

低空气动环境及其对无人机气动影响研究综述

李道春, 刘奕良, 阚梓, 李永亢, 孔令淇, 芦悦焯, 向锦武, 赵仕伟*
(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要:低空气动环境呈现流场结构复杂、干扰源多样以及耦合效应显著等特征,对无人机气动性能与飞行安全产生重要影响,已成为低空无人机气动领域的研究重点。围绕低空复杂风场环境、空间限制环境和多无人机环境三类典型场景开展系统综述。对低空复杂风场的基本特征及建模研究进行了系统梳理,归纳了低空风场对无人机的影响及低空风场的主要研究方法。依据干扰机理和约束类型对空间限制环境进行了分类,系统总结了空间限制环境下无人机受到的气动影响。对多无人机环境下的无人机气动特性进行了总结,梳理了协同与非编队飞行两种工况下多无人机间气动耦合机理及研究方法。在此基础上,进一步提炼当前针对低空环境下无人机的气动研究所面临的核心问题与关键挑战,同时对本方向的未来研究重点进行了展望。

关键词:低空飞行环境;气动干扰;复杂风场;空间限制环境;多无人机环境

中图分类号:V211.44 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2026)02-001-28

Review of low-altitude aerodynamic environments and their effects on UAV aerodynamics

Li Daochun, LIU Yiliang, KAN Zi, LI Yongkang, KONG Lingqi, LU Yuexuan, XIANG Jinwu, ZHAO Shiwei*
(School of Aeronautics Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100091, China)

Abstract: The aerodynamic environment in low-altitude regions is characterised by complex flow field structures, diverse disturbance sources, and significant coupling effects. These factors have a significant impact on the aerodynamic performance and flight safety of UAV (unmanned aerial vehicle), making them a key focus of research in the field of low-altitude UAV aerodynamics. Three typical scenarios were systematically reviewed: complex low-altitude wind fields, spatially constrained environments, and multi-UAV environments. The fundamental characteristics and modelling approaches of complex low-altitude wind fields were systematically outlined, and their effects on UAV and key research methodologies were summarised. Spatially constrained environments were categorised based on disturbance mechanisms and constraint types, and a comprehensive summary of the aerodynamic impacts on UAV within such environments was provided. The aerodynamic characteristics of UAV in multi-UAV environments were summarised, and the aerodynamic coupling mechanisms and research methodologies for cooperative and non-formation flight scenarios were outlined. Building upon this foundation, the core issues and key challenges currently facing aerodynamic research on UAV in low-altitude environments were further refined, and future research priorities in this field were outlined.

Keywords: low-altitude flight environment; aerodynamic interference; complex wind fields; spatially constrained environment; multi-UAV environment

低空经济作为战略性新兴产业,正成为全球竞相布局的“新赛道”和推动经济高质量发展的“新引擎”。在2024年和2025年的政府工作报告中,国家均提出要推动商业航天、低空经济等新兴产业安全健康发展。当前我国低空经济的市场规模在

不断增长,预计到2035年将达到3.5万亿元^[1],展现出广阔的发展前景。伴随着国家低空经济战略的加速推进^[2]和低空空域管理改革的不断深化^[3],无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)产业受到了前所未有的关注,围绕提高无人机任务效

收稿日期:2025-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(T2288101,52202430,92371201)

第一作者:李道春(1980—),男,山东梁山人,教授,博士,博士生导师,E-mail:lidc@buaa.edu.cn

*通信作者:赵仕伟(1990—),男,安徽芜湖人,副教授,博士,博士生导师,E-mail:shiweizhao@buaa.edu.cn

引用格式:李道春,刘奕良,阚梓,等.低空气动环境及其对无人机气动影响研究综述[J].国防科技大学学报,2026,48(2):1-28.

Citation: LI D C, LIU Y L, KAN Z, et al. Review of low-altitude aerodynamic environments and their effects on UAV aerodynamics[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(2): 1-28.

能、拓宽应用场景的需求日益凸显,相关技术与产业体系也随之进入快速发展阶段。

无人机作为支撑城市低空经济应用场景创新及大规模推广的核心载体^[4],不仅具有成本低、机动灵活、操纵便捷等优势,还能通过搭载多种传感器和智能系统,实现对复杂空域环境的实时感知与数据采集。低空无人机通常指在 1 000 m 以下的低空空域中飞行的无人机^[3],目前已经被广泛应用于航空摄影^[5]、农业植保^[5]、地质测绘^[6]、建筑检修与维护^[7]、搜索与救援^[8]、监控与探测^[9]、物流配送^[10]等多个民用领域^[11-12],其典型应用场景如图 1 所示。从俄乌冲突爆发以来,无人机在现代战争中的作战价值引起了全球的广泛关注,其在战场监视侦察、火力引导及精确打击^[9]等方面的应用不断拓展,推动其在军用领域的快速发展。



图 1 低空无人机多元化应用

Fig. 1 Diversified applications of low-altitude UAV

我国作为无人机大国,目前正逐步向低空经济强国迈进,各种新型无人机功能丰富并逐渐参与到人们的生活之中。传统的无人机任务场景大多是开阔的空域,并且为了飞行安全,需要尽量避免无人机附近出现物体。然而考虑到无人机应用场景的日渐丰富,低空无人机所面临的飞行环境发生了极大改变。其中,越来越多的任务要求无人机在复杂的低空环境中飞行,甚至是靠近物体飞行^[13]。在低空环境下,无人机极易受到障碍物以及恶劣天气的影响,特别是小型无人机很容易

失去稳定^[14]。首先,低空环境下风场复杂,相较于开放空域湍流强度更大,风场瞬时突变现象发生频次更高。一方面,密集分布的摩天大楼形成“城市峡谷”,导致近地风场呈现强烈的三维非定常特征;另一方面,城市热岛效应与郊区冷源形成的热力环流、建筑群尾流干扰、随机阵风等多尺度气象要素耦合,使得城市低空大气扰动呈现高度动态性和时空异质性。以上原因对低空飞行器气动稳定性构成严峻挑战。其次,低空环境下建筑密集,飞行区域受限,无人机会受到来自不同方位以及多种形态墙壁的干扰。这些壁面的存在会严重影响螺旋桨的气动性能,在一定范围内显著改变螺旋桨的拉力与力矩的大小及波动,并对机体产生额外的力,破坏无人机的动力学平衡,严重时可能会导致无人机与障碍物相撞坠毁。最后,低空环境下,无人机会面临多无人机飞行的任务场景,无人机会主动或被动地与其他无人机同时近距离飞行,此时会受到来自周围其他无人机螺旋桨以及机体带来的气动干扰,这些扰动会作用于无人机的螺旋桨以及机身,并且基于不同的相对方位产生不同的效果,在距离较近时显著影响无人机的气动特性、操纵性与稳定性,进而可能导致无人机相撞坠毁。

未来复杂环境条件下的无人机低空作业将成为低空经济发展的关键组成部分。为深入审视低空无人机在复杂气动环境中所面临的核心科学问题及其研究趋势,本文将低空气动环境划分为复杂风场环境、空间限制环境以及多无人机环境(如图 2 所示)。围绕上述三类典型气动环境及其干扰因素,系统梳理相关技术在低空无人机领域的应用现状与研究进展,分析国内外在低空气动问题方面的研究动态,并探讨未来低空无人机气动特性的重点发展方向。在此基础上,提出针对低空无人机关键气动难题的对策与建议,以期提升我国低空无人机的安全飞行能力提供参考。

1 低空复杂风场环境及其对无人机的气动影响

低空复杂的风场环境,如湍流、风切变及地形效应等,对无人机的飞行安全与控制精度构成了严峻挑战。本节对低空复杂风场的特性及其对无人机的气动干扰进行总结,系统梳理当前主流的研究方法,并对未来发展方向提出建议,为提升无人机在复杂环境下的作业可靠性提供参考。低空复杂风场的成因、发展以及对无人飞行的影响如图 3 所示。

