

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.240379

低空飞行器噪声测量与计算方法综述

朱华颀¹, 芦照杰¹, 杨炜俊², 蔡 铭¹

(1. 中山大学 智能工程学院, 广东 深圳 518107; 2. 广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045)

摘要: 低空飞行器作为一种融合多学科技术的创新产物, 在过去几年中应用规模迅速扩大, 并且在未来具有进一步增长的潜力。然而, 低空飞行器可能成为环境噪声污染的新来源, 导致越来越多的人对其噪声产生烦恼反应。因此, 本文从低空飞行器噪声排放相关的法律法规、噪声测量与分析 and 噪声计算 3 个方面梳理了国内外研究现状。在法律法规方面, 介绍了欧盟航空安全局和美国联邦航空管理局对噪声排放限值的规定, 以及我国对低空飞行器噪声排放的治理目标; 在噪声测量与分析方面, 重点梳理了国内外 3 份指导低空飞行器噪声测量的标准, 并且讨论了室外和实验室内噪声的测量工作; 在噪声计算方面, 重点关注了基于模型和基于噪声传播的计算方法。最后, 剖析了低空飞行器在这些方面存在的问题, 并对未来低空飞行器噪声的防治和研究提出建议, 包括拓展法律法规的覆盖范围、统一测量标准以及增强验证等, 以推动低空飞行器噪声控制技术的进一步发展。

关键词: 低空飞行器; 噪声测量; 噪声计算; 噪声防治

中图分类号: X593; F403

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2025)01-0022-12

A Review of Noise Measurement and Calculation Methods for Low-altitude Aircraft

ZHU Huasa¹, LU Zhaojie¹, YANG Weijun², CAI Ming¹

(1. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

2. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

Abstract: As an innovative product integrating multidisciplinary technologies, low-altitude aircraft have rapidly expanded in application scale over the past few years and demonstrate foreseeable potential for further growth. However, low-altitude aircraft are highly likely to become a new source of environmental noise pollution, potentially causing increasing noise-related complaints. To address this issue, this paper reviews the current state of domestic and international research from three aspects: regulations related to low-altitude aircraft noise emissions, noise measurement and analysis, and noise calculation. In the aspect of regulations, the paper introduces the noise emission limits stipulated by the European Union Aviation Safety Agency (EASA) and the United States Federal Aviation Administration (FAA), as well as Chinese governance objectives for low-altitude aircraft noise emissions. In the aspect of noise measurement and analysis, it highlights three standards for noise measurement of low-altitude aircraft both domestically and internationally, and discusses the measurement methods employed in outdoor and laboratory environments. In the aspect of noise calculation, the paper concentrates on model-based and noise propagation-based methods. Finally, the paper analyzes challenges in these aspects and suggests future directions for noise prevention and research in low-altitude aircraft, including broader regulations, standardized measurement guidelines, and enhanced verification, to advance the development of noise control technologies.

收稿日期: 2024-11-27

基金项目: 国家自然科学基金委青年基金资助项目 (52302448); 中国工程院院地合作资助项目 (2024-DFZD-18-03)

作者简介: 朱华颀 (2001—), 男, 海南省人, 硕士研究生, 主要研究方向为低空飞行器噪声与机场噪声。

Email: zhuhs@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 蔡铭 (1977—), 男, 广东省人, 教授, 博士, 主要研究方向为交通大数据、交通环境工程、自主交通系统和低空运行控制研究。Email: caiming@mail.sysu.edu.cn

Key words: low-altitude aircraft; noise measurement; noise calculation; noise prevention

近年来, 低空飞行器技术迅猛发展, 无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV)、电动垂直起降飞行器 (electric vertical take-off and landing, eVTOL) 等低空飞行器在物流配送、环境监测、城市管理等领域得到了广泛应用。随着技术的进步和市场需求的增加, 低空飞行器的数量和种类不断增加, 其飞行频率和覆盖范围也迅速扩大。民航局数据显示, 截至 2023 年底, 无人机设计制造单位约 2 000 家, 国内注册无人机约 126.7 万架, 同比增长 32.2%; 无人机累计飞行时间超 2 300 万 h^[1]。

然而, 低空飞行器在运行过程中不可避免地产生噪声, 因此引发噪声污染问题。尤其在城市区域, 噪声污染会对居民的生活健康以及社会经济造成不利影响。在我国这样快速城市化和高人口密度的国家, 低空飞行器的普及对城市噪声环境带来了新的挑战。美国国家航空航天局 (national aeronautics and space administration, NASA) 和 Joby 公司对 Joby eVTOL 的噪声测量显示, 当飞行器在距离测量点 100 m 外起飞或降落时, 噪声的测量值为 65 dB(A)^[2]。在城市环境中, 飞行器与噪声敏感建筑物 (如住宅、学校、医院等) 的距离通常介于 50 ~ 200 m 之间, 这将加剧噪声对这些区域的影响。考虑到飞行器运行的高度可达几十至几百米, 其噪声传播范围在垂直空间的覆盖更加广泛, 影响的区域不仅限于水平分布, 还会扩展到更大范围内的受体。在未来飞行器普及的情况下, 这类噪声值可能会超过我国规定的绝大部分声功能区的噪声限值 (住宅 1 类声功能区昼间限值为 55 dB(A), 商住混合 2 类声功能区昼间限值为 60 dB(A))^[3]。

相关研究表明噪声会导致居民烦恼^[4]、睡眠障碍^[5]以及工作效率降低^[6]。长期暴露在飞机等飞行器噪声中, 还可能导致听力受损^[7]、心血管疾病^[6]、神经系统问题^[8]以及胎儿发育异常^[9]等健康风险。也有研究针对低空飞行器对人的烦恼程度的影响进行调查与分析。Christian 等^[10]的调查表明, 即使在相同的噪声水平下, 无人机产生的声音比汽车的声音更令人讨厌。Yedavalli 等^[11]对全球 1 500 人进行调查, 结果表明在无人机增加的情况下, 噪声是公众最关心的问题之一。Gwak 等^[12]发现, 无人机比相同“响度”的传统道路车辆和飞机的噪声更让人烦恼。

欧盟航空安全局 (european union aviation safety agency, EASA) 对全欧洲范围的公众调查研究表明, 公众对无人机的接受程度强烈依赖于感知的安全性、隐私保护问题和无人机的运行噪声^[13]。

因此, 为了更准确地评估与减小低空飞行器噪声对公众的影响, 对低空飞行器噪声的测量与计算具有重要的现实意义和学术价值。为此, 本文从低空飞行器噪声相关法规与标准、飞行器噪声测量与分析、飞行器噪声计算 3 个方面系统地论述低空飞行器噪声的研究进展及存在的挑战。最后, 探讨当前研究的不足之处, 并展望未来的发展趋势, 对低空飞行器噪声测量与计算的发展提出建议, 为相关领域的研究人员和工程技术人员提供参考, 以推动低空飞行器噪声控制技术的进一步发展。

