



# 有人/无人机智能协同: 机遇与挑战

吕金虎<sup>1,2</sup>, 冉茂鹏<sup>1,2</sup>, 王成才<sup>1,3\*</sup>, 王小谟<sup>3</sup>

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 中关村实验室, 北京 100194;

3. 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院, 北京 100041

\* E-mail: ccwang@pku.edu.cn

收稿日期: 2022-10-06; 接受日期: 2023-08-02; 网络版发表日期: 2024-04-08

国家自然科学基金(批准号: 61873295, 61833016, 62141604)、中央高校基本科研业务费专项资金和北京市科技新星计划(编号: 20220484082)资助项目

**摘要** 随着无人机智能化水平的不断提升, 人工智能驱动的有人/无人机协同有望成为未来战争新的制高点, 其核心技术亟待突破. 本文综述了有人/无人机智能协同面临的主要机遇与挑战, 系统梳理了人工智能在有人/无人机协同体系结构、协同感知、协同决策、协同控制以及评价体系等关键领域的研究现状, 并重点介绍了深度学习可解释性、牵制协同控制、有限网络带宽协同控制的新进展. 最后, 总结了有人/无人机协同的主要发展趋势, 即智能化水平更高、复杂环境适应能力更强、博弈对抗能力更强、安全性更高等.

**关键词** 有人/无人机协同, 人工智能, 智能协同, 分布式协同作战

## 1 引言

传统作战模式下, 有人机飞行员在执行作战任务时往往面临巨大的风险. 为了实现隐身突防等战术任务, 有人机需要保持静默, 防止被敌方雷达提前发现. 相比于有人机, 无人机不用考虑人的安全等因素, 在执行作战任务时具有更大的灵活性. 目前无人机的主要控制方式是由地面控制站的操作人员进行控制, 一些无人机依然需要两个或两个以上的操作人员才能完成对无人机和无人机载荷的控制. 地面控制站远程控制无人机的模式难以满足无人机在复杂动态战场环境下

的作战需求<sup>[1]</sup>. 将无人机控制站从地面转移到空中作战平台是无人机发展的必然趋势.

利用有人机控制无人机, 实现对无人机的就近实时指挥, 根据动态战场态势发布无人机控制指令, 可以有效增强态势感知能力, 提高作战系统的攻击能力和生存能力. 为抢占有人/无人机协同技术的制高点, 世界主要军事强国均大力开展相关研究. 如美国空军于2015年正式启动“忠诚僚机”项目, 该项目开发的能与有人机协同执行任务的先进无人机“XQ-58A女武神”于2019年3月首飞, 并于2023年5月发展成为F-35的电子战平台<sup>[1]</sup>; 美国海军MQ-25“黄貂鱼”(Stingray)无人

1) Marine XQ-58 Valkyries will be Electronic Warfare Platforms for F-35s, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/marine-xq-58-valkyries-will-be-electronic-warfare-platforms-for-f-35>, 2023-07-05

引用格式: 吕金虎, 冉茂鹏, 王成才, 等. 有人/无人机智能协同: 机遇与挑战. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 968-978  
Lv J H, Ran M P, Wang C C, et al. Manned/unmanned aerial vehicle intelligent cooperation: Opportunities and challenges (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 968-978, doi: 10.1360/SST-2022-0318

机可为舰载有人战斗机空中加油, 该无人机于2019年9月首飞, 并于2021年6月完成首次空中加油试验<sup>2)</sup>; 欧洲“神经元”(Neuron)无人战斗机于2012年11月试飞成功, 该无人机可在与“阵风”等有人战斗机协同作战过程中承担攻击、侦查、监视等任务<sup>3)</sup>。

有人/无人机协同作战要求无人机具备较高的认知智能、群体智能和人机混合智能, 其中认知智能使得无人机具有态势感知和意图理解能力, 群体智能使得无人机具有多机协同能力, 人机混合智能使得无人机具有与有人机对等的协同地位<sup>[2]</sup>。国务院出台的《新一代人工智能发展规划》中总结了新一代人工智能关键共性技术体系, 包含了群体智能关键技术、混合增强智能新架构与新技术以及自主无人系统的智能技术等。该规划同时强调了混合增强智能新架构与新技术的重点是突破人机协同的感知与执行一体化模型等与人机协同相关的技术。随着计算机技术的发展, 深度学习和强化学习等智能方法的出现将人工智能技术推向了新的高潮, 人工智能在智能机器人、图像处理、自然语言处理及语音识别等领域都取得了突破性进展<sup>[3,4]</sup>。将人工智能的最新成果向无人机系统进行转化, 为人机协同赋能, 是提高有人/无人机协同智能水平的关键。

当前, 有人/无人机智能协同面临的机遇主要包括以下三方面。

(1) 智能算法机遇: 深度学习、强化学习等人工智能算法的快速发展将极大地提升无人机自学习、自进化的能力, 进而提高有人/无人机协同的智能化水平。

(2) 高性能计算硬件机遇: 现代高性能计算硬件(GPU, FPGA, ASIC等)使得无人机可以拥有足够的计算能力实现复杂的人工智能算法, 从而提高有人/无人机协同的自主性和实时性。

(3) 人机交互技术机遇: 人机交互技术的不断发展, 如虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、脑机接口等, 可以显著提升有人/无人机协同的效率和准确性。

有人/无人机智能协同在迎接机遇的同时, 也面临着一些重要的挑战, 主要包括以下方面。

(1) 安全性和可靠性挑战: 有人/无人机智能协同需要保证在各种环境和条件下的安全性和可靠性, 例

如, 如何在通信中断或无人机故障的情况下保证任务的完成, 如何确保人工智能算法做出安全的决策等。

(2) 决策实时性挑战: 实时决策依赖强大的硬件和高效的算法, 如何在高动态、强对抗、资源受限的战场环境下实现有人/无人机实时协同决策是一个重要挑战。

(3) 交互复杂性挑战: 有人/无人机智能协同需要处理的交互极为复杂, 涉及大量异构不确定信息, 同时人机认知与行为模型也具有高度的复杂性。

根据上述机遇和挑战, 本文基于观察-判断-决策-行动(observe-orient-decide-act, OODA)循环理论总结了有人/无人机智能协同的五项关键技术: 协同体系、协同感知、协同控制、协同决策和协同效能评价(图1)。其中, 协同感知包括信息获取、信息融合和特征提取等技术; 协同决策包括人机交互、态势判读与理解一致性、人机协同规划、意外事件处理等技术; 协同控制包括编队控制、避障控制、协同跟踪控制等技术; 协同效能评价包括无人机自主能力评价、协同作战效能评价等。本文围绕这些关键技术, 综述国内外的研究成果, 介绍人工智能技术在这些领域的应用, 并在此基础上总结有人/无人机协同技术的主要发展趋势。