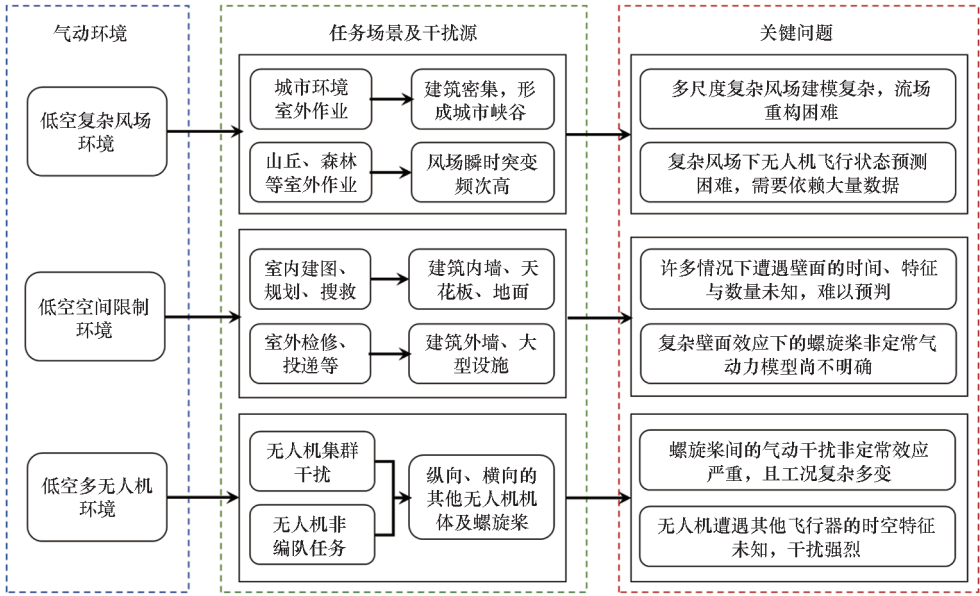


图 2 低空无人机面临的气动问题

Fig. 2 Aerodynamic problems faced by low-altitude UAV

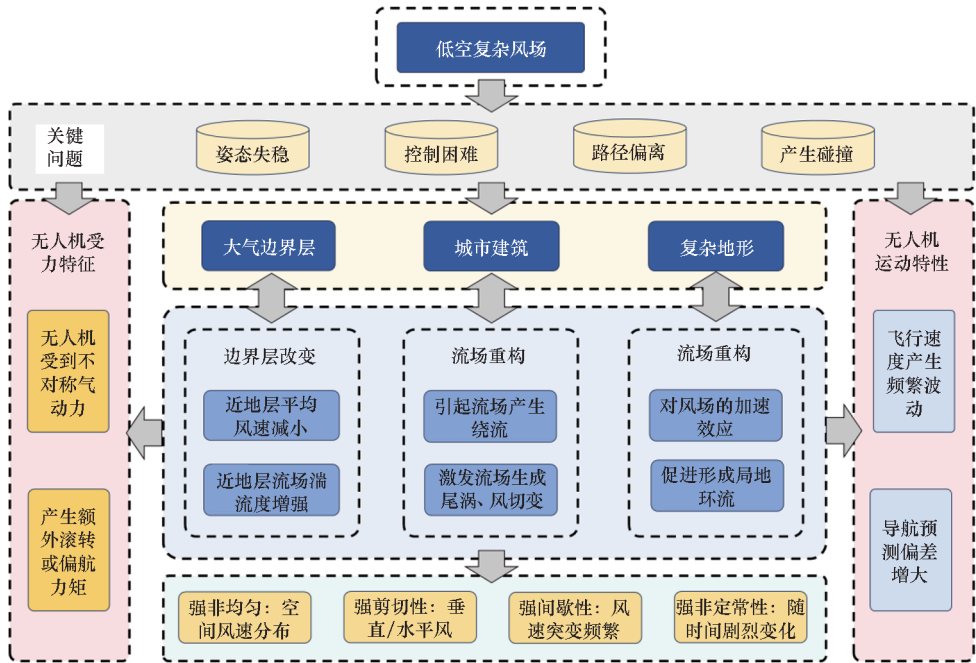


图 3 低空复杂风场的成因、发展及影响

Fig. 3 Causes, development and impacts of complex low-altitude wind fields

1.1 低空风场环境及特性

1.1.1 低空风场特征

低空风场受到地面摩擦、城市建筑、复杂地形等多种因素影响,其流动特性具有显著的时空非均匀性,表现出强非均匀、强剪切性、强间歇性与强非定常性的湍流特性。在城市环境中,低空风场会与建筑产生耦合效应,形成复杂的复合流动结构,并且低空风场极易受多变天气的影响。

在风场流过地表时,会产生一个边界层,即大

气边界层^[15] (atmospheric boundary layer, ABL)。大气边界层是直接受地表影响的大气底层,高度从几十米到约 1.5 km 不等,地表摩擦、热量交换和地形地貌的共同作用在此区域内催生了各种尺度的湍流,使其空气动力学特性与上方的自由大气截然不同^[16-17]。低空湍流的生成机制主要源于机械和热力两种作用^[18]。机械成因主要是指空气与粗糙地表(包括植被、建筑、山丘等)发生摩擦,从而产生湍流。热力成因则与地表的加热

和冷却有关^[18]。白天,地面受太阳辐射增温,近地层空气被加热,产生浮力,形成不稳定的热对流,这会显著增强湍流的强度和范围,而夜间地表辐射的冷却则会抑制湍流的发展^[19]。在城市和

复杂地形这两类典型的低空环境中,湍流特性更为复杂。城市建筑群的阻碍和绕流效应会在行人高度层产生复杂的风场,并伴随着强烈的动量混合^[20]。图 4 展示了城市环境中的典型湍流模式。

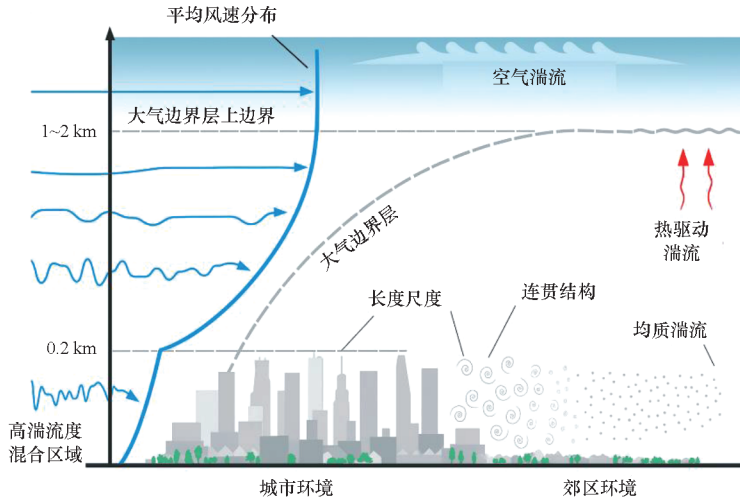


图 4 城市地区的大气环境^[21]

Fig. 4 Atmospheric environment in urban areas^[21]

低空湍流的主要特性可以从湍流强度、相干结构与涡旋以及非定常特性等方面进行描述。湍流强度是衡量风速脉动剧烈程度的指标,低空风场的湍流强度在近地层最高,并随高度增加而减弱。在复杂地形条件下,低空风场受到山谷地带或者建筑群的影响,会产生并维持更高强度的湍流^[22]。此外,研究发现湍流强度通常与平均风速成反比,即平均风速较低时,湍流脉动反而更为剧烈^[23],低空风场的湍流结构是一个多尺度、层次化的复杂体系^[24],它以发卡涡为基本构造单元,在近地表形成涡包^[25],并不断合并和增长,演化为贯穿整个边界层的大尺度运动 (large-scale motions, LSMs) 和超大尺度运动 (very-large-scale motions, VLMSs)^[26]。同时,这些结构受到地表粗糙度、复杂地形以及大气热力稳定度的影响^[27-28],呈现多样的形态和动力学特征。这些湍流结构,无论是小尺度的发卡涡还是大尺度的运动,均表现出显著的非定常特征。这种非定常性意味着湍流的统计特性 (如平均风速、湍流强度、雷诺应力等) 以及相干结构自身的几何形态、空间尺度和演化规律会随时间发生显著变化^[29]。这种非定常性使得低空风场预测和飞行器在其中的控制变得极具挑战性。

1.1.2 低空风场与地形耦合特性

低空风场,特别是近地层风速和风向的垂直结构,在建筑物密集的城市环境中会受到显著影响。建筑物的体型、高度、布局与城市整体热力结

构共同参与了风场的扰动过程,形成了复杂的风-建筑耦合效应。

从单个建筑的尺度来看,当气流遇到建筑物时,会在迎风面发生偏转,一部分气流向上翻越建筑顶部,另一部分则向下流动至地面,并在建筑根部形成一个马蹄形涡^[30]。在建筑物的背风面,气流发生分离,会形成一个低压、低速且湍流波动显著的区域,称为尾流区^[31]。当建筑群密集排列时,个体建筑的流场相互干扰,形成了更为复杂的“街道峡谷”流动^[32]。峡谷内的流动受到峡谷宽高比、来流域街道的夹角与建筑物结构等重要参数影响^[33-34],在不同的参数下会形成不同的流态,例如尾流干涉流和转向涡旋流^[35]。Oke^[36]提出了三种典型流态:孤立粗糙元流、尾流干扰流及掠过流 (如图 5 所示)。当街谷较宽时 ($H/W \leq 0.35$),建筑间距较大,气流在抵达下风向建筑前有充分发展空间,呈现孤立粗糙元特征;当街谷宽度减小 ($0.35 < H/W \leq 0.65$) 时,受扰气流未及充分调整便遭遇下一建筑,从而形成尾流干扰;对于深街谷 ($H/W > 0.65$),两涡旋合并为单一主涡旋,屋顶气流直接掠过建筑顶部而不进入街谷内部,形成典型的掠过流。需要指出的是,在临界区间附近 (如 $H/W \approx 0.35$ 或 $H/W \approx 0.65$),流动结构可能表现出两种流动模式的过渡特征。从更宏观的城市尺度来看,大量建筑物共同构成了高粗糙度的下垫面,形成了独特的城市边界层^[37]。与郊区相比,

城市边界层在结构上更为复杂,通常包含一个受建筑直接影响的“城市冠层”和一个位于其上方的“粗糙度子层”。在城市冠层内部,风速被显著削弱,湍流强度增强^[38]。同时,建筑物吸收和储

存太阳辐射,加上人类活动释放的人为热量,形成了显著的城市热岛效应,这会通过改变大气的热力稳定度,进一步与风场发生耦合作用,影响城市尺度环流的生消和发展^[39]。

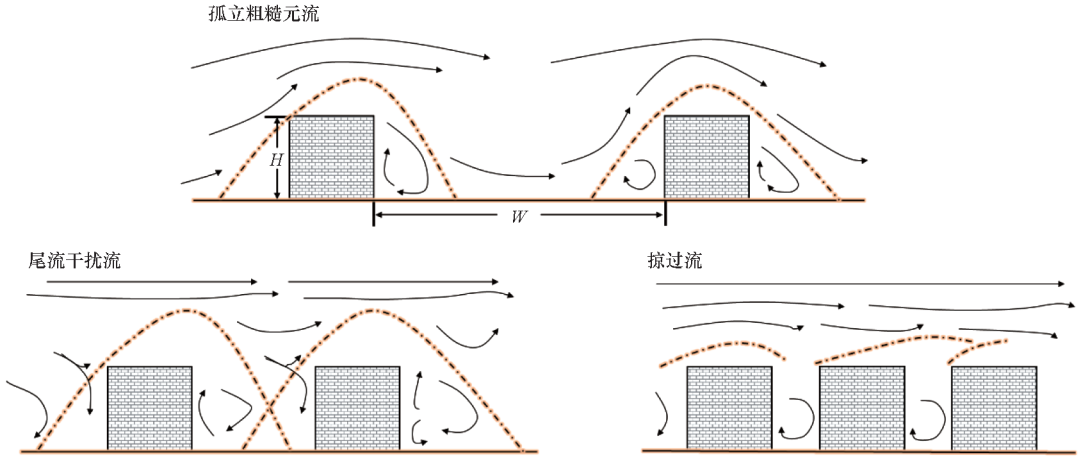


图 5 不同长宽比遮挡物形成的三种气流状态^[36]

Fig. 5 Three airflow states formed by obstructions with different aspect ratios^[36]

低空风场与建筑物的耦合是一个多尺度的复杂过程。在微观尺度,建筑物的几何形状决定了其周围的加速区、尾流区和涡旋结构;在中尺度,建筑群的布局形成了独特的街道峡谷流态;在宏观尺度,整个城市作为一个粗糙、加热的表面,改变了大气边界层的整体特性。

