



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

低空无人机集群反制概述

第2章



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

CONTENTS



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

01 低空无人机集群 特点

02 低空无人机集群安防挑战

03 低空无人机集群反制 基本内涵

04 低空无人机集群反制技术 特点



PART 01

低空无人机集群 特点

低空无人机集群特点



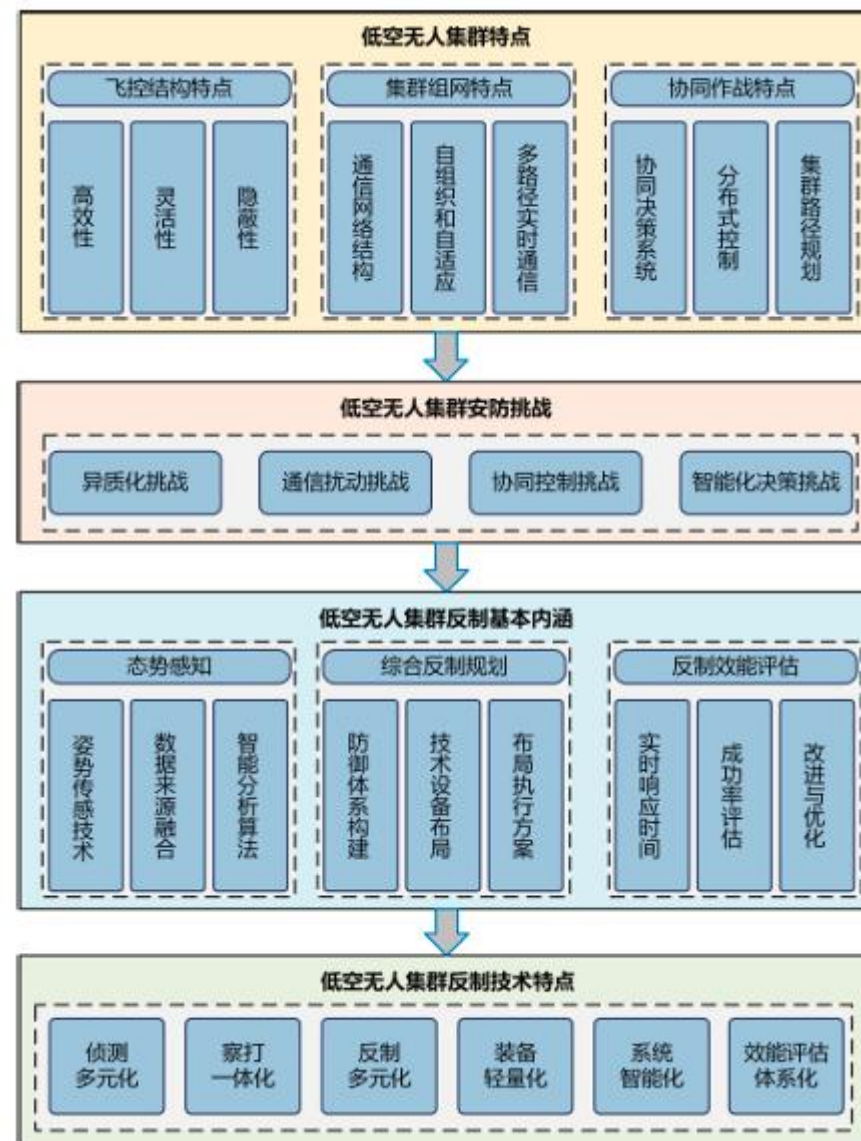
西北工业大学
NORTH CHINA UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

