

国内外反无人机技术发展综述

邱小剑¹, 骆博雅^{1*}, 付珍¹, 谭翔², 熊超³

(1. 江西省军民融合研究院, 南昌 330096; 2. 中国科学院无人机应用与管控研究中心, 北京 100101; 3. 东华理工大学核科学与工程学院, 南昌 330013)

摘要: 在无人机技术迅猛发展的背景下, 其在为生产生活带来便利的同时, 也带来了安全和隐私方面的威胁, 因此反无人机技术逐渐得到世界范围内的关注和重视。为研究当前国内外反无人机技术应用及发展情况, 系统梳理分析了当前反无人机关键技术, 总结了该领域发展现状, 揭示了现有技术面临的主要挑战, 并对未来的技术发展趋势进行了前瞻性分析。随着人工智能等新兴技术的发展应用, 未来反无人机技术将进一步向智能化、轻量化、集成化发展。

关键词: 无人机; 安全威胁; 反无人机技术; 无人机探测; 反制技术; 决策技术; 无人机管控
中图分类号: V279 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-1300(2024)05-0063-11
DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.20240095

An overview on development of domestic and foreign anti-UAV technology

Qiu Xiaojian¹, Luo Boya^{1*}, Fu Zhen¹, Tan Xiang², Xiong Chao³

(1. Jiangxi Institute of Civil Military Integration, Nanchang 330096, China; 2. Research Center for UAV Application and Regulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013)

Abstract: Against the backdrop of rapid development of UAV technology, it brings convenience to production and daily life, while it also poses threats to security and privacy. As a result, anti-UAV technology has gradually gained worldwide attention and importance. In order to study the current application and development of anti-UAV technology at home and abroad, the key technologies of anti-UAV are systematically analyzed. The current development status of the field is summarized. The main challenges faced by existing technologies are revealed. A forward-looking analysis on future technological trends are provided. With the development and application of emerging technologies such as artificial intelligence, future anti-UAV

收稿日期: 2024-08-26; 修回日期: 2024-09-21

基金项目: 江西省军民融合研究院“北斗+”项目子课题(2024JXRH0Y06)

作者简介: 邱小剑, 研究员。

通讯作者: 骆博雅, 研究实习员。

引用格式: 邱小剑, 骆博雅, 付珍, 等. 国内外反无人机技术发展综述[J]. 战术导弹技术, 2024(5): 63-73. (Qiu Xiaojian, Luo Boya, Fu Zhen, et al. An overview on development of domestic and foreign anti-UAV technology[J]. Tactical Missile Technology, 2024(5): 63-73.)

technology will further be developed towards intelligence, lightweight and integration.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); security threats; anti-UAV technology; UAV detection; countermeasure technology; decision-making; UAV supervision

1 引言

自21世纪以来,得益于信息技术、控制技术、通信技术等现代科技的不断进步和成熟,无人机产业经历了爆炸式的增长。无人机以其小巧的体积、轻便的质量、低廉的成本、卓越的机动性等优势,已经成为全球军事装备体系中不可或缺的一部分^[1]。与此同时,无人机技术的快速发展使得其应用领域也在不断拓宽,已经从科研和军事应用领域逐步拓宽到商业、娱乐等民用领域。据估计,2022年,全球无人机市场价值达到306亿美元,预计2030年将达到558亿美元^[2]。

然而,随着无人机的迅速发展和广泛应用,与其相关的各种安全问题也日益凸显。无人机可能侵犯机场等重要基础设施的空域^[3],或用于走私毒品等非法货物^[4],甚至成为恐怖分子的武器。据统计,2006—2023年,暴力非国家行为体(VNSA)发动了超过1122次无人机袭击,2023年的袭击次数最多,也门的胡塞武装和ISIS分别发动了431次和257次袭击^[5]。这些恶意攻击,对民用和军用领域的安全构成了重大挑战,引发了公众的担忧^[6]。因此,为了应对这些潜在威胁,反无人机技术应运而生,成为各国政府和安全机构关注的焦点。

2 国内外反无人机研究变化趋势

本研究利用谷歌学术数据库中的论文数据作为数据源,对国内外反无人机相关文献进行了检索。结果显示,自2014年以来,国内外对反无人机技术的研究兴趣日益增长,截至2023年底,已发表相关文献共计2185篇。

通过谷歌学术搜索得到的2014—2023年反无人机研究的发文数量变化如图1所示。近十年来,反无人机研究的发文数量呈现出逐年稳定的上升趋势,并在2019年实现了快速增长。这一趋势反

映出近年来无人机滥用所引发的安全问题已引起各国的高度关注。

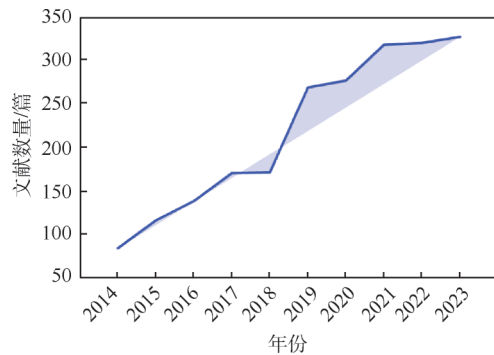


图1 2014—2023年反无人机研究发文趋势

Fig. 1 Anti-UAV research publications from 2014 to 2023

3 反无人机关键技术概况

全球范围内,无论是民用还是军用领域,都在积极推进反无人机技术的研究与开发。这些技术手段包括但不限于预警、探测、追踪、干扰、控制、捕获以及击毁等^[7]。

反无人机是一个涉及多个环节的复杂系统,它不仅需要多个传感器和系统的协同工作,还必须与操作者进行有效交互。这一过程可以划分为四个关键阶段:预防、探测、决策和反制。图2所示为反无人机处理链。

