

文章编号: 1674-8190(2023)02-001-11

多无人机协同打击制导控制技术研究进展

王玉杰, 唐钟南, 陈清阳, 高显忠, 邓小龙
(国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073)

摘要: 自杀式无人机具备长时巡航侦察和高速突防打击的特点, 为充分发挥其集群进攻优势, 突破复杂环境下的协同打击制导控制技术具有重要意义。由单机控制到集群动态协同、由单一约束到时空综合控制是探索时空约束下多机协同控制的基本思路。本文介绍了无人机集群进攻的应用背景, 分析了多机协同打击系统发展现状; 探究了攻击时间可控制导律、攻击角度可控制导律、时空约束下集群协同制导控制等关键技术; 总结了当前无人机协同运用中的不足之处, 并对下一步的研究方向进行了展望。本文研究的内容对于集群攻击作战运用及多机协同控制器的设计具有一定的参考意义。

关键词: 自杀式无人机; 协同打击; 攻击时间可控; 攻击角度可控; 协同制导控制

中图分类号: V279; V249

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.02.01

Research progress of guidance and control technology for multi-UAVs cooperative attack

WANG Yujie, TANG Zhongnan, CHEN Qingyang, GAO Xianzhong, DENG Xiaolong
(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The suicide UAV has the characteristics of long-term cruise and high-speed penetration, which can be used for target reconnaissance and attack. In order to give full play to the advantages of cluster attack, it is of great significance to break through the guidance and control technology for cooperative attack in complex environments. The basic ideas of exploring multi-UAVs cooperative control with spatio-temporal constraints are from single drone control to cluster dynamic coordination and single constraint to space-time comprehensive control. The application background of swarm attack is introduced, and the status of multi-UAVs coordinated strike system is analyzed. The key technologies such as impact time control guidance (ITCG), impact angle control guidance (IACG), and cluster cooperative control with spatio-temporal constraints are explored. The shortcomings of current UAV cooperative application are summarized, and the future research directions are prospected. The research of this paper has certain significance for the application of swarm attack operations and the design of multi-UAVs cooperative controllers.

Key words: suicide UAV; cooperative attack; impact time control; impact angle control; cooperative guidance and control

收稿日期: 2022-04-06; 修回日期: 2022-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61801495, 61903369)

通信作者: 王玉杰, yjwang@nudt.edu.cn

引用格式: 王玉杰, 唐钟南, 陈清阳, 等. 多无人机协同打击制导控制技术研究进展[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 1-11.

WANG Yujie, TANG Zhongnan, CHEN Qingyang, et al. Research progress of guidance and control technology for multi-UAVs cooperative attack[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 1-11. (in Chinese)

0 引言

无人机作为异军突起的新生力量,已由侦察保障逐步演变为进攻主角。自杀式无人机具备长时巡航和高速突防的优势,相比于常规导弹,其具有持续侦察监视能力强、无需预设打击目标位置等特点,对时敏目标有更强的实时打击能力;相比常规无人机,其具有结构紧凑、隐蔽性和突防能力强等特点;另外,自杀式的特点也使其避免了被敌捕获的被动局面,从而大胆前出至纵深区域执行高风险任务^[1]。

自杀式无人机,亦被称为巡飞弹,一般是指采用其自身动能和战斗部对目标进行直接撞击式毁伤的无人机武器^[2-3]。这种弹机一体的飞行器,在现代局部战争和武装冲突中发挥着越来越重要的作用。自俄乌冲突以来,美国已向乌克兰援助了121架“凤凰幽灵”和700余架“弹簧刀”巡飞弹,其既可执行侦察任务,也可作为导弹进行自杀式袭击。本文中讨论的自杀式无人机仅限于固定翼模式。

目前以色列和美国在自杀式无人机技术与实战部署方面拥有较高水平,已有多款实战型号装备到各军兵种以供使用,如以色列IAI公司研制的“哈比”反辐射无人机、美国洛马公司研发的LAM巡飞攻击弹药、Aero Vironment公司研发的“弹簧刀”(Switch Blade)单兵巡飞弹作战系统^[2,4]。英国、俄罗斯、波兰等国家也开展了相关研究。

自2015年美军提出“分布式杀伤”(Distributed Lethality)作战概念后,智能化协同作战的理念应运而生。在时空强耦合的复杂任务环境下,多平台协同作战成为无人机应用的重要方向,部署多架无人机,基于高可靠通信网络的信息交换实现无人机集群的互通互联^[5-8]。G. Slater^[9]分析了在承担“搜索和摧毁”任务时无人机集群合作的优势,在其设定的场景中,定义了一种自杀式无人机,可执行侦察搜索及毁伤评估的任务,且自身即为弹药并在攻击时自毁。

近年来,无人机集群进攻在局部武装冲突中的表现十分亮眼。2018年1月,叙利亚反政府武装从50 km外使用大规模无人机围攻赫梅米姆空军基地;2019年9月,沙特布盖格炼油厂和胡赖斯油田遭18架无人机和7枚巡航导弹袭击;2020年2月,土耳其使用无人机蜂群成功突破了“铠甲S-1”

防空系统,摧毁了叙利亚大量军事装备;2020年9~11月纳卡冲突中的无人机集群进攻对战争结局发挥了决定性作用。这些战例均表明,无人机集群战术可以把数量优势转化为质量优势,整体功能远超个体的叠加^[3],且部分损失不会对整体行动造成破坏性影响,系统生存能力大幅提高,对敌高价值目标的毁伤效果显著增强。

本文梳理了自杀式无人机系统应用背景及发展现状,结合集群协同作战需求,综述了多无人机协同打击制导控制关键技术,展望了未来多无人机协同打击制导控制技术的发展方向。

1 无人机协同打击系统发展现状

自杀式无人机兼具无人机长时巡航和导弹高速突防的特点,代表导弹与无人机融合发展的新方向,目前受到世界各国的广泛关注。美国于1994年实施的“低成本自主攻击弹药”(LOCAAS)项目^[10],较早开展了巡飞弹技术论证与研制。除美国外,以色列、英国和俄罗斯等军事强国也开展了相关研制工作,几款典型的自杀式无人机如图1所示。