低空无人机集群是由多个无人飞行器组成的协同系统，其特点主要体现在飞控结构、集群组网和协同作战3个方面。

在飞控结构方面，低空无人机集群采用先进的分布式飞行控制系统，使每个飞行器具备自主飞行和实时响应的能力，实现高效的任务执行。

在集群组网方面，通过强大的通信系统，集群中的飞行器能够实时共享信息，形成高效的网络结构，提高整体系统的协同性。

协同作战是低空无人机集群的核心特点之一，集群成员通过紧密协作，执行各种任务，例如搜索、监视和打击等，充分发挥集群的协同优势。



飞控结构特点



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

高效性

低空无人机集群的飞行控制单元 (FlightControlUnit, FCU) 是保障整个系统高效性的关键组成部分。通过分布式控制的设计, 每个无人机都搭载独立的FCU, 实现了无人机集群高度的分散化和自主性, 使每个飞行器能够在任务执行中独立做出实时决策, 不需要中央指挥。

灵活性

低空无人机集群的灵活性得益于其先进的传感器集成方案, 这一设计在多个方面提高了集群系统的适应能力和响应速度。集群中的每个无人机搭载了丰富多样的传感器, 涵盖了摄像头、雷达、GPS、惯性测量单元等, 形成了全面而多维的环境感知网络。这样多元的传感器组合为系统提供了更加全面深入的环境数据, 使集群能够更灵活地应对各类任务。

实时数据反馈

为集群中的每架无人机提供即时的环境信息。这种实时反馈机制使无人机能够迅速调整飞行策略, 适应环境的动态变化。在低空环境中, 风速、气温、障碍物位置等关键数据的即时获取, 使集群系统能够在不同条件下保持充分的灵活性, 保障任务的高效执行。

| 飞控结构特点

智能感知和处理

通过实时的环境感知，无人机能够灵活调整飞行路径，规避障碍物，确保在复杂环境中任务的高效执行。这种对抗复杂环境的能力提高了系统的适应能力和应变能力，使无人机集群在各种极端条件下都能够保持高度的灵活性。

自适应机制

传感器集成方案的设计使无人机能够根据任务需求选择性地调用特定传感器，实现定制化的环境感知。这种自适应机制允许无人机根据不同任务的特性进行自主调整，从而更好地满足多样的任务需求，提高系统的灵活性。

隐蔽性

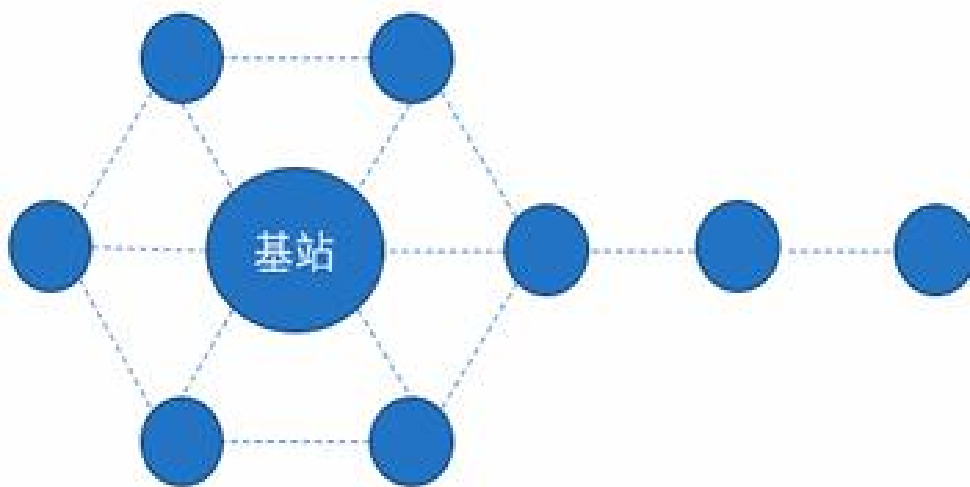
“低慢小”是一种无人机的飞行特性，是指无人机飞行时低空、低速、小型的特点。“低慢小”使无人机能够更有效地躲避探测，降低了被敌方侦测和攻击的风险，进而增强了无人机集群在敏感任务中的隐蔽性。