图3为反无人机技术研究框架,总结了目前反无人机处理链中预防、探测以及反制阶段的主要技术手段。

3.1 反无人机预防措施

在反无人机作战中,预防措施的有效性对于减少潜在威胁的发生至关重要。以下将重点从实际作战应用的角度对预防环节进行详细阐述。

3.1.1 法规监管

无人机的广泛应用带来了安全和隐私风险,各国通过立法对无人机进行严格监管已成为必然趋势^[8]。例如,美国国会从2012年开始颁布了多

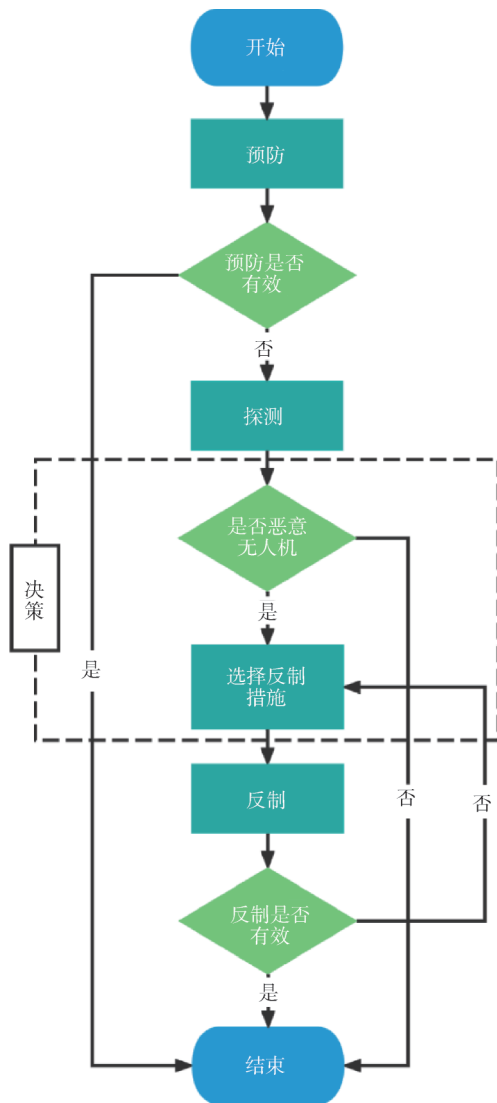


图2 反无人机处理链

Fig. 2 Anti-UAV processing chain

项法规，对无人机的分类、使用和运营进行全方位的监管^[9]。这些法规的实施不仅在民用领域产生了显著效果，更在军事和执法行动中提供了法律支持。通过明确的法律框架，各国可以对可能用于敌对目的的无人机进行有效的先期遏制，从而减少实际作战中的威胁。

3.1.2 地理围栏

地理围栏技术通过在无人机导航系统中设定特定地理界限，可有效预防因操作失误或不熟悉规定而导致无人机误入机场等敏感区域^[10]。当前全球市场上大部分商用无人机制造商，例如大疆和 Ardupilot 等，都已经开始采用地理围栏来保障

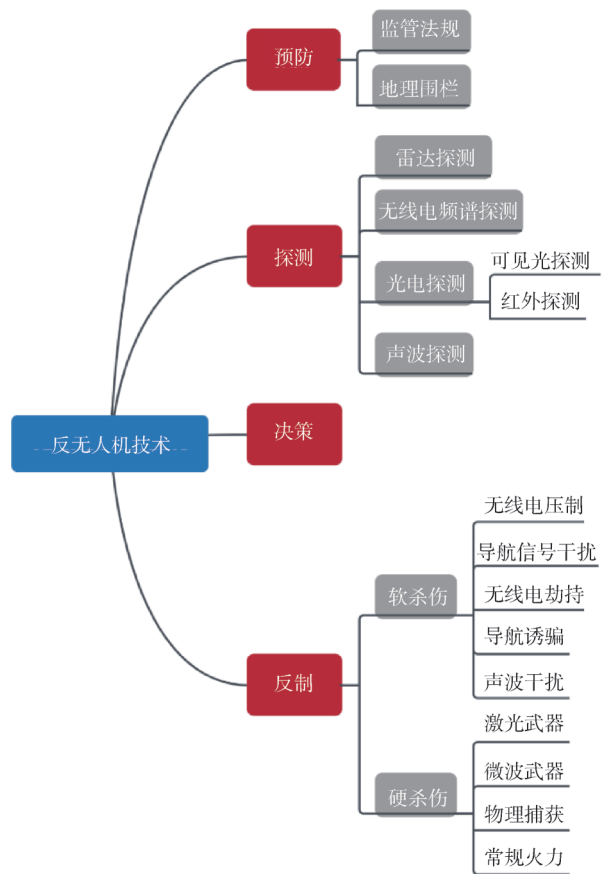


图3 反无人机技术研究框架

Fig. 3 Research framework of anti-UAV technology

空域安全^[11]。但如果无人机导航系统被关闭或者导航系统中没有设置地理围栏，地理围栏就难以产生效果。

预防不仅仅依赖于法规的制定和地理围栏技术的应用，还需要结合实际作战需求，针对性地提升预防手段的覆盖范围和反应速度。在实际作战中，预防措施需要具备更高的灵活性和适应性。例如，通过引入基于大数据分析的风险评估机制，实时监控无人机的活动并快速识别潜在威胁，在法规的框架内，进一步提升预防环节的实际作战效能。

3.2 探测技术

目前，无人机探测主要依赖以下四种技术：雷达探测、无线电频谱探测、光电探测和声波探测。表 1 详细比较了这四种无人机探测技术的优势与局限，为选择合适的探测手段提供了重要参考。

