

专家论丛

低空飞行器复杂环境与环境效应

张聚恩 中国航空工业集团有限公司

2025 年 7 月 14 日,在庄重的“中国科学会堂”,举办了一场高规格的科技交流活动。这便是“第 27 届中国科协年会”期间由中国航空学会主办的“低空飞行器复杂环境效应”学术论坛。在低空经济潮起、低空飞行日趋活跃、低空环境挑战凸现之际,召开这样一个高水平的学术会议非常及时且必要。五个大会报告和同步提供的学术论文摘要集内容精辟深刻,富有启发性,听后、阅后收获颇丰。

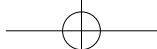
五个大会报告分别是:《低空飞行器环境影响分析与对策》,报告人为北京航空航天大学教授向锦武院士;《低空经济技术内涵及面向复杂气候效应的建议》,报告人为中国航空工业首席技术专家、中国航空学会应急救援分会主任吴希明;《无人机和 eVTOL 在低空空域飞行的噪声特征及基于噪声驱动的飞行规划策略》,报告人为空气动力学与声

学专家、香港科技大学教授张欣;《低空飞行器电磁安全研究》,报告人为中国航空研究院飞机雷电防护首席专家段泽民;《低空智能网联基础设施规划建设的实践探索》,报告人为中国航空规划设计研究总院总规划师郭琪。

综合大会报告和交流论文摘要的研读,我认为,研究低空飞行器复杂环境效应,首先需要认识到低空飞行的复杂环境是什么。而低空飞行器复杂环境效应问题,在本质上是飞行器应具备对环境的“低扰性”和面对复杂环境时的“抗扰性”。就这几个方面的问题,在会上会下,进行了深入思考与研究,现将学习心得梳理成文。

第一、低空飞行的自然环境

低空飞行环境是全部航空飞行活动环境的一部分,同其他高度的飞行一样,也由自然环境和



人为环境两部分组成，但由于其高度范围为全部飞行活动中最低、最靠近地表的那一部分，故而有自身的特殊性与复杂性。

航空器是在大气层内飞行的人造装置。飞行高度范围为从地表向上延伸至约 100km，包括对流层、平流层和中间层，对应的高度范围粗略划分为 0—20、20—50 和 50—100km。在科学意义上，从气象学角度，对流层、平流层和中间层可以视为航空的低空、中空和高空。这是航空飞行的主要自然环境。

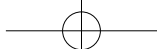
在我国提出大力发展的“低空经济”中，低空飞行活动的高度范围只是上述“低空”的一小部分，即从地表向上 6000 米，此处也是我国基础空域划分的 A 类的下限。这样说的依据是 2025 年 6 月 1 日下发的一份中央文件指出，“有序开放标准气压高度 6000 米以下管制空域，用于低空经济

活动”，事实上认定了低空经济中的“低空”不局限于 1000m，也不局限于 3000m 或 4000m，而是 6000m。

这段高度范围里，空气稠密，对流剧烈，气象多变。低空飞行的复杂环境首先是指这个高度范围的复杂自然环境。

我们以 6000m 为例，认识一下这里的自然环境。6000m 高空的气象环境以低压、低温、低密度空气和强风为特征，对航空活动、设备性能及人体生理均有显著影响。从 6000m 向下直到地表，气象参数呈现渐变的过程，部分参数变化为非线性。

(1) 气压与空气密度。气压随高度升高呈指数递减，每上升 100m，气压下降约 0.67kPa，6000m 高空的标准气压约为海平面的 50%，即约 540hPa（或 0.5 个标准大气压）；空气密度降至海



平面的约 50%，即约 0.7 kg/m^3 。这一变化直接影响飞行器的升力和发动机效率，例如无人机在此高度需调整动力输出以补偿升力损失。商用飞机需通过增压系统维持舱内气压至相当于 2400m 高度（约 800 hPa），以平衡乘客舒适度与飞行器结构强度的需求。

(2) 温度分布。高度每上升 1000m，温度下降约 6.5°C ，6000m 高度的平均温度约为 -24°C （标准大气条件下）。低温可能导致飞机燃油结冰或机械部件性能下降。在冬季，该高度层的温度可能更低（如 -30°C ）。商用飞机需要对抗高空低温，提供适宜温湿度的舱内环境。