1.1.3 低空风场建模研究

低空飞行的无人机极易受到风场的影响,然而目前传统天气模型的最佳分辨率仅能达到 1 ~ 1.5 km,无法准确表征无人机运行所涉及的关键尺度,而计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)往往可以用于获取此类应用所需的分辨率^[40]。随着计算能力的不断提升以及数值模型的不断完善,数值模拟在城市风环境研究中的应用日趋广泛。

研究初期,学者们致力于验证 CFD 技术在城市风环境模拟中的可行性。例如,Zhang 等^[41]采用基于雷诺平均 Navier-Stokes (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS) 方程的湍流模型,对不同建筑布局下的时均风场特性进行了分析,揭示了建筑几何对风的影响规律。然而,RANS 等时均模拟方法虽然算力需求较小,但是无法捕捉风场中的湍流脉动,模拟精度有限。为了克服这一局限,许多学者将大涡模拟(large eddy simulation, LES)等高精度计算方法应用于风场计算。Kusaka 等^[42]在 LES 框架下开发了 City-LES 模型,该模型额外考虑了建筑物和树木的辐射效应,使风场模拟的物理过程更为完备。Salim 等^[43]研发了微尺度下障碍分辨气

象模型(microscale obstacle-resolving meteorological model, MITRAS),它能显式解析建筑物等障碍物,并综合计算风、温、湿等多种气象指标。

尽管微尺度模型精度不断提高,但其模拟结果的准确性高度依赖于输入边界条件的真实性。为了解决这一“尺度断层”问题,最新的研究趋势是将宏观天气模型与微观 CFD 模型进行耦合。Zhang 等^[44]提出了一个高效的计算框架,该框架首先采用与城市冠层模型耦合的天气研究与预报模型(weather research & forecast-urban canopy model, WRF-UCM)模拟台风等天气过程,为目标区域提供随时间变化的真实风剖面和风向数据;随后,将这些数据作为边界条件,驱动嵌入式大涡模拟(embedded large eddy simulation, ELES)对核心区域进行高精度脉动风场模拟。这种多尺度耦合的方法不仅显著提升了模拟在真实天气事件(尤其是台风)下的可靠性,也通过在非核心区域采用时均结果来优化计算成本,代表了当前城市风场模拟领域的前沿方向。

1.2 低空复杂风场数值模拟及预测方法

1.2.1 传统数值模拟方法

针对低空复杂风场及其对无人机气动干扰的研究主要通过 CFD 仿真和试验研究两大类方法展开。计算流体力学作为一种强大的数值分析工具,通过求解流体力学控制方程(如 Navier-Stokes 方程),能够在计算机上对复杂的流场环境以及飞行器与流场的相互作用进行高保真度模拟。相

较于物理试验,CFD 具有成本低、周期短、可重复性好以及能够提供全流场精细化信息的独特优势^[45],已成为研究低空风场特性及其对无人机气动干扰机理的核心技术手段。

RANS 方法是 CFD 中处理湍流最主流的数值模拟方法,具有计算需求低的优点,使得在有限的时间和硬件条件下,开展大规模、多工况的工程预测成为可能。周盛涛^[46]结合 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型与雷诺平均方程,实现了香港九龙湾这一真实且复杂的沿岸城区的稳态 CFD 模拟,其模拟结果与实测数据基本吻合,证实了 RANS 方法在实际城市环境中的有效性。然而,RANS 方法在处理低空风场时具有无法捕捉瞬时特征、强分离区域模拟精度差等问题,无法准确模拟低空风场中常见的瞬时强风、非定常涡旋脱落以及建筑后方流动分离等流动现象。因此,在精度需求较高的情况下,研究者们往往使用尺度自适应模拟(scale adaptive simulation, SAS)、分离涡模拟(detached eddy simulation, DES)或大涡模拟等精度更高的方法。

尺度自适应模拟是一种介于传统的 RANS 和大涡模拟之间的高级湍流建模方法。它旨在解决 RANS 无法捕捉瞬时涡旋结构,而 LES 计算量又过大的矛盾。尺度自适应模拟能够在不需要 LES 那样极细网格的前提下,提供比 RANS 丰富得多的瞬时流场信息,使得在常规工业级工作站上开展高精度非定常风场模拟成为可能。Qin 等^[47]使用 SAS 方法研究了城市环境下植物分布对于污染物浓度扩散的影响。Žužul 等^[48]对比了 RANS 方法和 SAS 方法在复现垂直下击暴流风场时的准确性,再现了主涡环的发展过程。计算结果表明,二者在平均量吻合度上相似,而 SAS 方法在小尺度结构的模拟上更加准确。不过,这两种数值方法均显示出非物理性的径向速度峰值,表明其在平均风速方面的分辨率可能不足以精确地模拟如下击暴流这类复杂流动。因此,在模拟复杂风场时,仍然需要采用直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)或者 LES 等更加准确的计算方法。

直接数值模拟是计算流体力学中精度最高的方法,不产生模型误差,但是计算量巨大。在低空风场的模拟中,虽然其由于计算量巨大无法用于模拟具体的低空风场,但它在基础物理研究和模型标定中具有不可替代的地位。例如, DNS 可以提供无模型误差的三维瞬时流场数据,用于验证和标定 RANS、LES、SAS 等工程模型的准确性,或

者用于观察其他模型中无法观察到的微小结构,研究相应的基础物理机制。

大涡模拟在处理非定常特性、复杂分离流以及阵风模拟方面具有显著优势,能够在目前的超级计算机技术下实现风场的高精度模拟。大涡模拟的基本原理是对湍流中的大尺度涡进行直接数值模拟,而对小尺度涡则通过建立数学模型来模拟其统计效应。这种方法在保证精度的同时相比于 DNS 极大节约了计算成本,是目前高精度风场模拟的首选,得到了广泛的研究。Gronemeier 等^[49]开发并验证了并行化大涡模拟模型(parallelized large-eddy simulation model, PALM),该模型能精细模拟从行人高度到整个城市的风场动态。随后,Zhang 等^[50]将 LES 应用于香港高密度城区,成功评估了其复杂的通风状况,展示了 LES 在复杂城市拓扑结构中的强大应用能力。为了进一步提升模拟的真实性,还需要在风场计算中考虑城市热环境等气象指标。

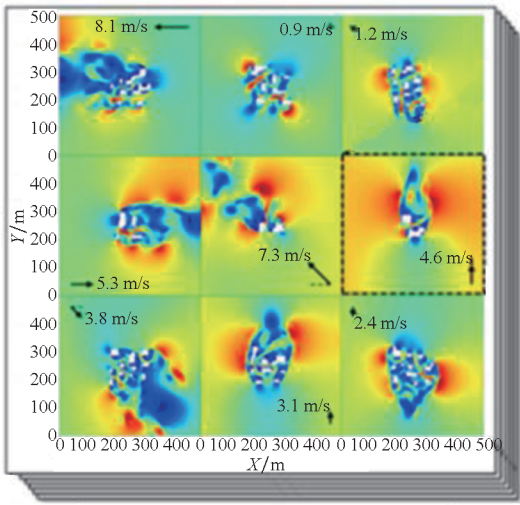
1.2.2 机器学习方法与 CFD 方法结合

虽然 CFD 计算能够有效地模拟风场结构,但是 LES 方法的计算成本极高。RANS 方法虽然计算相比于 LES 大幅减少,但是大规模三维流动的单个计算仍需数小时至数天,无法满足突发事件中城市风场快速预测的需求^[51]。近年来,机器学习(machine learning, ML)和深度学习(deep learning, DL)技术的引入,为 CFD 模拟提供了加速和优化的可能,尤其在风场预测方面取得了显著进展。其应用模式主要可归纳为以下四类范式:

一是将机器学习应用于直接流场预测。该类范式旨在利用 ML 模型完全替代高昂的 CFD 计算,实现从几何参数或边界条件到风场结果的直接演化。直接预测流场的主要方法是 CFD 与 ML 模型独立运行,通过数据交互提升计算效率。利用 CFD 生成高质量训练数据集支撑 ML 模型训练,而训练后的 ML 模型能快速预测新场景下的流场特性^[52]。He 等^[53]提出了一种混合计算框架模型,利用参数化设计、CFD 模拟和图像处理生成的 300 个建筑案例数据训练极端随机树模型,实现了建筑风环境的快速评估。Baitureyeva 等^[54]对比了多种算法对建筑群风场的预测效果,发现随机森林(random forest, RF)在处理不同建筑形态的回归预测中具有更强的稳健性。Kastner 等^[55]开发的计算流体力学和生成式对抗网络结合(CFD-generative adversarial network, CFD-GAN)

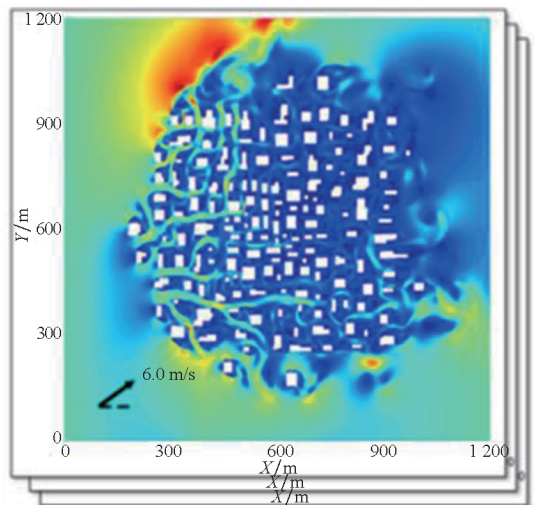
模型在 CAD 环境中可即时预测城市瞬态风场,实现了从数小时 CFD 计算到数秒预测的跨越。Clarke 等^[56]在行人高度风场预测中引入三维编码的混合多层感知器(multilayer perceptron-mixer, MLP-Mixer),在全局风场关联预测上达到了毫秒级计算。Folk 等^[57]将三维城市风场进行了切片,

以 CFD 计算结果作为训练数据,利用卷积自编码器(convolutional autoencoder, CAE)进行特征提取并使用深度神经网络(deep neural network, DNN)对风场进行了重构,如图 6 所示。模型可以预测城市环境不同位置的风速及风向,预测结果与计算结果吻合良好。