图1 几款典型的自杀式无人机^[11-13]
Fig. 1 Several typical suicide UAVs^[11-13]

“弹簧刀”(Switch Blade)是美国Aero Vironment公司研制的察打一体单兵无人机作战系统,如图1(a)所示,也是美军装备数量最多、实战应用最广的巡飞弹系统^[2]。“弹簧刀”采取筒式发射,机翼、螺旋桨等机构均可折叠,在发射后迅速展开,使用后置动力模式,中部安装有战斗部和控制系统,前部为导引头。作为一款性能优异、效费比突

出的单兵巡飞弹系统,美军一直致力于扩展“弹簧刀”系统的协同作战能力。

美国海军的“低成本无人机集群技术”(LOCUST)项目旨在研制一款小型无人机蜂群系统,如图2所示。项目采用“郊狼”(Coyote)无人机作为平台,长度仅为1 m左右,制造成本约1万美元,重约6 kg,可执行巡飞、情报、吸引火力、通讯干扰等任务。2018年推出了配合先进雷达的“郊狼”反无人机系统,并为“郊狼”无人机配备了导引头和战斗部,当有源相控阵雷达识别并判定无人机威胁后,无人机能够迅速响应并发起攻击。先进型“郊狼”无人机已进入美军的研究序列,相较于基础型,飞行速度和航程大幅提高。



图2 “郊狼”无人机及其发射系统^[14]

Fig. 2 "Coyote" UAV and its launch system^[14]

以色列 Aerospace Industries 公司在“哈比”反辐射无人机基础上,改进研制了“哈洛普”巡飞弹系统^[3],如图1(b)所示。该型无人机采用“鸭翼+三角翼”气动布局,对其进行了光学和红外隐身处理,机体表面涂有吸收电磁波的复合材料,具备较强的防空系统穿透能力,续航里程约1 000 km,能够在作战区域上空持续巡航约6 h。“哈洛普”巡飞弹系统配备了被动雷达导引头,可用来截获多波段的敌方雷达信号,能够进行主动分析和目标追踪。2020年9月,在亚美尼亚与阿塞拜疆的冲突中,阿塞拜疆军队大量使用了“哈洛普”巡飞弹系统。

2010年,英国 MBDA 公司推出了“火影”(Fire Shadow)巡飞弹,如图1(c)所示,旨在为英国陆军提供低成本高效打击手段。“火影”长3.66 m,重约200 kg,续航时间达10 h以上,射程超过150 km,可换装多种导引头和战斗部。操作员可以通过卫星数据链对无人机进行精确控制,并可以实时监控战场态势。“火影”通过发射车机动转移实现快速部署,主要用于反雷达作战。

2019年7月,俄罗斯 ZALA 航空公司推出了“柳叶刀”(Lancet)系列巡飞弹,包括 Lancet-3 和

Lancet-1 两种型号,如图3所示。Lancet-3 最大起飞质量为12 kg,有效载荷可达3 kg,可以在80~110 km/h的速度巡航40 min。相比之下,Lancet-1 最大起飞质量为5 kg,有效载荷1 kg,可以在80~110 km/h的速度巡航30 min。Lancet 系列的操作环境需求相当低,可在恶劣环境中快速发射,并配备了高爆或破片弹头;还配备有光学制导装置,并具备人在回路控制能力。



图3 “柳叶刀”巡飞弹^[11]

Fig. 3 "Lancet" cruise missiles^[11]

未来,各国将更加重视集侦察、监视、打击及战场毁伤评估于一体的蜂群攻击武器系统,并将进一步提高其战场态势感知能力和实时精确打击能力。作为一种无人机技术与弹药技术有机结合的产物,自杀式无人机能够利用多种武器平台发射或投放,在目标区域上方巡弋飞行,“待机”执行侦察监视、目标搜索、精确打击、毁伤评估等多种作战任务^[15]。这些特点使其可以融入到未来陆海空天电网“六位一体、攻防兼备”的作战模式中,并具有独特的优势。

作为一种新型无人作战样式,自杀式无人机群协同打击作战运用也存在许多挑战,特别是集群协同控制技术仍面临着多项瓶颈。甄子洋等^[16]系统总结了无人机集群作战协同控制与决策的相关概念和研究现状,梳理了无人机集群协同任务中的多项关键技术,提出了基于一致性算法的饱和和攻击策略,可为大规模无人机集群攻击的决策部署与战术实现提供支撑。为有效实现饱和、全向攻击,满足时空约束条件下的协同打击制导控制技术成为系统应用的关键。

2 协同打击制导控制技术研究进展

经过数十年的理论研究与长期的工程实践,导弹的制导控制方法已十分成熟;而巡飞弹的出现,标志着导弹与无人机的融合发展。由于自杀式无人机和导弹的制导控制技术,特别是末制导

技术非常相似,多数的经典方法在二者中均有应用的案例,因此本文不再专门针对导弹和自杀式无人机的制导控制技术做分类讨论。

为了实现对目标的全向饱和攻击,研究攻击时间和攻击角度协同控制方法有着重要意义;随着集群作战研究的深入,研究者不仅关注协同制导过程中打击时间和对终端落角进行约束设计,也开始关注集群飞行过程中的相对几何构型。本文分别针对协同打击过程中的时间协同、角度协同以及时空约束下集群协同控制等关键技术进行讨论。

2.1 攻击时间可控制导律研究

攻击时间可控制导律(Impact Time Control Guidance Law, 简称ITCG)是通过制导控制指令设计使得战斗部在预定时刻命中目标的方法,该方法提出的背景是面向反舰导弹同时攻击的应用场景,I. S. Jeon等^[17]推导了在比例导引框架下,末制导过程的剩余时间(Time-to-go)估计公式,为集群的时间协同提供了依据。