## 2 有人/无人机智能协同关键技术

### 2.1 智能协同体系

有人/无人机协同作战体系结构复杂, 具有体系内部节点多、平台异构、认知能力不对等等特点。建立高效的协同作战体系是充分发挥有人/无人机平台优势能力互补, 提高作战效能的关键。20世纪90年代, 美国国防部在自动化指挥系统(command, control, communication, computer, intelligence, surveillance and reconnaissance, C4ISR)的基础上发展了新的体系结构框架DoDAF (department of defense architectural framework)。经过30年的革新, DoDAF已经形成了完善的体系框架结构标准, 围绕DoDAF的体系结构框架设计方法处于领先地位。国内有人/无人机协同体系结构主要参考DoDAF, 并在此基础上进行修改、完善和扩充。

2) <https://www.boeing.com/defense/mq25/>, 2023-07-05

3) <https://www.dassault-aviation.com/en/defense/neuron/introduction/>, 2023-07-05

文献[5]基于DoDAF建立了有人/无人机协同空空打击任务背景下的体系结构模型, 包括构建综合字典、高级作战概念图、组织关系图、资源流图、作战活动模型、事件跟踪描述、作战状态转换描述等7部分. 以作战活动模型为例, 该模型以任务流图的形式描述了作战流程和各作战节点的职责(图2): 总指挥控制中心制定作战计划; 无人机地面指挥站进行无人机离线任务规划; 无人机和有人机巡航至作战区域后由有人机控制无人机进行协同探测和攻击.

基于DoDAF的体系设计方法主要用于整体作战体系设计, 考虑了包括指挥中心在内的众多作战节点以及体系结构的不同方面, 属于作战系统的顶层设计.

除此之外, 有人/无人机编队体系, 即具体的有人机和无人机间的协同方式, 也是有人/无人机协同体系的研究重点. 根据无人机的自主程度, 可以将有人/无人机编队体系分为: 完全集中式(无人机配合有人机)、有限集中分布式(有人机协助无人机进行决策)和无中心分布式(无人机可自主决策, 有人机与无人机对等互补).

文献[6]介绍了一种基于双模(dual-mode)认知自动化的有人/无人机协同体系(图3). 在该体系中, 有人机与无人机间通过机载人工认知单元(artificial cognitive units, ACUs)实现协同. 按照功能划分, 机载认知单元包括两部分: 操作认知单元(operating cognitive

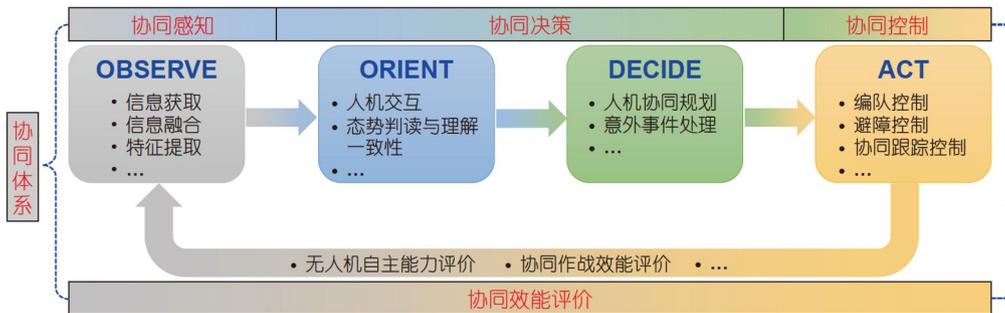


图 1 (网络版彩图)有人/无人机智能协同关键技术

Figure 1 (Color online) Key technologies of manned/unmanned aerial vehicle intelligent cooperation.

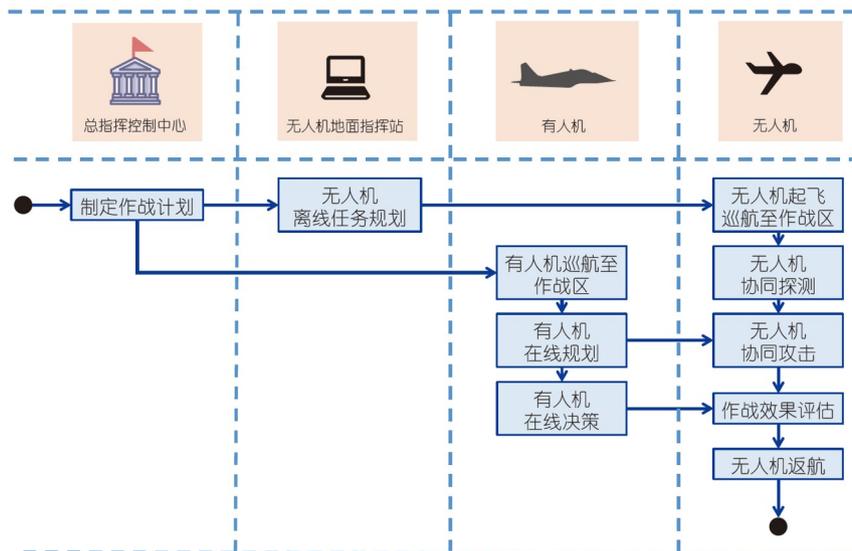


图 2 (网络版彩图)基于DoDAF的有人/无人机协同作战活动模型<sup>[5]</sup>

Figure 2 (Color online) DoDAF-based manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat activity model [5].