1 文献筛选

为了统一表述, 本文将城市空中交通 (urban air mobility, UAM) 和无人飞行器系统 (unmanned aircraft system, UAS) 等表示城市空域的词汇称为“低空”, 对于这些范围内涉及的飞行器统称为“低空飞行器”。本文聚焦于低空飞行器的噪声问题, 用于搜索的关键词为以下两组词汇的组合。第 1 组为 UAV、UAM、UAS、eVTOL、drone 和 aircraft; 第 2 组为 noise 和 sound。在实际检索过程中, 本文采取了两组关键词中各选取一个进行组合的方式, 例如“UAV and noise”“UAM and sound”“drone and noise”等, 以确保不同术语组合下的相关文献均被覆盖, 然后把检索结果按相关度排列, 重点聚焦于 2016 年 6 月 1 日至 2024 年 11 月 1 日的文献。使用的数据库是 Web of Science 和 Google Scholar。对这些文献进行去重处理, 并通过阅读摘要、文章内容排除无关的文献, 基于低空飞行器噪声测量和计算的角度, 确定了与本文主题高度相关的文献。期刊来源主要包括 Journal of the Acoustical Society of America、Aerospace Science and Technology、Acta Acustica United with Acustica、Transportation Research Part D: Transport and Environment、CEAS Aeronautical Journal 等。会议来源主要包括 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference、Inter-Noise、AIAA Aviation Forum、Quiet Drones Conference、NOI-

SE-CON 等。本文围绕低空飞行器噪声相关的法律法规、噪声测量与分析 (包括测量标准、室外测量和实验室内测量), 以及噪声计算 (包括基于模型的计算方法和基于噪声传播的方法)3 个主要主题展开, 系统地梳理和分析现有研究成果。

2 国内外研究现状

2.1 低空飞行器噪声排放限值相关法规与标准

该部分主要对国内外低空飞行器噪声排放限值的相关法规或标准进行简要介绍。随着技术的进步和应用场景的扩展, 一些国家和国际组织致力于出台相关的噪声管理法规和技术标准, 以确保新型飞行器的噪声排放符合环境保护的要求, 并减少对公

众的负面影响。但在现有阶段, 关于低空飞行器噪声排放限值的法规较少, 对噪声的限制大多集中于航空飞行器 (民航飞机) 以及划分的声功能区 (包括所有种类的噪声)。

EASA 在 2019 年规定小于 4 kg 的低空飞行器的最大 A 计权声功率级^[14], 并在 2020 年进行了修订^[15](见表 1)。2023 年 6 月, EASA 发布了世界上第一个关于 eVTOL 飞行器的噪声评估和限制的提案——环境保护技术规范 (environmental protection technical specifications, EPTS)^[16]。该规范适用于由多个垂直、非倾斜、均分分布的旋翼提供动力的飞行器。EPTS 中规定了特定的 eVTOL 飞行的有效感知噪声分贝 (effective perceived noise decibels, EPNdB) 的限值, 如表 2 所示。

表 1 EASA 在 2020 年规定的每类低空飞行器的最大声功率级 (包括过渡期)

Table 1 Maximum sound power levels for each category of low-altitude aircraft specified by EASA in 2020 (including transition periods)				
种类	最大起飞质量 m/g	最大声功率级 $L_{\text{WA}}/\text{dB(A)}$		
		自生效日起	自生效后 2 年起	自生效后 4 年起
C1/C2	$m < 900$	85	83	81
C2	$900 \leq m < 4\,000$	$85 + 18.5 \lg \frac{m}{900}$	$83 + 18.5 \lg \frac{m}{900}$	$81 + 18.5 \lg \frac{m}{900}$

表 2 EPTS 规定的飞行器允许的最大噪声水平

Table 2 Maximum permissible noise levels for aircraft specified by EPTS			
最大起飞质量 $m/1\,000\text{ kg}$	不同飞行程序的噪声水平/EPNdB		
	起飞	飞越	降落
$m \leq 0.788$	86	84	89
$0.788 < m \leq 0.8$	$87.031\,4 + 9.967\,3 \lg m$	$85.031\,4 + 9.967\,3 \lg m$	$90.031\,4 + 9.967\,3 \lg m$
$0.8 < m$	106	104	109

美国联邦航空管理局 (federal aviation administration, FAA) 于 2022 年 12 月对 Matternet M2 型飞行器应用了噪声认证标准^[17]。噪声认证标准是为了确保飞行器在运行过程中产生的噪声不会对环境、公众健康及生态系统造成过度影响所设定的噪声排放的具体标准。由于现有航空器认证体系尚未制定适用于所有类型无人机的通用噪声认证标准, FAA 目前正在为特定型号的无人机制定专门的噪声认证标准^[18]。为了填补这一空白, FAA 于 2023 年 7 月发布了一系列认证标准, 涵盖了大部分在美国境内运行的低空飞行器。这些认证标准适用于包括 Amazon 的 MK27-2、Flytrex 的 FTX-M600P 和 Airobotics 的 Optimus 1-EX 在内的多种无人机^[18]。这些飞行器

的噪声认证过程大致基于《联邦法规》附录 J 第 36 部分 H 子部分中定义的小型直升机噪声认证方法^[19]。FAA 已经提议对该方法进行更改以使其更适合低空无人飞行器, 例如将飞行高度从 492 ft 降低到 250 ft, 规定的暴露声级 (L_{AE}) 限值为 78 dB(A)。但有许多小型无人机制造商表示, 所提议的程序过于复杂, 而且成本高昂。

2023 年 6 月, 中国民用航空局颁布了《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》^[20]。其中, 第八条提出: 从事民用无人驾驶航空器系统的设计、生产、使用活动, 应当符合国家有关实名登记、飞行区域限制、应急处置、网络信息安全等规定, 并采取有效措施减少大气污染物和噪声排放^[20]。我国目前虽

然还没有对无人机的噪声排放规定具体的限值或实行强制措施, 但这为行业的技术创新提供了空间, 也为未来根据实际情况逐步细化噪声治理政策奠定了基础。

2.2 飞行器噪声测量与分析

本节首先对国内外的 3 份指导低空飞行器噪声测量的测量标准进行梳理, 对其提出的适用范围、飞行测试要求、度量指标和环境要求进行说明。此外, 本节将介绍近年来关于低空飞行器噪声的测量与分析的研究进展, 主要分为室外测量和实验室内测量两部分进行阐述。

2.2.1 测量标准

1) EASA: guidelines on noise measurement of unmanned aircraft systems lighter than 600 kg operating in the specific category (low and medium risk) [21]。

EASA 的测量方法适用于质量小于 600 kg 的无人机, 噪声度量指标为 A 计权暴露声级 L_{AE} 和 A 计权等效声级 L_{Aeq} , 分别对应水平飞越和悬停状态。水平飞越时, 参考测量点位于飞行器垂直下方 50 m 处; 悬停时, 参考测量点位于飞行器垂直下 25 m 处, 悬停持续时间为 30 s。由于每次测量时飞行器并不一定能在参考条件下飞行, EASA 还提出了测试情况下的测量要求。测试需进行至少 6 次重复, 飞行器高度和位置需满足特定限制条件 (如飞越高度在 17~150 m 之间, 横向偏移不得超过 $\pm 10^\circ$; 悬停高度在 12 m~50 m 之间, 偏差需控制在 ± 1 m 以内)。

测量环境要求包括地势平坦、无吸声特性; 温度在 5°C ~ 35°C 之间; 相对湿度为 20%~90%; 平飞越风速不超过 5.1 m/s, 悬停风速不超过 2.6 m/s, 且测量点上方锥形空间内无障碍物。每次测量的最大 A 计权声级 L_{Amax} 需高于背景噪声 15 dB (A) 以上, 否则测量无效。

