

异构无人系统协同控制研究进展¹

郭兴¹⁾, 李擎^{1,2)}✉, 姚其家^{1,2)}, 鲁小雅¹⁾

1) 北京科技大学自动化学院, 北京 100083 2) 工业过程知识自动化教育部重点实验室, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn

摘要 面对复杂化、多样化和立体化的任务需求, 异构无人系统将空、地、海跨域优势互补, 最大化提升系统各方面能力, 为未来协同作战和智慧民生提供有力的技术保障。首先, 本文梳理了国内外在跨域协同领域出台的推动性文件, 介绍了异构无人系统在军用、科研院所和民用等三方面的实际应用; 其次, 本文仅针对异构无人系统关键技术之一的协同控制, 分别阐述了异构无人系统协同控制在一致性、轨迹跟踪、编队-合围和不同通信条件等四方面的最新进展。其中, 由于一致性和轨迹跟踪存在上层控制理论性和下层控制可行性的区别, 进一步从滑模控制、自适应控制、反步控制和自适应动态规划等四方面对轨迹跟踪研究展开阐述; 然后, 为了更好地促进异构无人系统协同控制在实际中的应用, 通过总结前人相关工作, 讨论了其在多约束控制与实时性、多任务切换控制和跨域通信下稳定性等三方面亟需解决的技术瓶颈。最后, 综合异构无人系统协同控制研究现状和实际需求来看, 指出了其在深度强化学习和分布式博弈、人机交互和反群体智能等三方面的发展趋势。

关键词 异构无人系统; 协同控制; 跨域协同; 任务需求; 技术瓶颈

分类号 V249.1

Research progress for cooperative control of heterogeneous unmanned systems

GUO Xing¹⁾, LI Qing^{1,2)}✉, YAO Qi-jia^{1,2)}, LU Xiao-ya¹⁾

1) School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes (Ministry of Education), Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn

ABSTRACT In recent years, the development of artificial intelligence and control theory has endowed unmanned systems with remarkable capabilities, such as autonomy, self-learning, and scalability. These advancements are steering unmanned systems towards more distributed and collaborative operational modes. However, the requirements for complex, diverse and stereoscopic missions pose great challenges to unmanned systems. To address such issues, the cross-domain benefits across air, land, and maritime environments of heterogeneous unmanned systems (HUS) offer effective solutions. The cross-domain collaboration of HUS not only amplifies capabilities of a single system, but also furnishes a technological foundation for future cooperative operations and smart living scenarios. Firstly, this paper provides a comprehensive review of the promotional literature on cross-domain collaboration from both domestic and international perspectives. At the same time, the practical engineering applications of HUS in military, scientific research, and civilian fields are introduced. Currently, technological progress has been notably spurred by military powers, particularly the United States, the United Kingdom, and France. Although China's development is in a nascent exploratory phase, it has made significant strides in

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62273033, 12302043)

theoretical and technological research. Secondly, the research for cross-domain collaboration of HUS involves sophisticated theoretical frameworks and interdisciplinary integration. This paper elaborates on the latest research progress for collaborative control of HUS from four aspects: consensus, trajectory tracking, formation-containment, and diverse communication scenarios. Specifically, considering the difference between the theoretical nature of upper level control and the feasibility of lower level control in terms of consensus and trajectory tracking, further research progress on trajectory tracking methods is divided into four aspects: sliding mode control, adaptive control, backstepping control, and adaptive dynamic programming. Each control method has its unique merits, limitations, and applicable scenarios. Thirdly, despite rich research results in the cooperative control of HUS, numerous challenges remain in dealing with unknown and complex environments. This paper summarizes previous relevant work and underscores the technical challenges across three aspects: the conflict between multiple constraints and real-time task performance, the multi-task switching control problem, and the control stability problem under cross-domain communication. Concrete examples are cited to elucidate the difficulties of collaborative control for HUS. Finally, according to the current research status and practical needs of collaborative control of HUS, the future development directions will focus on three aspects: deep reinforcement learning and distributed games, human-machine interaction, and anti-swarm intelligence. In summary, the broad applicability and strategic importance of collaborative control of HUS have attracted the attention of leading military powers, solidifying its status as a pivotal area of technological innovation.

KEY WORDS heterogenous unmanned systems; cooperative control; cross-domain cooperation; task requirements; technical bottlenecks

近年来,随着人工智能和控制理论不断发展,无人系统以其自主性、自学习性和可扩展性等优势正朝着分布式和协同化等模式发展^[1-3]。其中,无人系统分为同构无人系统和异构无人系统。前者是由多个完全一样的单无人平台构成,而后者是由多个参数或性能不同的同种或异种无人平台构成。很显然,异构无人系统相比同构无人系统具备更高效的执行力,并且能承担更高危、复杂和重复的任务^[4-7]。例如,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)凭借机动性强和视野广的优势,与具备较高承载能力和续航能力的地面无人车(Unmanned Ground Vehicle, UGV)、无人艇(Unmanned Ship Vehicle, USV)和水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)协同合作,为复杂环境下的立体化任务执行提供了创新的解决方案。随着异构无人系统的深入研究和自主能力的不断提高,异构无人系统不仅在护卫运输、监视侦察和目标打击等军事领域被广泛应用^[4],而且在搜救任务、灾情监测和地质勘探等民用领域也被大量应用^[5]。通过多 UAV 编队协同侦察,快速引导 UGV 或 USV 形成特定编队或者到达安全区域^[5];利用 UGV、USV 和 UUV 承载力强的特点,为 UAV 提供安全着陆、充电和检修等服务^[6];异构多 UGV 编队行驶可有效缩短跟车间距和提升交通系统通行效率^[7]。

国外一些军事强国一直是联合作战、跨域以及多域等作战概念研究与实践的倡导者。2004年12月,俄军总参谋部颁布《俄军统一信息空间构想》,其中的内容包含了跨域协同作战的思想^[8]。2012年,美军酝酿并颁布《联合作战介入概念》,提出了跨域协同的作战概念^[9]。2017年,美国国防高级研究计划局(DARPA)提出“马赛克战”概念,强调将低成本传感器、多域指挥与控制节点以及相互协作的有/无人系统等多系统灵活组合,实现非对称作战^[10]。2018年8月,美国国防部公开了自2001年首发以来的第八版《无人系统综合路线图(2017-2042)》,旨在发展 UAV、UGV 和 USV 以适应联合作战需求,聚焦全域作战而非特种作战,并强调了异构无人系统中互操作性、自主性、安全网络和人机协作等四个方面的问题、挑战、机遇和重点发展的关键技术^[11]。如图1所示。2020年6月,北约指挥控制卓越中心发布了多域作战指挥控制演示平台白皮书,旨在优化对多域作战环境中的复杂威胁和挑战的响应能力,以实现指挥控制的高效性和适应性^[12]。2021年3月,美国海军部发布了《美国海军部无人作战框架》,针对无人系统概念与优势、发展现状与阶段和实现方法与手段三个方面大力建设包括 UAV、UGV、USV 和 UUV 在内的无人作战系统,旨

在实现无缝集成的有人-无人部队^[13]，2021年5月以色列基于作战需求视角，率先运用“多域作战”概念于加沙战场。而相比于国外，我国对于异构无人系统跨域协同的提出和推动起步较晚。2019年4月，中国工程院院士陈杰发表了《多智能体系统中的几个问题》报告，针对多无人系统协同控制提出了指挥无序、任务复杂性、故障频发和控制不力等四个挑战，并且凝炼成智能指挥与决策、分布式协同控制、故障监测和诊断和共享控制等四个科学问题，亟需各学科交叉融合以及各领域专家的通力合作^[1]。2021年11月，中国电子技术标准化研究院联合国内27家单位发布了《智能无人集群系统发展白皮书》，针对包括跨域协同在内的关键技术制定了一系列标准。

综上，基于异构无人系统的空、地、海跨域协同能够最大化提升系统各方面能力，为未来协同作战和智慧民生提供有力的技术保障。目前，这一领域已成为全球研究的热点，并受到各大军事强国的重视，被列为其核心的科技发展重点。