集群组网特点—基于Mesh网络结构的通信拓扑



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

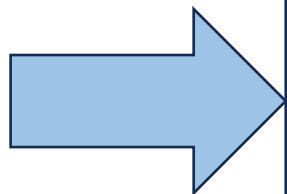
Mesh网络结构作为一种分布式的通信拓扑结构，在低空无人机集群中得到了广泛应用。相比于传统的星形或总线形拓扑，Mesh网络通过允许节点之间直接通信，构建了一种自组织的高度灵活的通信体系。这种结构以其强大的适应性和容错性在各种网络结构中脱颖而出，为低空无人机集群的通信提供了理想的解决方案。Mesh网络的核心原理在于每个节点都与其他节点直接连接，形成一个网状结构。这种直接连接的方式消除了对中央控制单元的依赖，使节点之间能够相互通信，数据能够通过多条路径传输，进而保障了集群系统的稳定性和可靠性。



I 集群组网特点—自组织和自适应性



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

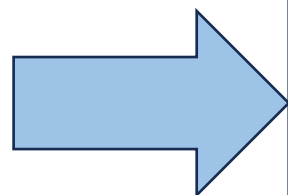


Mesh是一种自组织网络 (Low Altitude Unmanned Aerial Vehicle Swarm, LAAVS) , 具有独特的特点, 旨在实现多飞行器之间的协同操作、信息共享和任务协同。这种网络的主要特点之一是其高度自适应性, 通过飞行器之间的实时通信和智能算法, 实现在面对环境变化时任务需求的实时调整。自组织网络的实现是基于分布式计算和通信, 这使集群中的每架飞行器都能够自主感知、自主决策, 并及时做出相应响应。

集群组网特点—多路径实时通信



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



多路径通信的**鲁棒性**和**可靠性**是其显著优势之一。在低空环境中，无人机可能面临各种挑战，例如信号干扰、地形阻挡等，可能导致某些通信路径受到影响。通过允许数据历经不同路径传输，多路径通信提高了集群通信的鲁棒性，即使某些路径受到干扰或中断，系统仍能够选择其他可用路径，保障集群正常通信。

I 协同作战特点—协同决策系统

协同决策系统

低空无人机集群协同决策系统是一项复杂而精密的技术体系，其核心目标在于通过有效的信息交互和智能决策，使集群中的各个无人机节点能够以协同一致的方式执行任务，最大程度地发挥集群整体性能。该系统的首要特点在于实时协同，各个节点之间通过高效的通信手段共享感知数据、环境信息，以及任务状态。通过这种实时协同，集群中的无人机能够相互了解彼此的状态和动态，从而实现更为智能和适应性强的决策制定。

分布式控制

分布式结构没有一个确定的控制中心（中心节点），各架无人机在集群系统中的地位是平等的，它们通过合作的方式协同完成任务。在分布式控制结构下，全局控制问题被分解成多个子问题并由各架无人机独立解决。各架无人机具有一定的自主控制与决策能力，能够根据拓扑网络的连通情况与其他无人机进行信息交互，在分布式协同控制协议的作用下，实现无人机集群系统的整体控制。分布式结构具有实时性好、鲁棒性强、计算量低、灵活性高等优点。

集群路径规划

低空无人机集群路径规划是实现无人机协同飞行的关键技术之一，也是当前的研究热点之一。无人机集群路径规划充分考虑无人机的飞行能力、环境条件、任务目标，可为无人机集群规划最优飞行路径，为后续的无人机集群飞行提供基础保障。

低空无人机集群 安防挑战

PART
02

低空无人机集群安防挑战



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

低空无人机集群技术的崛起已经在多个领域引起了巨大的变革。无人机、无人车、无人船等无人系统的集群协同操作，为军事、民用、科研等领域带来了前所未有的挑战。本节将从集群异质化、通信扰动、协同控制和智能决策4个方面深入探讨低空安防挑战，为无人机集群反制规划提供理论基础