2) ISO 5305:2024: Noise measurements for UAS (unmanned aircraft systems) [22]。

国际标准化组织 (international organization for standardization, ISO) 提供的低空飞行器噪声测量方法适用于最大起飞质量小于 150 kg 的多旋翼无人机, 但不包括倾转旋翼机或倾转翼无人机。标准针对消声室、消声风洞和室外环境提出 3 种测试环境的建议, 并规定了不同飞行状态下的噪声度量指标 (见表 3)。其中, L_{Ap} 表示 A 计权声压级; L_{SAmax} 表示慢时计权 A 计权最大声压级。

表 3 ISO 中不同环境下的度量指标
Table 3 Measurement metrics for different environments in ISO

飞行状态	3 种环境下的度量指标		
	消声室	消声风洞	室外环境
悬停和偏航	L_{Ap}	L_{Ap}	L_{Ap}
起飞、降落和巡航	L_{AE}	L_{Ap}	$L_{SAmax} \setminus L_{AE}$

为了满足远场条件, 飞行器与传声器之间的距离需大于等于飞行器直径的 5 倍, 且飞行器离地高度应至少为 1.2 m 或直径的 2 倍 (取较大值)。ISO 特别关注噪声的指向性, 对每种飞行器状态和测量环境下的传声器布置位置、对飞行器的角度以及角度的分辨率都做了明确的要求。

在 3 种环境中, 背景噪声需低于被测飞行器噪声至少 6 dB(A), 推荐低于 15 dB(A)。在室外环境, 传声器需配备防风设备, 使 10 m/s 风速下的 A 计权 1 min 等效声压级 ($L_{Aeq,1min}$) 不超过 65 dB(A)。

3) GB 42590—2023: 民用无人驾驶航空器系统安全要求 [23]。

《民用无人驾驶航空器系统安全要求》规定了微型、轻型和小型无人机的分类标准, 并要求噪声测量的度量指标为 A 计权声压级。测试需使用地面和侧面两个观测点, 飞行高度和悬停高度均需满足大于无人机最大直径 5 倍。

测试结果需归一化至距离飞行器 1 m 处, 以表征噪声排放水平, 并用于铭牌和说明书标注。测量环境需满足地形平坦、温度在 5°C ~ 35°C 之间、相对湿度在 20%~90% 之间的条件; 飞行状态下风速不得超过 4.1 m/s (飞行方向) 和 2.1 m/s (垂直方向), 悬停状态风速不得超过 2.1 m/s。背景噪声要求低于无人机噪声 10 dB(A), 全消声室中推荐低于 15 dB(A)。

4) 小结。

本节介绍了关于飞行器噪声测量的 3 份测量标准。相比于国标 GB 42590-2023, EASA 和 ISO 对整套测量的流程有更详细地描述。3 个测量标准进行对比, 情况见表 4。从度量指标、测量环境和指向性的要求来看, ISO 的测量标准对各种环境下测量活动有更多、更明确的要求, 比较严格, 其次是 EASA 的测量标准。EASA 标准在广泛应用中更具合理性, 其适用于大部分质量小于 600 kg 的无人机, 包括多旋翼飞行器、固定翼飞行器、直升机和动力提升飞行器, 适用的飞行器范围广于其他两者。并且, EASA 测量标准中描述的方法比 ISO 提

表 4 3 份标准的对比

Table 4 Comparison of three standards

要点	EASA	ISO	GB
适用飞行器质量	小于 600 kg	小于 150 kg	小于 25 kg
测量状态	飞越、悬停	飞越、起飞、降落、悬停和偏航	飞越、悬停
度量指标	L_{AE}, L_{Aeq}	$L_{AE}/L_{SAmax}, L_{Ap}$	L_{Ap}
测量环境	室外	消声室、消声风洞、室外	室外
指向性	未考虑	考虑	未考虑
背景噪声要求	必须小于目标 15 dB	必须小于目标 6 dB, 理想为 15 dB	必须小于目标 10 dB, 理想为 15 dB
适用范围	较大	较大	较小

出的更简单，只需在飞行路径下方放置麦克风。

2.2.2 室外测量

室外较为宽阔，为无人机进行飞越等需要较大活动范围的操作提供场地。

Cabell 等^[24]描述了各种无人机悬停和飞越状态下的声压测量，将 3~4 个麦克风阵列放置在跑道中心的横线上。结果表明，所测得的 4 轴飞行器和模型飞机的 EPNL 聚集在 76 EPNdB 附近。其中，4 轴飞行器在飞越状态下离麦克风大约 5 m，模型飞机在麦克风上方 15~20 m。6 轴飞行器的变化更大，从 7 m 处的最大值 79 EPNdB 到 21.7 m 时的 69.4 EPNdB。

Senzig 等^[25]报告了 DJI Phantom 2 和 Prioria Hex 等飞行器在 400 ft(约 122 m) 下飞越的 A 计权最大声级，DJI Phantom 2 和 Prioria Hex 的 A 计权最大声级分别为 44.9 dB(A) 和 45.9 dB(A)。Senzig 等^[26]还报告了 DJI Phantom 3 Advanced 在 25 ft、50 ft、100 ft 和 200 ft 巡航时的 A 计权最大声级和暴露声级。

Alexander 等^[27-28]对 DJI M600pro 在悬停和以 3.2 m/s 慢速飞越的状态进行测量。其中，5 个麦克风放置在垂直于前向飞行路径的直线上，以覆盖不同的辐射角度，使用的度量为 Z 计权的暴露声级。

Read 等^[29]报告了测量的 Yuneec Typhoon、DJI M200 和 Gryphon Dynamics GD28X 无人机在快慢速飞越、垂直起降和悬停状态时归一化到麦克风上方 400 ft(约 122 m) 高度的 A 计权最大声级、A 计权等效声级和 A 计权暴露声级。这项工作中的测量数目十分庞大。

Wickersheim 等^[30]对配备分布式推进的飞行器的飞越噪声进行测量，结合了 GPS、飞行速度和声学数据，重建了噪声地图。结果显示，所有重构的噪声地图都表现出相似的方向性模式，有明显的高噪

声区域。此外，该研究还引入了一种消除背景噪声的方法，该方法不影响被观测的噪声频率范围。

在对飞行器噪声排放进行测量的过程中，许多学者通过反向传播方法计算飞行器在不同方向、相同距离的噪声水平。Ramos 等^[31]研究了 4 种无人机 (DJI Matrice 300 RTK、Yuneec H520E、DJI FPV 和 DJI Mini 3 pro) 飞越时的噪声排放。该研究通过反向传播，利用 A 计权最大声级和 A 计权暴露声级，分别得到二维和三维噪声排放的指向性。Herold 等^[32]利用反向传播方法重构了 DJI Mavic Pro 和 Matrice 300 RTK 两种无人机在飞行过程中的位置，并重建其各自的噪声半球。Nash 等^[33]研究了 Manna 无人机的噪声排放特性，通过反向传播方法对比了无人机下方 5 个角度 (0°、15°、30°、45°、60°) 的声压级，结果表明该无人机噪声的指向性对频率有明显的依赖，在整个频率范围内有 10 dB~20 dB 的变化。