3.2.1 雷达探测

雷达探测技术主要利用了无人机机身对电磁波的反射特性来探测无人机。雷达的探测距离远、定位精度高、反应速度快^[12]，且受天气影响小，能够全天候使用^[13]，是目前机场等重要基础设施中首选的无人机探测手段。

现有的雷达系统大多针对高速移动和大型目标设计，面对正常飞行高度小于1000 m、飞行速度低于200 km/h、雷达散射截面积小于2 m²的“低慢小”无人机时，雷达探测的效果往往不会很理想。并且雷达探测技术容易受到低空飞行的鸟类、风筝等物体的干扰，造成大量虚警。

为解决上述问题，许多研究对提高雷达在低空复杂环境的目标识别能力进行了探索。自动目标识别技术（Automatic Target Recognition, ATR）是目前研究的一个方向^[14]。但雷达高昂的成本仍是其在民用领域广泛应用的一个重要阻碍。

3.2.2 无线电频谱探测

无线电频谱探测技术利用高灵敏度的无线电接收器来扫描和捕获无人机与控制站之间的无线电信号，并通过测向定位技术确定无人机及其操作者的位置^[15]。

作为一种被动检测方式，无线电频谱探测无法追踪自主飞行的无人机，也难以探测使用未知控制协议或在探测频段外的无线电信号。在城市环境中，众多电子设备和通信设施发送的无线电信号也可能降低无人机信号的识别准确性。尽管存在这些缺陷，无线电频谱探测技术仍因其成本

低廉和探测距离远的优势在军用和民用领域都得到了广泛应用。Aouladhadj等^[16]提出了一种基于无线电频谱信号的无人机ID标签识别技术，通过解码无人机ID数据包来提取实时遥测数据，准确估算无人机的位置、高度和速度。结合深度学习的无线电信号识别技术，即使在复杂电磁环境和低信噪环境下，也能够保持较高的识别准确度，这是无线电频谱探测技术未来的发展趋势^[17]。

3.2.3 光电探测

光电探测技术通过利用可见光或红外传感器捕捉目标反射或辐射的不同波段图像，然后对这些图像进行处理分析，以实现无人机的探测、识别和跟踪^[18]。光电探测主要分为可见光探测和红外探测两种方式。

可见光探测利用光学相机通过视觉特征来探测无人机，主要适用于白天，设备成本较低，但受光照和天气条件的影响较大，且无法穿透障碍物。

红外探测则利用红外相机通过探测无人机内部组件辐射的热量来进行探测。红外相机抗电磁干扰能力强，可在城市中使用，但易受环境中其他热源的干扰，因此更适合夜间使用。

光电探测两种传感器探测范围都相对较短，这迫使其在很多情况下都需要与其他的传感系统融合使用。Ojdanić等^[19]提出了使用机器人望远镜进行长距离光学无人机探测的可行性分析，但这种方法会显著延长系统的反应时间。

表1 无人机探测技术比较

Table 1 Comparison of UAV detection technologies

探测技术	优点	缺点
雷达探测	1. 受天气影响小,能全天候探测 2. 探测距离远、定位精度高、反应速度快 3. 能同时探测跟踪多个目标	1. 难以探测低空飞行、慢速移动或悬停的无人机,虚警率高 2. 自动化程度低,依赖人工操作 3. 获取安装成本高
无线电频谱探测	1. 探测距离远、定位精度高 2. 获取安装成本较低 3. 能同时探测到无人机及其操作者的位置	1. 只能被动探测,无法探测自主飞行的无人机 2. 难以破解加密无线电 3. 只能探测频谱特征库内已有的频段,需持续更新数据库
光电探测	1. 不受光照条件影响,昼夜都可使用 2. 能够对目标进行拍摄取证,以便后续的分析	1. 探测距离短、探测范围小 2. 受天气条件(云、雨、雾等)影响大
声波探测	1. 获取安装成本低 2. 隐蔽性好	1. 探测距离短 2. 受环境噪声影响大,只能在低噪声环境使用

3.2.4 声波探测

声波探测技术通过声波传感器捕捉无人机在飞行过程中产生的声波信号, 通过将其与预先建立的音频指纹数据库进行匹配, 从而实现对无人机的监测和识别。

声波探测技术具有成本低、隐蔽性好和实时性高等优点。然而, 声波在空气中传播时会随着距离的增加而衰减, 限制了声学传感器的探测范围。因此, 声波探测技术通常适用于低噪声且目标距离较近的应用情况。Fang等^[20]开发了一种增强型光纤声学传感器, 展示出高测量灵敏度以及高保真语音恢复能力, 能够实现精确的无人机定位。这表明, 即使现阶段声波探测技术在实际应用中存在限制, 但通过适当的特征提取并结合深度学习算法, 其仍有在复杂环境下实现对无人机精准探测和识别的潜力。

3.2.5 多传感器融合探测

使用单一探测方法不可避免地会存在探测盲点, 而多传感器融合探测技术能够克服单一传感器在某些特定场景的局限性, 显著提高探测系统的鲁棒性和准确性。常见的组合有雷达+光电探测、光电+声波探测、光电+无线电频谱探测等。

雷达和光电传感器的组合拥有极好的互补性。雷达提供全向广域扫描, 但无人机识别率低且扫描频率低, 光电传感器能够识别和追踪目标, 但

探测距离短且无法对目标区域进行动态探测, 这种组合动态地弥补了彼此的缺陷。美国的M-LIDS系统就是雷达光电融合探测的典型应用^[21]。Lindner等^[22]研发了一种结合雷达和光学传感器的无人机检测辅助系统MODEAS, 可以自动检测和跟踪天空中几公里范围内的无人机。