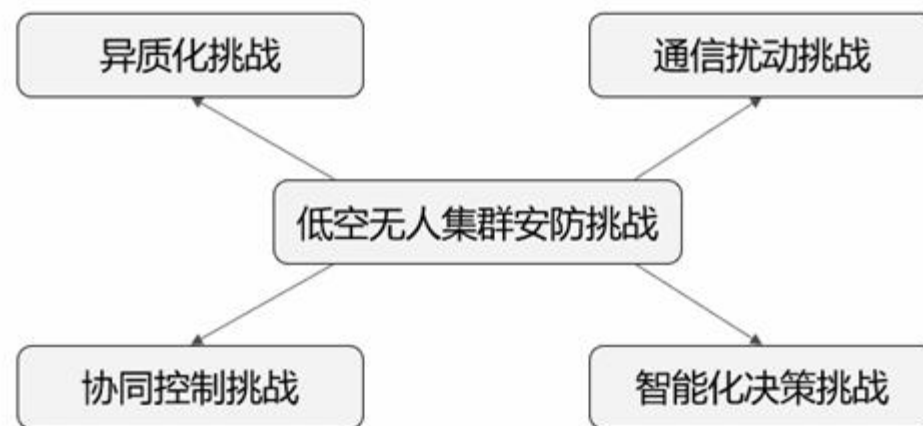


图 2.4 低空无人集群安防挑战示意

| 集群异质化



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

在低空无人机集群中，无人机的异质化和高速飞行带来了严峻的挑战。异质化表现在无人机群体的多样性，可能涵盖不同尺寸、速度和功能的无人机。其结果是，传统的安防系统在面对大规模异质无人机集群时可能面临性能瓶颈。

低空无人机集群中异质化群体的引入增加了系统的复杂性。不同类型的无人机可能搭载各种不同的传感器，执行不同的任务，并采用不同的通信协议。因此，监测系统在处理异质化群体时，需要具备高度的灵活性和适配性。传感器适配和数据融合成为一项重要挑战，监测系统必须能够实时识别和整合来自不同无人机的异构数据。此外，对无人机任务的感知与分类也是关键一环，以确保对不同任务的无人机能够做出准确的监测与响应。

| 通信扰动多样化

- ◆ 在应对低空无人机集群的通信干扰时，通信扰动所引发的问题凸显了在面对未来战场威胁时的复杂性和挑战。通信干扰作为一种电子对抗手段，不仅威胁着信息获取的精确性，而且严重影响了军事指挥与控制系统的稳定性。在这样的战场背景下，反制手段需要在高度复杂的信息环境中履行其职责，确保信息的准确传递，从而为战场指挥决策提供稳定可靠的基础。
- ◆ 低空无人机集群的通信扰动是一个复杂并且持续演化的问题。通过采用技术、政策和法规等多种手段，可以有效管理并减轻这些困难，从而确保无人机集群系统的安全性，同时促进其可持续发展。在不断演进的技术和威胁环境中，为适应未来的数据隐私和安全需求，保持警惕和创新至关重要。

| 智能决策自主化



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

- ◆ 自主决策技术最早源于机器人和无人驾驶领域，随着无人机集群任务需求的变化和交叉学科的不断发展，各种决策技术在无人机集群领域也得到了广泛应用。自主决策技术既是无人机集群智能化的体现，也是实现集群优势的核心。在无人机不同速度、不同相对距离、不同数据类型的复杂情景下，需要准确提取有效信息为无人机下一时刻的决策做出安全可靠的控制指令。
- ◆ 多智能体以其强大自主决策能力及良好的容错性、可扩展性、适应性、鲁棒性和协作能力等特点，在无人机集群和机器人足球自主决策领域备受关注。
- ◆ 由于大规模集群的复杂性，任务规划及分配是无人机集群自主决策的关键一环，合理的无人机集群任务分配模型和算法将大大提高集群整体性能，释放无人机的潜力。
- ◆ 异构无人系统整合针对于低空无人机集群包含多种类型无人系统，例如无人机、无人车、无人船等。这些异构系统具有不同的传感器配置、动力系统和执行任务的能力，因此，如何有效整合它们，构建一个统一且高效的智能决策系统是一个重要的挑战。
- ◆ 低空无人机集群智能决策的挑战主要包括异构系统整合及环境自适应。通过标准化接口、多模态信息融合、环境感知与建模、系统标准制定、拓扑结构优化和自主协同算法等策略，可以有效推动智能决策系统在低空无人机集群领域的发展。



