

电磁兼容在低空经济中的应用挑战

胡国良 张静静 汤 斌

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 北京 100095

摘要: 低空经济的快速发展使无人机等飞行器面临复杂动态电磁环境的严峻挑战, 传统电磁兼容(EMC)方法已难以完全适用。本文系统研究了电磁兼容在低空经济中的应用挑战, 分析了低空密集异构干扰、平台电磁特性及标准滞后等核心问题。

关键词: 低空经济; 电磁兼容(EMC); 无人机; 电磁环境效应

引言: 随着新一轮科技革命与产业变革的深入发展, 以低空空域为依托, 以各类有人/无人驾驶航空器为主导, 辐射带动相关领域融合的“低空经济”正成为全球竞逐的战略性新兴产业和培育新质生产力的重要引擎。低空经济不仅涵盖传统的通用航空, 更深度融合了高端制造、人工智能、新一代通信技术, 其典型应用场景包括无人机物流配送、城市空中交通、应急救援、农林植保、地理测绘及低空旅游等, 预计将在未来十年形成万亿级市场规模^[1]。

1 研究背景与意义

与万米高空相对“洁净”的电磁环境不同, 低空空域(尤其是3000米以下的都市圈和重点区域)电磁环境极为复杂和恶劣。大量低空飞行器密集升空作业, 其自身的通信链路、导航定位、控制信号及机载电子设备之间可能产生严重的同频干扰、邻频干扰与互调干扰; 另外地面既有的密集无线设施, 如5G/6G基站、广播电台、雷达站、高压输电线以及各类物联网设备, 构成了强大的背景电磁噪声和潜在干扰源。

系统性地研究电磁兼容技术在低空经济中的应用核心意义在于: 第一, 为构建低空安全屏障提供技术支撑, 通过前沿的EMC技术防范因电磁干扰引发的安全事故; 第二, 为低空装备的研发与认证提供方法论, 推动建立适应新业态的测试评估体系与标准规范; 第三, 为频谱资源的科学规划与高效利用提供决策参考, 保障各类无线电业务在低空环境的和谐共存, 从而赋能我国低空经济实现从“飞起来”到“飞得好”的跨越式发展。

2 国内外研究现状

国际上已从标准预研、技术验证和监管框架等多方面展开布局。在标准层面, 美国无线电技术委员会(RTCA)发布的DO-160G《机载设备环境条件和测试程序》仍是航空电子设备EMC测试的权威基础, 但其主要针对传统大型航空器。为应对小型无人机系统(sUAS)

的挑战, 美国联邦航空管理局(FAA)、ASTM国际标准组织等正积极推动制定或修订适用于低空、小型化平台的EMC相关标准。在技术研究方面, 美国国防高级研究计划局(DARPA)等机构资助了多项关于动态频谱接入、抗干扰导航通信等项目。欧洲航空安全局(EASA)在其城市空中交通(UAM)运行概念中, 明确将“频谱可用性与电磁兼容性”列为关键使能因素, 并联合研究机构开展低空电磁环境监测与建模工作。国际电工委员会(IEC)、国际电信联盟(ITU)等国际组织也在持续研究无人机等新兴业务与现有业务的共存技术标准^[2-4]。

在国内, 随着低空经济上升为国家战略, 相关研究与实践进入快速发展期。政策与频谱管理方面, 工业和信息化部等部门已发布《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法》, 并规划了用于无人机通信、感知与监管的专用频段, 为电磁兼容管理提供了初步的制度基础。技术研发层面, 国内顶尖高校和科研院所复杂电磁环境模拟、无人机抗干扰天线设计、电磁频谱地图构建等方面取得了一系列理论成果。产业应用上, 以深圳为代表的城市在无人机物流、安防巡检等场景开展了规模化应用, 积累了丰富的实地电磁环境数据与运维经验, 部分领先企业已开始自主研发高等级抗干扰飞控与数据链系统。

国内研究仍存在以下不足: 一是系统性不足, 现有研究多聚焦于通信或导航等单点技术, 缺乏从“平台-集群-环境”全链条视角的系统级EMC设计与评估方法; 二是标准滞后, 专门针对各类低空飞行器及其运营场景的EMC国家标准和行业标准体系尚不健全, 测试认证能力有待统一和提升; 三是跨域融合不深, 低空EMC研究与城市规划、5G/6G网络部署、电网设施等领域的协同设计尚处于起步阶段。