(3) 天气现象与风场、雷电。6000m 位于对流层中，偶有积雨云发展，可能引发颠簸或雷暴。6000 米高度的风速通常为地面的 2–3 倍。例如，地面风速 2m/s 时，高空可达 6m/s 以上。风向受科里奥利力（Coriolis Force，又称科氏力，是旋转参考系中因物体运动而产生的一种惯性力）影响，北半球向右偏转，逐渐转为偏西风。该高度层可能存在较强的垂直或水平风切变，对飞行稳定性构成挑战，这种现象在山区或急流带附近尤为显著和复杂。

雷电是一种强天气现象，发生的云层高度范围较广，但通常发生在积雨云的中下部，云底距地面高度一般为 300m 至 5000m。强对流天气下，产生雷电的云底可低至不足 300m；5000m 以上因气温降至零下，水蒸气颗粒凝固为固体，难以形成电荷分离。雷电对航空器的影响是多方面的，涉及飞行安全、结构损伤、电子系统干扰等，将专门列出并讨论。

(4) 大气成分与能见度。6000m 高度处氧气含量仅为海平面的 50%，人类暴露在此环境中会迅速出现缺氧症状，需依赖增压舱或氧气设备。能见度通常较高，但可能受冰晶云（如卷云）或航

迹云（在低温如 $< -40^\circ\text{C}$ 时，发动机排放的水汽与凝结核作用，可能形成）的影响。

如前所说，6000m 以下的大气是连续的，上述变化是渐变的，如果一具飞行器要在这样一个高度范围飞行，就必须适应这里的自然环境，克服自然环境带来的不利影响。

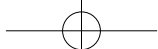
第二、低空飞行的人为环境

自然环境是航空飞行赖以存在的基础条件，换言之，航空飞行对自然环境是利用（借助空气产生静升力或动升力）和适应问题。但同时，又必须构建人为环境（或人造环境），以满足航空飞行的需要。广义地说，机场、跑道、航线、空管、培训设施、机舱环境等都是，通过人为技术手段模拟或创造的特定环境或条件，以满足安全、稳定、可靠飞行的要求。人为环境在提供飞行所需条件的同时，又产生了对大环境的不利影响，航空器相互之间也会产生不利影响。航空噪声与电磁干扰是两个主要的不利影响，也就成为人为环境效应、甚至全部环境效应的主要研究内容。

(1) 航空噪声与噪声抑制

航空噪声是一种特殊的环境声学现象，是由航空器在起飞、飞行、着陆等过程与活动中产生的一系列复杂声波组合而生，主要包括推进器噪声、排气噪声、喷气噪声、风扇噪声以及附面层压力起伏引起的噪声。这些噪声源的产生机理、频率与时间特性和传播规律各不相同，总体呈现出宽频带、非稳态和指向性强的特点。

以民用飞机为例。根据飞机运行阶段和噪声产生机制的不同，航空噪声可分为起飞噪声、巡航噪声、着陆噪声和地面运行噪声四大类，每类噪声的频谱特性和影响范围均有显著差异。起飞噪声主要来源于发动机喷气噪声。着陆噪声主要来自涡轮和风扇，呈现为高频为主的连续噪声。



地面运行噪声主要包括辅助动力装置 (Auxiliary Power Unit APU) 运行、飞机滑行和地面试车产生的噪声。

涡轮喷气飞机的主要噪声源是涡轮和喷气, 典型噪声级 90 – 110dB (地面), 主要影响跑道前方扇形区域; 涡轮风扇飞机的主要噪声源是风扇和喷气, 典型噪声级 80 – 100dB (地面), 主要影响跑道两侧较窄区域; 螺旋桨飞机的主要噪声源是螺旋桨与排气, 典型噪声级 8-95dB (地面), 影响较为广泛的周边地区; 直升机的主要噪声源是旋翼与传动系统, 典型噪声级 110 – 119dB (舱内); 超声速飞机的主要噪声源是轰声和喷气, 典型噪声级 110 – 130dB (轰声), 主要影响低空飞行时所覆盖的数公里宽区域。

超声速飞机产生的轰声、即声爆 (Sonic Boom) 是一种特殊的航空噪声现象。当飞机以超过声速的速度飞行时, 会产生 N 形压力波, 在地面被感知为强烈的爆炸式声响。这种噪声覆盖区域广、强度大, 因此协和号被限制只能在大西洋海域飞行, 进而导致其运营难以为继, 这成为该机型于 2003 年停飞的主要原因。

航空噪声对环境和人的健康造成不利影响, 降低和抑制航空噪声, 成为航空发展中不可忽视的挑战, 尤其在低空飞行时, 这种挑战更为严峻。近年来, 随着总体设计、航空发动机、材料与制造技术的进步, 航空噪声防控取得了显著进展, 为平衡航空运输发展与环境保护提供了关键支撑。