攻击时间协同是指:通过多机在同一时间对目标发动打击,短时间内达到敌方防空系统火力通道上限,“撕裂”敌防空网;或者是按照特定时序到达,有效突破分层设置的地面掩体等目标。时间协同的目标要求是多架无人机同时执行某个任务或者间隔一个预设的时间而顺序执行任务^[18]。S. Mobeen等^[19]分析了多无人机协同攻击制导策略,并通过仿真对比了时间协同到达方法的有效性。

在无人机集群协同突防领域,目前对于协同的定义通常默认为时间协同,包括同时到达、紧密时序到达和松散时序到达等^[20-22]。时间协同的方法主要有固定时间导引法和协调导引法,前者要求预先确定一个打击时间,后者要求在打击过程中保持数据交互^[23]。

固定时间导引法通过对各机装订期望的攻击时间,采用相应控制方法,使得实际飞行时间在有限时间内收敛到预定值,实现时间协同,其本质上是研究单机的独立导引。常见的设计思路包括:

①基于比例导引:引入攻击时间误差反馈的函数,作为比例导引的附加项或者时变导引系数项,用于修正实际飞行时间与期望攻击时间的

偏差^[24-26]。

②滑模控制理论:根据不同控制需求选取线性/非线性滑模面,设计具有较强鲁棒性的攻击时间可控制导律,消除有界随机干扰的不确定性影响^[27-29]。

③最优控制理论:以控制能量或时间等因素作为性能指标,将时间控制转换为两点边值问题,通过求解黎卡提方程获得最优的控制指令^[30-32]。

固定时间导引法本质上是一种独立导引方式,各机仅依靠自身获得的信息进行飞行时间控制。实际应用中,由于集群中各机航向、速度及周围环境的差别,可能导致无法得到满足所有个体的可行时间范围^[33];另外,固定时间导引法要求集群中无人机飞行时间收敛到所有个体飞行时间最大值。

针对上述问题,协调导引法通过引入双层制导策略,或搭建“领弹—从弹”架构,如图4所示,基于分布式控制、图论、多智能体协同等相关理论设计协同制导律^[34-36]。

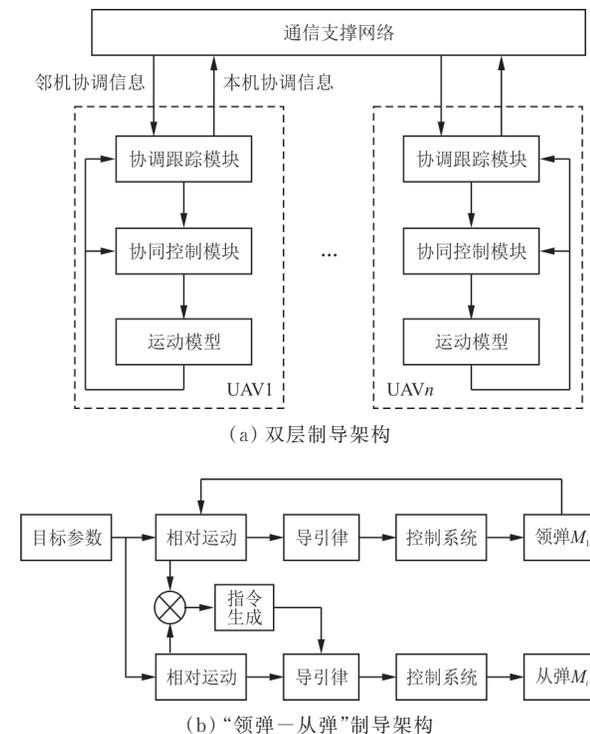


图4 典型的协调制导策略^[34-36]

Fig. 4 Typical coordinated guidance strategies^[34-36]

协调导引法使集群在飞行过程中自主协调预期时间,达到某种协调变量一致的状态,最终实现无人机同时到达目标。Z. A. Malik等^[37]提出了一

种基于经典比例导引律的多无人机协同制导方案,通过多无人机间的信息交换,各无人机的导引系数随时间变化,使其能够同时到达目标。协调导引法的优点是无需预先装订过多参数,集群规模可以方便地扩展,可以动态调整以适应突发状况,该方法无需预设飞行时间,在一些方案中甚至不需要剩余时间估计的过程^[38-39],对未来复杂战场环境下执行协同作战任务具有更强的适应性。

2.2 攻击角度可控制导律研究

攻击角度可控制导律(Impact Angle Control Guidance,简称IACG)的典型应用包括:反坦克导弹贯顶打击装甲薄弱的坦克顶部,反舰导弹突防时有效利用舰载防空雷达盲区,在特定方向上摧毁坚固的工事等。多无人机攻击角度的协同可进一步提升作战效能,一方面在协同飞行过程中可以对目标形成“合围”态势并获得较好的观测效果^[40],另一方面体现在对目标的全方位、立体化攻击,显著提升毁伤效能。

V. Shaferman等^[40]提出了一种基于最优控制理论的协同制导方法,对目标进行合围,不需要进行剧烈的机动;A. J. Sinclair等^[41]提出了一种面向协同攻击的最优路径规划及反馈制导方法,提高了目标定位及末端打击精度,可以使用更小、更便宜的弹药来协同攻击目标。针对高机动的目标,B. Yuksek等^[42]提出了集群协同的制导策略,提高了目标状态估计精度并减小了脱靶量,该方法通过减小目标的可逃逸区从而提高了协同制导效能;A. Chakravarthy等^[43-44]基于碰撞锥框架建立了非线性协同追踪制导律的解析表达式,对平面内的一群运动目标形成了合围态势。

在攻击末段,自杀式无人机通常采用俯冲加速的方式来提高突防概率和毁伤效果。如“哈洛普”无人机具备从任意方向、以任意角度对目标进行攻击的能力,在锁定敌方雷达信号后,及时转入打击状态,以近乎垂直的角度高速俯冲攻击目标,从而对雷达天线和周围设施造成最大程度的破坏。

