

文章编号: 1674-8190(2024)06-039-12

反辐射无人机发展与展望

祝小平^{1,2}, 祝宁华³, 张阳⁴, 耿峰⁵

(1. 西安爱生技术集团有限公司, 西安 710065)

(2. 西北工业大学 第 365 研究所, 西安 710065)

(3. 西北工业大学 工程实践训练中心, 西安 710072)

(4. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065)

(5. 中国电子科技集团有限公司第二十研究所, 西安 710068)

摘要: 雷达和通信是战场上的“千里眼”和“顺风耳”, 在现代信息化战争中具有十分重要的作用, 反辐射无人机就是对雷达和通信目标实施长时间压制和反辐射摧毁的武器系统, 是战争中不可或缺的电子战“硬杀伤”武器装备。本文综述了反辐射无人机的发展概况、关键技术及发展展望, 首先给出反辐射无人机的定义、特点及其与反辐射导弹的区别, 然后介绍了反辐射无人机的发展历程及其研制发展情况, 总结了反辐射无人机装备研制的关键技术, 最后展望了反辐射无人机的未来发展趋势。

关键词: 反辐射无人机; 攻击型无人机; 自杀式无人机; 精确制导武器; 自主技术; 智能技术

中图分类号: V279; E926

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.06.04

Development and prospect of anti-radiation unmanned aerial vehicles

ZHU Xiaoping^{1,2}, ZHU Ninghua³, ZHANG Yang⁴, GENG Feng⁵

(1. Xi'an ASN Technology Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

(2. The 365th Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

(3. Engineering Practice Training Center, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(4. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

(5. The 20th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710068, China)

Abstract: Radar and communication are the "clairwise eyes" and "wind ears" on the battlefield, which play a very important role in modern information war. Anti-radiation unmanned aerial vehicle(UAV) is a weapon system that can suppress and destroy radar and communication targets for a long time, and is an indispensable electronic warfare "hard kill" weapon equipment in war. This article provides an overview of the development, key technologies, and prospects of anti-radiation drones. Firstly, the definition and characteristics of the anti-radiation UAV, and the differences between anti-radiation drones and anti-radiation missiles are provided. Then, the development history and research progress of anti-radiation drones are introduced, and the key technologies for the development of anti-radiation drone equipment are summarized. Finally, the future development trends of anti-radiation drones are discussed.

Key words: anti-radiation unmanned aerial vehicle(UAV); attack UAV; suicide UAV; precision-guided weapon; autonomous technology; intelligent technology

收稿日期: 2024-04-08; 修回日期: 2024-06-03

通信作者: 祝小平(1963-), 男, 博士, 教授。E-mail: zhuxp@nwpu.edu.cn

引用格式: 祝小平, 祝宁华, 张阳, 等. 反辐射无人机发展与展望[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 39-50.

ZHU Xiaoping, ZHU Ninghua, ZHANG Yang, et al. Development and prospect of anti-radiation unmanned aerial vehicles[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 39-50. (in Chinese)

0 引言

在电子战发展史上,反辐射武器有着深远的影响。反辐射无人机是反辐射武器的一种,是无人机应用于电子战重点发展的武器装备^[1-6]。纳卡战争和俄乌战争表明,无人机正在改变作战模式,无人机装备已经成为战争中不可或缺的重要装备,特别是攻击型无人机^[7-9]。反辐射无人机作为攻击型无人机的重要一员,正在发挥越来越重要的作用。

众所周知,雷达是战场上的“千里眼”,在预警探测、对空/对海监视、目标指示、导弹制导、火炮控制等方面具有十分重要的作用。反辐射无人机就是对雷达实施长时间压制和反辐射摧毁的武器系统,是战场上“首战用我”,开辟空中走廊、夺取制空权和制信息权,进而取得战争决定性胜利的“杀手锏”武器装备。由于反辐射无人机在现代信息作战中的重要作用,世界各军事强国已将反辐射无人机列入 21 世纪重点发展技术和武器装备之一。

本文综合论述反辐射无人机的发展概况、关键技术及发展展望。首先给出反辐射无人机的定义、特点与优势,分析反辐射无人机与反辐射导弹在设计理念、作战使用和战术目的等方面的区别;其次介绍反辐射无人机的发展历程及其在世界各主要军事强国的研制发展情况;然后分析总结反辐射无人机装备研制中需要解决的主要关键技术;最后展望反辐射无人机的未来发展趋势。

1 反辐射无人机的概念及特点

1.1 反辐射无人机的定义

反辐射无人机是指在无人机上集成被动雷达/被动通信导引头和引信战斗部,采用自主或智能控制、精确制导技术,实现对雷达/通信等辐射源目标进行长时间压制和摧毁的电子对抗“硬杀伤”武器装备。反辐射无人机的攻击目标并不局限于雷达,还可用来攻击通信目标、雷达和通信干扰机、预警机以及专用电子战飞机等其他辐射源目标^[5]。因而反辐射无人机是现代电子战中不可或缺的“硬杀伤”武器装备,已成为电子战新质战斗力。

在反辐射无人机发展初期,反辐射无人机究

竟是无人机还是导弹一直是一个有争议的问题。但现在已基本得到共识,反辐射无人机属于无人机家族中的一员,是自杀式攻击型无人机。尽管反辐射无人机也具备导弹的所有属性,即依靠动力装置推进、由制导控制系统导引和控制飞行航迹(弹道)、将战斗部送至并摧毁目标的武器装备,但反辐射无人机更具备无人机的所有属性,并且在使用方式和作战运用方面灵活多样,是一次性使用的自杀式攻击型无人机系统武器装备。

目前,也有人将反辐射无人机称为巡飞弹,但这种叫法不够严谨。实际上,巡飞弹也是无人机的一种类型,是一种攻击型无人机。巡飞弹是无人机技术与弹药技术相结合的产物,不仅具有“弹”的打击目标能力,还可能携带图像等设备从而具有侦察、监视及战场毁伤评估能力^[10-11]。而反辐射无人机是专门针对雷达/通信等辐射源目标进行侦收、识别,进而进行长时间压制和攻击的精确制导武器。正如反辐射无人机在发展初期将其称为无人机还是导弹的问题一样,将反辐射无人机称为攻击型无人机更准确一些。

1.2 反辐射无人机的特点

反辐射无人机集飞机和导弹的功能于一身,能够以集群方式对敌雷达/通信等辐射源目标进行饱和式杀伤和攻击。相对于反辐射导弹而言,反辐射无人机具有作战使用灵活多样、续航时间和留空待机时间长、成本低、作战效能高等突出优点,有利于在复杂环境下开展多样化的对抗作战,如作为有人机的开路先锋,执行开辟空中走廊任务。反辐射无人机可以大量发射升空,按预规划路径自主编队突防、搜索目标,当发现目标后可伺机攻击、压制和摧毁目标。反辐射无人机的主要特点如下。