从 20 世纪 50 年代至今, 喷气客机噪声已大幅降低, 其中涡轮风扇发动机的贡献尤其显著, 通过增大涵道比、降低喷气速度和优化风扇设计, 实现了噪声与效率的双重改善。此外, 机体设计的进步也功不可没, 例如通过改进空气动力学外形、优化机身设计来减少附面层压力起伏噪声, 采用复合材料以降低结构振动, 优化起落架和襟

翼设计来减少气流分离噪声等。正因这些综合技术的应用, 新一代机型如波音 787 和空客 A350, 比前代机型噪声低 15 – 20dB。

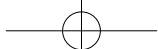
未来航空噪声技术将在低噪声航空器设计、低噪声航空发动机和先进使能技术等领域发力, 并向识别精准化和控制智能化方向发展。材料领域的突破将带来更高效的声学处理方案; 智能材料如压电陶瓷和形状记忆合金的应用, 有望实现自适应噪声控制, 即根据飞行条件自动调节结构以抑制噪声。

被视为未来低噪声航空器重要发展方向和低空飞行新品种的电动垂直起降 (eVTOL) 飞机, 在理论上可比传统直升机噪声降低 20dB, 展现出改变城市空中交通噪声格局的潜力。其噪声主要来自旋翼和电力系统, 呈高频特性且指向性更强。在大力发展此类航空器之始, 应将噪声控制纳入设计指标。同时, 应合理设计起降场和飞行航路, 以最大限度降低对社区影响与安全风险。

(2) 电磁干扰与电磁兼容

电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI) 是指电子设备或自然现象产生的电磁波影响其他设备正常工作的扰动现象。其本质是电磁场中的能量通过传导或辐射方式传递到其他电路中, 导致信号失真、设备故障甚至产生安全隐患。

电磁干扰的核心三要素为干扰源 (如雷电、电机、通信设备)、传播途径 (传导或辐射耦合) 和敏感设备。EMI 有多种分类方法, 按来源可分为有意干扰 (雷达、通信设备等主动发射的电磁波) 和无意干扰 (电气和电子设备运行时附带产生的干扰); 还可以分为自然干扰 (雷电、太阳黑子活动、宇宙噪声等) 和人为干扰。按传播方式可分为传导干扰 (通过导线或公共阻抗耦合) 和辐射干扰 (通过空间电磁场传播, 如天线间的干扰)。EMI 的频率范围宽泛。从工频 (50Hz) 到微



波 (300MHz – 100GHz), 不同频段的干扰呈现不同特性。

电磁干扰的危害是多方面的, 就航空器而言, 可能对机上电子设备造成影响, 如通信中断 (如飞机导航系统受干扰导致失联)、数据损坏 (如计算机死机、误码率升高) 和自动控制系统失灵 (如飞控系统故障) 等。

抑制电磁干扰的措施也是多样的, 包括屏蔽技术 (使用金属材料包裹设备或电缆, 阻断电磁波传播)、接地技术 (通过低阻抗接地释放干扰电流, 避免共模干扰)、滤波技术 (采用电容、电感等元件滤除特定频率的噪声)、合理布局与布线 (减小或避免辐射耦合)、切断传导路径和抑制高频干扰 (如通信线缆加磁环) 等。

电磁干扰是现代社会无法回避的问题, 其治理需结合技术手段 (如屏蔽、滤波) 和法规标准 (如 EMC 认证) 协同推进。由此, 引出电磁兼容与电磁兼容性的概念及其成系统的技术。

所谓电磁兼容 (Electromagnetic Compatible), 是指使用电磁频谱工作的工业产品在电磁环境中实现自身功能、抑制 EMI 的一种状态。而电磁兼容性 (EMC, Electromagnetic Compatibility) 指的是上述工业产品在使用电磁频谱工作时的一种“能力”, 这种能力可以保证它们在规定条件下, 不会因电磁发射或响应而造成不能接受或未预知的性能下降。两个词都可简称为 EMC, 但有一定的区别。在苏东林院士的专著《系统级电磁兼容性量化设计理论与方法》里, 特别指出要注意区分这两个概念。

EMC 所面对的电磁环境, 大致分为两类: 电磁背景环境与电磁威胁环境。后者特指把电磁波当做武器, 对敌方装备进行有针对性的电磁压制或干扰, 使其不能正常工作或完全失效, 这已成为现代战争中电子战的基本手段。鉴于其特殊性,