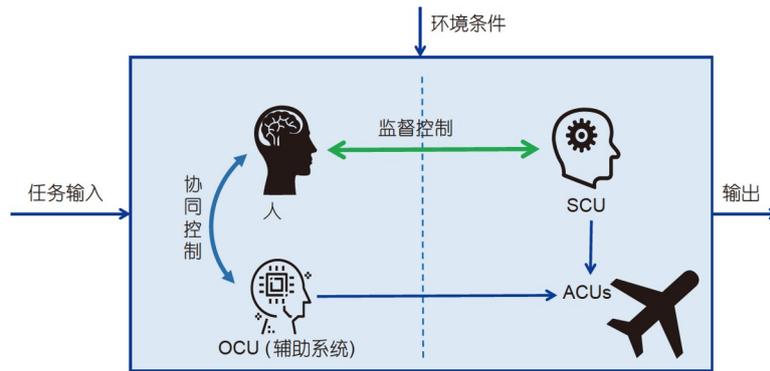


图 3 (网络版彩图)人工认知单元<sup>[6]</sup>

Figure 3 (Color online) Artificial cognitive unit [6].

unit, OCU)和支持认知单元(supporting cognitive unit, SCU). 其中, OCU也被称为辅助系统, 在协同过程中 OCU与飞行员之间合作进行决策; SCU相当于无人机端的自主协同控制系统, 负责完成飞行员和OCU分配给无人机的子任务. 在该体系结构下, 双模式指的就是OCU与SCU两种协同模式的混合.

文献[7]设计了一种基于态势感知的智能体决策模型, 并应用于有人/无人机协同体系构建. 如图4所示, 在该体系中, 人类被分为飞行员和指挥员两种角色. 飞行员负责有人机的导航、通信等系统管理; 指挥员负责有人机与无人机群的任务规划. 相应地, 智能体包括面向飞行员的辅助系统管理部分和面向指挥员的混合主动规划部分, 分别帮助飞行员和指挥员进行系统

管理和任务规划. 在执行任务时, 智能体的自主水平会根据飞行员和指挥员的工作负荷在低自主和高自主间进行自适应调节. 同时, 文献[7]提出了感知(perception)、理解(comprehension)和预测(projection)的智能体决策信息三级划分, 据此设计了人机交互界面.

未来, 需要结合人工智能的最新研究成果进一步推进有人/无人机协同体系建设, 其主要挑战在于如何最大化利用有人机和无人机各自的优势提高任务执行效率. 另外, 协同体系应具备灵活性和可扩展性, 以适应不同任务需求和系统组成.

## 2.2 智能协同感知

协同感知是有人机和无人机在利用各自平台获得战场信息的基础上, 通过协同机制进行信息交换、信息融合和特征提取的过程. 有人机和无人机在感知方面各有优势, 无人机可以携带更多的高精度传感器且个体差异较小, 通过多无人机协同感知可以拓宽传感器的探测范围, 但是无人机智能程度相对较低, 理解能力差; 有人机的综合感知能力好、环境适应能力强、理解能力强, 但是个体间差异较大, 飞行员状态对感知的影响较大. 有人机和无人机间的协同能够实现二者在感知方面的优势互补, 更好地理解战场态势.

协同感知可以分为信息获取、信息融合和特征提取三部分. 信息获取是协同感知的第一步, 是指通过传感器等模块获得战场信息. 按照信息的平台分类, 可以将信息来源分为: 无人机上的可见光传感器、红外传感器、激光雷达, 有人机上的机载雷达、飞行员视觉, 来自指挥中心的信息等. 信息融合是将多源信息进行

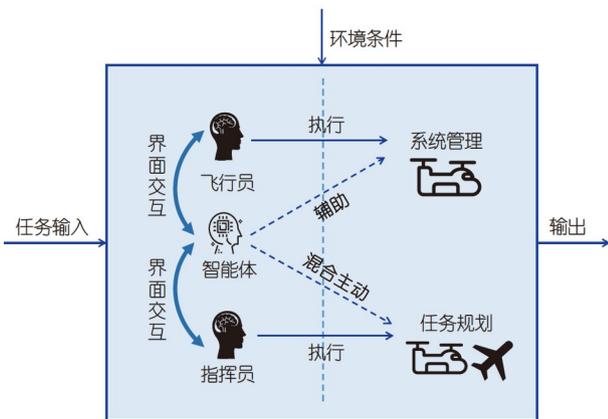


图 4 (网络版彩图)基于智能体决策模型的有人/无人机协同体系<sup>[7]</sup>

Figure 4 (Color online) Manned/unmanned aerial vehicle collaborative system based on agent decision model [7].

融合, 得到一致的战场态势信息的过程. 特征提取是从现有数据中得到所需信息的过程. 在一次感知过程中, 可能会存在多次信息融合和特征提取过程, 针对不同的情况, 二者的顺序也可以进行调整. 信息融合和特征提取的过程一般可归纳为包括数据层融合、特征层融合和决策层融合的三层融合模型<sup>[8]</sup>. 在有人/无人机协同感知方面, 数据层融合对数据传输的速率和带宽要求较高, 适合单机平台的不同传感器间的信息融合模式; 特征层融合适合有人机和无人机机载平台间的信息融合; 决策层融合对无人机的智能程度要求较高, 主要在考虑飞行员在内的有人/无人机协同体系中应用.

信息获取的一个重要问题是感知资源的调度. 在战场复杂实时动态环境下, 如何利用有限的感知资源对多目标进行探测和跟踪, 就是感知资源的调度问题. 资源调度问题本质上是一个多约束条件下的任务分配问题, 智能分配算法和智能调度算法均可应用于感知资源的调度问题. 文献<sup>[9]</sup>从信息增益的角度研究了传感器布置对时空协同三维视觉感知的影响.