将光学和声学传感器相结合是一种传统的传感器融合技术, 可以提高检测精度。通过声学传感器捕获无人机发出的噪声信号, 测量目标的大致方向, 然后通过光学传感器精确定位追踪。Ding等^[23]提出了一种基于声学 and 光学传感器融合的系统, 能够实现对无人机的大范围探测和高精度三维跟踪。

光电和无线电频谱探测的组合相当于光电和雷达探测组合的低成本解决方案, 它能在成本低廉的情况下保持较高的探测精度, 同时实现对无人机的识别和跟踪。Aledhari等^[24]提出了一种基于人工神经网络的无人机探测系统, 通过神经网络算法融合无线电频谱数据以及图像数据, 实现了75%的验证准确率。

3.3 反制措施

为保障重要区域的安全, 当探测到具有威胁的无人机后, 需要对其采取有效的反制措施。根据是否对无人机造成物理损坏, 无人机反制技术主要可以划分为两大类: 软杀伤技术和硬杀伤技术。表2对各种无人机反制技术进行了比较。

表2 无人机反制技术比较

Table 2 Comparison of UAV countermeasure technologies

反制技术		优点	缺点
软杀伤	无线电压制	成本低, 操作简单, 距离远	无法反制自主飞行无人机, 会影响周围其他无线电信号, 对人体有辐射
	无线电劫持	不会产生损伤	难以破解通信协议, 实现难度大
	导航信号干扰	成本低, 距离远, 效率高	无法反制手动飞行无人机, 对搭载惯导系统的无人机影响小, 会影响周围其他导航信号
	导航诱骗	距离远, 不会产生损伤	会影响周围其他导航信号
	声波干扰	能同时打击多个目标	成本高, 距离短
硬杀伤	激光武器	速度快, 精度高, 打击效果好	成本高, 易受天气影响
	微波武器	兼具软硬杀伤, 速度快, 受天气影响小, 能同时打击多个目标	难以精确控制打击范围, 易产生误伤
	物理捕获	高灵活性, 不会产生损伤	距离短, 操作难度大, 稳定性低
	常规火力	反制距离远, 打击精度高, 打击效果好	难对抗无人机集群

3.3.1 软杀伤技术

无人机电软杀伤技术是一种非物理性的反无人机手段,通过干扰、破坏或控制无人机的导航、通信和其他关键系统,达到迫使无人机降落、返航或失效的目的,主要包括无线电压制、无线电劫持、导航信号干扰、导航诱骗和声波干扰五种。

无线电压制技术的基本原理是识别并获取无人机遥控信号的特定频率,发射相同频率的干扰波,阻断无人机与地面站之间的通信链路^[25]。现代无人机普遍采用自适应跳频和扩频技术来增强对外部干扰的抵抗力。当前的无线电压制设备通常采用以下两种方法来应对:(1)动态频率干扰技术。通过跟踪无线电信号的变化,快速完成对无线电跳变频段的捕获、分析和识别,发射相应频段的无线电信号进行精准干扰。(2)宽频带干扰方法。在无人机遥控信号的常见频段,如2.4 GHz和5.8 GHz,施加大功率的全面频段宽带阻塞干扰。无线电压制技术是目前市面上应用最广泛的反制手段之一,广泛应用于民用和军用场景。例如美国的Liteye反无人机系统^[26]、俄罗斯的Mosquito Repellent电子站系统^[27]等。然而,这种手段的辐射较大,对人体有害,并且容易对周围的无线电信号产生影响。

无线电劫持技术通过截获、分析并伪造目标无人机与控制站之间的无线电信号,然后以更高的功率向目标无人机发送伪造的控制信号来覆盖原有信号,从而夺取目标无人机的控制权^[28]。其优势在于能够直接控制目标无人机,且不会对周围无线电信号造成干扰。然而,随着无人机通信技术的提升和加密算法的进步,无人机通信的安全性不断增强,使得破解通信协议变得更加困难。

导航信号干扰技术通过向目标无人机发送特定频率的干扰波形,与无人机接收的卫星导航信号产生叠加效应,从而导致无人机无法进行精确定位^[29]。然而,目前许多无人机都装备有惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS),即使在卫星导航信号受到干扰的情况下,无人机也能利用INS维持一定程度的自主飞行能力,这使得导航信号干扰技术的应用范围受到了限制。

导航诱骗技术通过捕获无人机的导航信号并

进行特定的时间和多普勒效应调制,生成虚假信号以误导无人机飞往错误的位置或返回起点^[30]。通过在重要区域广播虚假的导航信号,可以诱导入侵无人机飞离该区域^[31]。然而,这种手段也可能影响到范围内其他正常飞行无人机的导航信号。

声波干扰技术利用同频共振的原理,通过发射与无人机内部陀螺仪相同频率的超声波引发共振,影响其正常工作。实现声波干扰需要功能强大的超声波发射器,导致其成本较高,且声波强度随着距离增加而衰减的特点也限制了其反制距离^[32]。这些因素使得声波干扰技术在短期内难以广泛应用。

3.3.2 硬杀伤技术

硬杀伤技术是反无人机手段中的一种物理性攻击方式,它主要通过物理手段拦截或破坏无人机,使其丧失飞行能力,主要包括激光武器、微波武器、物理捕获以及常规火力四种。

激光武器通过发射高能激光束直接照射无人机,依靠其高能量来烧毁无人机的壳体或关键部件,导致无人机的结构损坏或电子系统失效。激光武器的优势在于其发射速度快、打击精度高、反制效果显著以及转移火力快,是目前反无人机作战中最具技术可行性的武器。美国的ATHENA激光武器系统^[33]、俄罗斯的Peresvet激光武器系统^[34]以及中国的“沉默猎手”防空系统^[35]等都采用了激光武器对无人机进行打击。然而,激光武器仍存在一些短板,例如受天气条件影响较大,在雨、雪、雾等复杂天气条件下,其反制效果可能会受到影响^[36]。