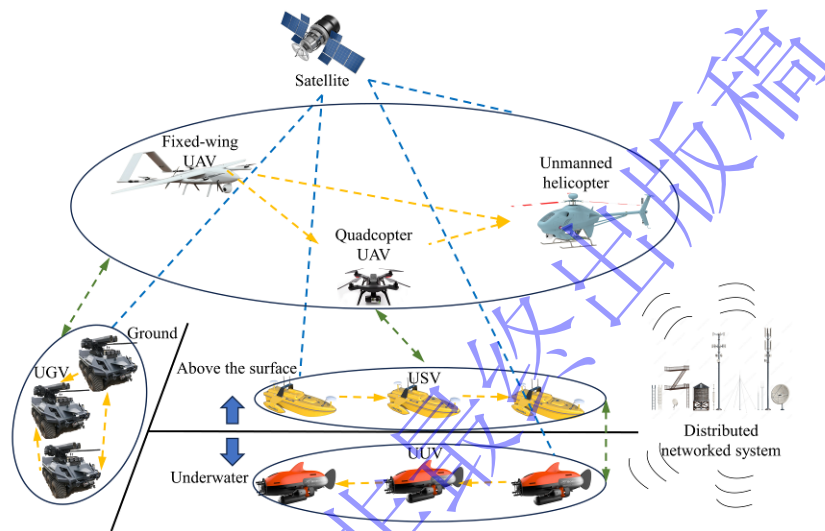


图1 异构无人系统作战概念图

Fig.1 Concept diagram of heterogeneous unmanned system operations

1 异构无人系统应用现状

近年来，由UGV、UAV、USV和UUV组成的异构无人系统的技术进步得益于以美、英、法为主的国家在军事领域的积极推动。这些国家直接针对具体的应用任务进行跨域协同的验证，实现了具有高度针对性和可视化的成果。尽管国内在异构无人系统跨域协同方面仍处于探索阶段，但在理论研究和攻关上已取得突破性进展，并且正在积极推进成果转化和实践应用。本节借助几个知名的跨域协同应用阐述跨域协同在作战方面带来的实用效能，如表1所示。

同时，高校等科研院所在异构无人系统跨域协同方面也取得了一系列进展，如图2所示。2015年，罗马大学Lorenzo Rosa团队构建了多UGVs和搭载摄像头的UAV异构无人系统，多UGVs利用UAV提供的环境信息执行指定任务^[14]。2018年，新加坡南洋理工大学K.Harikumar团队利用UAV空中视野为传感器失灵的UGV进行路径规划，辅助UGV实现户外环境下避障任务^[15]。2019年，北京航空航天大学董希旺团队搭建了室内UAV/UGV异构无人系统平台，实现了多UAVs在单个UGV上起飞、领航、降落和充电的全过程^[16]。2022年11月，华中科技大学张海涛团队实现异构UAV/USV系统的协同控制。2023年8月，西北工业大学李学龙团队提出了异构智能体协同控制算法框架，实现了无人机集群、机械臂、机器狗的自主协作。

异构无人系统跨域协同不仅在军用和高校等科研院所上获得突破性的进展，在民用领域也实现了初步实践应用，如图3所示。自2012年开始，Amazon不断优化Kiva仓储系统，利用机器人和UAV实现智能物流管理^[17]。2018年，由云州、百度、比亚迪、零度智控和高巨创新等企业联合开发的由UAV、UGV和USV组成的异构无人系统在世界最长的跨海大桥—港珠澳大桥亮相，实

现了协同编队和自动防撞^[2]。2020年，长江干流开展冬季执法大练兵首次执法巡航，无人机从游艇上起飞并在空中巡查污染源，但此次无人机是与游艇的合作，尚未实现自主^[2]。同年，在建的京雄高速部分路段首次使用由摊铺机和压路机组成的异构无人系统完成了高速公路的摊铺及压实^[18]。

表 1 国内外异构无人系统跨域协同应用

Organization	Time	Content	Type and number of platforms
Space and Naval Warfare Systems Command	2005	Surveillance and countermeasures against "intruders" through the control center using the cross-domain collaboration of air, ground, and maritime	One UAV, three UGVs, and one control center
Northrop Grumman	2016	Developing a new cross-domain heterogeneous unmanned systems cooperative operations control framework	One UUV, two USVs, and one helicopter
Qinetiq Group plc	2016	Development of the ACER system for command and control of UAVs, USVs, and UUVs	Variable UAVs, USVs, and UUVs
	2017	Development of the autonomous command and control of UAVs, USVs, and UUVs.	Five UUVs, two USVs, and one UAV
Direction des Constructions Navales Services	2017	Alleged operation of three unmanned systems to detect, identify, intercept, and destroy the enemy in a coordinated manner using the I4*Drones mission system	One UAV, two USVs, and one UUV
Sustainable Hub to Engage into Rural Policies with Actors	2013-2015	Rescue of missing persons in the Alps and of those buried after the avalanche catastrophe is accomplished using real air and ground equipment in a coordinated manner	One fixed-wing UAV, one unmanned helicopter, one quadrotor UAV, and one UGV
OCEAN2020 Unmanned Maritime Systems for Enhanced Situational Awareness and Decision Support	2017	Data and information collected from systems deployed in the theatre of operations using real air, sea and ground equipment and manned equipment	Four UAVs, three USVs, two UUVs, naval forces, five satellites, four national maritime operations centers, and two ground communication networks
Department of Equipment Development of the Central Military Commission	2018 and 2021	Organization of the "Over the Hurdles" challenge to achieve air-ground unmanned system cluster reconnaissance strikes	Three UAVs and three UGVs
Shenyang Institute of Automation and Public Security Bureau of Liaoning Province	2021	Demonstration of the application of air-ground cross-domain coordination for "on-site security of large-scale mass events"	Four UAVs, four UUVs, and command and control module
People's Liberation Army Navy Equipment Department	2022	Unmanned platform stereoscopic cross-domain collaboration virtual challenge	Virtual unmanned platform

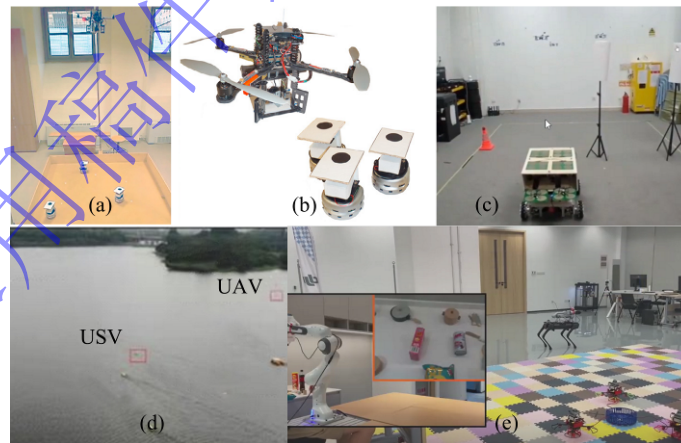


图 2 在科研院所异构无人系统的工程应用. (a) 罗马大学团队; (b) 新加坡南洋理工大学团队; (c) 北京航空航天大学团队; (d) 华中科技大学团队; (e) 西北工业大学团队

Fig.2 Engineering application of heterogeneous unmanned systems in research institutes: (a) Sapienza University of Rome; (b) Nanyang Technological University; (c) Beihang University; (d) Huazhong University of Science and Technology; (e) Northwestern Polytechnical University

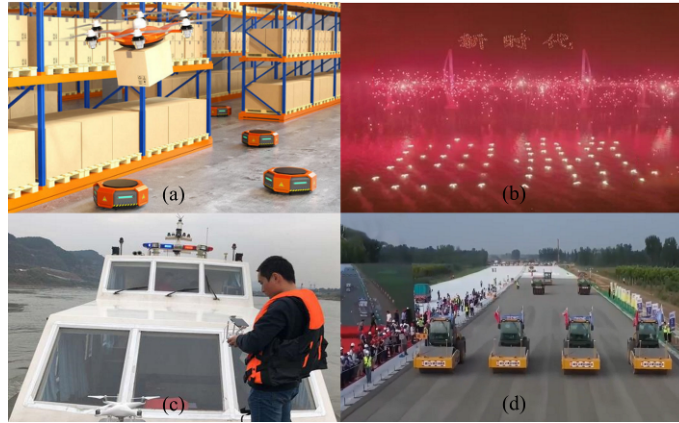


图3 在民用领域异构无人系统的初步实践应用。(a) Kiva 仓储系统; (b) 跨海大桥表演; (c) 执法巡航; (d) 高速公路铺路

Fig.3 Preliminary practical application of heterogeneous unmanned systems in the civilian field: (a) Kiva warehousing system; (b) Cross-sea bridge show; (c) Law enforcement cruise; (d) Expressway paving