信息融合也被称为数据融合. 信息融合的算法可以分为大致三类: 估计方法、推理方法和智能方法. 其中, 估计方法包括最小二乘法、加权平均数法、卡尔曼滤波法、最大似然估计法等; 推理方法包括贝叶斯推理、D-S证据推理、支持向量机等; 智能方法包括神经网络、遗传算法、模糊逻辑法和知识系统法等. 文献<sup>[10]</sup>总结了机器学习在车辆协同感知上的应用, 并重点阐述了卷积神经网络(CNN)在激光雷达数据融合中的重要作用. 文献<sup>[11]</sup>基于概率神经网络PNN和D-S证据推理方法研究了一种飞机图像目标多特征信息融合识别方法. 文献<sup>[12]</sup>从硬件实现的角度研究了多传感器的数据融合, 设计了一种模拟-数字混合的数据融合硬件平台. 上述智能融合算法适用于数据和特征层面的融合, 决策层面的融合需要无人机具有决策能力, 并且飞行员和无人机间需要构建理解机制和融合机制, 即需要有人机和无人机间具有混合主动能力. 决策层的融合是未来的重要发展方向.

特征提取是一个十分广泛的概念, 特征提取的具体应用包括图像特征提取、声学特征提取、文本特征提取等. 在有人/无人机协同领域, 针对信息融合和特征提取的三个不同层面, 特征提取技术的需求有不同的特点. 针对特征层和决策层的数据融合, 需要对获

得的信息进行初步的特征提取, 包括从雷达图像中识别跟踪敌方目标、对飞行员的语音动作进行识别、利用激光雷达构造点云地图等. 针对数据层面的融合, 则需要对融合后的数据进行进一步特征提取, 包括对融合后的图像进行目标识别和跟踪等.

随着人工智能技术的蓬勃发展, 特征提取的智能方法发挥着越来越重要的作用, 其中CNN和循环神经网络(RNN)等深度学习特征提取方法展示出了强大的能力<sup>[13,14]</sup>. 针对有人/无人机协同场景, 如何利用人工智能方法提高特征提取的速度、准确性和鲁棒性是主要挑战. 为此, 应重点关注人工智能方法的可解释性和泛化性, 以有效适应有人/无人机协同感知对高可靠性、强泛化能力的要求. 针对这一问题, 本团队基于因果关系和模型解耦, 构建了可信学习方法, 有效提升了模型的可解释性和性能. 考虑如下双线性模型:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{A}, \mathbf{x}} G(\mathbf{A}, \mathbf{x}) = \|\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_1 + R(\mathbf{A}), \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ , 它可以用  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{M \times N}$  和  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  表征;  $R(\cdot)$  代表正则项, 通常采用  $\ell_1$  或  $\ell_2$  范数. 为了避免过拟合, 双线性模型都会有一个变量含有稀疏性约束, 如  $\ell_1$  范数约束. 在双线性模型(1)中, 优化目标是关于  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{x}$  的函数, 且  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{x}$  间存在耦合. 如果采用随机梯度下降等经典优化方法, 忽略变量耦合, 计算梯度时将  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{x}$  视为独立的变量, 模型的训练会受到负面影响, 具体表现为当  $\mathbf{x}$  稀疏时,  $\mathbf{A}$  的梯度将会消失. 通过构建基于协同梯度下降算法的可信学习实现过程, 明确了模型优化过程的因果关系, 提升了模型的可解释性, 并在CNN训练以及模型压缩任务中验证了该方法的有效性和适用性<sup>[15,16]</sup>. 未来, 将应用该方法解决有人/无人机智能协同感知中的具体问题, 并重点关注方法的可解释性.

### 2.3 智能协同决策

有人/无人机协同决策的关键挑战在于如何有效处理人机交互过程的复杂性, 并确保决策的安全性、可靠性和实时性. 应对这一挑战需要综合应用人工智能算法、高性能计算硬件和人机交互技术的前沿成果. 就目前的技术而言, 有人机与无人机在智能程度上仍相差甚远, 要实现有人机与无人机间的智能协同决策需要重点突破以下四项技术.

### (1) 智能人机交互技术

人机交互是人工智能的新兴热点技术,是有人机与无人机协同决策的先导。有人机与无人机通过智能的人机交互技术实现信息的双向顺畅传递。先进智能的人机交互技术不仅能辅助有人机系统高效地指挥控制无人机,减轻驾驶员负担,减少操作失误,还能将无人机系统收集或推理得到的信息以简洁高效的形式告知有人机系统,提高其协同效能。

针对有人/无人机间的协同,现有的智能人机交互技术主要有:基于视觉的显示控制技术、语音交互技术、手势识别技术以及凝视跟踪技术等。

基于视觉的显示控制技术包括基于全息屏幕显示的动态可配置界面以及增强现实(augmented reality, AR)显示技术。全息屏幕显示技术融合激光技术和全息方法,在夜航微光条件和白天强光照射下均有良好清晰的显示效果。基于全息屏幕显示的动态可配置界面支持飞行员根据自身使用习惯和作战需求通过手指触摸的方式,在相应区域动态调整各种信息的显示方式、显示顺序、窗口的尺寸大小以及显示信息的增减。目前绝大部分第五代战机以及部分第四代战机已经采用了该项技术。AR显示技术是一种利用计算机产生的附加信息对用户所看到的真实世界景象进行增强或扩张的技术,它能够将真实环境与虚拟数据融合,具有实时交互性,能够使驾驶员对信息的感知和认知能力得到很大程度的增强。

语音交互技术包括语音识别、自然语言处理、多轮对话管理以及语音合成等。它可以在不占用驾驶员双手的前提下为其提供与飞机系统交互的方式。通过驾驶员向无人机发送语音任务指令以及无人机以语音形式将信息反馈给有人机系统的方式,显著提高人机交互效率。

手势识别技术是一种新型智能的人机自然交互控制技术,目前主要包括基于可穿戴传感器的手势识别以及基于视觉的手势识别这两种实现方式。基于可穿戴传感器的方法依赖于高科技装备且对材料有一定限制,而基于视觉的方法则随着计算机视觉的发展逐渐成为主流。在这种智能的交互方式下,驾驶员可通过自身手势动作对无人机或有人机系统进行指挥和回应,从而使驾驶员与飞机的交互变得更为简洁、自然、快速,在对抗条件下其优势将更为突出。