微波武器通过发射高功率、宽角度的倒锥形高强度电磁脉冲,利用微波衍射和无人机内部电路的耦合作用,扰乱无人机的控制系统或烧毁其天线、电路元件、导航和通讯系统^[37]。微波武器结合了软硬杀伤能力,具备同时打击多架无人机的能力,能够有效对抗无人机集群^[38],且攻击速度快,受天气影响小^[39],具有突出的军事应用前景,是目前各国无人机反制技术研究的重要领域之一。美国对高功率微波武器的研究高度重视,逐渐将其推广并应用于实战中,研发了Leonidas多目标反电子系统以及THOR反无人机系统等^[40]。

然而,微波武器也存在一些缺陷,由于波束宽,在打击目标时难以精确控制打击范围。此外,微波武器需要强大的电源支持并且通常尺寸较大、质量较大,这限制了其灵活部署能力。

物理捕获技术旨在使用物理手段完好无损地拦截和捕获无人机,主要方法包括鸟捕获、网捕获和无人机捕获三种方式。物理捕获技术环保且灵活,无损害风险,但鸟捕获训练成本高,且存在不确定性,网捕获的射程和操作技能要求限制了其应用,无人机捕获也需要较高的操作技巧和设备支持。

常规火力手段涉及使用枪支、高射炮、防空导弹等传统防空武器来直接摧毁无人机。技术具有高成熟度,能够实现远距离打击,打击精度高,具有显著的打击效果,尤其适用于对飞行高度较高的大型无人机的有效打击。然而,此手段难以应对多个目标,无法满足针对无人机集群的反制需求。

3.4 反制效果评估

反制措施实施结束后,对于反制效果的评估也是反无人机处理链中的重要环节,其结果能够反映采取的反制措施在当下场景的适用程度以及反制效能,从而让操作员判断是否需要再进行再反制或更换反制措施,并在反制结束后对评估较低的方面进行改进,以提高反制技术整体效能。

当前国内外对于无人机反制效果评估的相关研究十分有限,国际上也并没有形成统一的评估体系。比较常见的评估指标有反制成功率、反制时间^[41-42]以及反制结果^[43-44]等。

反制成功率是能够最直观体现采取无人机反制措施在当下场景的有效性的指标,在模拟实验或者实战中对探测到的无人机进行反制,通过计算一定次数的反制操作中无人机不再对受保护对象构成威胁的有效行动次数来评估反制措施在该场景下对无人机成功反制的概率。

评估的另一个重要参数是有效反制无人机所需的时间。即从开始反制到成功反制所需的时间。如果反制时间过长,则可能会导致错过最佳反制时机,造成严重损失。例如,反制时间过长导致装载炸药的无人机足够靠近目标,导致其爆炸造

成损失,或者导致无人机已经采集到足够多用于情报任务的图像。

由于各种反制措施原理的差异,对于无人机的反制效果也有区别,可能会出现坠落、摧毁、悬停、返回、着陆等结果。根据反制结束后目标无人机的实际状态与期望状态之间的差异,反制结果的评估可分为三种情况:彻底反制、部分反制、无效反制。反制结果这一指标能够较直观地描述采取的反制措施在当下场景的适用程度。

3.5 反无人机决策

在探测到入侵的无人机后,操作员需要根据目标无人机的详细信息以及当下场景来制定反制策略,决定对入侵无人机采取何种处置手段。主要包括两部分内容:恶意无人机的识别、反制措施选择。

为对无人机进行识别管理,一些国家制定了相关无人机登记制度,中国在2023年发布的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》中规定所有进行飞行活动的无人机都需要对其类型、型号、唯一产品识别码等信息进行登记^[45];美国早在2019年就制定了无人机系统远程ID标准规范,允许政府和民间根据无人机的远程ID识别无人机系统^[46]。操作员可以利用探测手段对无人机的型号、远程ID等信息进行识别,然后根据其登记情况判定其是否为恶意无人机。

如果确定目标无人机具有威胁,就需要操作员根据目标无人机类型以及当下场景选择最适合的反制措施。选择合适的反制措施不仅能够确保对目标无人机进行有效反制,还能够防止反制技术可能引发的次生灾害。一般来说,硬杀伤技术主要应用于军事场景,适合对军用中大型无人机以及集群无人机进行打击,软杀伤技术主要应用于民用场景,适合反制低慢小无人机。无线电压制技术凭借其成本低、反制距离远以及具备集群无人机打击能力的优势,使得其作为一种软杀伤手段仍能够广泛应用于军事场景中。物理捕获虽然是一种硬杀伤手段,但其反制距离短,只适合对低慢小无人机进行反制,因此在军事场景中应用有限。表3对各种反制技术的适用场景以及目标无人机类型进行了对比,为反无人机决策中选

择合适的反制手段提供了参考。

反无人机决策是一个复杂的过程,在实际情况中,很多时候反制场景都会随着周围环境的变化以及目标无人机飞行活动的变化而发生改变,仅依靠操作员自身经验进行决策就显得捉襟见肘。由人工智能技术支持的反无人机决策可以成为对抗无人机的有效方法,人工智能可以在模拟中接受训练,通过不断学习以适应新的威胁,根据具体的环境和情况做出自主决策,极大提升决策的效率以及准确性。国内外均有相关研究在探索利用人工智能辅助反无人机决策的可能性。Mehta等^[47]结合传统的信号处理和机器学习,提出了一种人机协作框架,用于提高反无人机操作的效率和准确性;孙学章等^[48]提出基于卷积神经网络的反无人机蜂群智能决策算法,实现对无人机蜂群拦截方式的智能决策,且具有较高的决策精度。