2 异构无人系统协同控制研究现状

由于异构无人系统通常工作在复杂且未知的环境中，其研究涉及系统结构、任务分配、环境感知、定位导航、路径规划、通信技术以及协同控制等复杂理论和多学科交叉融合，本文仅针对异构无人系统的关键技术之一的协同控制，从控制理论和控制工程出发，阐述协同控制在一致性、轨迹跟踪、编队-合围以及不同通信条件等四方面的研究现状。

2.1 异构无人系统一致性研究

一致性问题作为多智能体系统(Multi-agent System, MAS)协同领域的一个基础问题，对异构无人系统协同有极其重要的理论意义和应用价值。在该领域中一致性问题是指利用各智能体的局部信息设计控制算法使所有智能体的状态最终收敛至相同的状态。一致性问题始于1960年管理科学与统计学领域的研究，由DeGroot^[19]首次提出一致性问题的概念。之后，Benediktsson^[20]于1992年首次将一致性思想应用于多传感器信息融合领域，拉开了一致性问题在系统理论研究的序幕。自2003年开始，Jadbabaie^[21]、Olfati-Saber^[22]和Ren^[23]针对MAS的一致性分别提出了严格稳定性证明、系统性理论框架和有向生成树概念。至此，MAS一致性逐渐成为研究热点。

目前，关于MAS一致性研究根据不同的标准有不同的分类方法^[24]，例如：一致性控制问题根据收敛速度可以分为渐进一致性、有限时间一致性、固定时间一致性和预设时间一致性等；根据最终系统状态是否一致可以分为平均一致性和分组一致性等；根据有无领导者可以分为无领导一致性和领导者跟随一致性等。由于同构无人系统的一致性研究已经拥有丰富的成果，这里暂且不对其展开阐述，仅对异构无人系统的一致性研究进行分析。在许多实际应用中，由于单个智能体之间的状态定义和模型维度不同，很难使用在同构MAS的状态一致性研究中惯用的Kronecker积来设计适用于所有成员的控制律。因此，大多研究采取输出一致控制使异构无人系统达成一致性^[25-43]。

对于具有单一领导者的异构无人系统，目标在于控制每个跟随者和领导者的输出轨迹同步，该类一致性问题被称为跟踪问题，如图4(a)所示。目前，主要有三种方法解决异构无人系统的输出一致性问题：第一种方法^[25-29]是为每个跟随者设计分布式观测器来估计领导者状态，通过输出调节方程设计局部输出控制律；第二种方法^[30-33]是定义每个跟随者及其邻居的相对输出信息，并以此为基础设计分布式输出控制律；第三种方法^[34-37]是仅通过网络通信获得智能体之间相对输出信息，设计控制律解决非内省异构无人系统(智能体无法获得自身的状态或输出信息)的输出调节问题。

对于具有多领导者的异构无人系统，目的在于控制每个跟随者进入到多领导者形成的凸包内，该类一致性问题被称为包含问题^[38-43]，如图4(b)所示。Hamed Haghshenas等^[38]较早地引入动态补

偿器和输出调节方法解决异构 MAS 包含问题。Zuo 等^[39]采用基于自适应调节律的输出调节器，来解决具有多个未知领导者的异构 MAS 包含问题。Qin 等^[40]推导出异构 MAS 实现输出包含的必要条件，通过等效转换方法和最优控制律实现了系统的包含控制。Hajar Atrianfar 等^[41]通过引入跟随邻域误差将包含控制问题转化为输出调节问题，解决了具有结构不确定性和外部扰动的异构 MAS 的鲁棒控制问题。Luka Martinovic 等^[42]提出了一种基于观测器的分布式协议来解决外部扰动下线性 MAS 的输出包含问题。Majid Mazouchi 等^[43]针对完全异构 MAS，基于虚拟外部系统为每个跟随者设计观测器和控制律实现输出包含控制。总体来说，考虑输出一致性解决包含控制问题的研究并不多，仍然需要进一步探索。

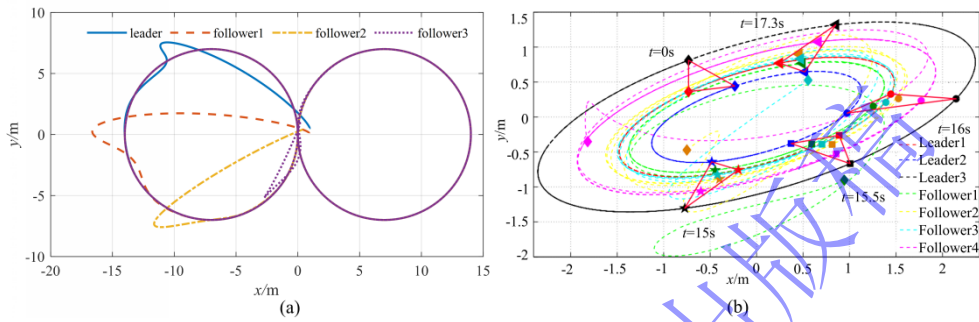


图 4 异构 MAS 输出调节一致性. (a) 具有单一领导者的系统(跟踪问题); (b) 具有多领导者的系统(编队问题)^[39]

Fig.4 Output regulation of heterogeneous MAS: (a) Single-leader system (tracking problem); (b) Multi-leader system (containment problem)^[39]

2.2 异构无人系统轨迹跟踪研究

轨迹跟踪问题是异构无人系统协同控制的关键问题之一，要求系统中各个成员能从任意初始状态跟踪期望轨迹。虽然上节一致性方法(针对具有单一领导者的异构无人系统)也可以解决异构无人系统轨迹跟踪问题，但是受限于理想智能体模型，难以全面捕捉实际物理系统特性，例如，UAV 不仅同时具有外部位置环和内部姿态环，而且需要两个控制回路的高度协调，导致基于理想智能体模型设计的控制律在实际应用中可能无法直接适用。因此，控制理论的研究者和工程师在设计控制律时，必须综合考虑实际物理系统的非线性特性、动态耦合以及外部环境因素，以开发出既符合理论要求又适应实际应用的控制策略。为了应对这些挑战，本节将重点从滑模控制、自适应控制、反步控制和自适应动态规划等方面对异构无人系统轨迹跟踪研究展开阐述。

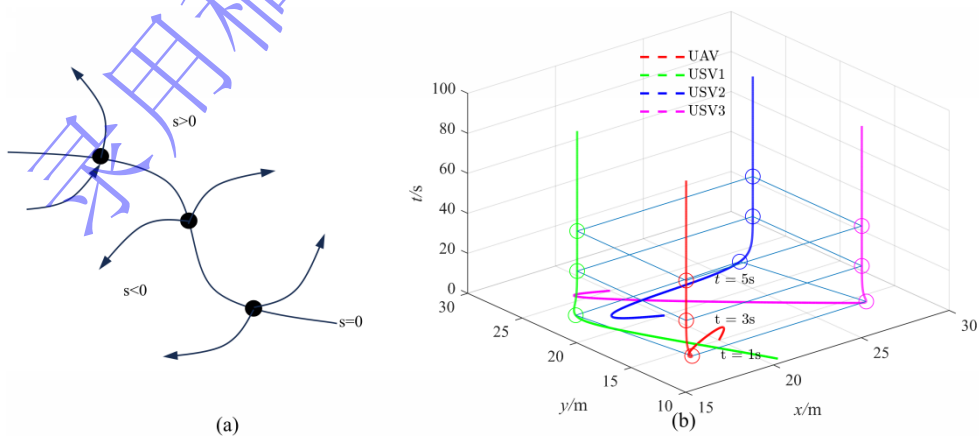


图 5 基于超曲滑模面的异构 UAV-USV 系统轨迹跟踪. (a) 超曲滑模面; (b) 异构 UAV-USV 系统轨迹跟踪

Fig.5 Trajectory tracking of heterogeneous UAV-USV system based on super-twisting sliding surface: (a) Super-twisting sliding surface; (b) Trajectory tracking of heterogeneous UAV-USV system