2.2.3 实验室内测量

实验室内 (消声室和消声风洞等) 的空间较小，通常只能支持无人机进行悬停等速度较慢的操作，或被支架固定住从而模拟其他状态。

Herreman^[34]通过在消声室中，将 20 个麦克风均匀分布在固定的 KittyHawk HDX17 无人机周围半径为 0.9 m 的球面上，确定了无人机飞越时的声功率。同样地，Heutschi 等^[35]在半消声室中，通过在距离声源中心 1.5 m 处按不同仰角布置 5 个声压传声器，研究了多种多旋翼无人机 (包括 DJI Mavic 2 Pro、DJI Inspire 2 和 DJI S-900) 的噪声排放特性。为了构建与转速相关的噪声排放模型，他们在无人机悬停状态下，通过附加不同重量调整转速，从而得出更为精确的数据。此外，Intaratep 等^[36]则利用单个麦克风和负荷传感器，针对固定的 DJI Phantom

2 无人机的 4 种不同旋翼配置 (两个塑料旋翼和两个碳纤维旋翼), 进一步探讨了其噪声与推力之间的关系。

在相关研究领域, Mobley^[37]同样在消声室中进行实验, 使用 20 个声压传声器测量了固定的 KittyHawk HDX15 和 HDX17 无人机在不同电功率设置下的声压, 其测量装置分布在一个半径为 1.9 m 的球面上。而 Papa 等^[38]通过在半径为 1.2 m 的上半球区域布置声压传声器, 测量了固定的 Syma X5C 和 RC Eye One Xtreme 无人机的声压数据, 从而表征了其声功率。此外, Fattah 等^[39]在大型消声室内, 采用地面布置的 72 个麦克风组成的阵列, 研究无人机在悬停和慢速飞越状态下的声压级, 并生成了详细的声压级分布图。在此基础上, Zhou 等^[40]通过增加 8 个垂直阵列麦克风, 进一步研究 DJI Phantom 4 无人机在悬停、爬升、下降和前飞状态下的声压级分布。然而, Zhou 等^[41]的后续研究虽然在分析方法上有所改进, 但在声学机理探讨方面的贡献较少。

与此同时, Putzu 等^[42]开展了一项独特的研究, 在 WindShaper 风洞环境中, 模拟 Parrot Bebop 2 和 DJI Mavic Pro 无人机的前飞状态。与传统风洞实验不同, WindShaper 不仅能够生成非均匀风场 (具有可变的强度和方向), 还能够模拟包括降雨、降雪和冰雹在内的真实天气条件。此外, 与其他风洞实验中飞行器通常被固定的做法不同, 该研究中的无人机处于自由飞行状态, 进一步提升了实验的真实性和实用性。

何敬玉等^[43]开发了一种基于麦克风阵列声源定位的多旋翼无人机跟踪探测识别定位系统, 在全消声室中, 该系统的定位精度为 92.2%。但是在实际测试过程中, 文中并没有提供飞行器的飞行速度, 没有详细分析误差的来源。

与上述研究主要集中于消声或半消声环境中的无人机噪声排放特性不同, Zamponi 等^[44]探讨了 DJI Air 2S 无人机在测试大厅 (非消声环境) 中的噪声排放特性, 研究表明, 在室内环境中, 声反射的影响不容忽视, 测量到的声压级相较于消声条件下的变化高达 ± 5 dB。他们还深入研究了混响对声衰减的影响, 发现声衰减与距离的关系在距离声源 5 m 内呈现与距离的 0.5 次方成正比的趋势。这一发现为室内无人机噪声测量的准确性提供了重要参

考, 同时也为非消声环境中的噪声建模提出新的挑战。

在无人机噪声排放的指向性研究领域, 多项研究^[45-49] (文献^[49]的测量场地在室外) 报告了一个共同现象, 即最小声压级通常出现在旋翼平面的方位。对此, Zawodny 等^[45]提出一种可能的解释, 即旋翼无人机产生的非定常载荷噪声在旋翼平面外的幅值更高。该结论表明, 旋翼平面内和平面外的噪声特性存在显著差异, 对进一步研究旋翼噪声的传播特性具有重要意义。

2.2.4 小结

本小节对飞行器噪声测量和分析的相关研究进行总结。研究主要集中在以下 4 方面: 1) 测量和报告飞行器在特定运动状态 (如悬停、飞越等) 下的噪声值 (如最大声级、暴露声级、声功率级等); 2) 结合 GPS 等数据重构飞行状态下的噪声地图; 3) 利用反向传播方法构建飞行器噪声半球并探讨噪声排放的指向性; 4) 分析不同状态下影响不同频率噪声级的因素。

2.3 飞行器噪声计算

现有的计算飞行器噪声的计算方法主要可以分为基于模型的计算方法和基于噪声传播的计算方法两类。

基于模型的计算方法主要是通过流体动力学计算或采集飞行器噪声数据建立噪声排放模型。这类方法通常用于快速估算飞行器噪声, 在大范围的区域分析中尤其有用。由于该方法依赖于模型假设和已有数据, 计算速度较快, 适合大规模、多任务的噪声预估, 但精度较低, 尤其在复杂环境下。

噪声传播计算方法通过流体动力学模拟飞行器的气流和压力波动来识别主要噪声源, 并结合声学模型或直接计算, 推算受体处的噪声值。它不仅要考虑声源的噪声强度, 还要考虑声音在传播过程中的衰减、反射、折射、吸收等复杂因素。这类方法通常采用数值模拟技术, 精确计算不同飞行状态下飞行器产生的噪声如何在环境中传播, 最终到达观测点的位置。

上述两类方法都使用了数值模拟仿真方法, 也称计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法, 来计算不同飞行器不同工况下的噪声排放。数值模拟是基于物理学和空气动力学原理, 通过数值模拟来计算噪声水平。常用的数值模拟软

件有 ANSYS Fluent、OpenFOAM、STAR-CCM+和 Actran。这些软件都可以基于不同的仿真模型和声学模型计算飞行器的噪声排放水平。除了以上商用软件外,一些实验室也开发了计算多旋翼飞行器噪声的工具,例如 CONA^[50-51]、RMAC^[52-53]、HMB3^[54]、Opty δ B-BEMT^[55],以及 NASA 开发的 OVERFLOW (2.4c)^[56]。

下文对基于这两类方法的相关研究进行介绍。

2.3.1 基于模型的计算方法

飞行器噪声受到很多因素的影响,包括飞行器类型、飞行器运行状态、流量、空域路网参数条件等。一直以来,学者们根据基于噪声-功率-距离 (noise-power-distance, NPD) 曲线和监测数据驱动两种方法对飞行器噪声的建模与计算展开研究。基于 NPD 曲线计算飞行器噪声需要使用到飞行器噪声与性能 (aircraft noise and performance, ANP) 数据库。ANP 数据库包含了广泛的飞行器噪声和性能数据,包括不同类型飞行器在各种操作条件下的噪声水平、性能参数和运行环境。但这些方法现在仅适用于传统的固定翼飞机。

相比于传统的固定翼飞行器,新兴的 UAV、eVTOL 等低空飞行器并没有全面且可用的 NPD 曲线用于噪声的计算,这是面临的主要问题之一。并且,现有的或未来的 UAV 和 eVTOL 形态多样,不同类型的飞行器差异较大,普及不够,因此很难获得全面且丰富的飞行器运动数据及噪声数据,这给对新兴飞行器噪声排放的建模带来了巨大挑战。