PART 03

低空无人机集群反制 基本内涵

I 低空无人机集群反制基本内涵



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

- ◆ 低空无人机集群反制是指采取一系列技术手段和组织策略，对低空范围内的无人机集群进行监测、识别并进行有效应对的系统性行动。这一领域的关注主要源于无人机技术的快速发展，以及无人机在军事、商业和个人领域中的广泛应用。低空无人机集群反制旨在保护关键设施、维护公共安全，以及应对潜在的安全威胁。
- ◆ 低空无人机集群反制的目标在于建立一套全面有效的体系，能够及时、准确地感知低空无人机的存在，迅速做出反应并采取必要措施，以确保安全和秩序。其意义在于应对无人机可能带来的潜在风险，保障公众利益，维护社会稳定。通过有效的反制措施，可以降低无人机对航空、国防、公共交通等领域的潜在威胁。

雷达监测系统

雷达系统由发射机、接收机、天线和信号处理系统等组成，通过利用无线电波的反射特性，实现对目标的远程感知。发射机产生一束脉冲电磁波，这些波被天线发射到空中，当波遇到目标时，一部分被目标表面反射回来，并被接收机接收。接收机测量返回信号的时间延迟，通过这个延迟计算目标的距离。同时，接收机还分析反射信号的频率变化，以确定目标的速度。这样，雷达系统就能够实现对目标的定位和跟踪。

视觉感知系统

视觉感知系统是低空无人机集群反制中至关重要的一项技术，通过使用摄像头、红外传感器等设备获取图像信息，为系统提供对目标的直观视觉识别。在这一领域，视觉感知不仅是获取图像，而且通过对图像的处理和分析，实现对无人机的识别、跟踪和行为分析。

智能分析算法

在低空无人机集群反制中，智能分析算法是对融合的多源数据进行高效处理和决策的核心。通过利用先进智能算法，系统能够从海量数据中提取关键信息，实现对目标的精准识别。

I 综合反制规划



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

- 综合反制规划是应对低空无人机集群威胁的一项关键举措，其核心在于构建坚固的防御体系。
- 通过系统性的规划，该防御体系应当能够有效识别低空无人机集群的态势，包括其数量、类型和行为等，从而为实施有针对性的反制措施提供必要的信息。
- 防御体系建设还需充分整合多元化的技术手段，包括先进的侦测、干扰、拦截等技术，以提高对低空无人机集群的全方位应对能力。
- 同时，综合反制规划要考虑异质化威胁，因此，防御体系应当具备灵活应对不同类型集群的能力，并不断更新优化以适应动态威胁环境。
- 总体而言，防御体系的建设是综合反制规划的核心要素，致力于保障对低空无人机集群威胁的有效应对能力。

I 反制效能评估—性能指标



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

实时响应时间

在低空无人机集群反制中，实时响应时间是评估系统反制效能的一个至关重要的指标。这一指标直接关系到系统对潜在威胁的及时发现和迅速应对能力。实时响应时间是指系统从检测到潜在威胁到采取有效反制措施所经过的时间。这个时间间隔直接反映了系统的反应速度，对于防止潜在威胁造成损害至关重要。在低空无人机集群反制中，无人机可能以高速飞行，因此，实时响应时间的缩短意味着系统更有可能成功拦截、击落或驱离潜在威胁。实时响应时间受多种因素的影响，了解并优化这些因素对于提高反制效能至关重要。