滑模控制是一种以李雅普诺夫第二方法为核心的非线性控制方法，由 Emeleyanov 等于 1962 年首次提出，并由 Utkin 对其进一步改进。由于滑模控制具有抑制外部扰动和不确定参数的优势，该方法在异构无人系统轨迹跟踪控制中被广泛应用^[44-47]，如图 5 所示。Sanjoy Mondal 等^[44]基于超螺旋算法改进滑模控制器，实现了高阶 MAS 轨迹跟踪控制。Mu 等^[45]提出了基于积分滑模面的滑模控制策略，来解决异构 UAV-UGV 系统的轨迹跟踪问题。Gao 等^[46]设计了基于线性滑模面的异构 UGV 协同跟踪控制方案，提高了异构系统在拓扑变换、参数误差和外部扰动下的稳定性。Cheng 等^[47]利用非奇异快速终端滑模控制技术解决了异构 UAV-UGV 系统在模型摄动和执行器故障下的协同跟踪控制问题。从上述研究中我们可以看出，由于滑模控制律中存在切换项，并且实际应用中的硬件存在切换频率限制，控制过程中控制器会不可避免地发生高频抖振现象。因此，如何在异构无人系统轨迹跟踪控制中减少滑模控制的抖振是控制领域亟需解决的问题之一。

自适应控制是一种能根据环境变化自动调节自身特性的反馈控制方法，通过自适应律可以使系统能按照预设的标准工作在最优状态^[48-49]。自适应控制和滑模控制具有类似的抗扰特性，但自适应控制更多用于模型较精确的比如航天器、卫星、机器人和无人机等运动控制^[50-53]。Li 等^[50]设计了基于自适应律的神经网络轨迹跟踪控制算法，解决了由一阶和二阶非线性智能体组成的异构系统的协同跟踪问题。Rosa 等^[51]利用更新增益的方式实现异构不确定欧拉-拉格朗日系统的自适应轨迹跟踪控制，并在航天器动力学仿真中验证了该方法的有效性。田磊等^[52]结合自适应控制和滑模控制提出了输出时变编队跟踪控制律，摆脱了现有控制器对领导者控制输入边界和拓扑变换下拉普拉斯矩阵的特征值等信息的依赖。He 等^[53]利用局部邻居信息设计了分布式自适应控制器，解决了异构非完整约束 MAS 轨迹跟踪问题。然而，在应对复杂多变的工况或环境时，以上述为代表的自适应控制的抗扰或动态调节能力有限，限制了自适应控制在异构无人系统轨迹跟踪控制中的广泛应用。

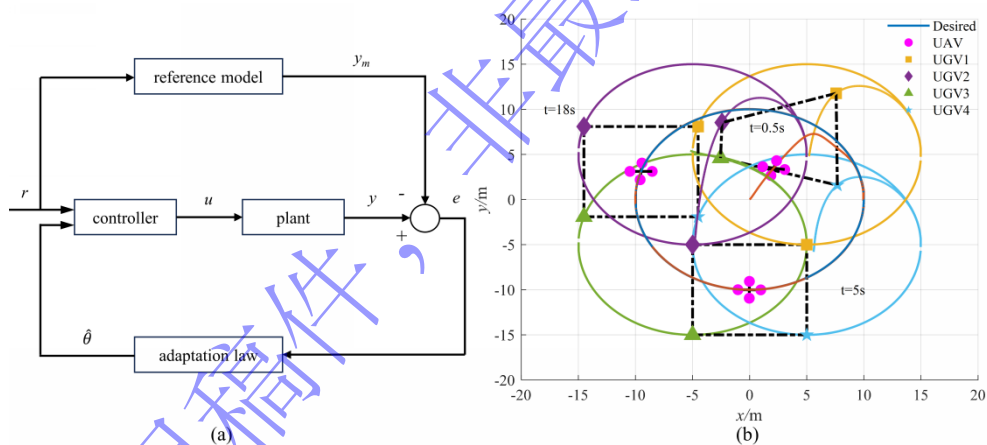


图 6 基于模型参考自适应控制的异构 UAV-UGV 系统轨迹跟踪。(a) 模型参考自适应控制流程; (b) 异构 UAV-UGV 系统轨迹跟踪

Fig.6 Trajectory tracking of heterogeneous UAV-UGV system based on model reference adaptive control: (a) Model reference adaptive control process; (b) Trajectory tracking of heterogeneous UAV-UGV system

反步控制是一种以李雅普诺夫第二方法为核心，将高阶系统分解成多个不超过系统阶数的子系统，并对每个子系统设计中虚拟控制量，从而“反推”至整个系统，设计出总轨迹跟踪控制律。因此，反步控制具有较高的控制精度和全局稳定性^[54-57]。Chen 等^[54]针对基于模糊逻辑系统建立的异构系统，利用分布式自适应反步控制器实现一致性跟踪。Chen 等^[55]以反步控制为框架设计了自适应模糊跟踪控制器，解决了一类具有异构动力学的非线性严格反馈 MAS 的有限时间跟踪控制问题。Cheng 等^[56-57]在两篇论文中将反步控制分别与固定时间稳定性理论和滑模控制结合设计了分布式跟踪控制器，并验证了两种控制器在异构 UAV-UGV 系统存在模型参数摄动、外部干扰和执行器故障等条件下的稳定性。从上述研究中我们可以看出，反步控制并不是一个具体的控制方法，而是一种控制框架，由于该框架计算量大、抗扰性能差和依赖系统模型的缺点限制了其在异构无人系统

协同控制中的广泛性应用。因此，反步控制通常结合动态面控制、自适应控制以及抗扰方法共同使用。

自适应动态规划(Adaptive Dynamic Programming, ADP)是一种以函数近似结构(例如神经网络、模糊模型、多项式等)为工具，通过更新迭代获得哈密顿-雅可比-贝尔曼(Hamilton-Jacobi-Bellman, HJB)方程的近似解，从而解决非线性系统优化控制问题。该方法由 Werbos 等^[58]于 1977 年首次提出，随后，Bertsekas 等^[59]学者将自适应动态规划应用于控制领域。由于自适应动态规划具有环境模型弱依赖性和强自学习性，该方法成为异构无人系统轨迹跟踪控制的热点应用。Wei 等^[60]针对异构 MAS 利用 ADP 提出了最优分布式轨迹控制器，使所有智能体都能跟踪给定的动态，同时使迭代值函数达到纳什均衡。Song 等^[61]设计了基于 ADP 的数据驱动优化控制方法，解决了异构车辆系统的自适应巡航问题。Xu 等^[62]基于分布式自适应观测器和自适应动态规划设计出一种数据高效的非策略学习算法，实现了存在未知外部系统动力学下的异构非线性 MAS 的最优轨迹跟踪控制。从上述研究中我们可以看出，评价网络或者奖励函数作为自适应动态规划的关键环节，其好坏程度直接影响异构无人系统轨迹跟踪效果，同时，自适应动态规划可迁移性不足的问题限制了其实际工程应用。

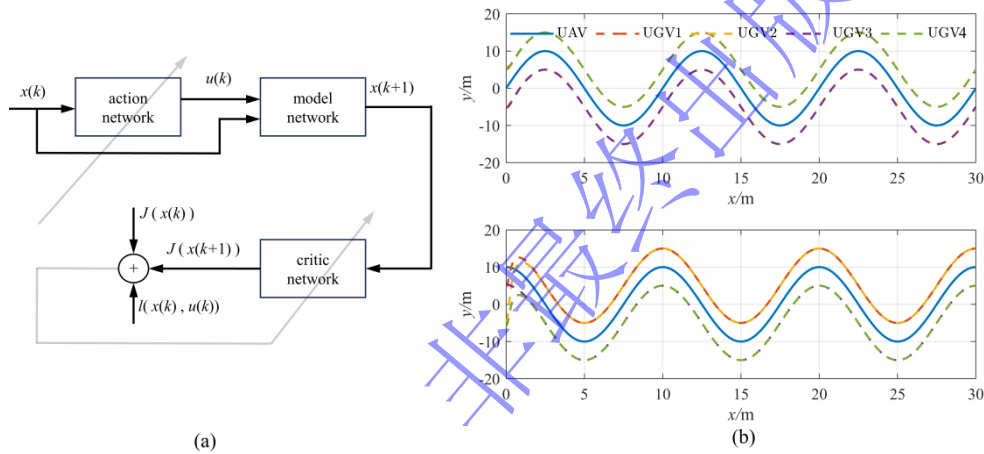


图 7 基于 ADP 的异构 UAV-UGV 系统轨迹跟踪. (a) ADP 流程; (b) 异构 UAV-UGV 系统轨迹跟踪

Fig.7 Trajectory tracking of heterogeneous UAV-UGV system based on ADP: (a) ADP control process; (b) Trajectory tracking of heterogeneous UAV-UGV system