NASA 团队对生成飞行器 NPD 曲线数据做了许多努力。Rizzi 等^[57]通过 CFD 方法,使用固定翼飞行器的飞行剖面噪声数据生成了一架四旋翼飞行器和“升力+巡航”飞行器的 NPD 数据 (第 1 代数据),主要包含周期载荷和厚度噪声。在第 1 代数据的基础上,Rizzi 等^[58]考虑飞行器垂直起降时的宽带自噪声,生成了第 2 代 NPD 数据。Rizzi 等^[59]随后开发了基于固定翼和旋翼飞行器建模的两种方法,生成用于 AEDT (aviation environmental design tool) 的 NPD 数据。Rizzi 等^[60]生成直升机模式的 NPD 数据,开发了一种混合方法,将一种四旋翼飞行器的某些飞行段建模为固定翼模式,其他段建模为直升机模式。该研究还基于拟定的飞行路线生成了噪声地图。Rizzi 等^[61]对第 2 代噪声源数据更新作为第 3 代数据库的基础。对噪声源数据的更新包括对周

期和宽带噪声分量采用一致大气吸收处理以及一些关于文件格式的改变等。

Glaab 等^[62]为了模拟假想的飞行器队列在纽约市运营时产生的噪声,将 H125 直升机的 NPD 数据缩放到原值的 80% 从而表示飞行器的 NPD 数据。这是在缺少特定飞行器 NPD 数据情况下简便的预测方法。

Schmähl 等^[63]从噪声测量数据出发,对 eVTOL 无人机水平飞越、爬升和下降进行半经验噪声建模。这种方法在未来飞行器足够多的情况下有可能会成为主流。这是因为,随着 eVTOL 等飞行器数据的积累,基于数据收集的建模方法能够充分利用测量结果并与飞行器运行数据的结合,实现对噪声排放模型的迭代。类似的基于数据收集的建模方法已经广泛应用在民航飞机^[64-65]和道路交通噪声^[66-67]的研究中。

2.3.2 基于噪声传播的计算方法

飞行器噪声传播研究主要涉及噪声从噪声源 (如飞机发动机、气动噪声等) 到接收点 (如地面居民区、机场周边等) 的传递过程及其影响因素。准确预测飞行器运动环境中的噪声传播具有挑战性,因为需要考虑各种波现象,即多次反射、衍射和传播场景,例如狭窄城市峡谷中振幅较大的驻波和大气湍流的散射。由于气温和风速梯度的垂直和水平变化,噪声在不同的建筑之间会发生多次反射,也会发生折射。

可以用两种基于 CFD 的方法评估飞行器在不同飞行轨迹和操作条件的声足迹。声足迹是指声源在特定环境中传播声音的空间分布区域,通常描述的是噪声的强度或声压级随空间变化的情况。第 1 种是直接方法,直接应用高保真 CFD 求解器来计算飞行器周围的流场、噪声排放和噪声足迹^[68]。这种方法直接越过了噪声从源到受体的传播过程,但仅限相对短程传播的问题,因为其需要较高的计算资源。第 2 种方法采用混合方法,分 3 个步骤评估飞行器的噪声足迹。1) 先通过 CFD 模拟获得飞行器周围的流场。2) 通过 FW-H (Ffowcs Williams-Hawkings) 声学类比,在飞行器周围的球体 (或半球体) 上对噪声源进行采样。3) 使用基于波的方法将噪声信号从噪声球传播到受体,该方法使用有限元法^[69]、射线追踪^[70-71]或波速追踪技术^[72-74]求解对流波动方程。

在混合方法中, 噪声球的计算也使用了高保真的 CFD 模拟。然而高保真的 CFD 模拟的成本较高, 无法评估飞行任务的剖面, 这些剖面涉及评估数千个噪声球体, 每个球体对应不同的飞行状态参数组合。因此, 它们难以与设计优化过程相结合。为此, 有学者开发了计算效率高的低保真度方法^[75]和高保真度方法^[76], 在计算资源和保真度之间做了平衡。为了将天气效应纳入噪声足迹, Yunus 等^[71]开发了一种两点 3D 特征射线追踪剂, 解释了由气温和风速梯度的垂直变化引起的声音折射。Bian 等^[73]使用低保真度方法和高斯光束追踪模型研究飞行器噪声的传播。然而, 高斯光速追踪模型仅限于非均匀各向同性大气, 因此在有风的情况下无法传播噪声信号。Yunus 等^[55]将高效的低保真度噪声预测方法与 Yunus 等^[77]其他研究中开发的高斯光束追

踪模型结合, 考虑了 3D 变化地形拓扑和风廓线的声学效应。

2.3.3 小结

表 5 总结了两类计算方法的研究趋势、关键研究内容和适用场景。

基于模型的计算方法侧重于构建噪声计算模型和基于模型进行快速的噪声估算, 适用于数据丰富的飞行器类型。该方法在基于 CFD 构建新兴飞行器模型时也需要大量的计算资源, 但在未来可以快速估算大范围区域内的飞行器噪声。

基于噪声传播的计算方法则更加注重噪声在环境中的传播过程, 通过高保真 CFD 模拟和复杂声学模型实现高精度的噪声预测, 尤其适用于复杂城市环境。然而, 该方法的高计算资源需求和复杂性限制了其在大规模任务中的应用。

表 5 两类计算方法的对比总结

Table 5 Comparison of two calculation methods

要点	基于模型的计算方法	基于噪声传播的计算方法
研究趋势	① 开发适用于新兴飞行器的 NPD 模型 ② 结合数据驱动方法, 提升模型的适用性和精度	① 优化高保真方法计算效率, 降低计算资源需求 ② 综合考虑多种环境因素, 提升噪声计算的全面性和准确性
关键研究内容	① 如何使用 CFD 方法获得不同飞行器的 NPD 模型 ② 对已有的 NPD 模型进行缩放, 模拟新兴飞行器的 NPD 模型 ③ 基于监测数据的方法建立新兴飞行器的噪声计算模型	① 采用高保真 CFD 求解器直接计算噪声排放和传播 ② 使用混合方法分布获得噪声足迹 ③ 研究噪声在复杂城市环境中的传播特性 ④ 如何平衡保真度和计算资源, 高效计算飞行器噪声
适用场景	① 快速估算大范围区域内的飞行器噪声 ② 适用于数据丰富的飞行器	① 详细分析复杂环境中的噪声传播 ② 需要高精度噪声预测的应用场景

3 现状总结与存在问题

目前, 对低空飞行器噪声的研究取得了一定的进展, 但仍然存在许多问题, 本章节将对上述每一块内容的主要问题进行了梳理。

1) 法律法规层面。

在法律法规层面, 对噪声排放限值的低空飞行器大多局限于多旋翼型飞行器, 然而现有的飞行器还有矢量推力型和升力+巡航型等类型。这些未考虑的飞行器的航程一般大于多旋翼型飞行器的飞行航程, 其噪声影响范围介于多旋翼型和传统的固定翼飞机之间, 是未来噪声防治中不可忽视的一部分。我国的法规中几乎没有对低空飞行器的噪声排放的限值提出要求, 这是未来需要考虑的内容。

