

# 城市复杂环境轻小型无人机反制系统

黄 满

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550000

**【摘 要】**：随着民用无人机技术的普及与“黑飞”事件频发，城市低空空域安全面临严峻挑战。本文针对城市复杂环境下轻小型无人机的反制难题，在分析城市低空空域环境特征、典型威胁模式及反制约束条件的基础上，构建了多模态探测识别、分层协同反制、指挥控制与智能决策三大分系统，其中反制分系统通过导航诱骗、定向干扰与物理拦截的分层防御策略，在确保城市安全的前提下实现精准可控处置，构建了“发现-识别-跟踪-处置-评估”的反制系统方案，为城市低空安全防御提供了一种高效、可靠且可控的技术路径。

**【关键词】**：城市环境；无人机反制；系统设计

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.118

## 1 背景

低空经济发展与无人机技术普及，无人机在航拍、物流、巡检等领域得到广泛应用，但轻小型无人机“黑飞”、扰航、非法侵入甚至加装、改装无人机实施恐怖袭击等事件频发，对城市公共安全、关键基础设施及重大活动的安保构成了严峻威胁。城市环境作为高度复杂的人造空间，其特有的高楼林立、电磁环境杂乱以及人口密集等特点，不仅为轻小型无人机的隐蔽飞行和快速突防提供了有利条件，也给反制系统的探测、识别与处置带来了巨大困难。立足城市复杂环境特性，研发一套集高效探测、精准识别、智能跟踪、分层协同与协同反制于一体的轻小型无人机反制系统，已成为维护城市低空空域安全的迫切需求。

## 2 城市环境特性与无人机威胁特性

### 2.1 城市环境特性分析

城市低空空域独特的环境特征直接影响着反无人机系统的探测效能与处置策略。首先，城市地表覆盖密集的高层建筑与复杂构筑物，不仅导致无人机可借助楼宇间隙进行超低空突防，还使得探测信号存在严重的多路径效应与遮挡问题，产生大量探测盲区。其次，城市环境中充斥着复杂的电磁信号，包括各类通信基站、广播电视塔、Wi-Fi网络及雷达设备等，这些非合作信号极易对无人机的探测与识别系统形成干扰，造成虚警或漏警。同时，城市背景噪声中混杂着大量人工运动目标，如地面车辆、行人以及空飘物等，如何从复杂的动态背景中准确提取低空无人机目标，成为系统设计必须面对的挑战。

### 2.2 无人机典型威胁模式

在城市环境中，轻小型无人机的威胁呈现出多样化、隐蔽

化与智能化的特征。从威胁意图角度分析，可分为无意侵入与蓄意攻击两类：前者主要表现为航拍爱好者违规飞行误入禁飞区域，干扰民航起降或侵犯个人隐私；后者则涵盖携带危险品实施恐怖袭击、抵近敏感建筑进行非法侦察、干扰大型活动秩序等严重安全事件。从威胁行为模式观察，常见类型包括超低空贴地飞行以规避雷达探测、利用楼宇反射形成雷达盲区进行突防、多机协同编队实施饱和式打击、悬停于高层建筑间隙执行隐匿侦察或攻击任务等。此外，部分加改装无人机具备自主航线规划与抗GPS干扰能力，可在无遥控信号情况下执行预设任务，对传统依赖无线电信号的探测手段和反制手段形成有效规避。

## 3 反制系统方案与原理

### 3.1 核心原理

基于城市复杂环境的特殊约束与无人机目标威胁特征，遵循“探测全域化、识别智能化、处置精准化、指控一体化”的核心原理开展反制系统方案设计。探测全域化强调通过多模态传感器组网融合，实现对城市低空空域的全天候、无死角覆盖；识别智能化要求构建基于深度学习的目标识别与行为分析模型，提升复杂背景下的敌我判别与威胁评估能力；处置精准化主张采用分层分级、软硬结合的反制手段，在确保有效处置的同时将附带损伤控制在最低限度；指控一体化则追求多源态势信息的融合呈现与智能辅助决策，形成“发现-识别-跟踪-处置-评估”的闭环管控链条，全面提升系统在城市环境下的适应性与可靠性。