本文不再详述此类环境。

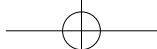
电磁背景环境则主要源于大量使用的各式电子电气产品, 主要表现形式是使用时产生的传导干扰和辐射干扰。在现代社会中, 电磁背景环境是如此之强大、复杂, 我们身边充斥着挥之不去的电磁波, 已经没有什么纯净空间可言了。

我曾看过一个材料, 说 20 世纪 50 年代, 一台 120kW 长波发射机的功率场可覆盖 30 万 km², 而如今要达到同样面积, 功率需增大到 2MW, 接近 20 倍。对这个数据我未做考证, 但从那时以来, 以高频、高速、高灵敏度、高安装密度、高集成度、高可靠性等为特征的电子信息技术快速发展, 它所带来的负面影响确是不争的事实。

电磁背景功率与产品的电磁发射功率交相互涨, 导致电子信号接收、传输与处理系统的危机, 严重时可导致系统崩溃, 这绝非危言耸听。进入 21 世纪, 电磁环境持续恶化, 如何使“产品”能正常工作, 而又对环境的负面影响最小, 成为严峻挑战和重大科技难题。

随着电磁环境的日益复杂化, 人们愈加认识到电子电气产品具有 EMC 的重要性, 并认识到, EMC 是一个系统工程问题。产品研制设计之初就必须考虑 EMC, 而不是等到产品研制出来、在测试或使用中发现问题时, 再来补救。EMC 设计与amp;管理必须贯穿于产品的设计、研制、使用全过程。同时, 要十分重视 EMC 标准和规范的建立与贯彻, 符合有关标准 / 规范 (如发射准则、敏感程度等) 的产品, 才能被认为具有了 EMC, 即, 既可抵御来自环境的影响, 自身对外部环境的影响又可控。

对航空器而言, EMC 的核心挑战在于: 干扰源多样性, 如前所述, 包括自然干扰 (雷电、太阳风) 和人为干扰 (雷达、通信设备); 设备敏感性与多耦合路径, 包括高灵敏度接收机 (如导航系统) 易受大功率设备 (如雷达) 的辐射干扰, 而机舱



内狭小空间加剧了线缆传导和空间辐射耦合程度；动态电磁环境，飞行不同阶段（起飞、巡航、着陆）的电磁环境差异显著，地面大功率设备与机载系统交互可能引发匹配试验中未暴露的问题。

EMC 问题，需通过设计预防、测试验证、动态调控等多维度，面向全生命周期予以解决。从设计阶段开始，优化布局及采用多种先进技术（如使用金属屏蔽层或导电复合材料的屏蔽技术）阻断辐射干扰；采用滤波与接地技术（在电源线和信号线加装穿心电容或低通滤波器），抑制传导干扰；优化接地网络以减少电位差；采用合理布局与布线技术，使敏感设备远离干扰源，线缆分类绑扎并采用双绞线或屏蔽线，以降低串扰。

还要加强测试与验证工作。通过实验室模拟（如辐射敏感度测试）和实际飞行测试结合，进行系统级 EMC 试验，验证设备在极端场强下的稳定性。进行动态环境模拟，构建飞行状态下的实时电磁环境模型，模拟不同高度、姿态的干扰场景。

人们对 EMC 的认识经历了曲折和逐步提升的过程，为此也付出过沉重的代价，至今问题也并未真正解决。也许，永远都不能说问题得到了彻底解决，“此长彼消”“魔道相弈”的状况将始终存在。20 世纪 80 年代，EMC 成为世界范围的一个活跃的学科领域。我国以 1986 年颁布 GJB151-86《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》为标志，EMC 也进入实质性发展阶段。

未来，航空器 EMC 将向一体化、智能化自适应、绿色高效和低成本方向发展。将从单设备兼容转向全系统协同兼容；利用智能材料（如可变阻抗涂层）动态调节屏蔽效能。通过机器学习分析干扰频谱，快速定位干扰源并优化抑制策略。开发低功耗、低辐射的机载设备，减少电磁污染对生态环境的影响。

第三、雷电的影响与防范

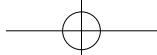
雷电这一特殊自然现象，主要发生在低空，且对航空器造成全面影响。统计显示，76% 的雷击发生在 7600m 以下，爬升和下降阶段风险最高；喷气式飞机平均每 1 万飞行小时遭遇一次雷击。因此，对其单独进行影响与防范的分析。