类似于时间控制的设计思想,可以基于比例导引^[45-48]、最优控制理论^[49-51]、滑模控制理论^[52-54]等开展攻击角度可控制导律的设计,此外还有基于模型预测静态规划技术的IACG^[55-56]等方法。

工程实践中,制导、控制系统的分离设计需要进行繁琐的组合调试与迭代过程,当制导与控制回路的频谱分离假设失效时可能引起系统失稳^[57]。针对末制导阶段的高动态特性,开展带攻击角度约束的制导控制一体化(Integrated Guidance and Control,简称IGC)设计可实现制导系统和控制系统的有机协调,在提高打击精度方面极具潜力^[58],其设计架构如图5所示。结合现代控制理论,多种一体化设计方法被引入,主要包括滑模控制、反步法、动态面法等。

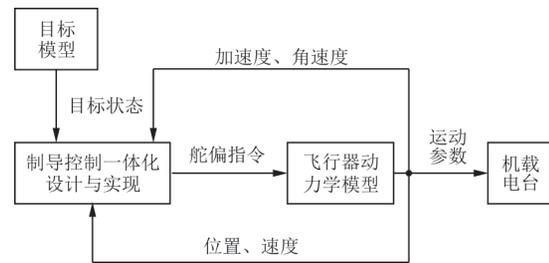


图5 制导控制一体化设计架构^[58]

Fig. 5 Schematic diagram of IGC^[58]

滑模控制器的设计可以通过求解线性矩阵不等式实现^[59],或结合多滑动面控制理论^[60]、非线性扰动观测技术^[61]来提高一体化系统的快速性,满足期望的攻击角和姿态角约束,然而控制量的高频抖振可能导致系统发散。

反步控制器可以利用未知状态和干扰估计信息实现制导控制一体化设计^[62],保证系统整体的鲁棒性,可以将反步法和滑模控制相结合设计自适应控制器,使用估计器识别模型参数的变化^[63],但是反步法在处理高阶串级式积分方程组时,易陷入“微分膨胀”问题。

Liu W等^[64]基于自适应动态面控制理论设置多级虚拟控制量输入,建立多级反馈的制导控制一体化模型,并据此引入攻击角度约束,该方法可应对较大的气动参数不确定性;Wang W等^[65]推导了多通道全耦合制导控制一体化模型,实现了三维空间落角约束下的对地攻击。然而,若动态面控制中各级积分器对干扰项的估计项不能及时收敛,则会影响最终的控制效果。

2.3 时空约束下集群协同控制

为了实现对目标的全向饱和攻击,开展攻击时间和角度协同可控制导律(Impact Time and Angle Control Guidance,简称ITACG)的研究具有重

大意义。通过制导律切换来实现攻击角度/时间的控制是常用的设计方法,张友安等^[66]、李新三等^[67]将末制导过程划分为ITCG段和IACG段,分别实现攻击时间协同和攻击角度协同,其不足之处是会带来制导指令的跳变,且第二阶段时间过长时会使得攻击时间出现累积偏差;Chen X等^[68]设计了一组由多段比例导引弹道组成的航迹,可以在满足末端攻击角精确控制的前提下确保攻击时间不出现累积偏差;唐杨等^[69]提出了一种基于攻击时间和角度控制的协同制导方法,通过引入辅助阶段,增强了两阶段制导律的时间控制能力,从而实现自杀式攻击型无人机在强对抗条件下从不同方向对目标实施同时攻击。

在非线性制导律的基础上,Chen Y等^[70]提出了一种带视场角约束的集群协同制导律,其由一个圆形制导项和一个偏置项组成,前者用于获得精确的飞行时间分析,后者用于修正偏差并实现协同到达,从而完成齐射攻击;Chen Y等^[71]针对三维空间中的协同打击问题,提出了一种分段协同打击策略,即协调段和比例导引段,分别实现集群的时间协同和末端的精确打击;Chen Y等^[72]在导弹速度可调的情况下,将其制导过程解耦为以法向加速度为输入的方向控制,和以发动机推力为输入的协同速度控制,从而实现带攻击角度约束的同时攻击。

时空协同控制则是综合多约束条件,设计形式统一的制导律以实现攻击时间和攻击角度的综合控制,常用的设计思路是在IACG的框架中引入剩余飞行时间反馈项,实现ITACG。Yang Z等^[73]构造了视线角和视线角速度指令多项式,将时间估计引入非线性滑模面,采用等效滑模方法设计了多约束制导律;Wang C等^[74]提出了一种齐射攻击中带碰撞角约束的分布式协同制导方法,并将其推广到了三维场景中,该方法不需要导弹进行速度调节,并通过理论分析了其稳定性和有效性。针对变速飞行器,阮聪等^[75]提出了一种速度时变条件下的剩余飞行时间估计方法,在比例导引的基础上基于终端滑模理论设计了ITACG。

在多无人机协同制导控制应用中,常用的协调架构是基于多智能体一致性理论构建的^[76-77]。

为同时满足时间和空间(攻击角度)协同,多采用解耦控制策略,分别在视线/法线方向上设计过载指令,用于攻击时间/角度的协同控制。司玉洁等^[78]基于三维空间中的相对运动方程,在法线方向上采用快速非奇异终端滑模理论设计了IACG,在视线方向上基于攻击时间误差方程设计了ITCG;Zhao E等^[79]提出了一种基于有限时间一致性理论的协同方案,实现了面向饱和攻击的多飞行器分布式协同制导控制,其将加速度指令分解为沿LOS方向和垂直于LOS方向,并分析了该方法的稳定性。