凝视跟踪技术旨在没有物理接触的情况下实现人

机交互,其精度和速度因不受物理条件的限制而得以达到更高层级。随着实时图像处理、凝视指向定点选择等技术的突破,凝视跟踪技术有望应用到实际的有人/无人机协同中。

近年来,上述人机协作与交互技术逐渐受到研究者的重视<sup>[17,18]</sup>。整体来看,国内人机协作与交互相关的研究仍出于起步阶段,理论不深,应用未广,未来仍有极大的探索空间。

### (2) 智能人机协作态势判读与理解一致性技术

人机都能理解的共享战场态势图是协同决策的前提,有人机系统综合判读能力强、环境适应性好,但精度低、个体差异大、易疲劳,无人机系统判读精度高、个体差异小,但理解能力弱,环境适应性差<sup>[2]</sup>,实现两者感知的结合以及理解的一致性并非易事。人机协作态势感知的4个阶段如图5所示。

在有人/无人机协同态势判读与理解一致性方面,目前并无完善的理论与框架,只有部分学者对此进行了探索式的研究,如文献<sup>[19]</sup>研究了在粒计算视角下无人机集群的协同感知一致性以及基于态势感知一致性的无人机分布式协同性能。当前,进一步提高无人机的智能程度,从而更好地实现有人/无人机的协同态势判读与理解一致性十分紧迫。

### (3) 智能人机协同规划技术

有人/无人机协同规划主要包括有人/无人机协同任务分配和航迹规划,其实现方式根据有人/无人机的体系结构而略有不同,以人在回路上的自主协同体系为例,飞行员、有人机辅助决策系统以及无人机自主系统都有一定的自主性,其一般结构与工作原理如图6所示。其中,平台交互智能代理层主要负责与无人机自主系统的交互,自适应地调整两者控制权限;群组协调智能代理层完成多无人机的任务协调规划;人机交互智能代理层负责与飞行员的交互。

近年来,深度学习、强化学习等人工智能技术在人机协同规划领域得到了广泛关注<sup>[20,21]</sup>。可以预见,未来人工智能与无人机协同规划将更加密不可分,有人/无人机协同效能也将因人工智能技术的发展得到极大的提高。

### (4) 智能意外事件处理技术

有人/无人机的协同决策需要具备对意外事件进行处理的能力。由于战场环境复杂多变,各种不确定意外事件频出,预先计划可能失效,从而导致有人/无人

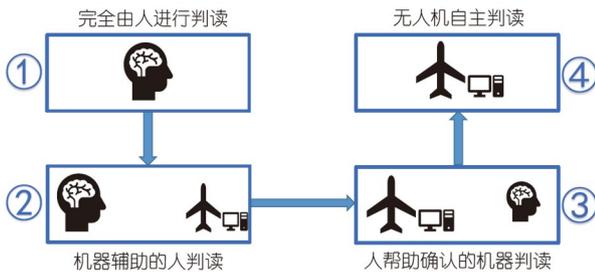


图 5 (网络版彩图)人机协作态势判读四个阶段  
 Figure 5 (Color online) Four stages of human-machine cooperation situation interpretation.

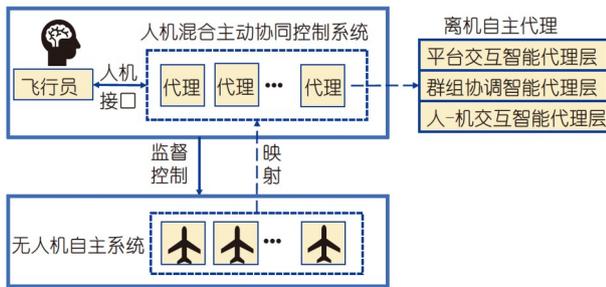


图 6 (网络版彩图)人机协同规划一般工作原理  
 Figure 6 (Color online) General working principle of human-machine collaborative planning.

机的协同效能急剧下降甚至威胁其生存. 典型的意外事件及其处理机制如图7所示.

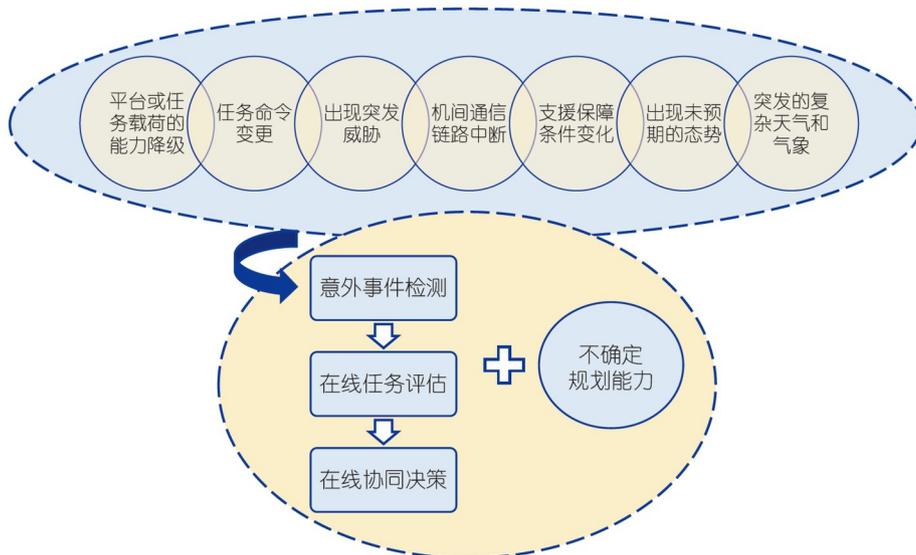


图 7 (网络版彩图)典型意外事件及其处理机制  
 Figure 7 (Color online) Typical unexpected events and their handling mechanisms.

目前, 针对有人/无人机协同中意外事件的处理研究非常欠缺, 但在实际应用中却普遍存在并且对作战性能影响巨大. 由于其机理复杂, 传统方法难以对其进行有效分析和处理, 未来由人工智能协助的智能意外事件处理技术必将成为新的研究热点.