1) 反辐射无人机既是飞机又是导弹,具有飞机和导弹双重功能

反辐射无人机既具有长时间巡航和待机、远距离飞行能力,又具有自寻和精确打击辐射源目标的能力,因此说它具有飞机和导弹双重功能。

2) 可防区外发射起飞、不需要载机,不存在载机和人员损伤的风险

反辐射无人机具有飞机和导弹双重功能,具有飞行时间长、飞行距离远的优势,因此反辐射无人机可防区外发射、不需要载机。这对没有制空

权的情况下作战非常重要。因为一般反辐射导弹飞行时间短,需要有人战斗机作为载机,在没有制空权的情况下,飞临敌方上空时,有人载机和飞行员面临被攻击的巨大风险。反辐射无人机可防区外发射起飞,不需要载机,不存在载机和飞行员损伤的风险,具有很高的作战效益和很低的作战风险。

3) 攻击辐射源目标种类多、频率范围广、体制多

反辐射无人机能够攻击的辐射源目标种类多,当集成被动雷达导引头时可攻击雷达目标,当集成被动通信导引头时可攻击通信目标。反辐射无人机甚至还可攻击卫星地球站、预警机和专用电子战飞机等,只要是辐射源目标,反辐射无人机均可以攻击。

4) 续航时间长,可对敌方防空系统进行长时间压制

反辐射无人机飞行时间长,可在目标区域上空长时间待机和搜索目标,只要辐射源目标开机,就可立即对目标进行攻击。在攻击过程中,如果雷达等目标关机,反辐射无人机在安全拉起高度以上则拉起恢复,从高速俯冲状态回到爬升状态,重新爬升到二次待机高度巡弋状态搜索目标,发现目标后又继续攻击目标。如果雷达目标等一直不开机,则在达到最大压制飞行时间后,进入自毁航线飞行并自毁。在攻击过程中,如果雷达等目标关机,反辐射无人机已在安全拉起高度以下,则反辐射无人机能够按照记忆导引方式对目标继续实施攻击。

5) 具有“发射后不管”自主飞行、自主搜索、自动捕获目标,选择攻击、精确制导和直接摧毁目标能力

反辐射无人机一般安装有卫星定位导航设备或卫星/惯性组合定位导航装置或卫星/航程推算组合导航系统,以及被动雷达/通信导引头,按照预先装订的规划路径,“发射后不管”自主飞行,自主搜索目标。

当导引头搜索到目标后,反辐射无人机可以选择优先级高的目标优先攻击。在末制导攻击阶段,反辐射无人机采用精确末制导控制方法实现精确制导,在接近目标时,近炸引信或碰撞引信引爆战斗部直接摧毁目标。

6) 可快速连续发射,集群式作战,大面积覆盖,对多个目标同时压制和攻击

反辐射无人机一般采用箱式发射方式,可快速连续发射。大量反辐射无人机发射升空后,可按集群式作战方式,对目标大面积覆盖,对多个目标同时压制和攻击。也可对高价值、高防御的重要目标进行饱和式集群攻击。

1.3 反辐射无人机与反辐射导弹的区别

反辐射无人机和反辐射导弹的核心功能是一样的,均是对辐射源目标进行攻击和摧毁。目前反辐射导弹已发展到第四代,反辐射无人机也发展到第二代。从反辐射无人机的特点可以看出,反辐射无人机与反辐射导弹在设计理念、作战使用和战术目的等方面有较多的不同之处^[10-11]。

1.3.1 在设计理念和应用技术方面的主要区别

反辐射无人机与反辐射导弹在设计理念和应用技术方面的主要区别在于:

1) 反辐射无人机的设计采用无人机的设计思想,同时兼顾精确末制导控制要求。即飞行器要有较好的气动性能,长时间飞行能力以及较好的纵、横向操纵控制和机动能力。而反辐射导弹更突出较好的纵、横向操纵控制和机动能力,对气动性能要求相对要低一些。

2) 动力方面,反辐射无人机要工作几小时以上,故低速反辐射无人机一般采用活塞发动机,高速反辐射无人机一般采用喷气发动机。而反辐射导弹只工作数十秒到几分钟,因而一般采用固体火箭发动机。

3) 导航和自主飞行、自动搜寻目标方面,反辐射无人机要具备“发射后不管”自主飞行能力,自动搜寻目标,在搜寻并确定目标后才进入精确末制导阶段,完成对目标精确打击。因此反辐射无人机需要长时间准确导航设备,如卫星导航、卫星/惯性组合导航等,还需要预先装订任务规划数据,明确飞行路径、目标搜索区域和攻击的目标特性。反辐射导弹是载机(有人机)搜寻并确认目标后,才发射反辐射导弹,反辐射导弹离开载机后,由被动导引头接收目标辐射信号进行引导,采用末制导技术完成对目标精确打击。因此反辐射导弹一般不需要长时间准确导航设备,不需要导航和自主飞行、自动搜寻目标,也不需要装订飞行路径、目标搜索区域等任务规划数据。

1.3.2 在作战使用和作战能力上的主要区别

反辐射无人机与反辐射导弹在作战使用和作战能力上的主要区别有^[12-14]:

1) 长时间连续的压制能力

反辐射无人机对辐射源目标的攻击,不仅是摧毁辐射源目标,更重要的是长时间压制辐射源目标。也就是说,反辐射无人机在目标区域上空长时间待机和搜索目标,只要辐射源目标开机,就可立即对目标实施攻击,致使目标不敢轻易开机工作。而反辐射导弹飞行时间短,一旦发射攻击目标,对敌方雷达等辐射源目标的威胁时间仅在分钟级以内。

2) “多对多”和面压制能力

反辐射无人机可以多机集群作战,实现对区域目标压制和同时对多目标发动攻击^[14],而反辐射导弹则不具有该能力。

3) 操纵员无需冒生命危险

反辐射无人机的发射是在后方,且无人机发射后可以尽快撤离,操纵员几乎无危险。而反辐射导弹的操纵员(飞行员)在执行任务时有相当大的危险,特别是在没有制空权的情况下,载机(包括飞行员)随时有被击落的危险。

4) 不需要载机

反辐射无人机在地面防区外发射,不需要载机。而反辐射导弹则需用有人/无人作战飞机作为载机,载机携带反辐射导弹飞临目标区域作战。

1.3.3 在战术目的和战术效果上的主要区别

在战术目的和战术效果上,反辐射无人机和反辐射导弹有着不同的特点^[12]:

1) 战术目的

反辐射无人机对目标辐射源的长时间压制成为其首要战术目的,能摧毁目标最好,即使不能摧毁,也能达到长时间压制的战术目的。而反辐射导弹的战术目的就是摧毁目标辐射源,具有一定的自卫目的,如未能将目标辐射源摧毁,则其战术目的就未达成。

2) 战术效果

反辐射无人机在燃油耗尽之前,对所有辐射源都是威胁。抗目标辐射源暂时关机的措施是重新恢复待机,再次攻击时的精度不受影响。而反辐射导弹发射之后,只能威胁一个辐射源,抗目标辐射源暂时关机的措施是按照记忆继续攻击,这种情况下其攻击精度与目标辐射源关机时反辐射

导弹距目标辐射源的距离有关,劣于正常的攻击精度。

2 反辐射无人机的发展状况

反辐射武器首先发展的是反辐射导弹,但由于反辐射导弹需要载机,随着防空武器装备的不断发展,在没有制空权的情况下,有人作战飞机作为载机面临严重的安全威胁,20世纪60—70年代的几次中东战争就证明了这一问题^[15-17]。因此,美国空军首先提出了反辐射无人机的需求,并获得了美国军方的大力支持。与此同时,以色列等国也提出了发展反辐射无人机装备,作为有效压制和摧毁地面防空雷达的措施,以帮助掌握战争制空权。20世纪80年代末期,美国、法国、德国、以色列、南非等国相继研制并部分装备了反辐射无人机^[1-2,4-5,7,17]。

反辐射无人机是综合反辐射导弹和无人机的优势而研制出来的新型武器,是反辐射导弹的有力补充,而且具有不可替代的作用。反辐射无人机从20世纪70年代开始发展至今,美国、以色列、德国、南非等国先后研制了勇敢者、静默彩虹、达尔(DAR)、百灵鸟(LARK)等多型反辐射无人机。具有代表性的反辐射无人机如表1所示。

美国典型的反辐射无人机有:勇敢者(Brave) 200和“静默彩虹”(Tacit Rainbow)高速反辐射无人机等^[5]; Brave 200型反辐射无人机于1979年由美国波音公司开始研制,该无人机装载于发射箱内,每15个发射箱作为一个标准组,可通过卡车运输并完成发射。Brave 300反辐射无人机是Brave 200的改进型号,其大幅提高了起飞重量和攻击半径,具有更强的突防能力。“静默彩虹”反辐射无人机即AGM-136,是由美国海、空军于20世纪80年代初开始联合研制的,是一种携带被动寻的导引头和战斗部的反辐射无人机。“静默彩虹”主要特点是:续航时间长,雷达截面积小,生存能力较高,采用毫米波技术,覆盖频段宽,具有远距离发射,自主搜索和锁定目标及巡逻能力,而且可截获多种体制的雷达信号。“静默彩虹”在捕获到威胁雷达的信号后可立即以高亚声速飞向目标,俯冲进行攻击;如果敌方雷达发射机突然关机,该无人机可以根据预先储存的目标信息完成攻击任务,也可以在目标区上空再次转入巡逻飞行,直至探测到雷达重新辐射电磁波后再次进行攻击^[5]。目前,

美国正将最先进的“战斧”巡航导弹改为反辐射无人 研制了“战斧 Block-IV”反辐射巡航导弹(无人
 人机。2014 年在“战斧 Block-III”的基础上,改进 机),最大航程达 1 500 km。

表 1 典型反辐射无人机情况表
 Table 1 The parameters of typical anti-radiation unmanned aerial vehicles

无人机 型号	无人机有关参数							
	生产厂	几何尺寸 翼展/m×机长/m	起飞质 量/kg	任务载 重/kg	最大平飞速度/ (km·h ⁻¹)	巡航速度/ (km·h ⁻¹)	待机速度/ (km·h ⁻¹)	俯冲速度/ (km·h ⁻¹)
Brave 200	美国 Boeing公司	2.59×2.13	120	27	225	180	145	360
DORNIER DAR	德国 Domier公司	2.00×2.30	120	25~30	220	180	150	360
MBB DAR	德国 MBB公司	2.26×1.81	120	50(含油)	220	180	140	360
MARULA	法国 SAGEM公司	2.24×2.10	135	35	220	180	160	400~500
RAKI	南非 Kentron公司	2.24×2.11	135	35	220	180	140	400~500
LARK	南非 Kentron公司	2.10×2.43	120	30	250	210	160	400~500
HARPY	以色列 IAI公司	2.10×2.60	135	25~30	250	200	165	400~500

无人机 型号	无人机有关参数					
	最大航程/km	续航时间/h	动力装置/hp ^①	发射方式	控制与导航	布局特点
Brave 200	400~500	3.0~5.0	28 双缸两冲程	火箭助推 箱式发射	预编程	鸭式
DORNIER DAR		3.0	26 双缸两冲程	火箭助推 箱式发射	GPS,自动驾驶仪	三角翼,推进式, 有侧力板
MBB DAR		约为 4.0	26 双缸两冲程	火箭助推 箱式发射	GPS/航程推算	三角翼,推进式, 有侧力板
MARULA	800	约为 5.0	26 双缸两冲程	火箭助推 箱式发射	GPS/航程推算	三角翼,推进式, 有侧力板
RAKI		4.5	26 双缸两冲程	火箭助推 箱式发射	GPS/航程推算, 预编程	三角翼,推进式, 有侧力板
LARK	800	4.5	38 转子发动机	火箭助推 箱式发射	GPS/航程推算, 预编程	三角翼,推进式, 有侧力板
HARPY	1 000	约为 5.0	38 转子发动机	火箭助推 箱式发射	GPS/航程推算, 预编程	三角翼,推进式, 有侧力板

无人机 型号	雷达导引头		
	频率范围/GHz	目标雷达	视场范围
Brave 200	2.0~5.0	脉冲、连续波、捷变频	
DORNIER DAR	0.8~20.0	脉冲、连续波、捷变频	
MBB DAR	2.0~18.0	脉冲、连续波、捷变频	
MARULA	2.0~16.0	脉冲、连续波、捷变频	方位:60°, 俯仰:145°
RAKI	2.0~10.0	脉冲、连续波、捷变频	
LARK	0.7~18.0	脉冲、连续波、捷变频	方位:60°, 俯仰:145°
HARPY	2.0~18.0	脉冲、连续波、捷变频	方位:60°, 俯仰:145°