针对机动目标拦截问题,Chen Z等^[80]设计了分布式协同滑模制导律用于控制径向速度,在俯仰/偏航通道采用有限时间IACG,确保视线角的快速收敛,实现了时间和空间约束下的多机动态协同;美国陆军实验室的L. D. Fairfax等^[81]研究了制导弹药的分布式协同控制问题,提出了一种平滑的分布式编队控制体系架构,并通过Lyapunov稳定性分析证明了算法的收敛性。

3 研究展望

受集群协同控制技术的限制,当前无人机协同运用中也暴露出诸多不足:(1)缺乏时空综合作战运用,各自为战,突防效果差;(2)仅有“数量”优势,缺乏“协同”赋能,毁伤效果差;(3)缺乏信息交互,集群重构能力差。随着现代电子战装备迅速发展及立体防空系统的应用,无人机作战效能受到显著影响。

提高复杂环境下的集群协同制导控制能力是提高作战效能的重要途径,目前的研究已经取得了丰富的成果,但是距离高精度、协同化、分布式的控制需求还有较大的差距。不足之处主要包括以下三个方面:(1)在开展制导控制一体化设计时,较少考虑攻击时间/角度的约束以及干扰的影响,难以满足高精度的末制导需求;(2)针对多机动态协同打击问题,缺少对于协调函数工作机理及动态协同收敛条件的深入分析;(3)针对通信受限条件下的分布式协同控制研究较少,且对该过程的有限时间一致性收敛准则也有待进一步分析。因此,下一步需针对以下三方面内容开展

研究。

3.1 飞行器制导控制一体化设计

传统的制导律和控制器设计是基于频谱分离的思想,将系统分为制导回路和控制回路进行独立设计,随后再进行整合。在高动态场景下,如打击的末端,制导回路的时间常数将趋近于控制回路的时间常数,频谱分离的假设不再严格成立,因此可能造成控制失稳和较大的脱靶量。为了提高制导控制系统的整体性能,需要充分考虑制导与控制子系统之间的耦合,将制导与控制回路作为整体进行设计,根据相对运动信息和飞行器自身状态直接计算得到执行机构指令。制导控制一体化设计可以有效提高飞行器动态响应特性,保持对目标的稳定跟踪,实现对攻击时间/角度的快速精确控制,同时提高末端打击精度。

针对多无人机协同打击应用,在开展制导控制一体化设计时,应充分考虑无人机间信息交互的影响。例如在时间协调过程中,精确估计剩余飞行时间非常困难,尤其是在具有攻击时间约束的制导律设计中,无人机通常需要通过机动来实现最终攻击时间的协调,基于制导控制一体化设计的时间协同策略较难实现。同时,还需考虑在末制导俯冲打击过程中无人机的非线性和时变性、气动参数的摄动以及输入饱和的限制所带来的系统稳定性和鲁棒性问题。

3.2 基于协调变量的多无人机协同制导

协调层的引入使得集群在通信网络的支持下,利用协调策略实时调整协调变量,最终实现攻击时间/攻击角度的动态协同。协调层的基本思想是假设各无人机的可行控制决策集到相应协调变量的映射是可逆的,基于协调函数解算出协调变量的值,而后通过协调变量到决策集合的逆映射得到唯一确定的控制指令,从而实现多机协同。该方法无需预先装订过多参数,可以实时调整以适应突发状况,同时支持集群规模的动态扩展。因此下一步需深入研究基于协调变量的集群攻击动态协同制导控制方法,探索协调函数的工作机理、组织方式、最优准则等,分析典型通信拓扑结构下集群动态协同调节范围与收敛条件,为机群

协同规划与控制提供有力支持。

3.3 基于一致性理论的分布式协同控制

在复杂战场环境下由于电磁干扰和通信距离的限制,不能保证集群中每个无人机都能接收到全局的协调信息,因此研究基于多智能体一致性理论的分布式协调算法对于通信受限下的协同控制具有重要意义。多智能体系统中的各单元通过拓扑网络交换信息,在特定控制协议下得到协调变量或直接得到控制量。该方法基于代数图论表示个体间的通信关系,控制协议具有分布式的特点,在通信拓扑满足一定条件时(存在有向生成树等),即使各单元不能获得全局的协调信息,通过建立合适的控制协议也能实现集群状态的一致性收敛。设计一致性理论框架下多无人机攻击角度协同制导律、速度协同调节策略,有效利用无人机速度大小/方向的可调特性,以提高攻击时间/角度的动态协同调节范围、抗扰能力及控制精度。

4 结束语

自杀式无人机具备长时巡航侦察和高速突防打击的特点,为充分发挥其集群进攻优势,突破复杂环境下的协同打击制导控制技术具有重要意义,由单机控制到集群动态协同、由单一约束到时空综合控制是探索时空约束下多机协同控制的基本思路。本文介绍了无人机集群进攻的应用背景,分析了多机协同打击系统发展现状;探究了攻击时间可控制导律、攻击角度可控制导律、时空约束下集群协同控制等关键技术;总结了当前无人机协同运用中的不足之处,并对下一步的研究方向进行了展望。

本文综述内容对于集群攻击作战运用及多机协同控制器的设计具有一定的参考意义。时空约束下的协同制导控制技术将有效支撑无人机集群进攻的作战运用,让协同打击这一战略构想在新时期进一步延伸。针对敌方重点区域,通过多机协同突防使其防御系统无暇应对;针对敌方核心目标及关键部位,通过多机协同打击提高毁伤效果;同时,协同打击技术的研究将为反蜂群武器系统的竞争对抗式发展提供参考。