### 2.4 智能协同控制

有人/无人机智能协同控制是实现有人/无人机协同必不可少且至关重要的环节, 主要包括智能编队控制、避障避碰控制以及协同跟踪控制等. 由于其在有人/无人机协同中的重要地位, 早在20世纪英美等军事强国便进行了相关研究和探索, 包括机载有人/无人系统技术(AMUST)项目、“AMUST 6.2 effort”项目、“AMUST-Baseline”项目、波音公司有人/无人机协同飞行研究项目、英国QinetiQ公司有人/无人机飞行试验项目、美国“珀尔迪克斯”项目等. 其中, “AMUST”项目主要研究有人/无人机协同编队作战所需的平台以及控制策略; 英国QinetiQ公司的项目主要研究无人机自主能力对有人/无人机协同编队作战能力的影响; 美国“珀尔迪克斯”项目则已经实现有人驾驶的战斗机在空中投放上百架微型无人机并能像蜂群一样在空中形成集群队形.

与此同时, 国内外学者针对有人/无人机智能编队控制也开展了一定的研究, 如文献[22]基于异质鸽群

一致性方法, 提出了用于有人/无人机编队飞行的控制算法. 需要指出的是, 目前专门针对有人/无人机协同控制的研究较少, 但由于其属于集群协同控制的范畴, 相关的理论和方法都可在其上扩展应用. 在集群协同控制中, 如何在复杂动态环境和有限资源条件下实现高效协同控制是一个重要挑战. 这里涉及两个关键问题: 一是牵制协同控制, 即在集群中优先控制哪些重要节点, 也称为“抓牛鼻子”<sup>[23]</sup>; 二是有限网络带宽协同控制, 即如何在有限带宽条件下实现集群高效协同控制<sup>[24]</sup>. 本团队在集群系统牵制协同控制、有限网络带宽协同控制等领域取得了系列研究成果, 可为有人/无人机智能协同控制提供重要参考.

### (1) 牵制协同控制

牵制协同受启发于生物集群运动机制, 即如何通过控制少部分关键节点实现对整个集群系统的有效控制. 考虑一个含 $N$ 个个体的集群系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f(t, x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma x_j + u_i, & i = 1, 2, \dots, l, \\ \dot{x}_i = f(t, x_i) + c \sum_{j=1}^N a_{ij} \Gamma x_j + u_i, & i = l+1, l+2, \dots, N, \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $x_i \in \mathbb{R}^n$  和  $u_i \in \mathbb{R}^n$  分别为个体 $i$ 的状态和控制输入,  $f(t, x_i) : \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  为连续可微非线性函数,  $c > 0$  为个体间耦合强度,  $\Gamma \in \mathbb{R}^{n \times n}$  为内部耦合矩阵,  $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{N \times N}$  为集群系统个体间邻接矩阵,  $l$  为牵制节点数. 文献<sup>[25]</sup>揭示了复杂动态集群系统的牵制节点数与拓扑结构、耦合强度、控制增益之间的定量关系, 并给出了几类自适应牵制同步规则. 文献<sup>[26]</sup>阐明了一类典型复杂集群系统同步机理, 并给出了易于验证的牵制协同判别准则和牵制节点选择方法. 文献<sup>[23]</sup>分别给出了强连通网络、有向生成树网络、弱连通网络、有向森林网络等4类网络结构下的牵制协同控制算法. 文献<sup>[27]</sup>设计了复杂集群系统脉冲控制算法, 并验证了算法鲁棒性.

### (2) 有限网络带宽协同控制

集群系统协同的效果一般由网络通信性能和协同控制策略共同决定, 在有人/无人机协同作战等实际应用中, 各个个体之间在单位时间内只能交换有限的信息. 因此, 在设计集群系统协同控制策略时, 应充分考虑网络带宽的限制, 并有必要对通信协议和控制策略

进行联合设计. 本团队针对这一集群系统协同控制中的基础性重要问题展开了深入研究<sup>[28,29]</sup>. 具体地, 考虑如下不确定非线性集群系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_{im} = f_{im}(x_{i1}, \dots, x_{im}) + x_{i,m+1}, & 1 \leq m \leq r-1, \\ \dot{x}_{ir} = f_{ir}(x_i, z_i, \omega_i) + u_i, \\ \dot{z}_i = f_{i0}(x_i, z_i, \omega_i), \\ y_i = x_{i1}, & 1 \leq i \leq N, \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ir}]^T \in \mathbb{R}^r$  和  $z_i \in \mathbb{R}^{n_i-r}$  分别为个体 $i$ 和其零动态的状态,  $n_i$  和  $r$  分别为个体 $i$ 的维数和相对阶,  $y_i \in \mathbb{R}$  为测量输出,  $u_i \in \mathbb{R}$  为控制输入,  $\omega_i \in \mathbb{R}^{n_{\omega_i}}$  为外部扰动,  $f_{i0}(x_i, z_i, \omega_i) : \mathbb{R}^r \times \mathbb{R}^{n_i-r} \times \mathbb{R}^{n_{\omega_i}} \rightarrow \mathbb{R}^{n_i-r}$ ,  $f_{im}(x_{i1}, \dots, x_{im}) : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $1 \leq m \leq r-1$ ,  $f_{ir}(x_i, z_i, \omega_i) : \mathbb{R}^r \times \mathbb{R}^{n_i-r} \times \mathbb{R}^{n_{\omega_i}} \rightarrow \mathbb{R}$  均为未知连续可微非线性函数. 针对有限网络带宽下高阶、输出反馈、含模型不确定性和外部干扰的复杂集群系统(3)协同控制问题, 本团队提出了一种基于动态量化和扰动补偿机制的通信协议与控制策略联合设计方法, 实现了一个比特带宽下的协同. 本团队工作解决了复杂不确定集群系统实现协同所需的最小网络带宽难题, 推动了复杂集群系统通信协议与控制策略联合设计的理论研究, 可为战场通信受限环境下有人/无人机智能协同控制提供一定设计依据.