2.3 异构无人系统编队-合围方法研究

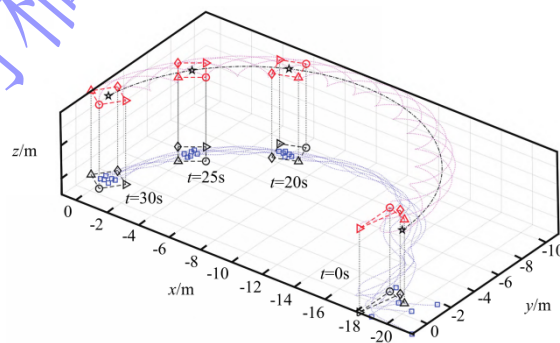


图 8 异构 UAV-UGV 系统编队-合围控制^[69]

Fig.8 Formation-containment control of heterogeneous UAV-UGV systems ^[69]

异构无人系统的编队-合围控制同时包含编队和合围两种不同集群行为。编队控制在于使用一致性或者其他控制方法控制系统所有成员在指定空间内形成并保持预设的相对阵位关系^[63]。合围控制即包含控制(上文已提及)，在于使用一致性或者其他控制方法使系统中所有跟随者进入多领导者

状态或输出所形成的凸包内部。由于在传统的合围控制中假设多领导之间不存在协同行为，这与实际应用场景中多领导者仍然需要保持编队行为不符。因此，异构无人系统的编队-合围控制引起研究人员的重点关注，如图 8 所示。Wang 等^[64-65]分别考虑了异构无人系统在离散通信和脉冲控制下输出编队-合围问题。Jiang 等^[66]借助自适应观测器设计了完全分布的编队-合围控制器。Cai 等^[67]利用二部固定时间补偿器估计的领导者状态信息开发了分布式控制器，实现了异构线性 MAS 的编队-合围跟踪控制。然而，文献[63-67]中皆假设虚拟领导者为自治系统，这严格限制了异构系统的参考轨迹类型，具有一定的局限性。Zuo 等^[68]针对异构 MAS 构建了动态输出反馈控制协议，并给出了时变输出编队-合围渐进稳定的充分条件。魏志强等^[69]基于分布式鲁棒自适应观测器设计了预定义的控制策略，克服了现有方法无法控制 UAV-UGV 系统宏观时变编队-合围的局限。张毅等^[70]提出了含时变耦合权值的分布式控制器，解决了 UAV-UGV 分组时变编队对目标的跟踪-合围问题。从目前研究进展来看，异构无人系统的编队-合围的研究大多采用输出调节方法，并尚处于起步阶段，相关的研究成果较少。

2.4 不同通信条件下异构无人系统协同控制研究

在大多数异构无人系统协同控制的研究中，都假设系统各成员之间具备良好通信条件，然而，现实中通信网络存在时滞、切换和带宽受限等行为，严重时可能导致异构无人系统丧失原有的稳定性。因此，复杂环境中不同通信条件下异构无人系统协同控制稳定性问题受到研究人员的关注。

通信时滞是通信网络中存在的普遍状况，大致分为传输时滞和输入时滞。目前，针对包含时滞的异构无人系统协同控制，通常由两种处理方式，一是以李雅普诺夫第二方法为核心实现控制目标，另一种将时域问题转化为频域问题分析系统稳定性。Xu 等^[71]推导出异构 MAS 可以在任意大的常数、时变和分布式通信延迟下实现一致性的充分条件。Bi 等^[72]针对具有无界分布传输延迟的异构 MAS 提出了新的分布式控制律，实现了异构 MAS 的编队-合围控制。Liu 等^[73]和 Sun 等^[74]基于频域方法和稳定性理论，分别推导出具有时滞的异构 MAS 实现平均一致性的充要条件和分组一致性的充分条件。总的来说，通过李雅普诺夫第二方法研究具有时滞的异构无人系统控制问题占据大多数。

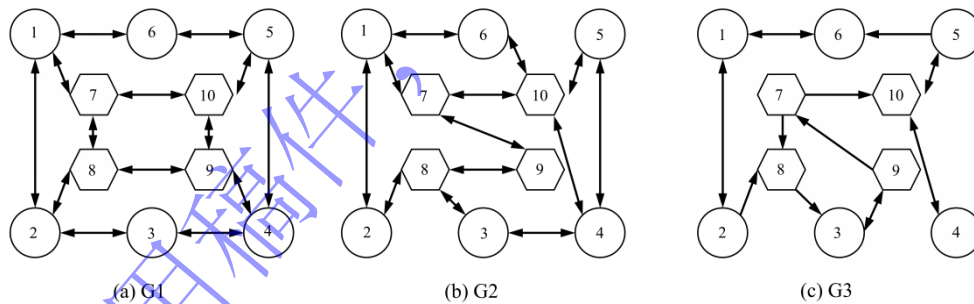


图 9 切换拓扑. (a) G1; (b) G2; (c) G3

Fig.9 Switching topologies: (a) G1; (b) G2; (c) G3

通信拓扑结构会因为信号传输质量、距离等外部环境的影响而发生变化，并且由于异构无人系统中各成员之间存在参数耦合，大大增加了系统控制难度，如图 9 所示。Zheng 等^[75]基于图论和非负矩阵论提出了具有切换拓扑的异构 MAS 一致性的充分条件。Meng 等^[76]首次研究了异构 MAS 在马尔可夫拓扑切换下的输出调节问题，并推导出了考虑随机通信拓扑的关键性质。Cheng 等^[77]提出了一种固定时间容错编队控制框架，实现了异构 UAV-UGV 系统在固定/切换拓扑下的时变编队控制。Song 等^[78]结合切换拓扑和数据驱动方法，解决了多输入多输出异构 MAS 输出跟踪时变编队问题。

通信带宽受限制约了网络的传输能力，为此，引入事件触发机制^[79]，仅在系统实际状态与参考状态误差超阈值时触发通信，有效降低通信频率与资源消耗，如图 10 所示。Song 等^[80]和 Jiang 等^[81]结合模型预测控制和事件触发机制，利用一致性算法分别解决了离散信息传输和拒绝服

务下的异构 MAS 一致性问题。Li 等^[82]提出了基于无模型强化学习的事件触发优化控制策略，实现了异构 MAS 系统的输出轨迹同步。然而，上述研究均为静态事件触发，即阈值为常数，虽然有效地降低了触发次数，但是仍然希望进一步降低通信的负担。因此，动态事件触发，即阈值自适应变化，逐渐受到广泛关注。Xia 等^[83]结合 ADP 优化策略，利用分布式动态事件触发控制器解决了输入约束下异构 MAS 同步问题。Liu 等^[84]设计了编队控制策略，利用动态事件触发机制，实现了异构 UAV-USV 系统的固定时间编队行为，相较于静态事件触发，显著降低了系统的触发次数和节约了通信资源。