3 低空经济中的电磁兼容核心挑战

低空飞行器, 特别是无人机系统, 在设计理念、使

用模式和部署规模上与传统航空器存在本质差异，这导致其面临的电磁兼容性问题呈现出系统性、动态性和高复杂度的新特征。

3.1 复杂、动态且不确定的电磁环境

低空空域的电磁环境本质上是城市与区域电磁环境在垂直方向上的延伸，其复杂程度远高于传统航空所关注的范围。

干扰源密集且异构，主要包括：（1）公众移动通信网络：密集部署的4G/5G基站及其未来演进的6G网络，是功率强大、覆盖连续的背景辐射源。（2）各类专用无线电系统：如公安、消防、交通指挥的集群通信，广播电视台的发射塔，以及气象雷达、空中交通管制一次/二次雷达等。（3）无意辐射源：高压输变电路、工业设备、汽车点火系统、各类消费电子设备等都会产生宽带的电磁噪声。（4）其他低空设备：大量同时作业的无人机之间，其数据链、图传链路和导航信号可能形成同频或邻频干扰。研究表明，在城市核心区，低空电磁环境的信号密度可比郊区高出2-3个数量级，这种多制式、多频段、高密度的信号交织，使得纯净的通信频段几乎不存在。

环境具有高度的动态性和时空不确定性。与传统航空器沿固定航线在相对稳定的高空环境飞行不同，低空无人机作业路径灵活，其遭遇的电磁环境随地理位置和飞行高度实时变化。更为严峻的是，一些干扰源如非法的无人机干扰枪、或特定目的的电子对抗设备的出现具有突发性和随机性。这使得基于静态场景和预设干扰模式的传统EMC设计与测试方法面临失效风险。

存在恶意干扰与信号欺骗的威胁。在安防和军事应用领域，低空无人机常面临有意的电子干扰和导航欺骗。在民用领域，虽然以恶意破坏为目的的情况较少，但各类未经协调的私设无线设备同样会构成严重的同频干扰，危及飞行安全。低空飞行器必须在这种充满敌意或非合作信号的电磁空间中，保持自身关键系统的鲁棒性。

3.2 低空飞行器平台特性带来的特殊问题

低空经济的载体，特别是中小型无人机和未来的eVTOL，其平台物理特性从根本上改变了电磁兼容设计的约束条件和难度。

平台微型化与高密度集成带来的挑战。为追求续航和载荷能力，无人机平台内部空间极其紧凑，飞控计算机、数传电台、图传模块、导航接收机、任务载荷等大量高频数字与射频电路被集成在狭小空间内。这导致设备间的近场耦合效应异常显著，电源线上的噪声极易通过共阻抗耦合影响敏感电路，数字电路的高速开关噪

声可通过空间辐射干扰邻近的射频接收前端。这种“自扰”问题在系统设计阶段若未通过精密的布局、布线和屏蔽进行抑制，将导致整机性能严重下降。

复合材料机体对电磁屏蔽效能的影响。为减轻重量，现代无人机和eVTOL大量采用碳纤维增强复合材料（CFRP）。然而，CFRP的导电性各向异性，其电磁屏蔽效能远低于传统的金属蒙皮。这带来双重问题：一方面，机体对外部辐射干扰的屏蔽能力减弱，内部敏感设备更易受环境影响；另一方面，机体对内部辐射的禁锢能力也下降，可能使得原本满足机内标准的设备，在整机集成后向外辐射超标，或导致不同系统间的串扰加剧。

能源系统产生的独特干扰。电动推进是低空飞行器的主流方向，其大功率电机驱动器和能量转换系统在工作时会产生强烈的宽频带传导和辐射骚扰。这些骚扰的基波和谐波频率可能覆盖从几十kHz到数百MHz甚至GHz的范围，极易对邻近的通信、导航接收机造成带内阻塞或互调干扰。此外，为高压电池包管理的BMS系统也是一个潜在的噪声源。

集群协同作业引发的系统性挑战。未来低空经济的许多场景依赖于无人机集群。当数十甚至上百架无人机在有限空域内编队飞行时，将形成一个移动的、高密度的射频网络。这引发了在单机层面不存在的系统性EMC问题：