注:①hp为[米制]马力的符号,1 hp=75 kgf·m/s=735.498 75 W。

德国 20 世纪 70 年代开始研究小型遥控飞行器执行反辐射和其他任务方面的应用,并和美国联合提出“蝗虫(LOCUST)计划”,旨在研制一种体积小、造价低的无人机,用于压制敌方防空雷达,但因资金不足而终止^[5]。1984 年美国退出该计划后,“蝗虫计划”就成为德国的独家计划,并改称“克达尔”小型反辐射无人机(KDAR: Kleindrohne Anti-Radar)计划,由以博登湖仪器技术公司、道尼尔公司和 MBB 公司为首的三个集团公司进行竞争。1988 年“克达尔”计划改称“达尔”计划,1989 年选定道尼尔公司为主承包商开始全面研制;1992 年德国政府决定继续进行研制但不采购;1993 年全面研制工作结束,至今未投产^[18]。

以色列飞机工业公司下属的马拉特分部在 20 世纪 80 年代初根据以色列军方的需求开始秘密研制“哈比”反辐射无人机。尽管反辐射导弹已成为主要攻击武器,但只能攻击预先侦察到的固定目标,难以对付那些机动设置的地面雷达。为了及时扫清地面威胁,确保空中优势,以色列军方决定利用德国“达尔”(DAR)无人机平台,率先发展一种具有一定自主攻击能力的反辐射无人机。由于这种无人机在攻击目标时类似从天而降的鹰隼,勇猛、凶残而不顾性命,为此借用希腊神话中长着鹰身的女妖的名字“哈比”(HARPY)为其命名^[19]。“哈比”反辐射无人机在 1997 年巴黎航展上首次对外公开亮相,与目前广泛用于侦察、通信的无人机不同,“哈比”反辐射无人机集无人机和导弹技术于一体,是一种利用敌方雷达辐射的电磁波信号搜索、跟踪并摧毁地面雷达的自主武器系统。由于“哈比”反辐射无人机在性能上的突出表现,美国国防部非常看好这种压制防空雷达的武器^[19]。1999 年 6 月指定雷锡恩公司同以色列飞机工业公司合作,在“哈比”的基础上发展了“短剑”无人机^[19]。进入 21 世纪,以色列 IAI 公司在“哈比”的基础上研制了“哈洛普”新型反辐射无人机,并于 2009 年巴黎航展上首次亮相。与“哈比”不同,“哈洛普”除了打击敌方雷达外,潜在打击目标还包括敌方导弹发射装置以及其他高价值设施,同时,“哈洛普”系统采用“人在回路”操控,地面操控员可通过数据链随时调整无人机的飞行航线和打击目标。“哈洛普”可从地面车辆、水面舰艇等多种作战平台发射,具备多次重复攻击能力,可以任意角度对目标实施打击^[20]。

除美国、法国、德国、以色列、南非等国发展和研制了反辐射无人机外,伊朗(Shahed-238 反辐射无人机)、土耳其(KARGI 反辐射无人机)、韩国(KUS-SX 反辐射无人机)也研制了反辐射无人机。

3 反辐射无人机关键技术

反辐射无人机作为电子战硬杀伤精确制导武器,装备研制需要解决的主要关键技术如下。

1) 满足飞机和导弹双重特性的飞行器总体设计技术

由于反辐射无人机既要有长时间压制目标的能力,又要有精确命中目标的能力,还要有突防、集群作战等能力,因此在反辐射无人机总体设计中,需要有高升阻比,还要有高机动性,特别是侧向机动能力;同时,要考虑隐身突防性能,尽可能机翼机身融合;还要考虑多机集群箱式快速发射约束要求,无人机尺寸、体积尽可能小。上述各要求,有的是相互矛盾的,很难全面达到,只能从系统的角度优化与折中,使反辐射无人机平台总体性能最佳。

2) 低油耗、宽包线动力技术

反辐射无人机是一次性使用的武器装备,整个飞行和攻击过程状态变化大,会产生负载急剧变化情况,要求发动机宽包线稳定工作,同时为了提高反辐射无人机对目标的压制时间,需要发动机尽可能低油耗。如采用活塞式发动机,主要要求其功重比高、抗过载和超转速能力强、体积小、工作可靠、成本低、维修方便,寿命可以短(50~100 h);如采用喷气发动机,主要要求其推重比高、抗过载和抗进口气流畸变能力强、体积小、工作可靠、成本低、维修方便,但短寿命(10~20 h)。

3) 不依赖卫星导航的自主、低成本、高可靠导航技术

反辐射无人机采用“发射后不管”的作战模式,自主导航非常重要,特别在卫星导航拒止的情况下,同时考虑一次性使用消耗性武器装备,因此不依赖卫星导航的自主、低成本、高可靠导航是技术关键^[21-24]。

4) 自主智能控制技术

为应对复杂对抗作战环境,反辐射无人机需要自主能力,自主智能控制技术成为关键。虽然目前有很多关于无人机自主智能控制、集群控制

技术研究方面的文章^[25-29],但应用到反辐射无人机装备研制中,还有许多工程化问题需要进一步突破。

5) 抗干扰、抗诱骗、宽频带被动导引头与精确制导技术

雷达目标为了抗反辐射武器攻击,主要采用闪烁干扰、假目标诱饵、关机等保护措施,这对反辐射无人机的被动导引头和制导系统设计提出了更高要求,抗干扰、抗诱骗、宽频带被动导引头设计和抗雷达目标关机制导系统设计成为技术关键。同时,新概念、新频段、新体制雷达也在不断创新发展,对抗这些新概念、新频段、新体制雷达的导引头技术和末制导技术也需要相适应发展^[30-32]。

6) 箱式快速发射技术

为满足反辐射无人机多机饱和攻击和集群作战需要,反辐射无人机一般采用箱式快速发射方式,为此满足无人机多机安全快速发射的箱式发射技术也是反辐射无人机武器系统的技术关键。反辐射无人机通常采用车载箱式发射方法,每辆发射车装载6~9只发射箱,每只发射箱装载1架或2架反辐射无人机。发射箱还同时作为贮存箱和运输箱之用。

7) 集群作战智能密集编队和多机协同任务规划技术

面对敌方地面防空阵地各种导弹制导、火炮控制、目标指示等雷达,海面航母战斗群中各种预警探测、对空/对海监视、目标指示、导弹制导、火炮控制等雷达,以及骨干通信网络节点中各种通信设施,加上强敌拦截、干扰等对抗措施,作为开路先锋的反辐射无人机必须采用集群作战、饱和攻击等方式才能制胜,为此,集群作战智能密集编队和多机协同任务规划技术成为反辐射无人机的技术关键^[33-45]。

4 反辐射无人机的发展趋势与展望

雷达和通信技术的不断发展,各种新体制、新概念雷达和通信技术不断涌现,同时,敌方陆、海、空、天、电磁五维一体化防御体系的不断完善,协同探测、干扰、拦截能力不断加强,这些都给反辐射无人机的作战效能和战场生存能力带来了巨大考验,未来反辐射无人机武器装备也应具备相应的应对措施创新发展。