### 3.2 反制系统方案

为满足城市复杂环境下反无人机作战的实际需求，系统需围绕探测、识别、跟踪、反制与指控五大核心功能构建反制系统方案，其功能架构与技术路径如表 1 所示。

表 1 反制系统功能模块及技术途径

核心功能	需求指标	技术实现路径	关键支撑技术
探测功能	全天候、全覆盖、低虚警率	雷达/光电/声波多模态协同探测，交叉验证目标	多元传感器融合、杂波抑制、自适应门限检测
识别功能	敌我识别、型号识别、威胁评估	基于 RCS 特征与光学图像的深度学习识别模型	微多普勒特征分析、知识图谱、行为意图推理
跟踪功能	连续稳定、轨迹预测	多传感器接力跟踪与卡尔曼滤波轨迹预测	联合概率数据关联、机动目标跟踪、意图预测
反制功能	精准打击、可控损伤、效果评估	导航诱骗与定向干扰分层协同、处置效果实时反馈	功率精准控制、多目标调度、毁伤效果评估
指控功能	态势融合、辅助决策、人机交互	统一态势图构建、处置方案智能推荐与人工确认	时空对齐、规则引擎、可视化交互、预案管理

在探测功能层面，系统需具备全天时、全天候的连续监视能力，能够在复杂电磁环境与建筑遮挡条件下保持低虚警率运行，核心技术路径是雷达、光电与声波探测手段的协同探测与数据融合。识别功能要求系统不仅能够区分敌我，还需识别具体无人机类型、飞鸟、气球等空飘物，并评估其威胁等级，这需要依托目标的雷达散射特性和光学图像特征，结合深度学习算法构建目标识别模型，同时引入行为意图推理机制提升威胁判别的准确性。跟踪功能的核心在于实现目标轨迹的连续稳定获取，并基于历史轨迹预测其未来运动趋势，为反制决策提供时空依据，卡尔曼滤波等预测算法与多传感器接力跟踪策略是实现该功能的关键。

反制功能要求在确保城市环境和人员安全的前提下实现精准处置，本系统采用干扰优先过滤+网捕/激光保底净空相结合的分层反制手段，实现城市环境低成本、低附带损害无人机反制。在指控功能层面，指控功能作为系统的中枢神经，负责将多源探测数据进行时空对齐与态势融合，形成统一的战场态势图，并基于规则引擎与预案库提供辅助决策建议，最终通过

友好的人机交互界面实现操作员对系统的有效管控。同时建立处置效果的实时评估机制，以便动态调整反制策略。

## 4 主要分系统设计

### 4.1 多模态探测识别分系统

为满足城市复杂环境下全天时、全天候、全覆盖、低虚警的探测需求，多模态探测识别分系统采用雷达、光电、声波三类传感器协同组网的架构设计。其中，毫米波雷达作为主探测器，利用其抗干扰能力强、测距精度高的优势，负责大范围目标搜索与初筛，并通过微多普勒特征分析初步判别目标属性；光电探测系统包括可见光与红外双模相机，在雷达引导下对疑似目标进行精准定位与视觉确认，可见光用于白天的细节辨识，红外用于夜间及低能见度条件下的持续追踪；声波探测则作为补充手段，通过采集无人机特有的声纹特征，在楼宇遮挡导致雷达盲区的场景下发挥辅助探测作用。三类传感器通过异构数据融合算法实现时空对齐与目标关联，前端采用自适应门限检测技术抑制城市环境中的杂波干扰，后端引入基于深度卷积神经网络的目标识别模型，融合雷达散射截面积、光学成像特征及声纹特征，实现对无人机类型的精准判别。

### 4.2 协同反制分系统

基于城市环境对反制手段的安全约束与精准性要求，协同反制分系统采用“软杀伤为主、硬杀伤保底、效果实时评估”的差异化处置策略。分层协同反制系统架构如图 1 所示，反制手段划分为三个层次：第一层为导航诱骗层，针对具备 GPS/北斗定位功能的无人机，通过发射欺骗卫星信号诱导其偏离航线或进入预设安全区降落，该手段具有无电磁辐射污染、对周边电子设备影响小的优点，适用于人员密集区域；第二层为定向射频干扰层，当导航诱骗无效或目标不具备卫星导航依赖时，启动窄波束定向射频干扰，切断无人机与遥控器之间的通信链路，触发其强制返航或原地降落，干扰功率采用动态自适应控制技术，确保仅作用于目标无人机而不影响周边合法电子设备；第三层为物理捕获层，作为极端情况下的备用手段，部署网捕无人机或激光照射警告装置，用于应对已构成紧迫威胁且软杀伤手段失效的特殊场景。反制过程中，系统通过光电设备持续监视目标状态，结合频谱监测设备评估干扰效果，当目标偏离预定航向或高度异常变化时，自动调整反制参数或切换处置手段，形成“探测-决策-处置-评估”的闭环控制，确保反制行动的精准可控。