（1）频谱需求爆炸式增长：集群内各单元间的通信、测距、防碰撞感知等需求，导致局部空域频谱资源极度紧张。（2）自扰与互扰：集群内部通信链路之间、感知信号（如毫米波雷达）之间可能产生严重的同频干扰和互调产物，影响编队稳定性和任务可靠性。（3）管理复杂性：如何对集群进行统一的、动态的频谱分配和管理，以避免系统性阻塞，是一个尚未完全解决的难题。

3.3 现有标准与法规体系的滞后性

传统航空EMC标准的适用性局限。目前全球航空电子设备EMC符合性验证的基石性标准，如RTCA DO-160G《机载设备环境条件和测试程序》，其制定背景主要针对大型、有人驾驶、金属机身的传统航空器。将其直接套用于低空小型无人机系统存在明显不足：（1）测试频段覆盖不足：DO-160G对射频敏感度的测试上限通常为18GHz，而许多无人机使用的导航、感知频段已超出此范围。（2）测试电平与场景不匹配：标准中规定的场强测试电平是基于高空巡航环境下的统计威胁，而低空环境，特别是城市环境，其局部场强可能远超这些预设值。（3）平台差异：标准中的测试方法假设设备安装在导电良好的金属机身上，对于复合材料机身的机影响未作充分考虑。

缺乏针对低空运营场景的专用标准。当前，对于消费级和部分工业级无人机，其EMC认证往往依据的是信息类产品通用标准（如CISPR系列、EN 55032），这些标准主要关注设备对公共电磁环境的“污染”程度，以及抵抗诸如静电、雷击浪涌等常见骚扰的抗扰度，并未充分评估其在复杂、动态射频环境中的生存能力。具体到无人机，缺乏对其关键安全功能在强射频干扰下的性能评估标准和测试方法。

型号认证与运行许可的脱节。目前的管理模式侧重于对单机产品进行型号核准，但对其在特定区域、特定任务场景下的运行风险缺乏评估。一架在实验室通过EMC测试的无人机，在某个电磁环境异常复杂的工业园区执行任务时，其风险是完全不同的。如何将电磁环境适应性评估纳入低空飞行器的运行风险评估体系，建立从“设备合规”到“运行安全”的桥梁，是监管层面面临的新课题。

频谱使用合规性的监管难题。低空飞行器使用的频谱资源是开放的共享频段。理论上，所有设备都需要遵守发射功率、带外辐射等规则，但实际上大量设备可能处于违规状态。低空飞行器机动性强、数量庞大，对其频谱使用行为进行有效、实时的监测和执法，在技术和成本上均存在巨大挑战。

4 结语

电磁兼容是低空经济看不见、却至关重要的“基础设施”。它犹如低空天路的“交通规则”和“免疫系统”，

其完善程度直接决定了这条新兴航道的通行能力、安全上限与商业价值。本文的研究表明，解决低空经济的电磁兼容问题，是一项需要技术攻坚、范式革新、政策引领与生态共建并举的系统工程。唯有通过持续的多学科交叉创新与全社会协同共治，才能筑牢这片充满希望的空域的电磁安全基石，最终支撑低空经济真正成为驱动社会进步的新质生产力，安全、稳健地飞向未来。

参考文献

- [1]杨华, 黄宁. “低空经济面临的频谱干扰挑战.” 中国信通院, 10 Apr. 2025.
- [2] “Electromagnetic compatibility is a crucial factor to consider for reducing potential safety concerns while designing and operating unmanned aerial vehicles (UAVs).” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 66, pp. 728-748, 16 Jan. 2024. doi: 10.1109/temc.2024.3382576.
- [3]Chen, B., Huang, L., Zhang, K., Hu, J., & Zhu, W. “Magnetic Interference Analysis and Compensation Method of Airborne Electronic Equipment in an Unmanned Aerial Vehicle.” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 14, p. 7455, 2023.
- [4]Ma, Z., Wei, H., & Yuan, X. “A Novel Transfer Function Model Based on the Feature Selection Validation Method for Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles in High-Intensity Radiated Field Environments.” *Electronics*, vol. 14, no. 5, p. 976, 28 Feb. 2025. doi: 10.3390/electronics14050976.