参考文献

- [1] 王晓光, 章卫国, 刘洋. 伴飞诱饵干扰下的自杀式无人机攻击策略[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3137-3146.
WANG Xiaoguang, ZHANG Weiguo, LIU Yang. Suicide drones' attack strategy on the condition of escort free-flight decoys influence[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3137-3146. (in Chinese)
- [2] 严毅梅. 导弹 OR 无人机——美国“弹簧刀”无人机[J]. 轻兵器, 2013(19): 26-27.
YAN Yimei. Missile or UAV-US "switchblade" UAV [J]. Small Arms, 2013(19): 26-27. (in Chinese)
- [3] 杨梅枝, 李伟业. 以色列军队无人机发展现状及基本经验[J]. 飞航导弹, 2021(3): 53-56.
YANG Meizhi, LI Weiye. Current situation and basic experience of Israeli Army UAV development[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(3): 53-56. (in Chinese)
- [4] 华阳, 徐敬, 周常尧, 等. 以色列哈比无人机的现状与发展[J]. 飞航导弹, 2006(9): 38-40.
HUA Yang, XU Jing, ZHOU Changyao, et al. Current situation and development of Israel's Harpy UAV [J]. Winged Missiles Journal, 2006(9): 38-40. (in Chinese)
- [5] 张睿文, 宋笔锋, 裴扬, 等. 复杂任务场景无人机集群自组织侦察建模与仿真[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 316-325.
ZHANG Ruiwen, SONG Bifeng, PEI Yang, et al. Modeling and simulation of UAV swarm self-organized surveillance in complex mission scenarios[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 316-325. (in Chinese)
- [6] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
SHEN Lincheng, NIU Yifeng, ZHU Huayong. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [7] CAMPION P M. UAV swarm communication and control architectures: a review [J]. Journal of Unmanned Vehicle Systems, 2019, 7(2): 93-106.
- [8] 李小卫, 段卓毅. 海上多任务飞机与无人机协同反潜作战研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(4): 458-463.
LI Xiaowei, DUAN Zhuoyi. Study on cooperative anti-submarine warfare of MMA and UAV [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(4): 458-463. (in Chinese)
- [9] SLATER G. Cooperation between UAVs in a search and destroy mission [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Austin, Texas: AIAA, 2003: 1-10.
- [10] BYRD L, THOMPSON R A, RICH M K. Hardware-in-the-loop testing for the low-cost autonomous attack system (LOCAAS) [J]. Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering, 1998(2): 409-417.
- [11] 搜狐网. 无人战争的终极武器——巡飞弹[EB/OL]. (2019-09-03) [2022-04-06]. https://www.sohu.com/a/338609977_358040.
Sohu. The ultimate weapon of unmanned warfare-cruise missiles [EB/OL]. (2019-09-03) [2022-04-06]. https://www.sohu.com/a/338609977_358040. (in Chinese)
- [12] 搜狐网. 战场灵刃!“弹簧刀”无人机横空出世[EB/OL]. (2020-01-21) [2022-04-06]. https://www.sohu.com/a/368247990_607689.
Sohu. Battlefield blade! "Switchblade" drone was born [EB/OL]. (2020-01-21) [2022-04-06]. https://www.sohu.com/a/368247990_607689. (in Chinese)
- [13] Thinkdefence. Fire shadow loitering munition [EB/OL]. (2021-07-28) [2022-04-06]. <https://www.thinkdefence.co.uk/fire-shadow-loitering-munition/>.
- [14] 腾讯网. 美陆军玩无人机蜂群又搞新花样[EB/OL]. (2020-12-03) [2022-04-06]. <https://new.qq.com/omn/20201203/20201203A08XBB00>.
Tencent. The U. S. Army is playing a new trick with drone swarms [EB/OL]. (2020-12-03) [2022-04-06]. <https://new.qq.com/omn/20201203/20201203A08XBB00>. (in Chinese)
- [15] 涂海峰. 巡飞弹药系统建模与导航控制技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
TU Haifeng. Research on modeling navigation and control technologies for loitering munition [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] 甄子洋, 江驹, 孙绍山, 等. 无人机集群作战协同控制与决策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2022.
ZHEN Ziyang, JIANG Ju, SUN Shaoshan, et al. Cooperative control and decision of UAV swarm operations [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2022. (in Chinese)
- [17] JEON I S, LEE J I, TAHK M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 260-266.
- [18] SCHUMACHER C, DEGLOPPER A, FULFORD A, et al. Cooperative UAV task planning for prosecution of moving ground targets [C] // AIAA Infotech@ Aerospace Conferences. Arlington, Virginia: AIAA, 2005: 1-11.
- [19] MOBEEN S, BHATTI U I. Cooperative guidance laws for flight of multiple uavs using arrival time control [C] // 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology. Islamabad, Pakistan: IEEE, 2019: 431-439.
- [20] 张友安, 王星亮, 吴华丽, 等. 带攻击时间约束的导引律综述[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(4): 301-309.
ZHANG Youan, WANG Xingliang, WU Huali, et al. Survey of guidance law with attack time constraint [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015,