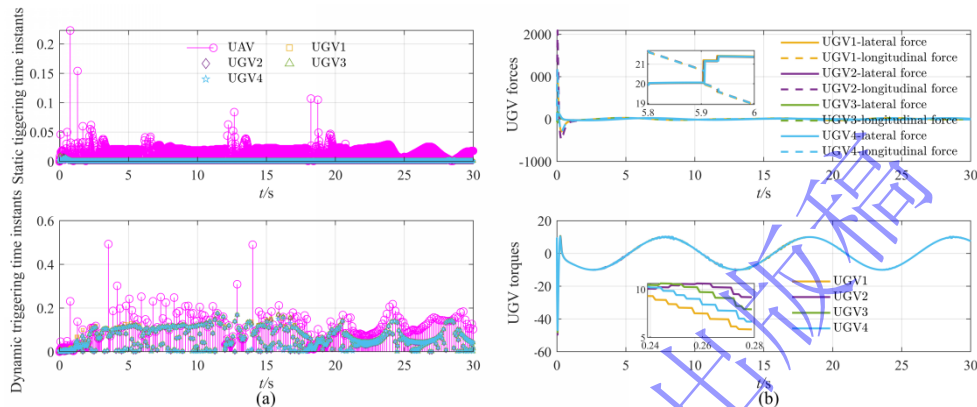


图 10 基于事件触发机制的异构 UAV-UGV 系统轨迹跟踪。(a) 静态事件触发和动态事件触发状态; (b) 异构 UAV-UGV 系统控制输入

Fig.10 Trajectory tracking of heterogeneous UAV-UGV system based on event-triggered mechanism: (a) The status of static and dynamic event triggering; (b) Control inputs of heterogeneous UAV-UGV system

3 异构无人系统协同控制技术瓶颈

尽管国内外关于异构无人系统协同控制的研究已经取得了丰富的研究成果，但在面对未知且复杂任务环境下的协同控制仍然存在诸多挑战。本文归纳总结前人相关工作，提出了目前异构无人系统协同控制亟需解决的技术瓶颈：

(1) 异构无人系统协同控制中多约束和实时性问题

在跨域、跨平台任务中，异构无人系统需快速、精确地响应控制指令，达成任务目标，如迅速到达特定坐标或准确执行任务动作。然而，现有的异构无人系统的协同控制方法大多建立在是渐近和指数稳定的基础上，虽然能够确保系统最终稳定，但往往无法满足任务对实时性的严格要求。随着控制理论的发展，基于有限时间和固定时间稳定的协同控制方法虽然一定程度上解决了上述问题，但是由于异构无人系统存在输入约束、输出约束等多约束问题，例如，输入约束可能限制了无人系统执行动作的力度和速度，输出约束可能涉及对执行结果的精度要求，这些因素共同作用，增加了协同控制方法设计的复杂性。因此，目前的控制方法仍然存在系统多约束和任务实时性相互矛盾的问题，限制了它们的工程应用。

(2) 异构无人系统中多任务切换协同控制问题

在实际环境中，异构无人系统承担的任务通常具有高度复杂性和耦合性，任务执行过程包括协作形成、维持、变换和分解等关键环节。每个环节都有其独特的运动和操作特点，例如，协作形成阶段需要快速准确地组建团队并分配任务；协作保持阶段则需要维持团队成员间的协调和同步；协作变换阶段可能涉及任务的动态调整和团队结构的改变；而协作分解阶段则需要有效地解散团队并确保各成员安全返回。因此，传统单一控制方法难以满足不同阶段的性能需求。因此，多种控制方法切换的平滑性、稳定性、实时性和鲁棒性仍然有待解决。

(3) 跨域通信下异构无人系统协同控制稳定性问题

尽管在上文中已有较多关于不同通信条件下异构无人系统协同控制的成果，但是在跨域、跨平台任务的跨域通信挑战尚未得到充分解决^[85-86]。异构无人系统的异体成员之间存在跨介质通信、跨域信息共享、跨域协同制导等诸多问题。例如，通信协议兼容性：异体成员可能采用不同通信标准，导致互操作性问题；通信传输稳定性：环境因素如恶劣天气和地形干扰，可能引起通信延迟、丢包和动态拓扑结构变化等问题；通信带宽受限：随着异构无人系统成员数量的增加，实际通信带宽限制了异体成员间信息传输的速率和效率；通信安全性：无线通信易受攻击，存在数据截获和系统劫持的风险。因此，如何设计控制方法使异构无人系统在面对跨域通信存在多层次、多维动态等特征时确保其稳定性是一个亟待解决的问题。

4 总结与展望

异构无人系统协同控制是跨域协同的关键技术，不同类型的无人平台间的协作配合可以使系统在各个领域发挥出“1+1>2”的效果。因此，开展异构无人系统协同控制研究具有重要的理论意义和工程意义。本文介绍了近年来异构无人系统的指导性文件和应用现状，重点介绍了基于一致性、轨迹跟踪、编队-合围和不同通信条件的异构无人系统协同控制研究成果，总结了异构无人系统协同控制的技术瓶颈。综合异构无人系统协同控制研究现状和实际需求来看，其发展方向将趋向三个方面：

(1) 基于深度强化学习和分布式博弈的协同控制

一方面，异构无人系统通常是在复杂环境下完成相应任务，相较于基于控制理论的协同控制方法，基于深度强化学习的方法可以一定程度减少协同控制方法对环境和模型的依赖性，提高其在任务需求中的自学习性。另一方面，随着异构无人系统的扩充，各成员间存在复杂的协同关系，而分布式博弈对于处理复杂关系具有天然优势，在协同控制研究中将会展现出越来越广泛的应用前景。

(2) 人机交互的协同控制

随着异构无人系统自主能力的不断提高，人对其控制作用不断削弱，但我们仍然希望它在人的控制范围内。因此，在考虑人机交互的协同控制系统设计时，不仅要保证人机协同控制权限分配策略的合理性，还要有处理人机冲突的能力，从而提升异构无人系统协同控制的表现。

(3) 反群体智能协同控制

目前，军事强国围绕“异构无人系统技术”展开激烈竞争，异构无人系统协同控制在未来战争中的重要性不言而喻。因此，针对敌方异构无人系统的反群体智能协同控制同样引起世界各国高度重视。如何引入人工智能技术提升反群体智能协同控制的自适应性、灵活性、集成性是未来异构无人系统的发展趋势之一。

参考文献

- [1] Xu B, Wang Z Y. Cooperative navigation of cross-domain heterogeneous unmanned ship formation: recent advances and future trends. *Chinese J Sh Res*, 2022, 17(4): 1-11, 56
(徐博, 王朝阳. 基于无人艇跨域异构编队协同导航研究进展与未来趋势. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 1-11, 56)
- [2] Xu X B, Duan H, Zeng Z G, et al. Progresses in UAV/USV cooperative control. *Aero Weapon*, 2020, 27(6): 1
(徐小斌, 段海滨, 曾志刚, 等. 无人机/无人艇协同控制技术研究进展. 航空兵器, 2020, 27(6): 1)
- [3] Duan H B, Liu S Q. Unmanned air/ground vehicles heterogeneous cooperative techniques: Current status and prospects. *Scientia Sinica Technologica*, 2010, 40(9): 1029
(段海滨, 刘森琪. 空中/地面机器人异构协同技术研究: 现状和展望. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(9): 1029)
- [4] Wei W, Wang J J, Fang Z R, et al. 3U: joint design of UAV-USV-UUV networks for cooperative target hunting. *IEEE Trans Veh Technol*, 2023, 72(3): 4085
- [5] Cheng W L, Zhang K, Jiang B, et al. Fixed-time formation tracking for heterogeneous multiagent systems under actuator faults and directed topologies. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2022, 58(4): 3063