成功率评估

低空无人机集群反制的有效性直接取决于系统反制的成功率，即系统在面对潜在威胁时成功拦截、击落或者驱离的次数与威胁事件发生次数的比例。成功率是评估反制效能的一个关键性能指标，其反映了系统的整体性能和反制能力。在成功率评估中，需要综合考虑多种因素，包括反制手段的性能、目标识别的准确性、实时响应时间，以及环境因素等。

I 反制效能评估—持续改进与在线优化



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

- 在低空无人机集群反制领域，系统设计的成功与否直接关系到关键设施和人员的安全。因此，持续改进和在线优化反制效能评估成为确保系统高效运作的重要环节。这一过程需要系统不仅设立明确的性能指标，监测实际成功率，还需要及时采取相应的优化措施，以适应不断变化的威胁。
- 设立合理的性能指标是持续改进的基础。这些指标应涵盖多个方面，包括反制手段的效能、目标识别的准确性、实时响应时间等。明确的性能指标为系统提供了量化的衡量标准，使其能够全面评估自身的性能表现。这包括反制手段的性能、目标识别的准确性、实时响应时间等多个方面。通过设立这些指标，系统能够更全面地了解自身在各个方面的表现，为后续的改进提供方向。
- 对实际成功率进行持续的监测和评估是系统优化的关键环节。通过实时监测系统对潜在威胁的应对情况，系统能够及时发现存在的问题和瓶颈。这种监测需要考虑多个因素，从技术设备的性能到操作流程的效率，确保系统在各个方面都能够达到预期的水平。实际成功率的监测和评估为系统提供了反馈，帮助了解反制系统在不同场景下的表现，并快速发现可能的改进点。
- 持续改进与在线优化反制效能评估的方法有助于确保系统能够在不断变化的低空无人机集群威胁环境中保持较高的成功率，保护关键设施和人员安全。这一过程是动态的，需要系统不断适应新的威胁和技术挑战。通过不断改进，系统能够更加灵活地应对不同情境，提高自身在复杂环境中的应对能力。

低空无人机集群反制 技术特点

PART
04





| 侦测多源化—雷达技术

雷达包括有源雷达和无源雷达两种

有源相控阵雷达的每个辐射器都配装一个发射和接收组件，每个组件都能自己产生、接收电磁波，因此，在频宽、信号处理和冗余设计上都比无源相控阵雷达具有更大的优势。



无源雷达采用全方位无感探测，探测过程中不对外发射任何无线电波。同时无源雷达发现微型无人机后可根据实际需求，自动或者手动开启全频段反制，可以对目前市场上98%的微型无人机造成干扰，使其无法正常起飞。



I 侦测多源化—光电传感器



光电传感器是一种使用光学技术来侦测目标的装置，包括红外摄像头、可见光摄像头、光学望远镜等。这些传感器能够捕捉目标发出的可见光和红外辐射，并将其转化为电信号进行分析。光电传感器在夜间和白天均有用处，与雷达不同，光电传感器不依赖于主动发射信号，因此，在夜晚和白天均能够工作。其可见光摄像头能够采集高分辨率的图像，允许操作员进行目标识别和特性分析。红外摄像头能够侦测目标发出的热量，适用于夜间和低光条件下的侦测情况。光电传感器通常与其他传感器相结合，以提供全面的目标信息。

I 侦测多源化—无线电频谱监测



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

无线电频谱监测是通过监测目标的无线通信信号来进行侦测和识别的技术。这种方法通常用于侦测无人机或其他通信设备。其可以通过监测目标的通信频率和协议，确定目标类型和其通信行为。与传统的物理传感器不同，无线电频谱监测的一大优势在于可以在不与目标接触的情况下进行，因此，更加隐蔽。目标的通信信号具有独特的特征，因此，无线电频谱监测也可以用于目标的指纹识别。

| 侦测多源化—声音传感器



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

声音传感器是一种用于侦测目标发出的声音信号的技术。在低空无人机集群反制中，这对于确定目标类型和位置非常有用。声音传感器能够识别无人机和其他飞行器的发动机声音独有的特征，利用这些特征可以实现对目标类型的确定。通过多个声音传感器的网络，可以确定目标的位置和移动方向。最重要的是，声音传感器不需要视觉线路，因此，对于在障碍物遮挡或低光条件下的侦测有出色的效果。