2) 噪声测量与分析。

在噪声测量与分析层面, 测量标准与方法的不统一是首要问题。由于这些官方的测量标准的变

化、互相之间有所差异以及标准较新的原因, 不同机构或学者在测量低空飞行器噪声时可能采用不同的测量方法和技术 (例如不同标准的声级计、不同的飞行模式、不同的麦克风/传声器放置方法、不同的度量等), 导致测量结果和评估方法不具备统一性和可重复性, 这可能也是导致研究者对某类问题 (例如排放的指向性) 没有统一的结论的原因之一。并且, 从学者们的工作和官方的测量方法大多集中在短期测试, 研究的样本量通常较小, 并没有对长时间、大规模低空飞行器飞行活动的连续监测和评估。

在实验室内的测量活动中, 消声室空间的大小一直是学者们关注的问题。在研究飞行器在空间上移动 (飞越、爬升和下降等状态) 的过程中, 消声室的大小极大地限制了飞行器的速度, 影响了实验工况的多样性。此外, 人员操作规范和技术水平也是测量实验中要考虑的因素。除了用于商业运输的无人机, 大多数的飞行器都是由操作员操作。高精度的

噪声测量和数据分析需要操作人员具备专业的操作飞行器的知识和技能。在测量过程中,操作人员的疏忽或微小的失误可能导致数据偏差或测量失败。

3) 噪声计算层面。

在噪声计算层面,无论是通过 CFD 方法获得 NPD 数据,还是通过 CFD 对由飞行器产生的城市噪声进行计算,都会面临计算资源的问题。高保真度的噪声计算需要求解复杂的流体动力学和声学方程,这对计算资源和时间提出了极高要求。许多商业或开源的噪声计算软件无法满足对多物理场、多尺度的耦合需求,限制了对复杂环境下飞行器噪声的计算。

传统基于 NPD 数据的噪声计算方法缺乏对新型低空飞行器的直接适用性。目前生成的低空飞行器 NPD 数据仍不完善,且各商用软件计算结果缺乏统一标准,不同工具和方法间的差异未得到充分比较。这种缺乏标准化的状况可能导致计算结果依赖于模型假设和参数选择,从而影响噪声预测的精度和可靠性。

基于噪声传播的计算方法尚未形成一个综合考虑准确性、效率和精细程度的计算框架。不同研究对噪声源半球的构建策略差异较大,且这些策略对噪声源精度的影响尚未得到深入评估。

研究中对计算结果进行全面的验证较少。尽管一些研究通过 CFD 方法生成 NPD 数据并对飞行器噪声排放进行了模拟计算,但实际验证仍然较少,尤其是在复杂环境下的验证工作较为缺乏。部分研究涉及的飞行器为概念设计,其计算结果的准确性和实用性尚需进一步检验。此外,在复杂环境下,基于噪声传播方法计算的飞行器噪声值的验证也存在困难。

4 关于低空飞行器噪声研究的建议

本文基于低空飞行器噪声的测量与计算的现状与存在问题,面向低空交通绿色、环保的发展需求,提出如下建议。

1) 在法律法规层面,未来应扩展其覆盖范围,制定涵盖多种低空飞行器类型的噪声排放标准,确保不同类型飞行器的噪声管理。在低空飞行器噪声管理方面,法律法规的制定和完善对于规范行业发展、保护公众健康和环境具有重要意义。在低空产业快速发展的时代,法律法规的制定也应符合其发

展的速度,制定统一的噪声排放标准。根据飞行器类型、尺寸、重量和用途,制定相应的噪声排放限值,明确不同类别飞行器在特定条件下的允许噪声排放水平,开发基于飞行器类型、尺寸、重量和用途的噪声评估工具,为法规制定提供科学依据,避免出现“先污染,后治理”的情况。

2) 在噪声测量层面,未来可以聚焦于制定和推广统一的测量标准以及建立长期、大规模的监测网络。制定统一的测量标准和规范具有重要意义。制定统一的标准和规范不仅可以提高数据的可比性和可重复性,还能促进数据共享和合作,同时为法律法规的制定提供支撑依据。对于室外噪声的测量,可以建立固定式的噪声监测点。在飞行器活动频繁的区域,如无人机外卖柜周边、无人机运货中心等区域,设置固定的噪声监测点,持续采集噪声数据。利用物联网和大数据技术,构建自动化噪声监测网络,实现实时数据采集与分析。对于在实验室内的测量,为了解决消声室空间有限的问题,可以设计一种可调节的消声室结构,通过机械装置改变消声室的内部空间大小和形状,以满足测量需求。

3) 在噪声计算层面,未来研究方向应重点关注优化计算资源的使用、完善 NPD 数据集、标准化计算工具以及增强计算结果验证等方面。在优化计算资源方面,可以采用机器学习和人工智能技术优化 CFD 和声学模型,提升计算速度和精度。在精细化计算噪声方面,许多商业软件得到的计算结果需要对比,因此建立一个统一的对比框架是必不可少的,以便客观、公正地评估不同软件的计算结果,确保计算的准确性和可靠性。许多学者在噪声计算模型构建(例如 NPD 模型的构建)中都做了相当的努力,但计算结果是否准确还需要更全面的实地验证。因此,未来可以开展大规模的实地噪声测量与计算对比实验,建立反馈机制,不断优化和校准计算模型,确保其在实际应用中的准确性和可靠性。此外,为了展现低空飞行器噪声的影响,将噪声计算结果与 GIS 技术集成,基于飞行器的运行数据,开发动态三维噪声地图。

5 总结

近年来,低空飞行器技术蓬勃发展,在众多领域得到广泛应用。然而,低空飞行器产生的噪声已成为影响公众接受程度的重要因素之一。本文通过

对低空飞行器噪声的相关文献进行综述, 从法律法规、测量标准、测量研究和计算方法总结了国内外研究现状。低空飞行器噪声研究已在这几个方面取得了一定进展。然而, 目前仍存在法规覆盖范围不足、测量标准不统一、计算结果缺乏全面验证等问题, 限制了噪声管理的规范化和研究成果的应用推广。