4 反无人机领域面临的挑战

4.1 智能自主程度低

当前,反无人机技术尚未实现高度智能化,主要探测和反制手段依赖人工操作,因此操作人员的熟练度对探测和反制效果有显著影响,这可能导致效率降低和误操作的风险,如对合法无人机的错误反制或选择不当的反制手段,可能引起无效操作或次生灾害。

在军事应用场景中,智能化水平的不足使得反无人机系统难以适应战场上复杂多变的环境和

快速变化的战争态势^[49],这可能导致系统在应对无人机威胁时处于被动。随着无人机技术在智能避障、抗干扰和隐身材料等方面的进步,对反无人机技术的智能化提出了更高的要求。

4.2 效费比低

效费比低是当前制约反无人机技术发展的主要因素^[50]。目前,大多数无人机探测和反制技术未能有效平衡性能与成本之间的关系。

雷达探测、激光武器等高性能手段的设备购买、安装和运营成本高昂,需要大量资金支持,同时需要具备相当专业技术的操作员来充分发挥其效能。这导致除了军队和一些重要单位外,其他组织和单位很难具备这些设备的安装和运营条件。而无线电频谱探测和压制等低成本手段在面对具有自主飞行能力的无人机时效果有限,且可能对周围无线电信号造成干扰或对人体产生有害辐射。

此外,无人机技术的发展降低了无人机的成本,而一套完整的反无人机系统则可能需要高昂的费用,这种成本上的不平衡使得反无人机技术在应对无人机安全问题时面临挑战,并且成为其发展中的主要困境之一。

4.3 技术发展迟滞

尽管近几年来反无人机技术的研究和发展速度逐年稳步增长,但与无人机技术相比,反无人机技术由于起步晚、受重视程度低、应用场景有限等因素,其发展速度远远落后于无人机技术。

自21世纪起,无人机技术日趋成熟,无人机体积趋小、速度趋快、飞行高度攀升。然而,反

表3 反制技术应用场景以及应用模式

Table 3 Application scenarios and modes of countermeasures technology

反制技术	适用场景	目标无人机类型
软杀伤	无线电压制	军事应用场景、电力、石油、天然气等关键基础设施、国境线附近等
	无线电劫持	重大活动、机场周边、重要交通枢纽、城市区域等
	导航信号干扰	
	导航诱骗	
声波干扰	办公区、郊区等低噪声环境	低慢小无人机、集群无人机
硬杀伤	激光武器	军事应用场景
	微波武器	军事应用场景
	物理捕获	军事应用场景、重大活动、机场周边、重要交通枢纽、城市区域等
	常规火力	军事应用场景

无人机技术的发展却未能与之同步。对于小型、高速、高飞的无人机,即便借助雷达探测、激光武器等高效手段,实现有效探测与精确打击仍面临挑战。同时,无人机通信技术的进步提升了无线电安全性,使得破解通信协议愈发困难,这导致无线电频谱探测、压制、劫持等低成本手段的适用性逐渐减弱。这种发展滞后导致现有反无人机技术在保护重要区域和关键设施空域方面的能力受限。

5 未来反无人机技术展望

5.1 结合人工智能的反无人机技术研发

人工智能技术,作为当今科技领域的翘楚,正以其革命性的力量推动着各行各业的创新与转型,极大地提升了生产效率和生活品质。将这一前沿技术应用于反无人机领域,无疑代表了一种新兴且高效的对抗手段。相较于传统依赖人工干预的反无人机技术,人工智能赋予了反无人机系统更高的智能化水平,可以显著提升探测、决策与反制效率。

通过深度强化学习,人工智能能够模拟大量的反无人机场景,从而精准区分目标无人机与周围的物体,甚至能精准辨识不同无人机之间的细微差别。这种卓越的识别和分类能力使得反无人机系统能够精准锁定目标。同时,经过训练的人工智能能够不断优化反无人机系统的决策部署,根据实时情形选择最合适的反制手段,并精准控制反制设备实施打击。在决策准确性、操作反应速度和精准度方面,人工智能展现出的潜力均超越了经验丰富的操作员。

目前,已有诸多研究致力于探索人工智能技术与反无人机技术各个环节的融合,尽管这些技术尚处于构想与试验阶段^[51-54]。但是,人工智能的引入无疑将为反无人机技术在与无人机的较量中带来巨大帮助。因此,结合人工智能技术必将成为未来反无人机技术发展的重要趋势之一。

5.2 移动反无人机装备轻量化升级

微型化是无人机技术的重要发展趋势,特点

在于体积小、速度快、隐蔽性强且灵活。而传统反无人机设备大多固定于地面,缺乏灵活性,探测和反制距离受限。继续依赖传统设备对抗无人机,将导致反无人机技术的效费比问题加剧。

为解决这一问题,开发轻量化、高灵活性的高性能反无人机设备成为未来的重要发展方向。目前,一些新型反无人机设备已经开始投入使用,如便携式干扰枪和车载察打结合反无人机系统^[55]。这些设备在灵活性上有所提升,其可移动性一定程度上解决了距离限制问题,但仍存缺陷。如干扰枪依赖人工操作,可能影响准确性;车载系统受限于地面,对高空无人机探测反制效果有限。