| 察打一体化



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

▲全方位感知察打一体化系统通过多源化的数据采集手段，包括传感器、雷达、光学设备等，全方位感知低空无人机集群的目标，确保了系统对目标的准确侦测和及时跟踪。

▲实时目标分析一旦侦测到目标，系统就能对目标进行实时分析。这包括目标的识别、分类、以及意图的分析。通过对目标进行深入分析，系统能够快速了解威胁程度并尝试采取行动。

▲快速反制决策基于实时的目标分析，系统能够迅速做出反制决策。这可能包括选择最合适的干扰手段、采取阻断措施，或者进行其他形式的反制。决策的速度和准确性是察打一体化系统的关键优势。

▲持续跟踪与调整察打一体化系统在实施反制措施后，持续跟踪目标的状态变化，并根据需要调整反制策略。这种持续性的监控确保了系统能够应对目标可能的变化和对抗措施。

▲信息共享与协同作战察打一体化要求系统内部各个模块之间的高度协同工作，实现信息的共享和传递。这种协同作战的方式确保了系统各个部分的一体化运作，从而提高了系统整体的反制效能。总体而言，察打一体化是低空无人机集群反制技术中的一项关键技术特点，它通过将侦测和打击能力整合在一个协同操作系统中，提高了系统的感知、分析和反制效能，使其更适应复杂多变的战场环境。

I 反制多元化



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

在面对低空无人机集群威胁时，采用多元化反制样式成为一种关键策略，以应对不同类型的无人机威胁和各种战术情境。多元化反制样式的核心特点之一是反制手段的多样性。这意味着反制方不依赖于单一的反制方法，而是采用多种不同类型的反制手段，例如电子干扰、物理拦截、网络攻击和拦截，以及武力行动。这种多样性的反制手段使反制方能够根据不同威胁的特点和情境选择最合适的反制方式。

另一个关键特点是综合应用，即根据情境的复杂性，反制方可以同时采用多种反制手段来提高反制的效果，例如组合电子干扰和物理拦截以增加成功拦截无人机的机会。综合应用还可以包括协同工作，不仅在反制手段之间，还在不同反制方之间，共同应对无人机集群威胁。

多元化反制样式的优势在于它能够适应不同威胁，提高反制效能，降低单点故障风险，提高实时响应性。通过采用多元化反制样式，反制方可以更好地适应不同威胁和情境，提高反制的效能，降低风险，并确保安全。这一方法在现代安全环境中具有重要意义，有望在未来继续发展和完善。

| 装备轻量化



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

(1) 高度便携性

反制系统的组件和设备经过精心设计，以确保整套系统具备出色的便携性。这使反制系统在各种战场环境中能够迅速部署和撤离，提高了反制效率。

(2) 灵活适应性

轻量化的装备设计使系统具备相当的灵活性，能够适应不同的战术和地形。这种灵活适应性有助于反制系统在复杂多样的作战场景中应对各种低空无人机集群威胁，确保系统在各种条件下都能够高效运作。

(3) 降低对基础设施的依赖

通过装备轻量化，系统降低了对大型基础设施的依赖，使反制技术更具自主性。这一特点在快速移动的军事行动中尤为重要，有助于降低后勤负担，提高作战灵活性。

(4) 提高机动性

轻量化的设计使反制装备更易于集成到不同平台上，包括车辆、飞行器等。这提高了反制系统的机动性，使其能够更灵活地追踪和对抗低空无人机集群，为作战指挥提供多种战术选择。在整个反制技术体系中，装备轻量化的特点有助于提高系统的部署效率、适应性和机动性，从而更好地应对低空无人机集群的威胁。