(a) 训练模拟

(a) Training simulation



(b) 评估模拟

(b) Evaluate simulation

图 6 CAE 与 DNN 相结合的城市风场预测^[57]Fig. 6 Urban wind field prediction combining CAE and DNN^[57]

二是基于机器学习的数值模拟增强,即通过机器学习优化传统求解器的瓶颈。例如,Zhao 等^[58]开发了基于卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的湍流建模框架,通过学习高精度雷诺应力模式来修正 RANS 模型,并将其集成至 CFD 求解器。这种方式保留了数值计算的严谨性,同时利用深度学习提升了对复杂城市流场的模拟精度,解决了传统湍流模型在强分离流区域表现不佳的问题。

三是基于机器学习的物理信息学习范式。Shao 等^[59]提出的物理信息图神经网络和 CFD 相结合(physics-informed graph neural network-CFD, PIGNN-CFD)的框架将物理方程作为约束引入图神经网络(graph neural network, GNN),不仅解决了 CNN 难以处理城市非结构化网格的痛点,更保证了预测结果符合 RANS 方程的守恒律。

四是基于机器学习的稀疏测点驱动的流场重构。Liu 等^[60]通过耦合 CFD 数据与稀疏传感器数据,实现了符合物理规律的风场重构。此外,无人机协同测风与因子化傅里叶神经运算符(factorized Fourier neural operator, F-FNO)的结合^[61]也证明了在该范式下,利用机器学习可以有效识别突发阵风与关键湍流区域,为城市空中交

通(urban air mobility, UAM)提供动态路径规划保障。

综上所述,深度学习模型通过不同路径显著提升了风场模拟的效率与能力:CNN 与 MLP-Mixer 侧重于局部与全局特征的提取;GNN 与傅里叶神经运算符(Fourier neural operator, FNO)解决了复杂几何与多尺度的泛化难题;而 GAN 与物理约束框架则在实时性与物理一致性之间寻求平衡。尽管在跨场景泛化和可解释性方面仍存挑战,但物理约束与数据驱动的深度融合(Physics-AI)将是未来推动城市风环境精准模拟与设计优化的核心方向。

1.3 低空复杂风场试验研究

1.3.1 风洞试验方法

在风洞中模拟低空风场,其核心是再现真实大气边界层的主要物理特性。由于风洞的试验段长度有限,无法让风场像在大自然中那样经过数十千米的地面摩擦后自然形成,因此必须采用人工方法来加速和模拟这一过程,其具体的方法可以分为被动模拟法和主动模拟法^[62]。

被动模拟法是传统且应用最广泛的技术,它通过在风洞试验段的入口和地面上布置固定的装

置对气流产生扰动,进而形成类似大气边界层的流动特性。被动模拟法通常由入口障碍物、涡流发生器和地面粗糙元三种部件组成。入口障碍物通常是位于试验段最前端的横向矮墙、格栅或密排圆柱,其功能为制造初始的动量损失,产生一个基础的风速剖面。涡流发生器的主要作用是对气流产生强力扰动,并产生强烈的流向涡以促进不同高度流层间的动量与能量交换,进而快速增加边界层的厚度。涡流发生器的形态种类很多,包括尖劈、三角翼,以及 Counihan 提出的椭圆楔形体^[63]等。地面粗糙元是在涡流发生器之后,沿风洞地面向下游长距离铺设的大量重复性粗糙单元。它确保了在整个测试区域内,风速剖面、湍流强度和湍流尺度等关键参数能够保持在一个动态平衡状态,以模拟特定地貌对风场的持续影响。Counihan^[63]最早将障碍物、涡流发生器与地面粗糙元结合,实现了风场的稳定模拟,生成了品质优良的厚边界层,为后续研究奠定了坚实基础。Standen^[64]在此基础上进行了简化,采用优化设计的尖劈与地面粗糙元相结合的方式,实现了更简单且同样有效的大气边界层模拟。由于此方法结构简洁、易于实现且模拟效果出色,尖劈-粗糙元法已成为当前全球风工程实验室中应用最为主流的被动模拟技术。

被动模拟虽然能够实现风洞流场的有效控制,但是其灵活性差,难以精确复现非平稳、非单调的复杂风场。为克服被动模拟的局限性,主动模拟技术应运而生。其核心原理是使用计算机控制的作动器阵列,主动地向流场中注入能量和动量,从而直接、实时地生成目标流场结构。目前的主动模拟法包括主动格栅法、脉冲射流法等。

主动格栅法通过在风洞上游布置由可独立/协同驱动的翼片组成的格栅,并按设定规律改变各翼片攻角,从而在其后方持续产生涡结构,这些涡结构在发展过程中不断破碎并相互作用,最终在试验段形成强度与尺度可调的流场。通过精确编排翼片的转动幅值、频率与相位,可以实现场景化的大气边界层或特定工程湍流的精确模拟。这种方法最早由 Bienkiewicz 等^[65]于 1983 年提出,他们采用了两层格栅在水平面内以 180° 反相缓慢往复振动的结构,通过改变振动频率与幅值来控制来流湍流的强度、积分尺度与能谱分布,实现了贴近实际大气边界层的风洞模拟。目前,主动格栅法已经被广泛应用于湍流风场重建^[66]、飞行器测试^[67]和土木风工程^[68]等不同的研究领域。

脉冲射流法是一种非机械式的主动流动控制

技术,它通过向流场中高频、间歇性地喷射流体来引入扰动,射流与主流相互作用形成一个涡环结构。这些涡环携带着动量和能量,与主流场发生强烈的相互作用,从而在局部或全局范围内改变流场的结构。Teunissen^[69]在 1975 年首次将射流激励器应用于风洞试验,成功复现了不同下垫面条件下的大气边界层流动。相对于主动格栅法,脉冲射流法的响应速度和控制精度更具优势。

1.3.2 风墙试验方法

多风扇阵列风力发生器 (fan array wind generators, FAWGs),又称为风墙,是目前最具有发展前景的风场模拟技术之一,已经成为湍流风场模拟的有力方法^[70]。风墙是一个由大量小型、可独立控制的风扇组成的风扇阵列,来取代传统风洞的单一大型驱动风扇。风墙由数十个乃至上千个小型风扇单元构成一个二维矩阵。每一个风扇都配备独立的电机和高频响控制器,使其转速能够在毫秒级的时间尺度上被精确、独立地调节。风墙的风扇阵列由一个高性能的中央计算机系统统一控制,以实现每个风扇的精确控制。每个风扇产生的气流会在下游阶段相互作用、掺混,最终形成一个宏观上连续、动态变化的、与目标风场高度一致的复杂流场。

风墙系统依托数字化控制,可按需合成随时间与空间变化的复杂风场:既能生成简化的正弦阵风,也可高保真重建大气边界层湍流。相较于其他模拟手段,其切换风场仅需更新控制系统的文件,无须对试验场地进行物理改造,显著提升试验效率;同时,数字化控制保证了工况设定的可追溯性与高度可重复性。

目前,已经有许多学者对风墙的风场特性进行了深入的研究。Walpen 等^[71]构建了由 $18 \times 9 \times 2$ 个独立可控反转风扇组成,并可以进一步拓展至 $36 \times 24 \times 2$ 个阵列的 FAWGs,实现了大气湍流尺度复现。Li 等^[72]针对一台 10×10 个独立可控小型风扇阵列风力发生器开展了系统的气动表征,揭示了该类装置生成的流场呈类射流结构。Liu 等^[73]搭建并表征了一台 $3.25 \text{ m} \times 3.25 \text{ m}$ 、由 40×40 个独立可控反转轴流风扇组成的风扇阵列风力发生器,用于在开放试验段内生成可控、可重复的均匀风、阵风与剪切风。试验结果表明此系统能够在有限空间内高保真复现均匀、阵风及剪切风等多类风场,具有优异的模块化扩展潜力与无人机测试应用前景。这些研究阐明了不同风墙的气动性能,证明了风墙的巨大应用潜力,为风墙的进一步应用提供了理论基础。

1.4 低空复杂风场环境对无人机的气动影响

无人机在低空作业时,其飞行姿态、速度和位置不可避免地会受到风场的干扰。低空大气边界层内的风场充满了湍流、阵风、风切变以及由地面和建筑物引起的复杂流动,这些现象对尺寸较小、重量较轻、飞行速度较低的无人机构成了严峻的气动挑战^[74]。

风场中的气流能够作用于无人机的桨叶上并影响无人机的飞行性能,因此有学者对低空复杂风场下旋翼的气动性能进行研究^[75]。Zagaglia等^[76]研究了在中等风力条件下,旋翼与简化的长方体障碍物相互作用时旋翼的载荷变化情况,发现旋翼会受到尾流回流的影响,出现推力下降和俯仰力矩突变。Tan等^[77]将黏性涡粒子方法与非定常面元法融合,实现了黏性流中旋翼叶片的非定常气动特性预测,成功捕捉了尾迹收缩、梢涡配对、涡卷起等旋翼尾迹非定常动态特征。旋翼叶片压力系数分布与非定常气动载荷的计算结果与实验数据及CFD计算结果吻合良好。刘洋等^[78]研究了障碍尾流、空间约束和随机湍流干扰场景下旋翼-环境耦合流场特征,发现空间约束引起的旋翼尾迹再循环会降低旋翼拉力,围合度越高削弱作用越严重。Luo等^[79]研究了多旋翼受风场的影响,如图7所示,并证明了所提出的气动模型适用于高速平飞情况。目前已经有一些研究对复杂风场下的旋翼气动性能进行分析,但是对于其流动机理的研究仍然不足,并且缺少工程应用的延伸。

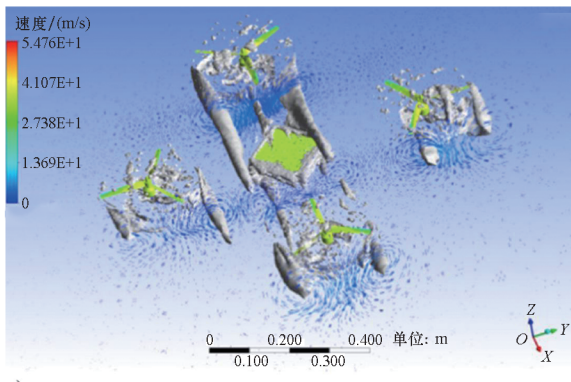


图7 四旋翼无人机在均匀风场中的涡量分布^[79]

