、任务控制站等节点人机功能动态分配、可变权限自主和低人机比条件下的人机混合主动监督控制; 建立无人系统的互操作体系, 支持空空、空地无人-有人机编队视频信息共享与载荷互操作.

(3) 协同感知、信息共享与态势理解. 加强无人-有人机协同态势感知与理解的机理研究, 掌握对抗条件下自动化的协同态势感知与一致性的态势理解方法, 实现融合离机数据的无人机大范围自主感知方法, 数据实时分发与态势共享, 并完成综合集成演练.

(4) 协同决策、协同规划与编队控制. 加强应对意外事件的协同决策机制和自主行为的实时规划方法研究, 提升对抗条件下紧密编队飞行的能力, 建立典型意外事件的决策处理机制, 实现机载协同航线实时重规划与战术目标的自动分配, 完成任务协同条件下编队飞行能力验证, 在最小监督下完成战术级目标.

5 结论

本文基于“观察 – 判断 – 决策 – 行动 (OODA)”任务回路, 针对内回路的多机自主协同, 外回路的人机智能协同, 系统梳理了无人 – 有人机协同控制技术体系, 包括人在回路上的自主协同控制体系结构、人 – 机系统能力匹配、人 – 机协作的态势感知与理解一致性、按需即时信息传递与智能化信息分发、对抗条件下意外事件响应与不确定实时规划、多平台协同行为的自同步与自学习能力等, 并从分布式体系架构, 人 – 机协作与交互, 协同感知、信息共享与态势理解, 协同决策、协同规划与编队控制等方面分析了下一步的研究重点。

参考文献

- 1 United States Air Force. RPA (Remotely Piloted Aircraft) Vector: Vision and Enabling Concepts 2013-2038. Report. 2014
- 2 Chen J, Xin B. Key scientific problems in the autonomous cooperation of manned-unmanned systems. *Sci Sin Inform*, 2018, 48: 1270–1274 [陈杰, 辛斌. 有人/无人系统自主协同的关键科学问题. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48: 1270–1274]
- 3 Shen L C, Niu Y F, Zhu H Y. Theories and Methods of Autonomous Cooperative Control for Multiple UAVs. 2 ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2018 [沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2018]
- 4 Mansur M H, Center A, Frye M, et al. Rapid prototyping and evaluation of control system designs for manned and unmanned applications. In: *Proceedings of the 56th Forum and Technology Display*, Virginia Beach, 2000
- 5 Levulis S J, Kim S Y, DeLucia P R. Effects of touch, voice, and multimodal input on multiple-UAV monitoring during simulated manned-unmanned teaming in a military helicopter. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2016. 60: 132
- 6 Lim Y X, Alessandro G, Roberto S, et al. Avionics human-machine interfaces and interactions for manned and unmanned aircraft. *J Intell Robot Syst*, 2018, 91: 755–774
- 7 Cummings M L, Guerlain S. Human performance issues in supervisory control of autonomous airborne vehicles. In: *Proceedings of AUVSI Unmanned Systems North America Conference*, 2004
- 8 Bertuccelli L F, Cummings M L. Operator choice modeling for collaborative UAV visual search tasks. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 2012, 42: 1088–1099
- 9 Schmitt F, Schulte A. Mixed-initiative mission planning using planning strategy models in military manned-unmanned teaming missions. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2015. 1391–1396
- 10 Bevacqua G, Cacace J. Mixed-initiative planning and execution for multiple drones in search and rescue missions. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 2015
- 11 North Atlantic Treaty Organisation. Supervisory Control of Multiple Uninhabited Systems- Methodologies and Enabling Human-Robot Interface Technologies. Report TR-HFM-170. 2012
- 12 United States Air Force. Autonomous Horizons—System Autonomy in the Air Force —A Path to the Future. Report AF/ST TR 15-01. 2015
- 13 Ruf C, Stütz P. Model-driven sensor operation assistance for a transport helicopter crew in manned-unmanned teaming missions: selecting the automation level by machine decision-making. In: *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems*. Berlin: Springer, 2017. 253–265
- 14 Yang J H, Kopolka M, Chung T H. Autonomy balancing in a manned-unmanned teaming (MUT) swarm attack. In: *Robot Intelligence Technology and Applications 2012*. Berlin: Springer, 2013. 208: 561–569
- 15 United States Department of Defense. Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2013-2038. Report 14-S-0553. 2013
- 16 United States Air Force. Small Unmanned Aircraft Systems (SUAS) Flight Plan: 2016-2036. Report. 2016
- 17 United States Air Force Research Laboratory. Cooperative Airspace Operations (CAO). Report WPAFB-08-0318. 2008