| 系统智能化



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

- 低空无人机集群反制技术的核心之一是系统智能化，这是通过引入先进的人工智能技术，使反制系统具备更高的自主决策水平和适应能力。
- 系统智能化的关键目标是实现对低空无人机集群的智能感知、分析和决策。利用先进的感知技术，系统能够准确、实时地获取低空无人机集群的相关信息。
- 智能感知不仅包括传统的传感器技术，还结合了图像识别、声纳技术等多模态信息处理技术，提高了对目标的全面感知能力。
- 系统智能化的重要特征是具备自主决策能力。通过深度学习、强化学习等技术，系统可以根据感知到的信息自主制定反制策略，适应不同的作战环境。
- 智能系统具备学习能力，通过不断积累经验和数据，实现对不同类型的低空无人机集群的精准辨识和有效反制。这种学习与适应能力使系统具备相当的灵活性。
- 系统智能化促使反制系统实现作战的高效协同，即多个系统之间能够协同工作，共同应对复杂多变的低空无人机集群威胁。这涉及智能系统之间的信息共享、任务分配和协同决策。
- 智能系统能够实时响应威胁，并迅速调整反制策略。这种实时响应能力是对低空无人机集群快速变化行为的一种有效应对。
- 智能系统在制定决策和执行反制任务的过程中，与人类操作员实现有效协同。这种人机协同可以通过简易界面、实时反馈等手段实现，实现整个反制过程的智能化。

| 效能评估体系化

反制效能评估要素和量化指标在低空无人机集群反制中具有关键意义，是用于测量和评估反制效果的基本工具，保障了反制系统性能和效率的适当改进。首先，侦测准确性是一个至关重要的评估指标。反制系统必须能够准确识别并追踪低空无人机集群。

准确的侦测是反制行动的关键，直接影响到反制的成功与否。反制响应时间是另一个重要指标，衡量了从侦测目标到实际反制的时间。在应对快速移动的无人机等威胁时，及时的反制至关重要，因此，反制响应时间必须被最小化。目标摧毁率是用于评估反制成功的指标，反映了反制行动的实际效果，即是否成功摧毁或中断了敌对目标的任务，这是反制系统的最终目标之一，因此，需要被定量化和监测。

资源利用效率是考察反制系统资源投入与反制效果之间的关系。反制行动通常需要大量资源，包括金钱、人力和装备。通过对资源的有效整合，可以实现反制效果的最大化。对抗多样性是考察反制系统对各种类型的低空无人机集群的适应性。这包括不同大小、速度和通信方式的集群目标。反制系统必须具备对威胁多样性的适应性。

反制效果持续性是指反制行动的持续时间，是在面对长时间威胁时的关键考量指标。反制系统必须能够维持长时间的反制，以保障保护区的安全。最后，误报率是另一个重要指标，用于评估反制系统误报的频率。减少误报有助于降低反制系统的运行成本，同时减轻了反制系统的负担。

| 本章小结



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

本章概述了低空无人机集群反制，着重探讨了低空无人机集群特点、低空安防挑战、低空反制基本内涵，以及反制技术特点等4个关键方面内容。从物理、网络和控制这3个关键层面深入剖析了低空无人机集群特点，揭示了低空无人机集群在飞行控制结构、集群组网特性和协同作战方面的主要特征。根据低空无人机集群的特点，从集群异质化、通信扰动多样化、协同控制复杂化、智能决策自主化等角度讨论了低空无人机集群所带来的安防挑战，阐明了低空安防中的关键技术难点。聚焦低空无人机集群反制的态势感知、综合反制规划，以及反制效能评估等核心内涵，分析了低空无人机集群反制的关键要素，为该领域的发展和创新提供了理论基础。低空无人机集群反制技术在侦测、打击、反制手段、装备设计、智能化，以及效能评估等方面呈现多元化、一体化、轻量化、智能化和体系化的特点，使反制技术能够对无人机集群进行全面、高效的反制，能够快速适应不同威胁情境，为低空安防提供了强有力的技术支持。



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

Thanks