4.1 持续提升反辐射无人机综合作战能力

1) 进一步提高飞行速度、增大航程和滞空时间

未来反辐射无人机将继续提高飞行速度、增大射程和压制时间,实现超视距、大范围的高速突防及攻击作战能力,增加攻击的突然性、隐蔽性和自身的安全性。

2) 进一步增大毁伤能力

采用高效能的战斗部,提高单位体积爆炸威力,以扩大战斗部的有效杀伤半径;采用高性能的引信(高精度的激光引信和高可靠性的触发引信),提高反辐射无人机的毁伤能力。

3) 高生存力和突防能力

随着复杂对抗和先进防空武器技术的发展,未来反辐射无人机将会面临更加复杂严酷的战场对抗环境,必须采用各种技术措施来增强自身战场生存力和突防能力。为此,未来反辐射无人机必须采取更先进的雷达隐身、红外隐身、声隐身等措施,如采用左手隐身材料、采取翼身融合低雷达反射外形、有源对消、离子体等雷达隐身技术,采取隔热/屏蔽、先进红外隐身材料、非常规喷管外形、燃油添加剂等红外隐身技术,采用发动机消声、吸声/隔声材料等声隐身技术,同时采取威胁规避、低空突防等措施,未来反辐射无人机生存力和突防能力会得到显著提升^[46]。

4) 进一步提高导引头性能

① 采用超宽频带技术,进一步拓展导引头工作频率

通过超宽频带技术来拓展导引头的工作频率,以应对防空雷达频段向两端延伸的发展趋势(例如,微波光子雷达、太赫兹雷达),让反辐射无人机能够攻击各个频段的雷达/通信等辐射源目标。

② 进一步提高导引头接收机灵敏度和动态范围

为了提高作战能力,反辐射无人机必须能够从雷达的旁瓣和背瓣发现和攻击目标。同时,随着低截获概率雷达、双(多)基雷达等先进雷达的发展和运用,增加了反辐射无人机发现雷达目标的难度,这就必须不断提升导引头接收机的灵敏度和动态范围。

③进一步提高信息处理能力

随着电磁技术的进步,在复杂对抗环境下,战场电磁信号密度越来越高、体制越来越多,要求导引头的目标信号分选识别和处理能力必须进一步提高。

④进一步小型化、轻量化和集成化

随着微系统、电子集成等技术的快速发展,导引头的小型化、轻量化和集成化会越来越高,功能会越来越强,如多模复合、频段复合、极化复合的一体化小型集成导引头会成为反辐射无人机的必须要求^[47]。

4.2 向适应新型体制雷达/通信的方向发展

为应对发展的新概念、新频段、新体制雷达和通信目标,反辐射无人机在导引头技术、末制导技术和引信战斗部技术方面也应向着对抗新型雷达/通信体制的方向发展。

1) 研究和探测和识别新概念、新频段、新体制雷达和通信目标的导引头技术

正在发展的新型雷达有太赫兹雷达、微波光子雷达、量子雷达、机会阵雷达、频控阵雷达、软件定义雷达等^[48-52];正在发展的新型通信有量子通信、6G通信等。为了能够攻击这些新型雷达和通信目标,必须研究和探测和识别这些新型雷达和通信目标的导引头,并能够对新型雷达和通信目标进行高精度测向,为制导系统提供导引信息。

2) 发展高维度高分辨率探测技术

为了进一步满足和提高反辐射无人机攻击新概念、新频段、新体制雷达/通信目标能力,适应复杂对抗环境,需要发展高维度高分辨率探测技术,提高反辐射无人机复杂战场适应性和新概念、新频段、新体制雷达/通信目标等多目标攻击能力^[47]。

3) 研究和探测新型高性能引信战斗部技术

太赫兹雷达、微波光子雷达、量子雷达、机会阵雷达、频控阵雷达、软件定义雷达等新型雷达以及新型通信目标,其结构和工作方式与现有雷达明显不同,要根据结构和工作方式的不同特征,研究和探测新型高性能引信战斗部技术,才能确保对新型雷达的有效毁伤。

4.3 向集群化方向发展

在复杂对抗环境下,现代战争中的雷达等预警探测、指挥控制体系呈多样、分布式的配置和布置。为满足这种作战要求,反辐射无人机必须集群作战,根据多目标态势,发射多架反辐射无人机组成集群攻击群,同时到达目标区域,对多个目标实施攻击。针对具有一定纵深防御体系的敌方来说,反辐射无人机集群作战能够大幅提高突防成功率和生存能力,大幅提高打击范围和打击成功率。为此,需要深化研究反辐射无人机集群化作战体系架构,研究集群作战管理和决策辅助技术,提高感知与规避能力,提高自主协同能力,提高战场实时强抗干扰通信能力等^[27-29,40-45,53-55]。

4.4 向智能化方向发展

随着人工智能(AI)技术的发展,为适应对抗复杂作战环境,反辐射无人机必定向智能化方向发展^[53-62]。智能反辐射无人机主要关键技术有智能飞行控制与导航、智能导引头与智能制导攻击、智能弹药杀伤和集群智能攻击等。

1) 智能飞行控制与导航技术

反辐射无人机智能飞行控制与导航制导主要是将AI技术应用到反辐射无人机的飞行控制、导航系统设计中,让反辐射无人机能够对多传感器信息智能融合,对作战环境和作战态势进行智能认知,对抗危险条件下的智能突防,自身的智能健康管理,实现反辐射无人机“发射后不管”,具备智能飞行控制、智能导航和智能突防能力。

2) 智能导引头和智能制导攻击技术

智能导引头是将导引头技术与AI技术有机结合,在导引头信号接收、识别、处理中均加入智能算法,实现导引头具备复杂对抗环境下对辐射源目标的准确探测识别、高精度测向和抗诱饵、抗干扰能力。

智能制导攻击技术是在制导系统设计、任务规划和多目标选择中均采用AI技术,实现反辐射无人机目标优先级选择、攻击过程决策、抗目标关机过程中均具备智能化能力,并能随着智能导引头探测目标信息的不断变化,随之调整攻击目标,对飞行路径进行必要的局部修改或进行重新规划^[53-60]。

3) 智能弹药杀伤技术

反辐射无人机智能弹药杀伤技术包括智能引信技术(含智能化安全执行机构)和智能战斗部技术。利用智能导引头和智能引信对目标类型、环境及其特性的智能认知,对引信中安全执行机构解除保险过程、战斗部起爆过程进行智能决策和控制,实现对目标的可靠摧毁^[54-55]。