- 18 Lummus R. Mission battle management system fighter engagement manager concept. In: Proceedings of AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: the Next 100 Years, Dayton, 2003
- 19 Onken R, Schulte A. System-Ergonomic Design of Cognitive Automation: Dual-Mode Cognitive Design of Vehicle Guidance and Control Work Systems. Berlin: Springer, 2010
- 20 Serrano D. Key Initiatives for Interoperability through Standardization-Applicability to Small Unmanned Vehicles. NATO Report STO-EN-SCI-271. 2015
- 21 Gourley S R. Airborne manned/unmanned system technology. Army Mag, 2000, 50: 50
- 22 Wilkins D. Manned/unmanned common architecture program (MCAP): a review. In: Proceedings of the 22nd Digital Avionics Systems Conference, 2003. 1–7
- 23 U.S. Air Force. Lockheed Martin Demonstrate Manned/Unmanned Teaming. <https://news.lockheedmartin.com/2017-04-10-U-S-Air-Force-Lockheed-Martin-Demonstrate-Manned-Unmanned-Teaming>
- 24 DARPA Tactical Technology Office. Collaborative Operations in Denied Environment (CODE) Program. Report DARPA-BAA-14-33. 2014
- 25 Defense Science Board, United States Department of Defense. The Role of Autonomy in DoD Systems. Report. 2012
- 26 United States Department of Defense. Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2017-2042. Report. 2018
- 27 Wang Y C, Liu J G. Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems. Chin Sci Bull, 2012, 57: 1290–1299 [王越超, 刘金国. 无人系统的自主性评价方法. 科学通报, 2012, 57: 1290–1299]
- 28 Jameson S, Franke J, Szczerba R, et al. Collaborative autonomy for manned/unmanned teams. In: Proceedings of the American Helicopter Society 61th Annual Forum, Grapevine, 2005

Key scientific problems in cooperation control of unmanned-manned aircraft systems

Yifeng NIU*, Lincheng SHEN, Jie LI & Xiangke WANG

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

* Corresponding author. E-mail: niuyifeng@nudt.edu.cn

Abstract Cooperation of unmanned-manned aircraft systems can accelerate technology adaptability, enhance the combat capabilities in adversary conditions, achieve complementary advantages, and form new and efficient combat systems, which are important for guaranteeing arms control. The key to obtaining the “1 + 1 > 2” combat effectiveness is cooperative control, i.e., autonomous cooperation of unmanned and manned aircraft with the minimum supervision of a pilot. This study provides a survey of the development of unmanned-manned cooperation and a systematic review of the technology system based on the “Observation-Oriented-Decision-Action” (OODA) loop. Our study focuses on multi-aircraft autonomous cooperation in the loop and human-robot intelligent cooperation outside the loop. Finally, we summarize the research focus in the future.

Keywords manned-unmanned aircraft systems, cooperation control, autonomous cooperation, intelligent operation, distributed architecture

Yifeng NIU received his B.S. and Ph.D. degrees from National University of Defense Technology (NUDT), China, in 2001 and 2007, respectively. He was a visiting scholar at Department of Computer Science of Tuebingen University in Germany in 2012. He now is an Associate Professor of College of Intelligence Science and Technology in NUDT. His current research interests include autonomous control, cooperative control, and environmental perception and cognition.

Jie LI received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in control science and engineering from National University of Defense Technology (NUDT), Changsha, China, in 2006, 2008, and 2014, respectively. He has been a lecturer at the College of Intelligence Science and Technology in NUDT. His research interests include mission planning for unmanned aerial vehicles; cooperative decision, planning, and control for multiple agents; and UAV swarms.

Lincheng SHEN received his B.E., M.S., and Ph.D. degrees in automatic control from National University of Defense Technology (NUDT), China, in 1986, 1989, and 1994, respectively. In 1989, he joined Department of Automatic Control, NUDT, where he is currently a full Professor and serves as the Dean of the graduate school. His research interests include mission planning, autonomous and cooperative control for unmanned systems, biomimetic robotics, and intelligent control.

Xiangke WANG received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in control science and engineering from National University of Defense Technology (NUDT), Changsha, China, in 2004, 2006, and 2012, respectively. Since 2014, he has been an Associate Professor of College of Intelligence Science and Technology in NUDT. His current research interests include coordinated decision and control of multiple UAV systems, nonlinear control, and visual servo control.