未来研究应重点完善法律法规体系, 制定针对不同类型飞行器的噪声排放限值标准; 统一噪声测量方法, 提升数据的可比性和共享性; 构建综合噪声排放与传播模型, 并加强复杂环境下的实地验证。此外, 可结合地理信息系统技术开发动态三维噪声地图, 直观呈现噪声分布, 为低空交通的可持续发展提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 新华社. 无人机超 126 万架!我国低空经济蕴藏万亿级市场[EB/OL]. (2024-03-30)[2024-11-20]. https://www.gov.cn/yao-wen/liebiao/202403/content_6942571.htm.
- [2] JOBY AVIATION. Joby's revolutionary low-noise footprint proven in NASA testing[EB/OL]. (2022-05-10)[2024-11-20]. <https://www.jobyaviation.com/news/joby-revolutionary-low-noise-footprint-nasa-testing>.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 声环境质量标准: GB 3096-2008[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2008.
- [4] MIEDEMA H M, OUDSHOORN C G. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2001, 109(4): 409-416.
- [5] MUZET A. Environmental noise, sleep and health[J]. *Sleep Medicine Reviews*, 2007, 11(2): 135-142.
- [6] DRATVA J, PHULERIA H C, FORASTER M, et al. Transportation noise and blood pressure in a population-based sample of adults[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(1): 50-55.
- [7] CHEN T J, CHEN S, HSIEH P Y, et al. Auditory effects of aircraft noise on people living near an airport[J]. *Archives of Environmental Health*, 1997, 52(1): 45-50.
- [8] WRIGHT D M, NEWELL K, MAGUIRE A, et al. Aircraft noise and self-assessed mental health around a regional urban airport: a population based record linkage study[J]. *Environmental Health*, 2018, 17(1): 74.
- [9] 李春光, 王转斌, 刘军坛. 飞机噪声的危害及其防治对策探讨[J]. *甘肃科技*, 2006, 22(9): 130-132.
- [10] CHRISTIAN A, CABELL R. Initial investigation into the psychoacoustic properties of small unmanned aerial system noise[C]//23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Denver: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017: 4051.
- [11] YEDAVALLI P, MOOBERRY J. An assessment of public perception of urban air mobility (UAM)[EB/OL]. (2021-05-15)[2024-11-20]. <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2022-07/Airbus-UTM-public-perception-study%20-urban-air-mobility.pdf>.
- [12] GWAK D Y, HAN D, LEE S. Sound quality factors influencing annoyance from hovering UAV[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 489: 115651.
- [13] EASA N N. Study on the societal acceptance of urban air mobility in Europe[EB/OL]. (2021-05-19)[2024-11-20]. <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-full-report.pdf>.
- [14] EUROPEAN COMMISSION. Commission delegated regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems: C/2019/1821[S/OL]. (2021-06-11)[2024-11-20]. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj.
- [15] EUROPEAN COMMISSION. Commission delegated regulation (EU) 2020/1058 of 27 April 2020 amending delegated regulation (EU) 2019/945 as regards the introduction of two new unmanned aircraft systems classes: C/2020/1991[S/OL]. (2022-07-20)[2024-11-20]. http://data.europa.eu/eli/reg_del/2020/1058/oj.
- [16] EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY (EASA). Consultation paper: Environmental protection technical specifications applicable to eVTOL powered by multiple, vertical, non-tilting, evenly distributed rotors[EB/OL]. (2023-05-04)[2024-11-20]. <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/137902/en>.
- [17] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Noise certification standards: matternet model M2 aircraft: 2022-19639 (87 FR 55878)[S/OL]. (2022-09-12)[2024-11-20]. <https://www.federalregister.gov/documents/2022/09/12/2022-19639/noise-certification-standards-matternet-model-m2-aircraft>.
- [18] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Noise certification of UAS/AAM using rules of particular applicability [R/OL]. (2023-07-28)[2024-11-20]. https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/aee/noise/uas_noise_certification.
- [19] US FEDERAL GOVERNMENT. US code of federal regulations title 14, subchapter C, part 36, appendix J to part 36 — Alternative noise certification procedure for helicopters under subpart H having a maximum certificated takeoff weight of not more than 7 000 pounds[EB/OL]. (2023-07-28)[2024-11-20]. <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-36/appendix-Appendix%20J%20to%20Part%2036>.
- [20] 中华人民共和国国务院, 中华人民共和国中央军事委员会. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. (2023-06-28)[2024-11-20]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888799.htm.
- [21] EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY. Guidelines on noise measurement of unmanned aircraft systems lighter than 600 kg: operating in the specific category (low and medium risk)[EB/OL]. (2023-09-11)[2024-11-20]. <https://doi.org/10.1007/s40726-023-00285-4>.
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION for STANDARDIZATION. Noise measurements for UAS (unmanned aircraft systems): ISO 5305: 2024[S/OL]. (2024-01-01)[2024-11-20]. <https://www.iso.org/standard/81111.html>.
- [23] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 民用

无人驾驶航空器系统安全要求: GB 42590-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

- [24] CABELL R, GROSVELD F, MCSWAIN R. Measured noise from small unmanned aerial vehicles[C]//Proceedings of the NOISE-CON 2016. Providence: Institute of Noise Control Engineering, 2016: 345-354.
- [25] SENZIG D, MARSAN M. UAS noise certification[C]//Proceedings of the Inter-Noise 2018, 47th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Chicago: Institute of Noise Control Engineering, 2018: 3718-3726.
- [26] SENZIG D A, MARSAN M, CUTLER C J, et al. Sound exposure level duration adjustments in UAS rotorcraft noise certification tests[R/OL]. (2018-09-27)[2024-11-20]. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37057>.
- [27] ALEXANDER W N, WHELCHER J. Flyover noise of multi-rotor sUAS[C]//Proceedings of the Inter-Noise 2019, 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Madrid: Institute of Noise Control Engineering, 2019: 2548-2558.
- [28] ALEXANDER W N, WHELCHER J, INTARATEP N, et al. Predicting community noise of sUAS[C]//25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Delft: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019: 2686.
- [29] READ D R, SENZIG D A, CUTLER C, et al. Noise Measurement report: unconventional aircraft—choctaw nation of Oklahoma[R]. Cambridge: Volpe National Transportation Systems Center, 2020.
- [30] WICKERSHEIM R, KEBLER M, KRÄMER E. Fly-over noise measurements of a distributed propulsion flight demonstrator [EB/OL]. (2024-10-16)[2024-11-20]. <https://www.dgllr.de/publikationen/2024/630146.pdf>
- [31] RAMOS-ROMERO C, GREEN N, TORIJA A J, et al. On-field noise measurements and acoustic characterisation of multi-rotor small unmanned aerial systems[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 141: 108537.
- [32] HEROLD G, SARRADJ E. Characterizing multicopter UAV noise emission through outdoor fly-by measurements with a microphone array[C]//30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2024). Rome: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2024: 3332.
- [33] NASH A, KENNEDY J. In flight evaluation of UAV noise emission[C]//Quiet Drones 2024. Manchester: University of Salford, 2024: 1-6.
- [34] HERREMAN K. Proposed measurement method for UAV sound levels[C]//Proceedings of the NOISE-CON 2016. Providence: Institute of Noise Control Engineering, 2016: 615-622.
- [35] HEUTSCHI K, OTT B, NUSSBAUMER T, et al. Synthesis of real world drone signals based on lab recordings[J]. *Acta Acustica*, 2020, 4: 24.
- [36] INTARATEP N, ALEXANDER W N, DEVENPORT W J, et al. Experimental study of quadcopter acoustics and performance at static thrust conditions[C]//Proceedings of the 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Lyon: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016: 2873.
- [37] MOBLEY F. Aeroacoustic emissions from quadcopter unmanned aircraft systems as quadrupoles[C]//Proceedings of the Inter-Noise 2018, 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Chicago: Institute of Noise Control Engineering, 2018: 212-223.
- [38] PAPA U, CORE G D, GIORDANO G. Determination of sound power levels of a small UAS during flight operations[C]//Proceedings of the Inter-Noise 2016, 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Hamburg: Institute of Noise Control Engineering, 2016: 692-702.
- [39] FATTAH R, ZHANG X, HUANG X. Noise assessment of multi-rotor flying vehicles[C]//Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration. Montreal: Canadian Acoustical Association, 2019: 151920.
- [40] ZHOU T, JIANG H, SUN Y, et al. Acoustic characteristics of a quad-copter under realistic flight conditions[C]//25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Delft: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019: 2587.
- [41] ZHOU T, JIANG H, HUANG B. Quad-copter noise measurements under realistic flight conditions[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 124: 107542.
- [42] PUTZU R, BOULANDET R, RUTSCHMANN B, et al. Aeroacoustic measurements on a free-flying drone in a Windshaper wind tunnel[C]//Proceedings of Quiet Drones 2020—International e-Symposium on Noise of UAV and UAS. Paris: Institut des Sciences et Technologies industrielles, 2020: 1-14.
- [43] 何敬玉, 刘吉铮, 杨志晨, 等. 多旋翼无人机噪声源跟踪定位系统研发及测试[J]. *现代防御技术*, 2024, 52(3): 1-8.
HE Jingyu, LIU Jizheng, YANG Zhichen, et al. Development and testing of multi rotor unmanned aerial vehicle noise source tracking and positioning system[J]. *Modern Defense Technology*, 2024, 52(3): 1-8.
- [44] ZAMPONI R, TORRIONE G, GALLO E, et al. Aeroacoustic assessment of the noise radiated by a maneuvering drone in an indoor test zone[C]//30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2024). Rome: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2024: 3274.
- [45] ZAWODNY N, PETTINGILL N. Acoustic wind tunnel measurements of a quadcopter in hover and forward flight conditions[C]//Proceedings of the Inter-Noise 2018, 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Chicago: Institute of Noise Control Engineering, 2018: 487-500.
- [46] ZAWODNY N, BOYD D, BURLEY C. Acoustic characterization and prediction of representative, small-scale rotary-wing unmanned aircraft system components[EB/OL]. (2016-05-17)[2024-11-20]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160009054>.
- [47] ZAWODNY N, BOYD J. Investigation of rotor-airframe interaction noise associated with small-scale rotary-wing unmanned aircraft systems[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2019, 65: 012007.
- [48] HEUTSCHI K, OTT B, NUSSBAUMER T, et al. Synthesis of real world drone signals based on lab recordings[J]. *Acta Acustica*, 2020, 4: 24.
- [49] KLOET N, WATKINS S, CLOTHIER R. Acoustic signature measurement of small multi-rotor unmanned aircraft systems[J]. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2017, 9: 3-14.