雷电对航空器的影响包括直接影响和间接影响。

直接影响主要指：结构与设备损伤，包括机身物理损坏、金属蒙皮烧蚀、关键部件破坏等。雷电的巨大电流（可达数万安培）可能击穿飞机铝质蒙皮，形成穿孔或熔痕，尤其是机头、翼尖、尾翼等突出部位。雷电产生的瞬态电磁场可穿透非金属结构，产生电缆浪涌电压，威胁航电设备；现代飞机结构大量采用碳纤维复合材料，其导电性差，雷击可能导致其分层、烧蚀甚至结构强度下降，需通过金属箔或导电网格增强防护。雷达罩因使用玻璃、碳纤维等非导电材料更易受损。雷击可能引燃燃油蒸汽，引发油箱爆炸；还可能损坏天线、传感器、翼尖放电刷、空速管等，导致通信或导航功能失效。

间接影响主要发生于电子系统，表现为功能障碍与操控干扰。雷电产生的强电磁场会干扰无线电罗盘、气象雷达等设备的正常工作，导致数据失真或信号丢失，甚至失去功能或通信中断。微电子电路（如飞控系统）可能因感应电压浪涌而发生故障，极端情况下引发自动驾驶失效。同时，还会对机组操作形成障碍，如强光致盲、仪表误读等。

由于雷击产生的环境关联风险也不可忽视。如伴随风切变等天气现象出现的颠簸——雷暴云中的强垂直气流导致飞机剧烈颠簸，甚至失控。还可能出现积冰与冰雹——低温环境使机身结冰，增加阻力；冰雹撞击可损毁发动机或挡风玻璃等。



雷电对航空器的影响可归结为物理损伤与电磁干扰的复合威胁，需要通过防护设计、采用功能适宜的材料、提高电磁兼容性和飞行管理等多种举措来应对。该领域技术发展趋势主要是优化设计、试验测试有效性、研发智能传感蒙皮和防护一体化复合材料等；飞行员与空管协同避让雷暴也是有效的安全策略。

第四，低空飞行复杂环境效应认知

低空飞行器复杂环境效应问题，在本质上是飞行器应该具有对环境的“低扰性”和面对低空复杂环境时的“抗扰性”（如果可以这样称谓的话）。前者是飞行器对环境和对其他飞行器的主动影响，后者是飞行器对于环境诸影响的被动适应。

可否将“低扰性”定义为：飞行器和机上系统在形成和保持功能的前提下，最大程度地消减对于环境产生的不利影响（如噪声、电磁干扰等）的一种特性或状态（Low Interference）。实现“低扰性”所需的技术或技术群，称“低扰性技术”。具有“低扰性”的航空器，类似“隐身航空器”，只不过后者是在特殊频率或频段下使自己的目标特征尽可能小。

而“抗扰性”与已经广泛使用的“抗干扰”基本同义，可称为：飞行器和机上系统抵抗外部干扰、保持功能与性能的特性或能力（Anti-interference Capability）。低空飞行器如低空无人机和类似eVTOL这样的新型航空器，面临的“抗扰性”问题，比高空更复杂，特别是气象与电磁环境的复合扰动。此外，低空飞行时还有多种特殊问题，如鸟击鸟撞、近地面沙尘环境、现代城市建筑环境、密集低空飞行器的相互干扰等，既有自然环境的影响，又有人为环境的影响，在研制低空飞行器、规划和实施低空飞行活动时，都需要充分考虑，采取有效的应对措施。

当前，我国低空经济潮起，低空飞行活动日趋活跃，但首要的物质基础是多样化的、适用的低空航空器。而这些低空航空器能正常飞行与进行工作的性能要求中，就应包含对复杂环境具有“抗扰性”，同时在需要时，还要对己方具有一定的“低扰性”，即自身对环境和他机的影响可控。

本文转载自作者于2025年8月21日在微信公众号“聚恩君”发表的同名文章。



【作者简介】张聚恩，1947年3月生，研究员。1964年入北京航空航天大学学习，1969年毕业于电子工程系。现任中国航空学会名誉副理事长、中国科协航空科学传播首席专家。参加我国多型航空装备研制，参与领导和组织多轮航空科技发展战略研究与规划制定实施、歼20/运20等重大型号预先研究等。曾任中国航空系统工程研究所总师、中国航空工业第一集团公司科技部部长、中国航空研究院常务副院长、中国航空学会第七届理事会秘书长等职。著述或主编《新航空概论》《大国航空》《空天工程通识》《2049年中国航空科技与未来航空》等。拥有个人微信公众号“聚恩君”，创作发表大量文章，宣传航空事业，普及科技知识，弘扬奋进精神。