Fig. 7 Eddy distribution of a quadcopter UAV in a uniform wind field^[79]

在上述研究基础上,低空风场对无人机的气动干扰问题正逐步成为无人系统领域的关键研究方向。与仅关注旋翼部件的研究相比,低空风场对无人机整机的气动干扰要更为复杂。Lv等^[80]

建立了在恒定风场扰动下的无人机动力学模型,Bangura等^[81]主要研究了旋翼尾迹在地面效应下与机体的相互作用,重点分析了旋翼下洗流与机体之间的干扰效应。Bannwarth等^[82]建立了考虑旋翼诱导速度、桨叶非定常效应以及桨间干扰效应的旋翼无人机动力学模型,并证明了其模型精度能够较好地捕捉多旋翼无人机在不同飞行状态下的气动力特性。目前,有关风场对于无人机影响的研究仍然缺乏对其气动机理的研究,相关模型精度仍然较低。

2 低空空间限制环境及其对无人机的气动影响

无人机在低空环境飞行,有时根据任务需求,需要在并不完全开阔的空域执行任务,此时会受到来自周围建筑墙壁、大型设施外墙或其他相似效果的遮挡。这些遮挡可以等效或简化为壁面,改变无人机的流场,并影响其气动性能。这些壁面主要会对无人机螺旋桨的气动性能产生干扰。对于螺旋桨壁面效应干扰的研究,最早起源于20世纪30年代,学者们发现直升机在起飞以及降落时,旋翼会受到来自地面的强烈干扰,并将这种干扰称为地面效应^[83]。在直升机靠近地面起降时,地面效应会使螺旋桨的升力产生极大的波动,从而使飞行器失稳,并造成坠机事故。学者们针对这一现象开展了一系列的机理与气动模型建立的研究,在日后的直升机控制设计中很大程度上避免了事故的发生。

2.1 低空空间限制环境类型

低空无人机除了受地面限制效应威胁,还会受到天花板效应、侧壁效应的影响,如图8所示,其中, F_G 、 F_C 代表额外升力, τ_s 代表额外力矩。此外,多种壁面耦合效应下还会产生更加复杂的

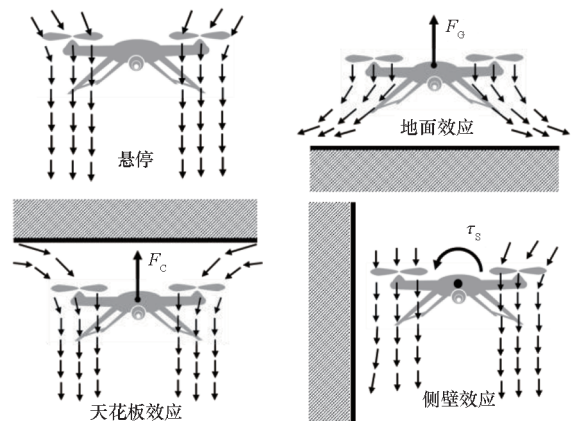


图8 三种无人机壁面效应示意图^[83]

Fig. 8 Schematic diagram of three wall effects of UAV^[83]

干扰效果。这些扰动可能影响螺旋桨的进气状态,导致气动效率下降、推力波动,甚至产生不对称载荷,从而影响飞行姿态控制的稳定性与飞行安全。特别是在靠近建筑物表面飞行时,壁面诱导的地面效应和非定常气流更易对小型多旋翼无人机造成显著影响,加之小型无人机质量轻、稳定性弱,导致安全飞行难度高,因此对于复杂壁面干扰下旋翼气动特性的研究意义重大。

装备不同机械设备以及传感器的无人机需要在城市低空空域进行作业以完成复杂的任务,会主动或被动地在限制环境中飞行,受到来自环境的复杂的壁面效应干扰。无人机灾后建筑环境搜索救援^[84-85]、物流货物配送^[86-87]以及室内未知环境点云扫描建图等任务如图 9 所示。



(a) 无人机室内搜救
(a) Indoor search and rescue by UAV



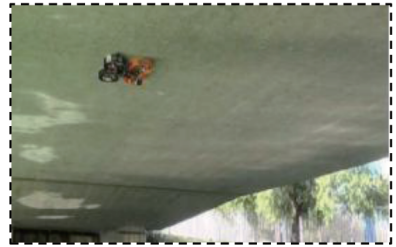
(b) 无人机室内建图
(b) Indoor mapping by UAV

图 9 无人机被动靠近壁面任务

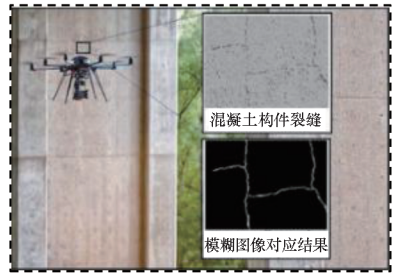
Fig.9 UAV passive approach to wall mission

在无人机执行任务过程中,城市环境带来的壁面干扰有时是多种壁面组合而成的,会影响无人机的飞行稳定性,导致无人机更易与壁面产生碰撞从而损坏。对于有些任务,需要无人机主动靠近带来壁面效应干扰的大型建筑或设备,比如桥梁检修^[88]、建筑缝隙检测^[89-90]等任务,如图 10 所示。这些任务下无人机一般受到单一壁面的干扰,并且这种干扰的来源一般是可以提前预知的,因此可以根据壁面对螺旋桨气动性能影响的机制对无人机的控制系统进行调整。此外,还有一些特殊设计的无人机,在飞行过程中主动靠近壁面边界并利用壁面干扰带来的气动性能的

提升执行特定的任务。比如天花板栖息无人机^[91],可以利用螺旋桨天花板效应带来的升力提升以及功率降低,实现低能耗的长时间悬停飞行。爬壁式建筑检测机器人也是利用这一原理,使机器人利用螺旋桨吸附在竖直墙面上并自由移动。



(a) 桥梁检修^[88]
(a) Bridge maintenance^[88]



(b) 建筑缝隙检测^[90]
(b) Building gap inspection^[90]

图 10 无人机主动靠近壁面任务

Fig.10 UAV actively approach to wall mission

对于常见的三种壁面,所带来的干扰产生的机理与影响效果不尽相同。当无人机飞行接近地面时,螺旋桨产生的下洗流会与地面发生相互作用,导致气流的压缩与加速。这一效应通常表现为推力的增强与功率的下降,尤其在低空悬停或起降阶段较为显著。然而,这种推力增强并非均匀分布,尤其在地面不平整或存在障碍物时,气流的扰动更加复杂。当飞行高度低于一个螺旋桨直径时,地面效应可能导致气流回流、升力不均或推力波动,从而造成飞行控制的非线性行为,甚至可能引发姿态失控。此外,地面效应的影响在横向风速较高时更加显著,可能导致飞行路径的偏离或稳定性降低。

天花板效应是指无人机在靠近天花板飞行时,螺旋桨产生的下洗流被天花板阻碍,导致气流滞留在螺旋桨附近,从而引起升力的不稳定和控制延迟。在此环境下,气流的非定常性增加了升力波动,影响了无人机的垂直飞行精度,尤其在悬停或低速飞行时尤为明显。天花板效应可能使无人机在接近天花板时产生类似“吸附”现象,即飞行器会突然向天花板方向移动,增加碰撞的风险。

这种效应对飞行控制系统提出了更高的要求,特别是在低空操作时,自动控制系统需要实时调整以维持稳定飞行。

侧壁效应主要表现为侧壁对无人机螺旋桨气流的横向干扰。当无人机飞行接近建筑物的侧壁时,螺旋桨的气流受到侧壁的影响,产生非对称的推力分布。侧壁可能导致推力方向的偏移,进而引发偏航或滚转的控制扰动。尤其在

狭窄通道或转弯飞行时,侧壁效应更为明显,气流的扰动可能导致无人机姿态失去稳定,从而增加碰撞的概率。非对称气流还可能导致无人机螺旋桨的气动效率下降,增加能量消耗和飞行时间不稳定。

将水平或竖直的壁面定义为**基础壁面**,将存在角度、有限尺度以及多壁面耦合的情况,定义为**复杂壁面效应**(如图 11 所示)。

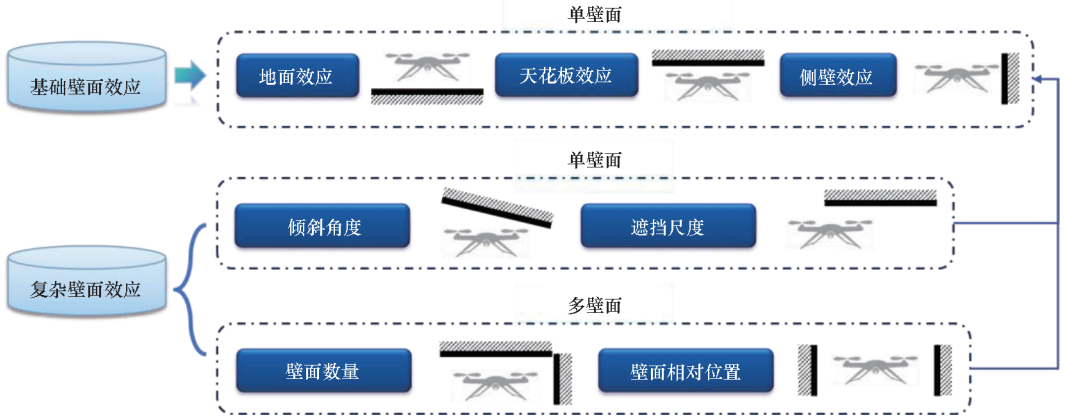


图 11 无人机壁面效应分类

Fig. 11 Classification of wall effects of UAVs

目前学者们主要采用数值计算方法和地面试验对螺旋桨壁面效应开展研究,主要针对壁面对升力影响的规律及其发生的机理。特别是当壁面非水平时,理论推导只能作为基础,需要利用数据对理论公式进行修正。最终可以建立快速预测拉力的气动模型,进一步协助无人机在壁面干扰下的安全飞行,如图 12 所示。

中突然遭遇的壁面,特别是斜面或渐近的壁面,也有学者进行了一定的研究,但是并不全面。第二,对于多壁面的研究目前是十分有限的,仅有少部分学者对具体问题进行了有限工况的计算或试验。多壁面的耦合干扰机理并不明确,并且没有适用的螺旋桨气动模型。单壁面的环境只是理想情况,真实的低空城市环境难免会遇到多种壁面耦合的情况,可能会造成干扰加剧,并且多壁面耦合常常会伴随更强烈的非对称情况,由此会造成无人机气动性能下降,并且飞行状态更不稳定。