## 2.5 协同评价体系

有人/无人机协同评价体系主要包括两部分内容: 一是无人机自主能力评价标准; 二是综合考虑各项因素后对有人/无人机整体协同效能的评价体系.

对于无人机自主能力评价, 国外早在20世纪90年代就开始了关于无人机自主能力等级划分的研究, 例如文献<sup>[30]</sup>从人机交互的角度分析了无人机自主能力等级的划分问题. 根据美国无人机系统路线图, 美国空军实验室将无人机自主控制分为了10个等级. 国内学术界也对此展开了丰富研究, 例如文献<sup>[31]</sup>提出了适于中国无人机技术发展的9级无人机自主控制等级.

有人/无人机整体协同效能的评估是协同作战领域的热点问题, 关系着实际协同作战效果, 合适的评价体系将推动有人/无人协同系统快速发展. 文献<sup>[32]</sup>提出了一种依赖专家经验的基于信息熵的有人/无人机协同作战效能评估方法. 文献<sup>[33]</sup>提出了一种综合分

析有人/无人机协同空战系统构成要素以及影响因素的评价模型建立方法。上述方法一般难以高效、直观地对协同效能进行评价或受主观因素影响较大。

未来, 人工智能技术将以不断增长的决策判断能力为有人/无人机协同效能评价体系的构建提供新的思路。在此过程中, 需要考虑的重难点问题包括以下方面。

(1) 动态性与复杂性: 协同任务往往具有很高的动态性与复杂性, 评价体系需要能够有效处理这种复杂性, 并适应动态任务与环境。

(2) 多层次评价指标: 评价体系需要包括多个层次的评价指标, 如任务层、决策层和操作层等, 如何整合这些不同层次的指标是一个需要解决的问题。

(3) 人机交互效果量化: 人机交互在协同任务中占据重要地位, 但如何量化其效果, 并将其纳入效能评价体系, 尚未形成统一评价方法。

### 3 有人/无人机智能协同发展趋势

有人/无人机智能协同是一个迅速发展的领域, 未来, 有人/无人机智能协同将朝着智能化水平更高、复杂环境适应性更强、博弈对抗能力更强、安全性更高的方向发展。

(1) 智能化水平更高。基于传统方法的有人/无人机协同往往建立在人的宏观调控和集中指挥下, 依赖人的决策处理能力, 这在高度对抗、瞬息万变的战场环境中很难取得较好的协同效果。为实现真正的有人/无人机智能协同, 在现代战争中抢占制高点, 必须大力发展人工智能技术, 并将其新的研究成果有广度又不乏深度地应用到具体的有人/无人机协同问题中。例如, 进一步厘清有人/无人机智能协同机理、建立统一且智能的有人/无人机协同效能评价体系等。

(2) 复杂环境适应性更强。有人/无人机协同执行作战任务时, 战场环境具有高度复杂、高动态、多约束等显著特点。有人/无人机系统需要实现高度复杂环境下信息高效交流、信息感知与理解一致; 高度动态环境下发挥各自优势实现能力互补、有效处理突发意外事件; 多约束环境下快速响应、做出优化决策等。近年来, 人工智能技术在处理上述问题时较传统方法展现出了明显的优势。可以预见, 人工智能技术的深入发展将进一步增强有人/无人机系统在复杂环境中的适应能力。

(3) 博弈对抗能力更强。有人/无人机协同体系的对抗将成为未来战争的重要形式。我国在博弈情景下的有人/无人机协同研究成果尚不充分, 难以有效应对未来高度智能和强对抗的空战形式。因此, 依托人工智能在博弈对抗上的最新进展迭代更新我国有人/无人机协同技术非常必要。

(4) 安全性更高。有人/无人机协同执行任务的一个重要目的就是提高系统安全程度, 减少人员伤亡。在有人/无人机协同研究中, 不仅要关注最终任务执行效果, 还应重点考虑有人机的安全性。目前, 针对有人/无人机协同中有人机安全性的专门研究较为欠缺, 主要原因在于其机理复杂, 传统方法难以有效分析和处理。未来, 由人工智能协助的有人机安全保障技术必将成为新的研究热点。

### 4 总结

本文围绕有人/无人机协同体系结构、协同感知、协同决策、协同控制以及评价体系等五项关键技术, 系统地梳理了人工智能技术在五项关键技术上的发展现状, 并指出了有人/无人机智能协同面临的主要挑战和发展机遇。

### 参考文献

- 1 Lim Y, Gardi A, Sabatini R, et al. Avionics human-machine interfaces and interactions for manned and unmanned aircraft. *Prog Aerosp Sci*, 2018, 102: 1-46
- 2 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 [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]
- 3 Gil Y, Greaves M, Hendler J, et al. Amplify scientific discovery with artificial intelligence. *Science*, 2014, 346: 171-172
- 4 Haque A, Arnold M, Li F F. Illuminating the dark spaces of healthcare with ambient intelligence. *Nature*, 2020, 585: 193-202
- 5 Wang X Y, Cao Y F, Sun H J, et al. Modeling for cooperative combat system architecture of manned/unmanned aerial vehicle based on DoDAF