4) 集群智能协同攻击技术

集群智能协同技术是一种利用多个独立的智能主体在相互协作和竞争的基础上,通过逐步调整和完善自身行为,实现集体目标的能力。集群智能协同技术能使集群内的无人智能个体避免相互冲突,确保智能集群的行为安全,并针对不同任务或请求,选派最佳无人智能个体完成指定任务^[53,61-62]。在反辐射无人机设计中采用集群智能协同技术,能够实现复杂对抗环境下对雷达/通信目标的集群智能协同攻击,大幅提升反辐射无人机作战效能,是反辐射无人机发展的重要方向。

5 结束语

1) 反辐射无人机技术和装备作为21世纪各国重点发展的电子对抗硬杀伤武器技术和装备,将随着现代雷达、通信技术和装备的发展,相互促进、共同提高。

2) 自主技术、智能技术、集群技术的应用,将会促进新一代反辐射无人机性能和作战效能的大幅提高。

3) 反辐射无人机在电子信息战中会发挥越来越大的作用,成为战争中不可或缺的新质作战装备,形成新质战斗力。

参考文献

- [1] 王建培. 国外攻击型无人机:反辐射无人机[J]. 国际航空, 1996(7): 5-7.
WANG Jianpei. Foreign attack unmanned aerial vehicles: anti-radiation unmanned aerial vehicles [J]. International Aviation, 1996(7): 5-7. (in Chinese)
- [2] 范奎武. 反辐射无人驾驶飞行器[J]. 飞航导弹, 1991(8): 15-17, 60.
FAN Kuiwu. Anti-radiation unmanned aerial vehicles [J]. Aerodynamic Missile Journal, 1991(8): 15-17, 60. (in Chinese)
- [3] 刘治德, 王勇. 美国反辐射导弹的发展历程和方向[J]. 飞航导弹, 2005(3): 24-32.
LIU Zhide, WANG Yong. Development course and direction of American anti-radiation missiles [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2005(3): 24-32. (in Chinese)
- [4] 曾祥能, 张永顺, 贺泽维, 等. 电子战新技术发展综述[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(5): 31-34.
ZENG Xiangneng, ZHANG Yongshun, HE Zewei, et al. Electronic warfare new technique development summarize [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010, 26(5): 31-34. (in Chinese)
- [5] 吴世龙, 钟飞. 电子战反辐射无人机系统及其作战效能分析[C]//中国航空学会信号与信息处理专业全国第八届全国学术会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2004: 16-21.
WU Shilong, ZHONG Fei. Analysis of electronic warfare anti-radiation UAV system and its operational effectiveness [C]// Proceedings of the 8th National Academic Signal and Information Branch of the CSAA. Beijing: CSAA, 2004: 16-21. (in Chinese)
- [6] 周晓峰, 杨建军. 反辐射导弹发展的新趋势及其对抗措施分析[J]. 飞航导弹, 2006(4): 3-6.
ZHOU Xiaofeng, YANG Jianjun. Analysis of new development trend and countermeasure for anti-radiation missiles [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2006(4): 3-6. (in Chinese)
- [7] 周璐, 刘恩凯. 无人机在反辐射作战中的影响分析[J]. 科技与创新, 2022(15): 95-97.
ZHOU Lu, LIU Enkai. Analysis of influence of unmanned aerial vehicles in anti-radiation war [J]. Science and Technology & Innovation, 2022(15): 95-97. (in Chinese)
- [8] 张阳. 纳卡冲突中无人机攻防装备运用及典型作战场景分析[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(5): 31-37.
ZHANG Yang. Analysis of the application of UAV attack and defense equipment and typical operational scenarios in the nagorno-karabakh conflict [J]. Command Control & Simulation, 2022, 44(5): 31-37. (in Chinese)
- [9] 赵国柱, 陈伟璠. 俄乌冲突中人工智能技术应用典型场景研究[J]. 战术导弹技术, 2022(6): 111-115, 127.
ZHAO Guozhu, CHEN Yifan. Research on typical application scenarios of artificial intelligence technology in the Russia-Ukraine conflict [J]. Tactical Missile Technology, 2022(6): 111-115, 127. (in Chinese)
- [10] 庞艳珂, 韩磊, 张民权, 等. 攻击型巡飞弹技术现状及发展趋势[J]. 兵工学报, 2010, 31(s2): 149-152.
PANG Yanke, HAN Lei, ZHANG Minquan, et al. Status and development trends of loitering attack missiles [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(s2): 149-152. (in Chinese)
- [11] VOSKUIJL M. Performance analysis and design of loitering munitions: a comprehensive technical survey of recent developments [J]. Defence Technology, 2022, 18(3): 325-343.
- [12] 姜峰. 反辐射无人机的优势和作战使用[C]//中国电子学会电子对抗分会第11届学术年会. 合肥: 中国电子学会, 1999: 54-59.
JIANG Feng. Advantages and operational use of anti-radiation