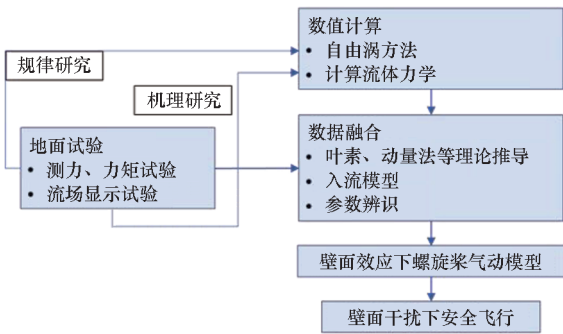


图 12 无人机壁面效应研究路线

Fig. 12 Research roadmap for UAV wall effect

从螺旋桨壁面效应相关研究现状来看,目前研究的重点主要有以下两点:第一,螺旋桨单壁面效应研究,主要集中在平面地面效应,近年来天花板及侧壁效应也开始得到了关注,对于复杂单壁面的研究较少,大部分研究集中在对单壁面效应的干扰进行气动建模,少部分通过试验以及 CFD 方法进行干扰机理研究。对于无人机在任务过程

2.2 低空无人机地面效应研究

关于地面效应的研究,主要经历了从理论推导到地面试验,最后到数值模拟三个阶段。理论推导方法虽然已经出现很久,但是推导出的地面效应气动模型至今仍被作为基础模型广泛应用。试验方法一直作为探究地面效应的重要研究方法,测力试验以及流场显示试验至今仍在发挥重要作用,近年来也常用于数值模拟方法的验证。

2.2.1 地面效应理论方法研究

最早在 19 世纪 30 年代,学者们为了得到直升机在地面效应影响下悬停时的气动特性,对螺旋桨的地面效应开展了一系列的理论以及试验研究^[83]。1937 年,德国物理学家 Betz^[92] 将一个汇布置在螺旋桨中心来模拟螺旋桨的尾流场,并以

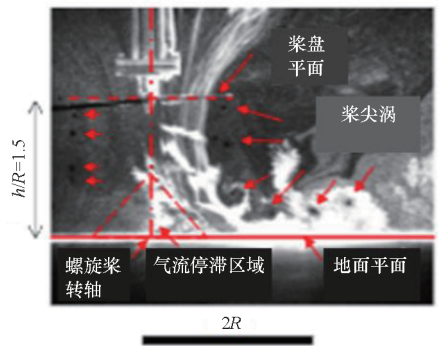
地面为对称轴布置了一个对称的等大反向的汇代替地面气流限制效果,并以此建立了理论模型。而后, Knight 等^[93]尝试了以两组等大反向的圆柱涡流来分析地面效应,继续推动了地面效应的理论研究。在 1950 年, Zbrzozek^[94]首次系统地针对螺旋桨在不同高度下的升力变化情况开展了地面效应试验。到了 1955 年,英国学者 Cheeseman 和 Bennett^[95]为研究直升机前飞时地面效应带来的气动影响,修正了 Betz 的模型,将其中的汇流动替换为源流动,并基于叶素理论和镜像源法推导出了地面效应下螺旋桨的升力变化模型。模型假设流动是无黏不可压缩的,并且需要满足无人机距离地面高度大于 0.25 倍半径。该模型仅用螺旋桨半径与离地高度两项参数即可反映螺旋桨在不同离地高度下升力的相对变化。其对不同尺寸的螺旋桨具有良好的适用性,因此至今仍被广泛应用于地面效应条件下螺旋桨气动力的估算。随后, Hayden^[96]基于试验数据与结果对螺旋桨的地面效应提出了一个经验模型,他的模型预测结果相比于 Cheeseman 和 Bennett 的模型,螺旋桨的升力有所提升。Curtis 等^[97]还针对直升机螺旋桨在距离地面很近距离下的气动性能进行了研究。

早期的理论推导忽略了螺旋桨尾流受地面限制后产生的变化,后续学者们在地面效应的研究中引入了涡流理论。Rossow^[98]利用圆柱涡面模型分析了地面和天花板的限制作用对螺旋桨升力的影响,并发现了一定规律。Duwaldt^[99]在他的基础上,还考虑了螺旋桨的尾流收缩特性,研究了螺旋桨与尾迹的交互。还有一些其他学者,也对于螺旋桨在地面附近的尾迹发展进行了研究^[100-102],他们通过尾迹的变化情况,揭示了地面效应产生的机理与发展规律。Lee 等^[102]分析了旋翼小速度近地前飞时的气动特性,重点探究了地面涡对流场的影响。南京航空航天大学的覃燕华^[103]利用自由尾迹法研究了共轴双旋翼在地面效应下的流场特征以及水平地面与倾斜地面影响下的旋翼悬停及前飞时的尾迹形状。

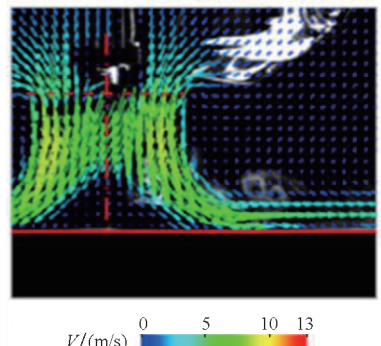
2.2.2 地面效应数值模拟研究

近年来,利用 CFD 数值模拟技术对螺旋桨地面效应进行仿真分析的方法逐渐得到人们的认可和重视,并且更为先进的流场试验方法也得到了推广。国内外均有对地面效应下旋翼飞行器的 CFD 仿真模拟与试验的研究^[104-105]。Kalra 等^[106-107]研究了微型旋翼的地面效应并对流动现象进行了探讨。Sanchez-Cuevas 等^[108]对地面效应及其对多旋翼无人机控制产生的影响进行了

研究。He 等^[109]对单旋翼以及多旋翼无人机的地面效应进行了准定常模型的建立。Otsuka 等^[110]对四旋翼无人机进行了流场可视化及拉力试验,分析了轴距对螺旋桨地面效应的影响。螺旋桨在地面效应下的典型流场显示如图 13 所示。Carter 等^[111]通过先前的四旋翼地面效应模型对螺旋桨受水面影响的气动力变化进行了模型修正。Wu 等^[112]对在极端地面效应 (extremely ground effect, EGE) 条件下悬停的螺旋桨的气动特性进行了试验和 CFD 研究。他们发现当螺旋桨与地面距离小于其半径的一半时,螺旋桨在地面效应下的气动性能与常规地面效应模型下的气动性能存在明显偏差。Deneke 和 Carter^[113]通过粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 试验研究了螺旋桨的推力与高度及来流速度间的关系,发现在地面效应影响下运动速度对螺旋桨推力的变化影响显著。北京理工大学的张威^[114]研究了地面效应下的涵道式螺旋桨,并分析了其对整机稳定性的影响。Mi^[115]对比了地面和水面对涵道式螺旋桨的影响,发现水面带来的气流阻塞效果较弱,推力的增量减小。Deng 等^[116]对涵道



(a) 涡结构
(a) Vortex structure



(b) 速度矢量
(b) Velocity vector

图 13 地面效应下螺旋桨的涡结构与速度矢量^[110]
Fig. 13 The vortex structure and velocity vector of propeller under ground effect^[110]

式螺旋桨在悬停、前飞及地面效应影响下的流场进行了 PIV 试验,分析了地面效应对于涵道式螺旋桨推力增加的原理。Ai 等^[117]研究了共轴涵道式无人机在地面效应下的动力学建模和控制,发现地面效应会导致涵道风扇的额外拉力增大。Luo 等^[118]对涵道式螺旋桨受地面效应带来的非定常气动特性进行了研究,发现在地面效应下,桨叶上存在小尺度的脱落涡并随螺旋桨旋转。

对于地面效应下飞行器的安全飞行,学者们也开展了研究。Li 等^[119]以螺旋桨拉力变化及拉力随距离的导数作为参考,设定了安全阈值,并建立了无人机在受到渐近地面效应及附近螺旋桨干扰时的安全飞行包线。Rovere 等^[120]对地面效应下的螺旋桨进行了安全性分析。他们考虑了包括悬停以及前飞两种不同的飞行条件,通过对尾流场的分析表明,当旋翼以较低的前进速度运动时受到的影响更为强烈。

2.3 低空无人机天花板及侧壁效应研究

2.3.1 天花板效应研究

对于天花板及侧壁的研究,并不像地面效应一样历史悠久,而是随着近年来无人机的广泛应用逐步得到发展的。Rossow^[121]对天花板以及地面对螺旋桨升力的影响开展了研究,这是关于探索天花板效应的第一个尝试。随后关于天花板效应的研究陷入沉寂,直到过去的 10 年间,才被学者们逐渐关注。Robinson 等^[122]利用 CFD 方法对小型螺旋桨靠近天花板悬停时受到的气动干扰进行了数值模拟研究,并采用自由涡模型与试验结果作为对照,结果表明天花板的存在使螺旋桨效率得到了明显改善,并且显著提高螺旋桨的升力。桥梁检测无人机在进行作业时传感器需要与表面接触,这就使无人机需要飞至距离上方平面天花板很近的位置。Sanchez-Cuevas 等^[88]设计了一种新型无人机,可以利用天花板效应带来的螺旋桨升力增加以及功率降低的效果,显著提高无人机的最大续航时间。Jardin 等^[123]搭建了地面试验台,可以对螺旋桨进行力的测量以及流场显示。他们对两种水平以及垂直壁面下螺旋桨性能的变化进行了研究,发现水平壁面(地面效应及天花板效应)有助于提升气动性能,而垂直边界对螺旋桨的影响较小。气动性能的提高取决于水平壁面与螺旋桨的相对位置。Luo 等^[124]对涵道式螺旋桨受天花板效应影响下的非定常气动特性进行了数值模拟研究,分别分析了螺旋桨以及涵道在天花板效应下的压力分布变化,并发现当距离小于 0.4 倍螺旋桨半径时,流场出现了严重的不稳