- (in Chinese). *J Syst Eng Electron*, 2020, 42: 2265–2274 [王新尧, 曹云峰, 孙厚俊, 等. 基于DoDAF的有人/无人机协同作战体系结构建模. 系统工程与电子技术, 2020, 42: 2265–2274]
- 6 Gangl S, Lettl B, Schulte A. Single-seat cockpit-based management of multiple UCAVs using on-board cognitive agents for coordination in manned-unmanned fighter missions. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 115–124
  - 7 Roth G, Schulte A, Schmitt F, et al. Transparency for a workload-adaptive cognitive agent in a manned-unmanned teaming application. *IEEE Trans Hum-Mach Syst*, 2020, 50: 225–233
  - 8 Hall D L, Llinas J. An introduction to multisensor data fusion. *Proc IEEE*, 1997, 85: 6–23
  - 9 An Q, Wang Y, Shen Y. Sensor deployment for visual 3D perception: A perspective of information gains. *IEEE Sens J*, 2021, 21: 8464–8478
  - 10 Yang Q, Fu S, Wang H, et al. Machine-learning-enabled cooperative perception for connected autonomous vehicles: Challenges and opportunities. *IEEE Network*, 2021, 35: 96–101
  - 11 Li X D, Yang W D, Dezert J. An airplane image target's multi-feature fusion recognition method (in Chinese). *Acta Automat Sin*, 2012, 38: 1298–1307 [李新德, 杨伟东, Dezert J. 一种飞机图像目标多特征信息融合识别方法. 自动化学报, 2012, 38: 1298–1307]
  - 12 Rehman S, Khan M F, Kim H D, et al. Analog-digital hybrid computing with SnS<sub>2</sub> memtransistor for low-powered sensor fusion. *Nat Commun*, 2022, 13: 1–8
  - 13 Chakraborty B, She X, Mukhopadhyay S. A fully spiking hybrid neural network for energy-efficient object detection. *IEEE Trans Image Process*, 2021, 30: 9014–9029
  - 14 Mou L, Ghamisi P, Zhu X X. Deep recurrent neural networks for hyperspectral image classification. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2017, 55: 3639–3655
  - 15 Zhuo L, Zhang B, Yang L et al. Cogradient descent for bilinear optimization. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Seattle, WA, 2020. 7956–7964
  - 16 Zhang B C, Bao Y X, Wang R Q, et al. A kind of dependable learning method based on cogradient descent (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2024, 54: 257–264 [张宝昌, 鲍宇翔, 王润琪, 等. 基于协同梯度下降的可信学习方法. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 257–264]
  - 17 Li T, Liu J, Zhang W, et al. UAV-human: A large benchmark for human behavior understanding with unmanned aerial vehicles. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Virtual: Springer, 2021. 16266–16275
  - 18 Mencarini E, Rapp A, Tirabeni L, Zancanaro M. Designing Wearable systems for sports: A review of trends and opportunities in human-computer interaction. *IEEE Trans Hum-Mach Syst*, 2019, 49: 314–325
  - 19 Gao Y, Li D S. UAV swarm distributed cooperative performance analysis based on situation awareness consensus (in Chinese). *J Astronaut*, 2018, 39: 1148–1156 [高杨, 李东生. 基于态势感知一致性的UAV集群分布式协同性能分析. 宇航学报, 2018, 39: 1148–1156]
  - 20 Yan Y, Wang H, Chen X. Collaborative path planning based on MAXQ hierarchical reinforcement learning for manned/unmanned aerial vehicles. In: *Proceedings of the 39th Chinese Control Conference (CCC)*. Shenyang, 2020. 4837–4832
  - 21 Wang C, Wu L, Yan C, et al. Coactive design of explainable agent-based task planning and deep reinforcement learning for human-UAVs teamwork. *Chin J Aeronaut*, 2020, 33: 2930–2945
  - 22 Huo M, Duan H, Ding X. Manned aircraft and unmanned aerial vehicle heterogeneous formation flight control via heterogeneous pigeon flock consistency. *Unmanned Syst*, 2021, 9: 227–236
  - 23 Yu W, Chen G, Lü J, et al. Synchronization via pinning control on general complex networks. *SIAM J Control Optim*, 2013, 51: 1395–1416
  - 24 Li T, Fu M, Xie L, Zhang J F. Distributed consensus with limited communication data rate. *IEEE Trans Automat Contr*, 2011, 56: 279–292
  - 25 Zhou J, Lu J A, Lü J. Pinning adaptive synchronization of a general complex dynamical network. *Automatica*, 2008, 44: 996–1003
  - 26 Yu W, Chen G, Lü J. On pinning synchronization of complex dynamical networks. *Automatica*, 2009, 45: 429–435
  - 27 Sun W, Lü J, Chen S, et al. Pinning impulsive control algorithms for complex network. *Chaos*, 2014, 24: 013141
  - 28 Ran M, Xie L. Distributed output feedback consensus of uncertain nonlinear multi-agent systems with limited data rate. In: *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference (CCC)*. Guangzhou, 2019. 5733–5739
  - 29 Ran M, Xie L. Practical output consensus of nonlinear heterogeneous multi-agent systems with limited data rate. *Automatica*, 2021, 129: 109624
  - 30 Parasuraman R, Sheridan T B, Wickens C D. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 2000, 30: 286–297
  - 31 Chen Z J, Wei J Z, Wang Y X, et al. UAV autonomous control levels and system structure (in Chinese). *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 2011, 32:

1075–1083 [陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究. 航空学报, 2011, 32: 1075–1083]

32 Fan J, Li D, Li R. Evaluation of MAV/UAV collaborative combat capability based on network structure. *Int J Aerosp Eng*, 2018, 2018: 1–12

33 Wu Y, Lu Q H, Quan J, et al. A method for evaluating manned/unmanned aerial vehicle combat cooperative capability. In: Proceedings of the 2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). Edinburgh, 2019. 130–135

## Manned/unmanned aerial vehicle intelligent cooperation: Opportunities and challenges

LV JinHu<sup>1,2</sup>, RAN MaoPeng<sup>1,2</sup>, WANG ChengCai<sup>1,3</sup> & WANG XiaoMo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup> Zhongguancun Laboratory, Beijing 100194, China;

<sup>3</sup> China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

With the improvement of unmanned aerial vehicle (UAV) intelligence, artificial intelligence (AI) driven manned/unmanned aerial vehicle (MAV/UAV) cooperation is expected to become a new commanding height in the future war, and its core technology needs to be broken through. This paper summarizes the main opportunities and challenges faced by MAV/UAV cooperation, and systematically sorts out the research status of AI in MAV/UAV cooperation architecture, cooperative perception, cooperative decision-making, cooperative control, and evaluation system. The new progress of deep learning interpretability, pinning control, and limited network bandwidth cooperative control are also introduced. Finally, the main development directions MAV/UAV cooperation are summarized, that is, higher intelligence level, stronger adaptability to complex environments, stronger game confrontation ability, and higher safety.

**MAV/UAV cooperation, artificial intelligence, intelligent cooperation, distributed cooperative combat**

doi: [10.1360/SST-2022-0318](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0318)