- tion unmanned aerial vehicles[C]// The 11th Academic Annual Conference of the Electronic Warfare Branch of the CIE. Hefei: The Chinese Institute of Electronics, 1999: 54-59. (in Chinese)
- [13] 刘培宾, 盛怀洁. 反辐射无人机与反辐射导弹作战能力对比分析[J]. 飞航导弹, 2019(1): 16-19.
LIU Peibin, SHENG Huaijie. Comparative analysis of combat capability of anti-radiation unmanned aerial vehicle and anti-radiation missile [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(1): 16-19. (in Chinese)
- [14] 刘刚, 曹泽阳. 地空导弹抗击反辐射无人机对策研究[J]. 飞航导弹, 2012(12): 50-53.
LIU Gang, CAO Zeyang. Research on countermeasures of surface-to air missile against anti-radiation UAV [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(12): 50-53. (in Chinese)
- [15] 刘箴, 符新军. 先进机载反辐射导弹综述及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2016(6): 43-49.
LIU Zhen, FU Xinjun. Overview development trend of advanced airborne anti-radiation missiles [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(6): 43-49. (in Chinese)
- [16] 杨卫丽, 左琳琳, 程鲤. 国外反辐射导弹及其制导技术发展[J]. 战术导弹技术, 2015(2): 12-16.
YANG Weili, ZUO Linlin, CHENG Li. Development of foreign anti-radiation missile and its guidance technology [J]. Tactical Missile Technology, 2015(2): 12-16. (in Chinese)
- [17] 季宏. 美国反辐射武器[J]. 舰船电子对抗, 2002, 25(1): 14-16.
JI Hong. American anti-radiation weapons [J]. Shipboard Electronic Warfare, 2002, 25(1): 14-16. (in Chinese)
- [18] 刘桐林. 巡逻型反辐射导弹的技术进展[J]. 飞航导弹, 1999(3): 14-21.
LIU Tonglin. Technical progress of patrol anti-radiation missile [J]. Aerodynamic Missile Journal, 1999(3): 14-21. (in Chinese)
- [19] 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. Situation and development of Israel HARPY UAV [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2006(9): 38-40. (in Chinese)
- [20] 李金兰, 杨慧君, 刘佳. 以色列飞机工业公司巡飞武器系统探析[J]. 飞航导弹, 2016(8): 8-11.
LI Jinlan, YANG Huijun, LIU Jia. Analysis of Israel Aircraft Company's patrol weapon system [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(8): 8-11. (in Chinese)
- [21] 赵靖, 宋丹. 无人机GNSS/IMU组合导航系统完好性监测方法[J]. 航空学报, 2024, 45(7): 247-260.
ZHAO Jing, SONG Dan. Integrity monitoring method for GNSS/IMU integrated navigation system of UAV [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(7): 247-260. (in Chinese)
- [22] 鄢家鑫, 贺晓华, 周泽波, 等. 基于GNSS/UWB的多无人机协同定位技术[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(1): 121-128.
YAN Jiaxin, HE Xiaohua, ZHOU Zebo, et al. Cooperative localization technology of multi-UAVs based on GNSS/UWB [J]. Journal of Detection & Control, 2024, 46(1): 121-128. (in Chinese)
- [23] 张睿, 李万睿, 肖勇, 等. 基于航迹规划的无人机地形辅助导航[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(3): 459-465.
ZHANG Rui, LI Wanrui, XIAO Yong, et al. Path planning-based terrain contour matching navigation of unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(3): 459-465. (in Chinese)
- [24] 邓廷祥, 任鹏, 程甲, 等. 面向集群协同的两点相对定位技术[J]. 兵工学报, 2023, 44(s2): 22-34.
DENG Tingxiang, REN Peng, CHENG Jia, et al. Relative positioning technology for two points based on cluster cooperative orientation [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44 (s2): 22-34. (in Chinese)
- [25] 金钰, 谷全祥. 2023年国外军用无人机装备技术发展综述[J]. 战术导弹技术, 2024(1): 33-47.
JIN Yu, GU Quanxiang. Overview of the development of foreign military UAV systems and technology in 2023 [J]. Tactical Missile Technology, 2024(1): 33-47. (in Chinese)
- [26] 严飞, 祝小平, 周洲, 等. 考虑同时攻击约束的多异构无人机实时任务分配[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(5): 555-569.
YAN Fei, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. Real-time task allocation for a heterogeneous multi-UAV simultaneous attack [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(5): 555-569. (in Chinese)
- [27] 任智, 张栋, 唐硕, 等. 无人机集群反制与对抗技术探讨[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(6): 660-672.
REN Zhi, ZHANG Dong, TANG Shuo, et al. Discussion on technologies of UAV swarm countermeasures and confrontation [J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(6): 660-672. (in Chinese)
- [28] 刘正元, 吴元清, 李艳洲, 等. 多无人机群任务规划和编队飞行的综述和展望[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(6): 623-636.
LIU Zhengyuan, WU Yuanqing, LI Yanzhou, et al. Overview and prospect of multiple UAV swarms mission planning and formation flying [J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(6): 623-636. (in Chinese)
- [29] 陈明飞, 王晓东, 宋勋, 等. 领航者一跟随者集群系统的队形优化与控制[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(6): 709-716.
CHEN Mingfei, WANG Xiaodong, SONG Xun, et al. Formation optimization and control for the leader-follower swarm systems [J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(6): 709-716. (in Chinese)

- [30] 梁永生, 唐勇, 王濛. 间断制导下的反辐射无人机被动定位算法研究[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 299-303.
LIANG Yongsheng, TANG Yong, WANG Meng. Study on passive localization algorithm of anti-radiation unmanned aerial vehicle under intermittent guidance [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 299-303. (in Chinese)
- [31] 吕日毅, 钱仁军, 李超, 等. 无人机抗干扰防诱骗技术分析[J]. 飞机设计, 2024, 44(1): 24-29.
LYU Riyi, QIAN Renjun, LI Chao, et al. Analysis on anti-jamming and anti-deception technology of UAV [J]. Aircraft Design, 2024, 44(1): 24-29. (in Chinese)
- [32] 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): 324844.
TANG Yang, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. Cooperative guidance method based on impact time and angle control [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 324844. (in Chinese)
- [33] 段海滨, 梅宇, 赵彦杰, 等. 2023年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 217-231.
DUAN Haibin, MEI Yu, ZHAO Yanjie, et al. Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2023 [J]. Science & Technology Review, 2024, 42(1): 217-231. (in Chinese)
- [34] 兰珍, 李子杏, 闫超, 等. 基于脑机接口的无人机控制系统研究综述[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(12): 2142-2159.
LAN Zhen, LI Zixing, YAN Chao, et al. A survey of brain-computer interface-based unmanned aerial vehicle control systems [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(12): 2142-2159. (in Chinese)
- [35] 张宏宏, 李文华, 郑家毅, 等. 有人/无人机协同作战: 概念、技术与挑战[J]. 航空学报, 2024, 45(15): 168-194.
ZHANG Honghong, LI Wenhua, ZHENG Jiayi, et al. Manned/unmanned aerial vehicle cooperative combat system: concepts, technologies, and challenges [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(15): 168-194. (in Chinese)
- [36] 任广山, 常晶, 陈为胜. 无人机系统智能自主控制技术发展现状与展望[J]. 控制与信息技术, 2018(6): 7-13.
REN Guangshan, CHANG Jing, CHEN Weisheng. Present and prospect of intelligent autonomous control for UAV [J]. Control and Information Technology, 2018(6): 7-13. (in Chinese)
- [37] ZHEN Z Y, XING D J, GAO C. Cooperative search-attack mission planning for multi-UAV based on intelligent self-organized algorithm [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 402-411.
- [38] 范彦铭. 无人机的自主与智能控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(3): 221-229.
FAN Yanming. Autonomous and intelligent control of the unmanned aerial vehicle [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(3): 221-229. (in Chinese)
- [39] 张旭东, 孙智伟, 吴利荣, 等. 未来有人机/无人机智能协同作战顶层概念思考[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 62-68.
ZHANG Xudong, SUN Zhiwei, WU Lirong, et al. Research on the fundamental and grand concept of intelligent cooperative combat of manned/unmanned aircraft [J]. Unmanned Systems Technology, 2021, 4(2): 62-68. (in Chinese)
- [40] 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[J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 117-126.
JIANG Bitao, WEN Guanghui, ZHOU Jialing, et al. Cross-domain cooperative technology of intelligent unmanned swarm systems: current status and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 117-126. (in Chinese)
- [41] 周思全, 董希旺, 李清东, 等. 无人机—无人车异构时变编队控制与扰动抑制[J]. 航空学报, 2020, 41(s1): 723767.
ZHOU Siqian, DONG Xiwang, LI Qingdong, et al. Time-varying formation control and disturbance rejection for UAV-UGV heterogeneous swarm system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(s1): 723767. (in Chinese)
- [42] 刘雷, 刘大卫, 王晓光, 等. 无人机集群与反无人机集群发展现状及展望[J]. 航空学报, 2022, 43(s1): 726908.
LIU Lei, LIU Dawei, WANG Xiaoguang, et al. Development status and prospect of UAV cluster and anti-UAV cluster [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(s1): 726908. (in Chinese)
- [43] 段海滨, 邱华鑫, 陈琳, 等. 无人机自主集群技术研究展望[J]. 科技导报, 2018, 36(21): 90-98.
DUAN Haibin, QIU Huaxin, CHEN Lin, et al. Prospects on unmanned aerial vehicle autonomous swarm technology [J]. Science & Technology Review, 2018, 36(21): 90-98. (in Chinese)
- [44] 贾永楠, 田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(s1): 4-14.
JIA Yongnan, TIAN Siying, LI Qing. Recent development of unmanned aerial vehicle swarms [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(s1): 4-14. (in Chinese)
- [45] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 023732.
WANG Xiangke, LIU Zhihong, CONG Yirui, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: review and outlook [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 023732. (in Chinese)
- [46] 陈黎. 军用无人机技术的发展现状及未来趋势[J]. 航空科学技术, 2013, 24(2): 11-14.
CHEN Li. Development and trend of military UAV technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2013, 24(2):