- 30(4): 301-309. (in Chinese)
- [21] FANG Y, MA K, CHEN Y. Cooperative guidance laws with constraints on impact time and terminal angle[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(10): 2434-2441.
- [22] HARRISON G A. Hybrid guidance law for approach angle and time-of-arrival control [J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2012, 35(4): 1104-1114.
- [23] JEON I S, LEE J I, TAHK M J. Homing guidance law for cooperative attack of multiple missiles [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(1): 275-280.
- [24] KIM C Y, RA W S, WHANG I H. Time-to-go rational function biased PN guidance law for precise impact angle [C]// 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). [S. l.]: IEEE, 2017: 1804-1809.
- [25] ZHANG Y, WANG X, WU H. Impact time control guidance law with field of view constraint [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, 39: 361-369.
- [26] 陈升富, 刘丹, 常思江. 考虑视场角约束下的攻击时间控制制导律[J]. *弹道学报*, 2018, 30(4): 7-12.
CHEN Shengfu, LIU Dan, CHANG Sijiang. Impact-time-control guidance law considering field-of-view constraint [J]. *Journal of Ballistics*, 2018, 30(4): 7-12. (in Chinese)
- [27] ZHAO Y, SHENG Y, LIU X. Analytical impact time and angle guidance via time-varying sliding mode technique [J]. *ISA Transactions*, 2016, 62: 164-176.
- [28] CHEN X, WANG J. Nonsingular sliding-mode control for field-of-view constrained impact time guidance [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2018, 41(5): 1214-1222.
- [29] HU Q, HAN T, MING X. New impact time and angle guidance strategy via virtual target approach [J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2018, 41(8): 1755-1765.
- [30] ARITA S, UENO S. Optimal feedback guidance for nonlinear missile model with impact time and angle constraints [C]// AIAA Guidance Navigation & Control. [S. l.]: AIAA, 2013: 4785-4796.
- [31] ERER K S, TEKIN R. Impact time and angle control based on constrained optimal solutions [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016, 39(10): 2448-2454.
- [32] 黄汉桥, 周军, 郭建国. 具有角度和时间约束的导弹最优全弹道设计[J]. *西北工业大学学报*, 2010, 28(2): 165-170.
HUANG Hanqiao, ZHOU Jun, GUO Jianguo. Design and simulation of an optimal missile trajectory with constraints of impact time and impact angle [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(2): 165-170. (in Chinese)
- [33] 马国欣, 张友安. 多导弹时间协同分布式导引律设计[J]. *控制与决策*, 2014, 29(5): 843-847.
MA Guoxin, ZHANG Youan. Time-cooperative distributed guidance law design for multi-missiles [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(5): 843-847. (in Chinese)
- [34] CAO Y, WEI R, CASBEER D W, et al. Finite-time consensus of networked lipschitz nonlinear agents under communication constraints [C] // American Control Conference (ACC). [S. l.]: IEEE, 2013: 1326-1331.
- [35] WANG X, ZHENG Y, LIN H. Integrated guidance and control law for cooperative attack of multiple missiles [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 42: 1-11.
- [36] SONG J, SONG S, XU S. Three-dimensional cooperative guidance law for multiple missiles with finite-time convergence [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 67: 193-205.
- [37] MALIK Z A, HAYDAR M F, RIAZ J. Cooperative guidance scheme for flight of multiple combat UA vs against a non-accelerating moving target [C]// 2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST). Islamabad, Pakistan: IEEE, 2021: 606-612.
- [38] KIM H G, CHO D, JIN H. Sliding mode guidance law for impact time control without explicit time-to-go estimation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2018, 55(1): 236-250.
- [39] ZHU J, SU D, XIE Y, et al. Impact time and angle control guidance independent of time-to-go prediction [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 86: 818-825.
- [40] SHAFERMAN V, SHIMA T. Cooperative optimal guidance laws for imposing a relative intercept angle [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 38(8): 1395-1408.
- [41] SINCLAIR A J, PRAZENICA R J, JEFFCOAT D E. Optimal and feedback path planning for cooperative attack [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(6): 1708-1715.
- [42] YUKSEK B, URE N K, INALHAN G. Cooperative interception of a highly manoeuvrable aerial target [C]// 2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Kissimmee, Florida: AIAA, 2018: 1-11.
- [43] CHAKRAVARTHY A, GHOSE D. Cooperative pursuit using collision cones [C]// AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego, California: AIAA, 2019: 1-12.
- [44] CHAKRAVARTHY A, GHOSE D. Cooperative pursuit guidance to surround intruder swarms using collision cones [J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2020, 17(8): 454-469.
- [45] LEE C H, KIM T H, TAHK M J. Interception angle control guidance using proportional navigation with error feedback [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, 36(5): 1556-1561.
- [46] ERER K S, MERTTOP U O. Indirect impact-angle-control against stationary targets using biased pure proportional navigation [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dy-*