定性,拉力出现了非常大的波动。Hao 等^[125]对地面效应和天花板效应进行了一系列的数值模拟,包括特别近的距离,他们发现地面效应对于螺旋桨拉力的提高更显著,相应地,天花板效应对于螺旋桨的悬停效率提升效果明显,天花板效应下螺旋桨的典型流场如图 14 所示。Cai 等^[126]对于不同形状和尺寸的地面及天花板平面进行了试验,他们发现地面及天花板效应的效果主要取决于遮挡平面的面积。

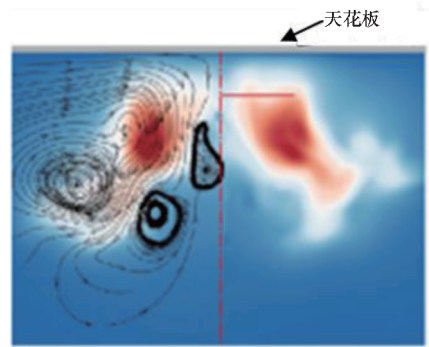


图 14 天花板效应下螺旋桨流场的速度分布^[125]

Fig. 14 Velocity distribution of propeller flow field under ceiling effect^[125]

与地面效应相似,也有学者试图推导出天花板效应的气动模型,用于快速估算天花板附近螺旋桨的升力变化。Wang 等^[127]对螺旋桨在天花板附近悬停时的气动特性进行了 CFD 计算,并对 Cheeseman 和 Bennett 的地面效应模型进行了扩展。Conyers 等^[128]对螺旋桨的天花板效应模型进行了理论推导,他们采用了叶素及动量理论,并验证了模型的有效性。Hsiao 等^[129-130]基于动量理论以及叶素理论提出了描述天花板效应下的气动力模型,并通过试验方法加以验证,结果表明所提出的模型具有很好的准确性。他们发现在某些工况,天花板的存在可以使螺旋桨的功率消耗大幅降低。他们的模型也被许多学者应用到了研究之中。在这之后,也有其他学者通过理论分析和试验的方式建立了天花板效应的气动模型^[131-132]。Kocer 等^[133]利用辨识到的四旋翼无人机非线性模型实现对天花板效应下螺旋桨气动力的预测以及交互控制,将预测控制器实时应用于控制系统,用以补充天花板效应带来的气动力的变化。

2.3.2 侧壁效应研究

虽然侧壁对螺旋桨升力的影响效果较小,但侧壁的存在会影响无人机的飞行稳定性,并且侧壁在无人机低空环境的出现频率很高,同样会严重危害无人机的安全飞行。Robinson 等^[134-135]针对螺旋桨在靠近竖直侧面墙壁时的壁面效应开展

了研究。他们通过 CFD 模拟进行了流场分析,发现侧壁效应会使螺旋桨的尾迹形状与叶尖涡流环量不对称,进一步导致叶片上的气动力随螺旋桨运动的相对位置而变化。Ai 等^[136]提出了一种新型的共轴涵道式无人机,可以在不发生碰撞的前提下靠近垂直墙壁飞行。他们通过数值模拟的方法分析了螺旋桨的拉力及力矩随不同侧向距离的变化情况。Carter 等^[137]对微型四旋翼无人机在地面、天花板以及侧壁效应下的气动特性开展了试验研究,通过测力试验获取气动力数据,并利用 PIV 技术对流场进行可视化分析,四旋翼无人机在侧壁附近的升力变化如图 15 所示。结果表明侧壁对螺旋桨气动性能的影响较小,在螺旋桨靠近侧壁时升力会有略微的损失。Ding 等^[138]通过试验测量了涵道式螺旋桨在靠近侧壁时的相互作用影响,并基于试验数据、飞行动力学以及动量理论拟合出了侧壁的气动模型,允许无人机在没有测距传感器或视觉传感器的情况下估计障碍物的距离和方向。他们为机器人设计了动态逆控制器和反应式导航方法,使无人机能够在未知的环境中安全飞行。飞行试验验证了无人机探测墙壁和避免碰撞的能力,成功地识别并沿着墙壁轮廓实现了安全飞行。Lee 等^[139]提出了一种基于神经网络的自适应控制器,以适应四旋翼无人机面对未知的、可能随时间变化的外部壁面干扰。提出的算法可以估计在狭窄区域、靠近墙壁和/或其他表面飞行时出现的不确定力,从而使控制器在这些干扰下仍能保持一定的位置跟踪性能。Nakata 等^[140]通过对夜行蚊子的避撞机制进行观察,发现当蚊子进入地面或侧壁效应时,它们会感知到自身引起的气流模式的变化。他们利用 CFD 方法模拟了无人机低空和近壁飞行,并根据蚊子活体高速运动学测量结果,对高精度的机械感应器上产生的压力和速度分布的变化进行量化,并验

证了编码空气动力信息可以避免碰撞的原理。

2.4 低空无人机复杂壁面耦合效应研究

随着无人机任务场景趋向复杂,真实情况中受到的壁面干扰不只局限于地面、天花板、侧壁之类的简单无限尺度平面,还包括不完全的壁面、存在倾斜角度的壁面以及多壁面耦合,在这些情况下传统的理论以及模型不再完全适用。为提升无人机在复杂场景的安全性,也有学者对于复杂壁面的干扰开展了研究。

2.4.1 复杂单壁面效应研究

复杂单壁面效应也是基于三种典型的壁面效应情况,在其基础上进行一定的空间上的拓展。南京理工大学的王心旷^[141]对螺旋桨近面效应开展了一系列数值模拟与试验研究。她所研究的工况包含无限尺度地面、天花板以及竖直与环形侧壁效应,斜面地面效应,有限面积地面效应等室内常见的多种复杂壁面情况。她对不同近面情形下的旋翼升力分别建立了数学模型,并通过可视化流场对近面效应的原理和流场变化趋势进行了分析和讨论。Li 等^[119]设计了一种新型的子母式无人机系统,该系统由一架大型多旋翼无人母机以及多架无人子机组成,他们通过用动量源方法数值模拟以及地面试验的方法研究了回收与释放过程中无人母机与无人子机的干扰。其中无人子机在靠近无人母机进行回收时,大型母机的机体相当于一个渐近的地面效应,他们对不同相对位置以及不同地面效应影响范围下的子机旋翼进行了分析,并提出了无人子机的安全飞行边界以及合适的飞行路径。Milluzzo 等^[142]利用 PIV 试验的方法对倾斜表面上方螺旋桨的尾流进行了分析,对螺旋桨的平均尾流结构和轴向速度分布进行了比较,最后得出与平地情况相比,地平面倾角为 30° 时,螺旋桨的性能降低了约 10%。Ding 等^[143]对与侧壁存在倾斜角度的涵道式螺旋桨进行了试验,并设计出了一种可以贴近侧壁稳定飞行的无人机。Garofano-Soldado 等^[144]通过数值模拟的方法对螺旋桨与地面存在倾斜角度的情况进行了研究,并对经典的地面效应模型进行了修正,引入了角度项,结果表明存在倾斜角度时地面效应的影响变弱,并且他所提出的模型具有准确性与一定的普适性。Liu 等^[13]通过 CFD 方法以及地面试验的方法对与天花板存在倾斜角度的螺旋桨进行了气动特性研究,典型流场分布如图 16 所示,其中螺旋桨与天花板相对距离为 0.6 倍螺旋桨半径。并且基于仿真数据提出了带倾斜角度的天花板效应模型,结果表明倾斜天花板效应与地面不

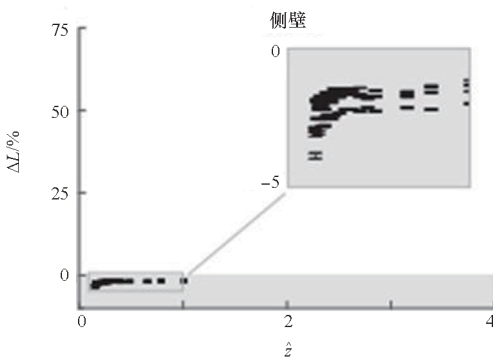
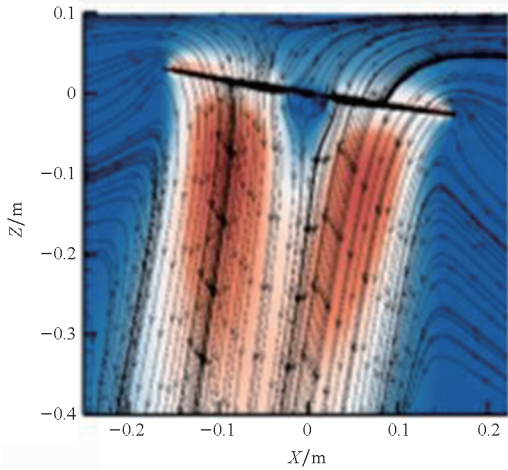


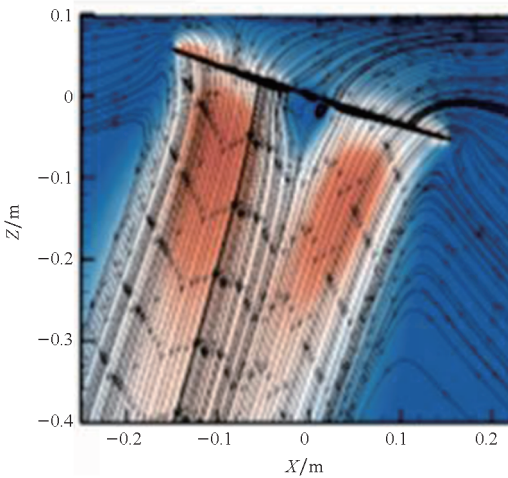
图 15 四旋翼无人机升力随侧壁距离的变化^[137]

Fig. 15 Change in lift of a quadcopter UAV with distance from the sidewall^[137]

同,在较近距离下角度的增加反而会使天花板效应增强。



(a) 倾斜角度为 10°
(a) The tilt angle is 10°



(b) 倾斜角度为 25°
(b) The tilt angle is 25°

图 16 螺旋桨在倾斜天花板效应下的流场分布^[13]

Fig. 16 Flow field distribution of propeller under tilted ceiling effect^[13]