- 11-14. (in Chinese)
- [47] 胡仕友, 赵英海. 导弹武器智能精确制导技术发展分析[J]. 战术导弹技术, 2017(2): 1-6.
HU Shiyou, ZHAO Yinghai. Analysis on the development of intelligent precision guidance technology for missile weapons[J]. Tactical Missile Technology, 2017(2): 1-6. (in Chinese)
- [48] 王健明. 面向下一代战争的雷达系统与技术[J]. 现代雷达, 2017, 39(12): 1-11.
WANG Jianming. Radar systems and radar technologies for next generation of warfare[J]. Modern Radar, 2017, 39(12): 1-11. (in Chinese)
- [49] 党亚娟, 李耐和. 雷达新技术发展动向[J]. 国防科技工业, 2018(2): 44-46.
DANG Yajuan, LI Naihe. Development trend of new radar technology[J]. Defence Science & Technology Industry, 2018(2): 44-46. (in Chinese)
- [50] 雷红文, 王虎, 杨旭, 等. 太赫兹技术空间应用进展分析与展望[J]. 空间电子技术, 2017, 14(2): 1-7, 12.
LEI Hongwen, WANG Hu, YANG Xu, et al. Analysis and progress of terahertz techniques applied in space science[J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(2): 1-7, 12. (in Chinese)
- [51] 王宏强, 刘康, 程永强, 等. 量子雷达及其研究进展[J]. 电子学报, 2017, 45(2): 492-500.
WANG Hongqiang, LIU Kang, CHENG Yongqiang, et al. The advances in quantum radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(2): 492-500. (in Chinese)
- [52] 王晓海. 认知雷达系统技术发展综述[J]. 数字通信世界, 2018(s1): 40-43.
WANG Xiaohai. Overview of cognitive radar system technology development[J]. Digital Communication World, 2018(s1): 40-43. (in Chinese)
- [53] 宋瑞, 杨雪榕, 潘升东. 智能集群关键技术及军事应用研究[C]// 第二届中国空天安全会议. 大连: 中国指挥与控制学会, 2017: 254-258.
SONG Rui, YANG Xuerong, PAN Shengdong. The research on the key technologies and military applications of intelligent swarm[C]// The Second China Space Safety Conference. Dalian: Chinese Institute of Command and Control, 2017: 254-258. (in Chinese)
- [54] 曾家有, 吴杰. 智能反舰导弹发展需求及其关键技术[J]. 战术导弹技术, 2018(2): 36-42.
ZENG Jiayou, WU Jie. Development demand and key technology of intelligent anti-ship missile[J]. Tactical Missile Technology, 2018(2): 36-42. (in Chinese)
- [55] 丁宇, 闫秀生. 智能化远程反舰导弹能力及技术分析[J]. 光电技术应用, 2019, 34(2): 1-5, 68.
DING Yu, YAN Xiusheng. Technical analysis of intelligent long-range anti-ship missile capability[J]. Electro-Optic Technology Application, 2019, 34(2): 1-5, 68. (in Chinese)
- [56] 刘网定, 张国宁, 郑世明. 基于深度强化学习的作战实体智能感知与决策研究[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(5): 164-169.
LIU Wangding, ZHANG Guoning, ZHENG Shiming. Research on intelligent perception and decision-making of combat entities based on deep reinforcement learning[J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(5): 164-169. (in Chinese)
- [57] 张博超, 温晓玲, 刘璐, 等. 基于近端策略优化的空战决策算法研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(2): 145-151.
ZHANG Bochao, WEN Xiaoling, LIU Lu, et al. Research on air combat decision algorithm based on proximal policy optimization[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(2): 145-151. (in Chinese)
- [58] 况立群, 李思远, 冯利, 等. 深度强化学习算法在智能军事决策中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(20): 271-278.
KUANG Liqun, LI Siyuan, FENG Li, et al. Application of deep reinforcement learning algorithm on intelligent military decision system[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(20): 271-278. (in Chinese)
- [59] 单圣哲, 杨孟超, 张伟伟, 等. 自主空战连续决策方法[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 47-58.
SHAN Shengzhe, YANG Mengchao, ZHANG Weiwei, et al. Continuous decision-making method for autonomous air combat[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 47-58. (in Chinese)
- [60] 左家亮, 杨任农, 张滢, 等. 基于启发式强化学习的空战机动智能决策[J]. 航空学报, 2017, 38(10): 321168.
ZUO Jialiang, YANG Rennong, ZHANG Ying, et al. Intelligent decision-making in air combat maneuvering based on heuristic reinforcement learning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(10): 321168. (in Chinese)
- [61] SHEN Y K, WEI C. Multi-UAV flocking control with individual properties inspired by bird behavior[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 130: 107882.
- [62] 姜龙亭, 魏瑞轩, 张启瑞, 等. 基于群智机理的集群防碰撞控制[J]. 航空学报, 2020, 41(s2): 724294.
JIANG Longting, WEI Ruixuan, ZHANG Qirui, et al. Anti-collision control of UAVs based on swarm intelligence mechanism[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(s2): 724294. (in Chinese)

(编辑: 马文静)