Rudys等^[56]提出将低成本的小型船用雷达嵌入固定翼无人机的机翼中,从而能够在空中对目标无人机进行全方位探测。美军曾使用一架“郊狼”无人机装载高功率微波武器,实现了对10架无人机的成功拦截^[57]。结合无人机的高灵活性,为解决现有探测反制设备灵活性低、距离有限等问题提供了一种有效的解决方案。

未来,通过将更多的无人机探测和反制设备轻量化、小型化,并集成到无人机等高灵活性的移动平台上,能够在一定程度上解决现有反无人机技术效费比低的问题,进一步推动反无人机技术的发展。

5.3 一体化协同反无人机系统构建

随着无人机技术的快速发展,其在军事作战场景的影响力也在迅速增长。目前,无人机作战已经进入到蜂群作战阶段,无人机蜂群技术在军事领域的应用对反无人机技术提出了更为严峻的考验。传统的单个无人机探测和反制手段在应对由多个不同型号、不同功能的无人机组成的蜂群时,已显露出其局限性。因此,开发集决策指挥、侦察探测、反制拦截功能于一体的协同反无人机系统变得尤为重要。

一体化协同反无人机系统通过整合多种探测和反制技术,实现从探测到反制阶段的无缝对接。在探测阶段,系统利用多传感器协同以及多源数据融合技术,实现对空域的全方位、全天候监控,并精确探测识别不同型号无人机。在无人机反制

阶段,结合人工智能技术,根据不同打击目标以及不同反制场景进行智能决策,选择最合适的反制手段,集成软硬杀伤于一体,形成一个全方位、多层次的智能反制网络,实现对无人机蜂群的有效对抗。

多手段融合的一体化协同反无人机系统将成为未来反无人机技术的重要研究方向,它通过将多种探测反制手段结合,将不同技术互补以提升系统整体效能,从而弥补反无人机技术与无人机技术发展速度间的差距,为未来对抗无人机威胁提供了一种有效的解决方案。

6 结束语

综上所述,无人机技术在军用和民用领域带来的安全隐私威胁在当下呈现逐渐复杂化和多元化的趋势,这对反无人机技术提出了更高和更迫切的要求。现有反无人机技术仍存在技术手段单一、效费比低、智能化程度低等局限。而随着人工智能技术等新兴技术的发展,国内外反无人机研究开始更多地关注将这些技术与反无人机解决方案相结合,不断提高无人机探测反制手段的效能,为反无人机技术在未来与无人机的对抗以及对空域的保护中提供技术支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 李晓文. 小型无人机在战术空中控制中的应用分析[J]. 飞航导弹, 2020 (5): 49-53.
- [2] Drone Industry Insights. Industry leading drone market analysis 2022-2030 [EB/OL]. 2024-05-24. <https://droneii.com/drone-market-analysis-2022-2030>.
- [3] Lykou G, Moustakas D, Gritzalis D. Defending airports from UAS: A survey on cyber-attacks and counter-drone sensing technologies [J]. Sensors, 2020, 20 (12): 3537.
- [4] Turkmen Z, Kuloglu M. A new era for drug trafficking: Drones[J]. Forensic Sci. Addict. Res, 2018, 2: 114-118.
- [5] Homeland Security Today. Drones as a terrorist tool: Latest trends in who is using them and how [EB/OL]. 2024-08-11. [https://www.hstoday.us/subject-matter-areas/counterterrorism/violent-non-state-actors-use-of-](https://www.hstoday.us/subject-matter-areas/counterterrorism/violent-non-state-actors-use-of-armed-unmanned-aerial-vehicles-uavs-latest-uses/)
- [armed-unmanned-aerial-vehicles-uavs-latest-uses/](https://www.hstoday.us/subject-matter-areas/counterterrorism/violent-non-state-actors-use-of-armed-unmanned-aerial-vehicles-uavs-latest-uses/).
- [6] Golphin III A N, Offord B D. Counter-Unmanned aerial systems (C-UAS) interoperability in the global geopolitical environment [D]. Monterey, USA: Naval Postgraduate School, 2021.
- [7] 钟梁, 孙丽. 关于反无人机技术手段现状分析[J]. 大众标准化, 2023 (23): 58-60.
- [8] 王锡柱. 无人机分类监管: 国际经验与中国路径[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2022, 35 (2): 142-150.
- [9] 刘静. 民用无人机滥用风险监管: 美国实践及其启示[J]. 时代法学, 2022, 20 (5): 103-111.
- [10] 谢东岑, 梁晓龙, 张佳强, 等. 无人机地理围栏越界探测算法改进与分析[J]. 航空工程进展, 2020, 11 (2): 207-213.
- [11] 付其喜, 梁晓龙, 张佳强, 等. 自主飞行无人机地理围栏算法设计与实现[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53 (5): 167-175.
- [12] 蒋冬婷, 范长军, 雍其润, 等. 面向重点区域安防的无人机探测与反制技术研究[J]. 应用科学学报, 2022, 40 (1): 167-178.
- [13] Knott E F, Schaeffer J F, Tullely M T. Radar cross section [M]. Southampton, UK: SciTech Publishing, 2004.
- [14] 李德仁, 龚江昆, 闫军, 等. 基于雷达自动目标识别技术的反无人机雷达[J]. 无线电工程, 2024, 54 (4): 765-779.
- [15] 无人机探测反制无线电频谱技术应用分析[J]. 中国安防, 2024 (3): 33-38.
- [16] Aouladhadj D, Kpre E, Deniau V, et al. Drone detection and tracking using RF identification signals[J]. Sensors, 2023, 23 (17): 7650.
- [17] 陈唯实, 黄毅峰, 卢贤锋. 多传感器融合的无人机探测技术应用综述[J]. 现代雷达, 2020, 42 (6): 15-29.
- [18] Müller T. Robust drone detection for day/night counter-UAV with static VIS and SWIR cameras[C]. Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR VIII. Anaheim, USA, 2017.
- [19] Ojdanić D, Sinn A, Naverschnigg C, et al. Feasibility analysis of optical UAV detection over long distances using robotic telescopes [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59 (5): 5148-5157.
- [20] Fang J, Li Y, Ji P N, et al. Drone detection and local-