- [6] Guo J F, Zheng H X, Jia Tao, et al. Summary of key technologies for heterogeneous unmanned system cooperative operations. *J Astronautics*, 2020, 41(6): 686
(郭继峰, 郑红星, 贾涛等. 异构无人系统协同作战关键技术综述. 宇航学报, 2020, 41(6): 686)
- [7] Liu J Z, Wang Z P, Sun F C, et al. Research on delay compensation control for heterogeneous connected and automated vehicle platoons. *Automot Engineering*, 2023, 45(9): 1573(刘济铮, 王震坡, 孙逢春等. 异构智能网联汽车编队延迟补偿控制研究. 汽车工程, 2023, 45(9): 1573)
- [8] Bi H Y. *The Choice of Russia on the EU Enlargement* [Dissertation]. Shang hai: East China Normal University, 2005
(毕洪业. 欧盟东扩与俄罗斯的选择[学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2005)
- [9] Lei H t, Zhu C, Wang C, et al. Key technologies of planning and control for cross-domain coordination on joint operational actions. *J Command Control*, 2023, 9(4): 361
(雷洪涛, 朱承, 王琛, 等. 联合作战行动跨域协同计划与控制关键技术. 指挥与控制学报, 2023, 9(4): 361)
- [10] Zhang X M, Han M L, Yu Y R, et al. Development and key technologies of submarine-UUV cooperative operation. *J UNMANNED UNDERSEA SYSTEMS*, 2021, 29(5): 497
(张鑫明, 韩明磊, 余益锐, 等. 潜艇与UUV协同作战发展现状及关键技术. 水下无人系统学报, 2021, 29(5): 497)
- [11] Li L, Wang T, Jiang Q. Key technology develop trends of unmanned systems viewed from unmanned systems integrated roadmap 2017—2042. *Unmanned Systems Technol*, 2018, 1(4): 79
(李磊, 王彤, 蒋琪. 从美军2042年无人系统路线图看无人系统关键技术发展动向. 无人系统技术, 2018, 1(4): 79)
- [12] Qiu Z M, Meng X Y, Ma Y, et al. Development and key technologies of maritime unmanned systems. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(3): 74
(邱志明, 孟祥尧, 马焱, 等. 海上无人系统发展及关键技术研究. 中国工程科学, 2023, 25(3): 74)
- [13] Rosa L, Cognetti M, Nicastro A, et al. Multi-task cooperative control in a heterogeneous ground-air robot team. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(5): 53
- [14] Zhang H P, Zhao S, Huang S P, et al. Analysis on the mechanism and process model of joint all-domain command and control. *Fire Control & Command Control*, 2023, 48(9): 51
(章华平, 赵朔, 黄松平, 等. 联合全域指挥控制机理与过程模型探析. 火力与指挥控制, 2023, 48(9): 51)
- [15] Harikumar K, Bera T, Bardhan R, et al. Autonomous navigation and sensorless obstacle avoidance for UGV with environment information from UAV//2nd IEEE International Conference on Robotic Computing(IRC), Laguna Hills, CA, 2018: 266
- [16] Zhou X Q. *Study on the Cooperative Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles and Unmanned Ground Vehicles* [Dissertation]. Xian: Chang'an University, 2017
(周小强. 无人机-无人车空地联合编队控制研究[学位论文]. 西安: 长安大学, 2017)
- [17] Jiang W, Ma X, Mao C Y, et al. Study on the storage assignment in KIVA robotic mobile fulfillment system. *J Zhejiang Nor U(Nat.Sci.)*, 2021, 44(3): 344
(姜伟, 马骁, 毛程远, 等. KIVA智能仓储系统中储位分配问题研究. 浙江师范大学学报:自然科学版, 2021, 44(3): 344)
- [18] Yan K. XCMG unmanned cluster equipment was used for the first time in high-speed pavement maintenance construction. *China Highw Transp*, 2021, 18: 76
(闫考. 徐工无人集群装备首次用于高速路面养护施工. 中国公路, 2021, 18: 76.)
- [19] Morris H, Degroot. Reaching a consensus. *J Am Stat Assoc*, 2012, 69(345): 118
- [20] Benediktsson J, Swain P. Consensus theoretic classification methods. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1992, 22(4): 688
- [21] Jadbabaie A, Lin L, Morse A. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Trans Autom Control*, 2003, 48(6): 988
- [22] Olfati-Saber R, Murray R. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Trans Autom Control*, 2004, 49(9): 1520

- [23] Ren W, Beard R. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies. *IEEE Trans Autom Control*, 2005, 50(5): 655
- [24] Wang Z. *Research on Formation Control Methods for Multi-agent* [Dissertation]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2012
(王治. 多智能体编队控制方法研究[学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012)
- [25] Su Y, Huang J. Cooperative output regulation of linear multi-agent Systems. *IEEE Trans Autom Control*, 2012, 57(4): 1062
- [26] Yu L, Wang J. Robust cooperative control for multi-agent systems via distributed output regulation. *Syst Control Lett*, 2013, 62(11): 1049
- [27] Jiao Q, Modares H, Lewis F, et al. Distributed L2-gain output-feedback control of homogeneous and heterogeneous systems. *Automatic*, 2016, 71(5): 361
- [28] Shi L, Li Y, Lin Z. Semi-global leader-following output consensus of heterogeneous multi-agent systems with input saturation. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2018, 28(16): 4916
- [29] Huang C, Ye X. Cooperative Output regulation of heterogeneous multi-agent systems: an H_∞ criterion. *IEEE Trans Autom Control*, 2014, 59(1): 267
- [30] Yaghmaie F, Su R, Lewis F, et al. Bipartite and cooperative output synchronizations of linear heterogeneous agents: A unified framework. *Automatica*, 2017, 80: 172
- [31] Yaghmaie F, Su R, Lewis F, et al. Bipartite and cooperative output synchronizations of linear heterogeneous agents: A unified framework // *American Control Conference(ACC)*. Boston, MA, 2017: 172
- [32] Lv Y, Wen G, Huang T. Adaptive protocol design for distributed tracking with relative output information: A distributed fixed-time observer approach. *IEEE Trans Control Network Systems*, 2020, 7(1), 118
- [33] Zhang H, Duan J, Wang Y, et al. Bipartite fixed-time output consensus of heterogeneous linear multiagent systems. *IEEE Trans Cybern*, 2021, 51(2): 548
- [34] Grip H, Saberi A, Yang T, et al. Output synchronization for heterogeneous networks of non-introspective, Non-Right-Invertible Agents// *American Control Conference(ACC)*. Washington, DC, 2013: 5791
- [35] Peymani E, Grip H, Saberi A, et al. H_∞ almost output synchronization for heterogeneous networks of introspective agents under external disturbances. *Automatic*, 2014, 50(4): 1026
- [36] Stoorvogel A, Saberi A, Liu Z, et al. H_2 and H_∞ almost output synchronization of heterogeneous continuous-time multi-agent systems with passive agents and partial-state coupling via static protocol// *American Control Conference(ACC)*. Philadelphia, PA, 2019: 3341
- [37] Lv Y, Fu J, Wen G, Huang T, et al. Distributed adaptive observer-based control for output consensus of heterogeneous MASs with input saturation constraint. *IEEE Trans Circuits Syst I Reg Papers*, 2020, 67(3): 995
- [38] Haghshenas H, Badamchizadeh M, Baradarannia M. Containment control of heterogeneous linear multi-agent systems. *Automatica*, 2015, 54: 210
- [39] Zuo S, Song Y, Lewis F, et al. Adaptive output containment control of heterogeneous multi-agent systems with unknown leaders. *Automatica*, 2018, 92: 235
- [40] Qin J, Ma Q, Yu X, et al. Output containment control for heterogeneous linear multiagent systems with fixed and switching topologies. *IEEE Trans Cybern*, 2019, 49(12): 4117
- [41] Atrianfar H, Karimi A. Robust H_∞ containment control of heterogeneous multi-agent systems with structured uncertainty and external disturbances. *Int J Rob Non Control*, 2022, 32(2): 698
- [42] Martinovic L, Zecevic Z, Krstajic B. Output containment control in heterogeneous multi-agent systems without exchange of controller states. *Euro J Control*, 2024, 75: 100889
- [43] Mazouchi M, Tatari F, Kiumarsi B, et al. Fully-Heterogeneous containment control of a network of leader-follower systems. *Institute Electrical Electronics Engineers (IEEE)*, 2021