- namics, 2012, 35(2): 700-704.
- [47] 高峰, 唐胜景, 师娇, 等. 一种基于落角约束的偏置比例导引律[J]. 北京理工大学学报, 2014(3): 277-282.
GAO Feng, TANG Shengjing, SHI Jiao, et al. A bias proportional navigation guidance law based on terminal impact angle constraint [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014(3): 277-282. (in Chinese)
- [48] KIM B S, LEE J G, HAN H S. Biased PNG law for impact with angular constraint[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 277-288.
- [49] HA I J, HUR J S, KO M S, et al. Performance analysis of png laws for randomly maneuvering targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(5): 713-721.
- [50] LEE J I, JEON I S, HUN C. Command-shaping guidance law based on a Gaussian weighting function [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2014, 50(1): 772-777.
- [51] 张友安, 黄洁, 孙阳平. 带有落角约束的一般加权最优制导律[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 848-856.
ZHANG Youan, HUANG Ji, XUN Yangping. Generalized weighted optimal guidance laws with impact angle constraints [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 848-856. (in Chinese)
- [52] MING C, WANG X, SUN R. A novel non-singular terminal sliding mode control-based integrated missile guidance and control with impact angle constraint[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 94: 105368.
- [53] ZHANG Y, TANG S, GUO J. An adaptive fast fixed-time guidance law with an impact angle constraint for intercepting maneuvering targets [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(6): 1327-1344.
- [54] ZHANG W J, XIA Q L, LI W. Novel second-order sliding mode guidance law with an impact angle constraint that considers autopilot lag for intercepting manoeuvring targets[J]. Aeronautical Journal, 2020(3): 1-21.
- [55] 查颖, 郭杰, 洪海超, 等. 基于可变终端时间模型预测静态规划的制导律设计[J]. 飞行力学, 2019, 37(1): 64-68.
ZHA Ying, GUO Jie, HONG Haichao, et al. Guidance law design based on the flexible final time model predictive static programming [J]. Flight Dynamics, 2019, 37(1): 64-68. (in Chinese)
- [56] LI Y, ZHOU H, CHEN W. Three-dimensional impact time and angle control guidance based on mpsp[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2019(4): 1-16.
- [57] 王兴龙, 许哲, 王雪梅, 等. 带落角约束的导弹制导控制一体化设计综述[J]. 电光与控制, 2020, 27(2): 49-54.
WANG Xinglong, XU Zhe, WANG Xuemei, et al. A survey on integrated guidance and control of missile with terminal angle constraint [J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2): 49-54. (in Chinese)
- [58] HUANG H, ZHAO X, ZHANG X. Intelligent guidance and control methods for missile swarm [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 245: 8235148.
- [59] WU P, YANG M. Integrated guidance and control design for missile with terminal impact angle constraint based on sliding mode control[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 21(4): 623-628.
- [60] TAO C, WANG S, TIAN G, et al. Integrated guidance and control with terminal impact angular constraint for bank to turn flight vehicle[C]// 2014 33rd Chinese Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2014: 681-685.
- [61] YANG S, GUO J, ZHOU J. New integrated guidance and control of homing missiles with an impact angle against a ground target [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018(1): 1-10.
- [62] 常晶, 周军, 郭建国. 红外拦截弹输出反馈制导控制一体化设计[J]. 宇航学报, 2018, 39(5): 516-523.
CHANG Jing, ZHOU Jun, GUO Jianguo. An integrated design of output-feedback guidance and control for the interceptor with infrared seeker [J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(5): 516-523. (in Chinese)
- [63] ASHRAFIFAR A, JEGARKANDI M F. Adaptive fin failures tolerant integrated guidance and control based on backstepping sliding mode [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(10): 1823-1833.
- [64] LIU W, WEI Y, DUAN G. Integrated guidance and control with impact angle constraint[C]// 2017 Chinese Automation Congress (CAC). Beijing: IEEE, 2017: 866-871.
- [65] WANG W, XIONG S, WANG S, et al. Three dimensional impact angle constrained integrated guidance and control for missiles with input saturation and actuator failure [J]. Aerospace Science & Technology, 2016, 53(2): 169-187.
- [66] 张友安, 张友根. 多导弹攻击时间与攻击角度两阶段制导[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(5): 1442-1447.
ZHANG Youan, ZHANG Yougen. Two stages guidance to control impact time and impact angle for multi-missiles [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(5): 1442-1447. (in Chinese)
- [67] 李新三, 汪立新, 范小虎, 等. 导弹撞击角度与飞行时间两阶段控制制导律[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(6): 6-11.
LI Xinsan, WANG Lixin, FAN Xiaohu, et al. Two-stage control guidance of missile impact angle and flighttime [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(6): 6-11. (in Chinese)
- [68] CHEN X, WANG J. Two-stage guidance law with impact time and angle constraints [J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 95: 2575-2590.
- [69] 唐杨, 祝小平, 周洲, 等. 一种基于攻击时间和角度控制的协同制导方法[J]. 航空学报, 2022, 43(1): 466-478.
TANG Yang, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. Coope-

- rative guidance method based on impact time and angle control[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(1): 466-478. (in Chinese)
- [70] CHEN Y, GUO D, WANG J, et al. Cooperative circular guidance with nonuniform field-of-view constraints [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022, 45(2): 368-376.
- [71] CHEN Y, WANG J, WANG C, et al. Three-dimensional cooperative homing guidance law with field-of-view constraint [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2020, 43(2): 389-397.
- [72] CHEN Y, WANG J, SHAN J, et al. Cooperative guidance for multiple powered missiles with constrained impact and bounded speed [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, 44(4): 825-841.
- [73] YANG Z, WANG H, LIN D, et al. A new impact time and angle control guidance law for stationary and nonmaneuvering targets [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016(3): 6136178.
- [74] WANG C, DONG W, WANG J, et al. Impact-angle-constrained cooperative guidance for salvo attack [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022, 45(4): 684-703.
- [75] 阮聪, 温求道, 孙国鑫. 考虑速度时变的多约束攻击时间控制制导律 [J]. *战术导弹技术*, 2020(3): 59-65.
RUAN Cong, WEN Qiuqiu, SUN Guoxin. Multi-constraint impact time control guidance law under time-varying velocity [J]. *Tactical Missile Technology*, 2020(3): 59-65. (in Chinese)
- [76] ZHOU J, L Y, LI Z, et al. Cooperative guidance law design for simultaneous attack with multiple missiles against a maneuvering target [J]. *Journal of Systems Science & Complexity*, 2018, 31(1): 287-301.
- [77] YOO J H, KIM H J. Two distributed guidance approaches for rendezvous of multiple agents [C] // *International Conference on Control Automation & Systems*. [S. l.]: IEEE, 2010: 2128-2132.
- [78] 司玉洁, 熊华, 宋勋, 等. 三维自适应终端滑模协同制导律 [J]. *航空学报*, 2020, 41(s1): 99-109.
SI Yujie, XIONG Hua, SONG Xun, et al. Three dimensional guidance law for cooperative operation based on adaptive terminal sliding mode [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(s1): 99-109. (in Chinese)
- [79] ZHAO E, CHAO T, WANG S, et al. Distributed cooperative guidance law for multiple flight vehicles of saturation attack [C] // *2016 Atmospheric Flight Mechanics Conference*. Washington, D. C.: AIAA, 2016: 1-11.
- [80] CHEN Z, CHEN W, LIU X, et al. Three-dimensional fixed-time robust cooperative guidance law for simultaneous attack with impact angle constraint [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 110: 106523.
- [81] FAIRFAX L D, STROHM L S, FRESCONI F. Distributed and cooperative control for swarming munitions [C] // *AIAA SciTech Forum Archive, Online Event*. [S. l.]: AIAA, 2021: 1-7.

作者简介:

王玉杰(1988—),男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器导航制导与控制。

唐钟南(1997—),男,硕士研究生。主要研究方向:多无人机协同制导控制。

陈清阳(1982—),男,博士,副研究员。主要研究方向:无人机控制。

高显忠(1985—),男,博士,副研究员。主要研究方向:飞行器智能规划。

邓小龙(1984—),男,博士,讲师。主要研究方向:飞行器总体设计。

(编辑:丛艳娟)