- ization using enhanced fiber-optic acoustic sensor and distributed acoustic sensing technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 41 (3): 822-831.
- [21] 韩长喜, 邓大松, 陈卓, 等. 低慢小无人机威胁下的野战防空系统发展研究[J]. *战术导弹技术*, 2023 (5): 151-156.
- [22] Lindner A, Müller T, Sommer L W, et al. MODEAS - a counter-UAV system with optical and radar sensors [J]. *Preprints*, 2024.
- [23] Ding S, Guo X, Peng T, et al. Drone detection and tracking system based on fused acoustical and optical approaches [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5 (10): 2300251.
- [24] Aledhari M, Razzak R, Parizi R M, et al. Sensor fusion for drone detection [C]. 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). Helsinki, Finland, 2021.
- [25] 齐鹏文, 施志刚, 郭培恒, 等. 基于无线电的“低慢小”无人机反制技术研究[C]. 第十六届全国信号和智能信息处理与应用学术会议, 北京 2022-12-17.
- [26] Highpoint Aerotechnologies Liteye [EB/OL]. 2024-08-01. <https://www.highpointaerotech.com/liteye>.
- [27] 孙海文, 于邵祯, 周末, 等. 反无人机蜂群作战指挥控制系统[J]. *指挥控制与仿真*, 2023, 45 (2): 31-37.
- [28] 张珣, 唐艳, 罗士伟. 国外无人机反制系统发展概况[J]. *数字通信世界*, 2023 (3): 1-4.
- [29] 陈伟. “低慢小”无人机反制装备与理论探析[J]. *河南科技*, 2022, 41 (2): 10-13.
- [30] 张皓, 吴虎胜, 彭强. “低慢小”无人机反制装备及关键技术发展需求综述[J]. *航空兵器*, 2022, 29 (5): 43-52.
- [31] Gaspar J, Ferreira R, Sebastião P, et al. Capture of UAVs through GPS spoofing [C]. 2018 Global Wireless Summit (GWS). Chiang Rai, Thailand, November 25-28, 2018.
- [32] Castrillo V U, Manco A, Pascarella D, et al. A review of counter-UAS technologies for cooperative defensive teams of drones [J]. *Drones*, 2022, 6 (3): 65.
- [33] 黄明锐, 赵国林, 潘晓东, 等. 国外反无人机蜂群研究现状及发展趋势[J]. *舰船电子工程*, 2023, 43 (7): 1-3.
- [34] 周新人, 卢盈齐, 刘学亮, 等. 国外定向能防空武器抗击无人机蜂群研究现状分析及思考[J]. *飞航导弹*, 2021 (7): 91-95.
- [35] 刘文学, 王涛, 李赵健伟, 等. 反无人机装备发展现状及趋势[C]. 2022年无人系统高峰论坛(USS2022). 西安, 2022-09-25.
- [36] 张珣, 张静, 胡中雨. 国外无人机反制技术发展探析[J]. *数字通信世界*, 2023 (4): 4-6+9.
- [37] 易劲松, 屈长虹, 张秦岭. 定向能武器在反无人机蜂群作战中的运用探析[J]. *国防科技工业*, 2022 (12): 58-60.
- [38] 张秦岭, 魏金涛. 浅析定向能武器在要地防御反无人机集群中的应用[J]. *国防科技工业*, 2021 (12): 53-55.
- [39] 姚庆阳, 辜霄, 王辉, 等. 高功率微波无人机反制系统研究[J]. *真空电子技术*, 2024 (1): 51-55.
- [40] 周末, 孙海文, 王亮, 等. 国外反无人机蜂群作战研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2023, 45 (2): 24-30.
- [41] 伍瀚宇. 无人机反制系统处置效果分析及二次灾害评估研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- [42] Łukasiewicz J, Kobaszyńska-Twardowska A. Proposed method for building an anti-drone system for the protection of facilities important for state security [J]. *Security and Defence Quarterly*, 2022, 39 (3): 88-107.
- [43] 程擎, 伍瀚宇, 吉鹏, 等. 一种民用无人机反制系统评估方法[J]. *电讯技术*, 2022, 62 (9): 1231-1239.
- [44] 刘小旭, 万子平. “低慢小”无人机高效费比反制技术的研究[J]. *中国军转民*, 2023 (19): 54-56.
- [45] 国务院. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. 2024-05-24. https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10586/202307/content_6893000.html.
- [46] ASTM. F3411-19 Standard Specification for Remote ID and Tracking [EB/OL]. 2024-07-30. <https://www.astm.org/f3411-19.html>.
- [47] Mehta V, Kaza K, Dadboud F, et al. Enhancing counter drone operations through human-ai collaboration: A hierarchical decision-making framework [C]. 2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC). Barcelona, Spain, 2023.
- [48] 孙学章, 时晨光, 周建江. 基于卷积神经网络的反无人机蜂群智能决策算法[J]. *战术导弹技术*, 2024 (3): 154-162.
- [49] 陈丽蓉, 罗俊松, 宁进, 等. 无人机集群智能反制技术的研究现状及展望[J/OL]. 2024-04-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1097.TN.20231227.1636.014.html>.
- [50] 吕鉴衡. 无人机反制领域面临的问题及对策[J]. *武警学院学报*, 2021, 37 (10): 44-48.