- [44] Mondal S, Su R, Xie L. Heterogeneous consensus of higher-order multi-agent systems with mismatched uncertainties using sliding mode control. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2017, 27(13): 2303
- [45] Mu B, Zhang B, Shi Y. Integral sliding mode flight controller design for a quadrotor and the application in a heterogeneous multi-agent system. *IEEE Trans Ind Electron*, 2017, 64(12): 9389
- [46] Feng G, Dang D, He Y. Robust coordinated control of nonlinear heterogeneous platoon interacted by uncertain topology. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2022, 23(6): 4982
- [47] Cheng W, Jiang B, Zhang K, et al. Robust finite-time cooperative formation control of UGV-UAV with model uncertainties and actuator faults. *J Franklin Inst*, 2021, 358(17): 8811
- [48] Zhang Y Z, Li Q, Zhang W C. Survey of multi- model adaptive control theory and its applications, *Chin J Eng*, 2020, 42(2): 135
(张玉振, 李擎, 张维存, 等. 多模型自适应控制理论及应用. 工程科学学报, 2020, 42(2): 135)
- [49] Zhang Y Z, Li Q, Zhang W C. Weighted multiple model adaptive control with self-tuning model. *Chin J Eng*, 2018, 40(11): 1389
(张玉振, 李擎, 张维存. 含有自校正模型的加权多模型自适应控制. 工程科学学报, 2018, 40(11): 1389)
- [50] Li X, Shi P, Wang Y. Distributed cooperative adaptive tracking control for heterogeneous systems with hybrid nonlinear dynamics. *Nonlinear Dyn*, 2019, 95(3): 2131
- [51] Rosa M. Leader-Follower Synchronization of uncertain euler-lagrange dynamics with input constraints. *Aerospace*, 2020, 7(9): 127
- [52] Tian L, Dong X W, Zhao Q L, et al. Distributed adaptive time-varying output formation tracking for heterogeneous swarm systems. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2023, 47(10): 2386
(刘济铮, 王震坡, 孙逢春, 等. 异构智能网联汽车编队延迟补偿控制研究. 汽车工程, 2023, 47(10): 2386)
- [53] Wang Y, Liu X, Xiao J, et al. Output formation-containment of interacted heterogeneous linear systems by distributed hybrid active control. *Automatica*, 2018, 93: 26
- [54] Chen C, Ren C, Du T. Fuzzy Observed-based adaptive consensus tracking control for second-order multiagent systems with heterogeneous nonlinear dynamics. *IEEE Trans Fuzzy Syst*, 2016, 24(4): 906
- [55] He L, Dong W H. Distributed adaptive consensus tracking control for heterogeneous nonlinear multi-agent systems, 2022, 130: 177
- [56] Cheng W, Zhang K, Jiang B, et al. Ding.Fixed-time fault-tolerant formation control for heterogeneous multi-agent systems with parameter uncertainties and disturbances. *IEEE Trans Circuits Syst I Reg Papers*, 2021, 68(5): 2121
- [57] Cheng W, Jiang B, Zhang K, et al. Robust finite-time cooperative formation control of UGV-UAV with model uncertainties and actuator faults. *J Franklin Inst*, 2021, 358(17): 8811
- [58] Werbos P. Computational intelligence for the smart grid-history, challenges, and opportunities. *IEEE Comput Intell Mag*, 2011, 6(3): 14
- [59] Bertsekas D, Tsitsiklis J. Neuro-dynamic programming overview and a case study in optimal stopping//36th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, CA, 1997: 1181
- [60] Wei Q L, Liu D R, Lewis F. Optimal distributed synchronization control for continuous-time heterogeneous multi-agent differential graphical games. *Inf Sci*, 2015, 317: 96
- [61] Song X, Ding F, Xiao F, et al. Data-driven optimal cooperative adaptive cruise control of heterogeneous vehicle platoons with unknown dynamics. *Sci China Inf Sci*, 2020, 63(9): 190204
- [62] Xu Y, Wu Z G. Data-Efficient Off-Policy Learning for Distributed Optimal Tracking Control of HMAS With Unidentified Exosystem Dynamics. *IEEE Trans Neural Networks and Learning Systems*, 2024, 35(3), 3181
- [63] Jia Y N, Li Q. Research development of multi-robot formation control. *Chin J Eng*, 2018, 40(8): 893
(贾永楠, 李擎. 多机器人编队控制研究进展. 工程科学学报, 2018, 40(8): 893)

- [64] Wang Y, Liu X, Xiao J, et al. Output formation-containment of coupled heterogeneous linear systems under intermittent communication. *J Franklin Inst*, 2017, 354(1): 392
- [65] Wang Y, Liu X, Xiao J, et al. Output formation-containment of interacted heterogeneous linear systems by distributed hybrid active control. *Automatic*, 2018, 93(3): 26
- [66] Jiang W, Wen G, Peng Z, et al. Fully distributed formation-containment control of heterogeneous linear multiagent systems. *IEEE Trans Autom Control*, 2019, 64(9): 3889
- [67] Cai Y, Zhang H, Wang Y, et al. Adaptive bipartite fixed-time time-varying output formation-containment tracking of heterogeneous linear multiagent systems. *IEEE Trans Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(9): 4688
- [68] Zuo S, Song Y, Lewis F, et al. Time-varying output formation containment of general linear homogeneous and heterogeneous multiagent systems. *IEEE Trans Control Network Systems*, 2019, 6(2): 537
- [69] Wei Z Q, Weng Z M, Hua Y Z, et al. Formation-containment tracking control for heterogeneous unmanned swarm systems with switching topologies. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(2): 258
(魏志强, 翁哲鸣, 化永朝, 等. 切换拓扑下异构无人集群编队-合围跟踪控制. *航空学报*, 2023, 44(2): 258)
- [70] Zhang Y, Yu H, Yang X X, et al. Adaptive group formation tracking-containment control for heterogeneous unmanned swarm. *Syst Eng Electron*, 2023, 45(10): 3274
(张毅, 于浩, 杨秀霞, 等. 异构无人集群分组编队自适应跟踪-合围控制. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(10): 3274)
- [71] Xu X, Liu L, Feng G. Consensus of heterogeneous linear multiagent systems with communication time-delays. *IEEE Trans Cybern*, 2017, 47(8): 1820
- [72] Bi C, Xu X, Liu L. Formation-containment tracking for heterogeneous linear multiagent systems under unbounded distributed transmission delays. *IEEE Trans Control Network Systems*, 2023, 10(2): 822
- [73] Liu C, Tian Y. Formation control of multi-agent systems with heterogeneous communication delays. *Int J Syst Sci*, 2009, 40(6): 627
- [74] Sun F, Wu X, Kurths J, et al. Group consensus for heterogeneous multiagent systems with time-delays based on frequency domain approach. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2023, 53(5): 2572
- [75] Zheng Y, Wang L. Distributed consensus of heterogeneous multi-agent systems with fixed and switching topologies. *Int J Control*, 2012, 85(12): 1967
- [76] Meng M, Liu L, Feng G. Adaptive Output regulation of heterogeneous multiagent systems under markovian switching topologies. *IEEE Trans Cybern*, 2018, 48(10): 2962
- [77] Cheng W, Zhang K, Jiang B. Continuous fixed-time fault-tolerant formation control for heterogeneous multiagent systems under fixed and switching topologies. *IEEE Trans Veh Technol*, 2023, 72(2): 1545
- [78] Song W, Feng J, Sun S. Data-based output tracking formation control for heterogeneous MIMO multiagent systems under switching topologies. *Neurocomputing*, 2021, 422: 322
- [79] Peng C, Li F. A survey on recent advances in event-triggered communication and control. *Inf Sci*, 2018, 457: 113
- [80] Li H, Li X. Distributed Model predictive consensus of heterogeneous time-varying multi-agent systems: With and Without Self-Triggered Mechanism. *IEEE Trans Circuits Syst I Reg Papers*, 2020, 67(12): 5358
- [81] Yin X, Gao Z, Yue D, et al. Cloud-based event-triggered predictive control for heterogeneous NMASs under both DoS attacks and transmission delays. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 2022, 52(12): 7482
- [82] Li Q, Xia L, Song R. Novel Resilient Structure of Output Formation Tracking of Heterogeneous Systems With Unknown Leader Under Contested Environments. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 2021, 51(11): 6819
- [83] Li Q, Xia L, Song R. Distributed Optimized Dynamic Event-triggered Control For Unknown Heterogeneous Nonlinear MASs With Input-constrained. *Neural Networks*, 2022, 154: 1
- [84] Liu H, Weng P, Tian X, et al. Distributed adaptive fixed-time formation control for UAV-USV heterogeneous multi-agent systems. *Ocean Eng*, 2023, 267: 113240

- [85] Jiang B T, Wen G H, Zhou J L, et al. Cross-Domain Cooperative Technology of Intelligent Unmanned Swarm Systems: Current Status and Prospects. *Strategic Study CAE*, 2024, 26(1): 117
(江碧涛,温广辉,周佳玲,等. 智能无人集群系统跨域协同技术研究现状与展望. 中国工程科学, 2024, 26(1): 117)
- [86] Chai R Q, Guo Y L, Zuo Z Y, et al. Cooperative motion planning and control for aerial-ground autonomous systems: Methods and applications. *Progress Aerospace Sci*, 2024, 146: 101005

录用稿件，
非最终出版稿