- [50] KIM Y, LEE S. Deep learning based prediction of urban air mobility noise propagation in urban environment[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2024, 155(1): 171-187.
- [51] KO J, KIM Y, JEONG J, et al. Prediction-based psychoacoustic analysis of multirotor noise under gusty wind conditions[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2023, 154(5): 3004-3018.
- [52] SMITH B, GANDHI F, NIEMIEC R. A comparison of multi-copter noise characteristics with increasing number of rotors [C]//Proceedings of the 76th Vertical Flight Society Annual Forum. Virginia Beach: Vertical Flight Society, 2020: 16499.
- [53] SMITH B, LYRINTZIS A, GANDHI F. An assessment of multi-copter noise in edgewise flight[C]//Proceedings of the 77th Vertical Flight Society Annual Forum. Alexandria: Vertical Flight Society, 2021: 16691.
- [54] HIGGINS R J, BARAKOS G N, SHAHPAR S, et al. An aeroacoustic investigation of a tilting eVTOL concept aircraft[C]//AIAA Aviation 2020 Forum. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020: 2684.
- [55] YUNUS F, CASALINO D, AVALLONE F, et al. Efficient prediction of urban air mobility noise in a vertiport environment[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 139: 108410.
- [56] NASA. Overflow CFD software: scalable, accurate, and flexible computational fluid dynamics solutions for aerodynamics simulations[EB/OL]. (2024-03-08)[2024-11-20]. <https://overflow.larc.nasa.gov/>.
- [57] RIZZI S, RAFAELOF M. Community noise assessment of urban air mobility vehicle operations using the FAA aviation environmental design tool[C]//50th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2021). Washington: International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE), 2021, 263: 450-461.
- [58] RIZZI S, RAFAELOF M. Second generation UAM community noise assessment using the FAA aviation environmental design tool[C]//Proceedings of the AIAA AVIATION 2022 Forum. San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2022: 2167.
- [59] RIZZI S A, LETICA S J, BOYD D D, et al. Prediction-based approaches for generation of noise-power-distance data with application to urban air mobility vehicles[C]//28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference. Southampton: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2022: 2839.
- [60] RIZZI S, RAFAELOF M. On the modeling of UAM aircraft community noise in AEDT helicopter mode[C]//Proceedings of the AIAA AVIATION 2023 Forum. San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2023: 3363.
- [61] RIZZI S, LETICA S J, BOYD D D, et al. Prediction of noise-power-distance data for urban air mobility vehicles[J]. *Journal of Aircraft*, 2023, 61: 1-17.
- [62] GLAAB P, WIELAND F, SANTOS M, et al. Simulating fleet noise for notional UAM vehicles and operations in New York[C]//2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE, 2019: 1-10.
- [63] SCHMÄHL M, RIEGER C, SPECK S, et al. Semi-empirical noise modeling of a cargo eVTOL UAV by means of system identification from flight noise measurement data[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2022, 13(1): 85-96.
- [64] 袁芳. 基于多点噪声监测的机场噪声分布预测系统及预测方法: 202210778656.0[P]. 2022-08-12.
- [65] 王尚北. 基于多噪声监测点机场周围飞机噪声时空序列预测模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [66] LAN Z, CAI M, LI F, et al. Study of the traffic noise source emission model and the frequency spectrum analysis of electric vehicles on urban roads in China[J]. *Acta Acustica united with Acustica*, 2018, 104: 989-998.
- [67] LAN Z, CAI M. Dynamic traffic noise maps based on noise monitoring and traffic speed data[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 94: 102796.
- [68] CASALINO D, van der VELDEN W C, ROMANI G, et al. Aeroacoustic analysis of urban air operations using the LB/VLES method[C]//25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Delft: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019: 2662.
- [69] CASALINO D, BARBARINO M, VISINGARDI A. Simulation of helicopter community noise in complex urban geometry [J]. *AIAA Journal*, 2011, 49(8): 1614-1624.
- [70] CASALINO D, van der VELDEN W C, ROMANI G. Community noise of urban air transportation vehicles[C]//AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019: 1834.
- [71] YUNUS F, CASALINO D, AVALLONE F, et al. Toward inclusion of atmospheric effects in the aircraft community noise predictions[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2021, 150(2): 759-768.
- [72] BIAN H, FATTAH R, ZHONG S, et al. On the efficient modeling of generic source directivity in Gaussian beam tracing[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2021, 149(4): 2743-2751.
- [73] BIAN H, TAN Q, ZHONG S, et al. Assessment of UAM and drone noise impact on the environment based on virtual flights[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 118: 106996.
- [74] WANG H, CAI M, LUO W. Areawide dynamic traffic noise simulation in urban built-up area using beam tracing approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 30: 1-12.
- [75] YUNUS F, GRANDE E, CASALINO D, et al. Efficient low-fidelity aeroacoustic permanence calculation of propellers[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 123: 107438.
- [76] BARBARINO M, PETROSINO F, VISINGARDI A. A high-fidelity aeroacoustic simulation of a VTOL aircraft in an urban air mobility scenario[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 125: 107104.
- [77] YUNUS F, CASALINO D, AVALLONE F, et al. Efficient prediction of airborne noise propagation in a non-turbulent urban environment using Gaussian beam tracing method[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2023, 153(4): 2362-2362.