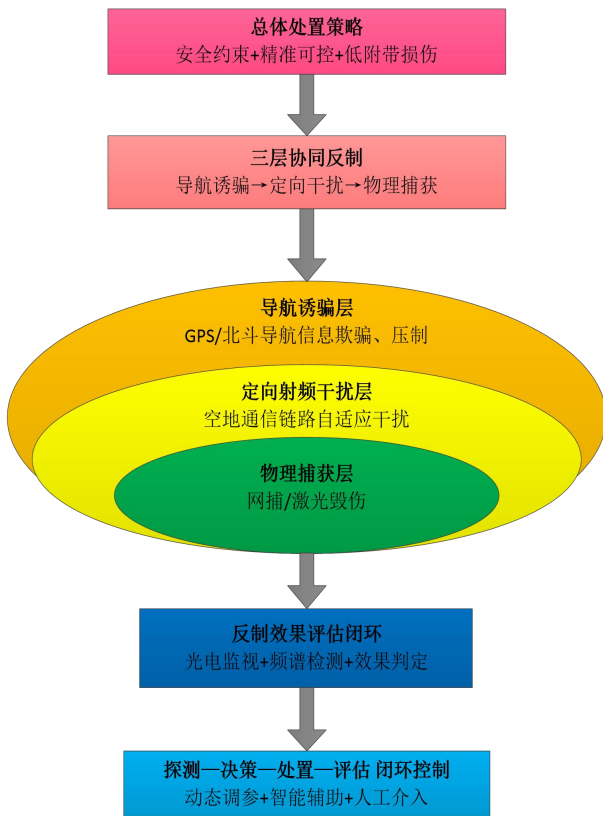


图1 协同反制分系统架构设计

#### 4.3 指挥控制分系统

作为整个反无人机系统的中枢核心，指挥控制分系统承担多源态势融合、辅助决策生成与人机交互管控三大核心职能。

#### 参考文献：

- [1] 万俊.海上执法反制小型无人机对策研究[J].中国军转民,2026,(04):21-22.
- [2] 王明涵,李智慧.基于 AHP 模糊综合评价法的无人机反制设备效能评估[J].现代信息科技,2026,10(04):153-158+163.
- [3] 钟夏.超大城市空间特征下警卫工作无人机反制能力提升研究[J].中国军转民,2026,(02):51-52.
- [4] 王华林,杨长山,霍天,等.无人机反制技术研究综述[J].中国宽带,2025,21(12):142-144.
- [5] 李存健,崔文秀.低空经济中无线电反制技术的应用[J].数字通信世界,2025,(11):135-136.
- [6] 吴小松,房之军,陈通海.民用无人机反制技术研究[J].中国无线电,2018(3):4.
- [7] 王丽蓉,龙佳丽,罗明.国土防空中的无人机反制技术研究[J].中国军转民,2025(19):44-46.
- [8] 赵丽,张娴."低慢小"无人机目标威胁分析与反制技术研究[J].产业与科技论坛,2024,23(13):47-49.

在态势融合层面，系统接入多模态探测分系统的目标数据、反制分系统的状态数据以及城市环境的地理信息数据，通过时空对齐算法将异构数据统一至同一时空坐标系下，构建包含目标位置、轨迹、身份、威胁等级及周边环境要素的综合态势图，实现战场透明化。在辅助决策层面，系统构建基于规则引擎与深度强化学习的智能决策模型，规则引擎依据预设的禁飞区边界、敏感目标距离、人员密度等约束条件，生成符合安全规范的处置建议；深度强化学习模型则通过对历史案例的训练学习，在复杂动态场景下优化反制资源调度与处置时机选择，两者结合形成多套候选方案供操作员参考。在人机交互层面，采用可视化交互界面设计，将复杂态势信息与决策建议以图形化、符号化方式直观呈现，操作员可通过触摸屏或语音指令快速确认或调整处置方案，系统记录操作过程并自动更新预案库。此外，分系统还具备多机协同管控能力，当探测到多个威胁目标时，可自动评估各目标威胁等级并分配反制资源，实现多目标并发情况下的有序处置。

#### 5 结语

针对城市复杂环境下小型无人机带来的安全挑战，基于对城市低空空域的环境特征、目标典型威胁模式及反制约条件的分析，提出了一套完整的无人机反制系统方案，在确保反制效能的同时最大限度降低了附带损伤风险。未来，随着无人机技术的持续演进与城市低空飞行活动的日益密集，反无人机系统还需在集群目标辨识、反制资源动态调配以及法规标准适配等方面开展深入研究，以不断提升城市低空空域的安全保障能力。