2.4.2 多壁面耦合效应研究

实际飞行任务中,除了应对理想化的单一壁面情况,无人机往往会遇到多种壁面叠加并产生耦合干扰。对于多种壁面的情况,近年来也逐渐受到学者们的关注。Paz 等^[105]利用嵌套网格的方法对四旋翼无人机飞越障碍物进行了数值模拟,评估了地面距离对无人机性能的影响,并分析了不同平移速度下机身周围流场结构的变化特征。Garofano-Soldado 等^[145]对无人机在隧道内检修的情况进行了数值模拟研究,分别对不同倾斜角度、不同相对距离下,直角墙角以及弯角墙角进行了仿真,并分析了流场演化的机理以及旋翼气动特性的变化情况。Liu 等^[146]对旋翼在建筑附

近悬停进行了仿真分析,除地面以及建筑侧壁带来的耦合干扰外,还考虑了侧风的存在。他们根据相对位置以及特性的不同将流场划分为了四个区域,并得到直升机在屋顶作业时采用顺风的方式有利于飞行安全的结论。Otsuka 等^[147]通过试验的方法对螺旋桨处于转角处以及顶点附近升力的变化开展了研究,并发现螺旋桨在转角及顶点推力减小是沿垂直角形成的喷泉流与螺旋桨入流之间的流动再循环结构造成的。Martin 等^[148]利用地面试验的方式统计了无人机在管道内的受力情况,并且对气动力进行了建模,而后结合飞行时间传感器(time of flight sensor, TOF)实现了无人机在管道内的安全飞行。Liu 等^[149]对地面和侧壁同时存在的情况进行了分析,发现螺旋桨在距离壁面一定范围内,两种壁面会存在强烈的耦合干扰,典型流场分布如图 17 所示。

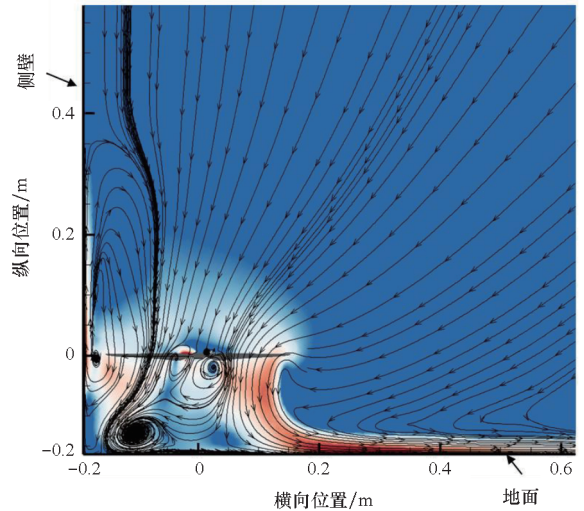


图 17 螺旋桨在地面与侧壁耦合干扰下的流场^[149]

Fig. 17 Flow field of propeller under ground and sidewall coupling interference^[149]

3 低空多无人机环境及机间气动干扰

随着低空经济的快速发展,低空环境中无人机的飞行往往会受到临近无人机的干扰。在低空高密度协同运行场景中,多机近距耦合使原本“静风”背景演变为动态扰动场,机间气动干扰问题也因此逐渐成为影响系统性能与飞行安全的重要因素。多架无人机在有限空域内同时飞行时,个体产生的尾流、下洗流及涡结构会相互作用,导致无人机气动力变化、姿态扰动和控制精度下降。本节围绕低空多无人机环境及机间气动干扰展开综述,系统总结低空多机运行的环境特征、机间气动干扰及研究方法,为多无人机系统在复杂低空环境中的安全高效运行提供参考。

3.1 低空多无人机环境及气动特性

随着无人机技术的普及,低空空域正成为多类型无人机协同运行的重要场所。低空环境通常位于地面至数百米的高度,其空气动力特征与高空显著不同,表现为湍流强度大、风切变频繁、地形和建筑物对气流影响显著等。在这种复杂背景下,多架无人机在有限空域内同时飞行时,每个个体不仅受到环境风场的随机扰动,还受到邻近机体尾流、诱导流及阻挡效应的影响,从而形成空间多方向、非定常且强非线性的耦合流场。这种耦合流场的强度和作用方式随无人机相对位置、编队形态及机动动作而显著变化,成为多机协同飞行中复杂的气动干扰的主要来源^[150]。

多机的协同飞行模式对机间气动干扰的表现具有显著影响,在水平或纵向编队中,尾流及耦合气动扰动在多机间叠加作用,容易引发推力波动和姿态扰动,增加保持队形难度;在密集集群飞行中,流场耦合呈现统计稳定性差、瞬态干扰频繁的特征;对于异构系统,例如,在子母式无人机模式下,母机尾流高度集中作用于子机螺旋桨和机体,同时伴随局部反作用流场,使子机更易出现非对称推力和控制响应延迟,对飞行稳定性和任务精度提出更高要求。

多无人机系统的任务类型也决定了环境特征的复杂程度。在农业植保作业中,多机间尾流叠加会改变喷洒区气流结构,影响药液沉积均匀性;在城市低空物流或巡检任务中,建筑群形成的地形湍流与无人机尾流相互作用,易导致推力波动与控制偏差,从而引起路径偏离或测量误差^[151-152]。

因此系统研究机间气动干扰的作用机理,量化其对推力、升力和姿态的影响规律,并结合合理的编队间距设计与控制补偿策略,对于保障低空多旋翼无人机安全、高效协同作业具有重要意义。

3.2 低空协同无人机气动耦合干扰

在低空多无人机系统中,机间气动干扰是影响协同飞行性能的核心问题。其产生源于多个无人机在有限空域内的尾流相互作用、诱导流叠加和流场重构。该现象具有非定常性、非线性及多尺度的特性,它不仅取决于机体构型,还与编队形态、相对间距、飞行速度及姿态变化密切相关。

近年来,无人机编队控制在分布式控制、强化学习以及基于优化的路径规划等方面已取得显著进展^[153],但在涉及气动耦合约束的研究中仍显不足,特别是对尾流、下洗流和涡干扰等非定常气

动因素的关注不够。这主要是由于多机系统的流场高度非定常、尺度跨度大,直接进行多机气动仿真和实验验证存在巨大的计算与测量挑战。因此,深入研究无人机机间气动干扰机理,并将其纳入飞行控制与编队设计,成为提升多机协同性能的关键环节。对于无人机机间气动干扰,研究路线如图 18 所示。

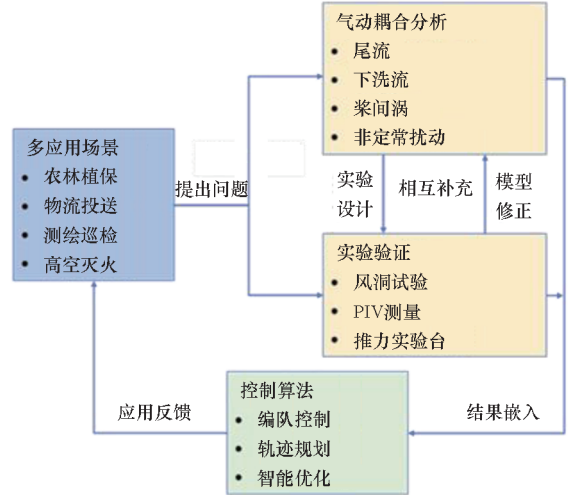


图 18 低空无人机机间气动干扰研究路线

Fig. 18 Research roadmap for inter-aircraft aerodynamic interference of low-altitude UAVs

固定翼编队飞行中,气动干扰主要源自上游机体的翼尖涡尾迹。翼尖涡在传播过程中形成显著的上洗区和速度畸变区域,使下游机体所受的局部气流场发生改变,进而影响升力、阻力及力矩分布。当后机处于上洗区时,可获得额外升力并降低阻力;但若进入尾涡核心区或位置偏离,则可能导致气动力波动和姿态不稳定^[154]。Qiao等^[155]对固定翼飞机编队飞行时的气动性能进行了分析,飞行中的上洗与下洗流分布如图 19 所示。

不同的编队布局导致气动干扰特征差异显著。梯形与人字编队通常能有效提升整体升阻比,但同时可能引入不平衡的滚转力矩;纵列构型虽然简化了横向干扰,却会因尾迹直接作用而降低下游机的气动效率^[156],如图 20 所示。总体来看,固定翼编队的气动干扰受相对间距、编队形式、攻角以及尾迹涡演化过程的共同影响。

多旋翼无人机在集群飞行任务中具有独特的优势。除了具备成本低廉、设计与制造简便、机动性强和悬停能力突出的特性,这类平台在实现协同编队与群体智能任务方面展现出显著潜力^[157]。旋翼无人机的机间干扰主要源于旋翼下

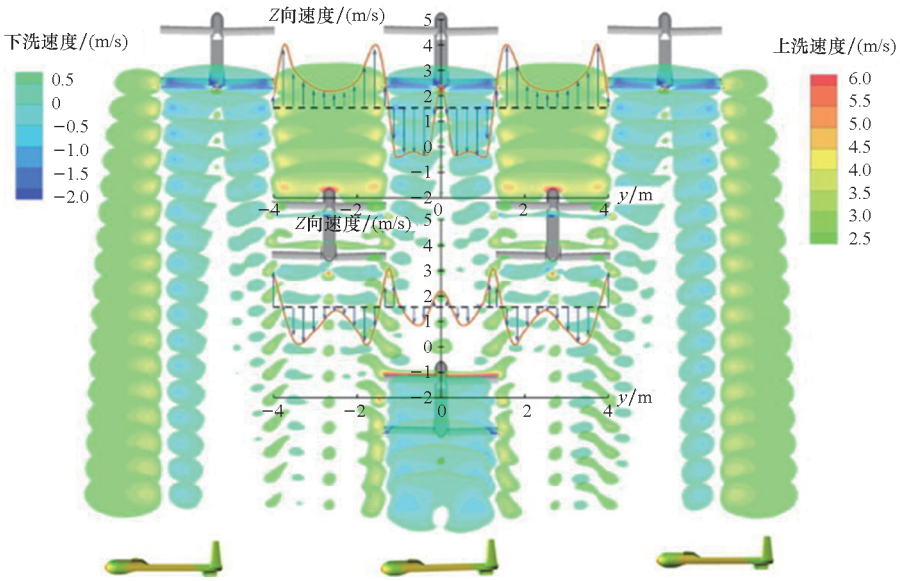


图 19 固定翼编队飞行中上洗与下洗流示意图^[155]

Fig. 19 Schematic diagram of upwash and downwash airflow during fixed-wing formation flight^[155]

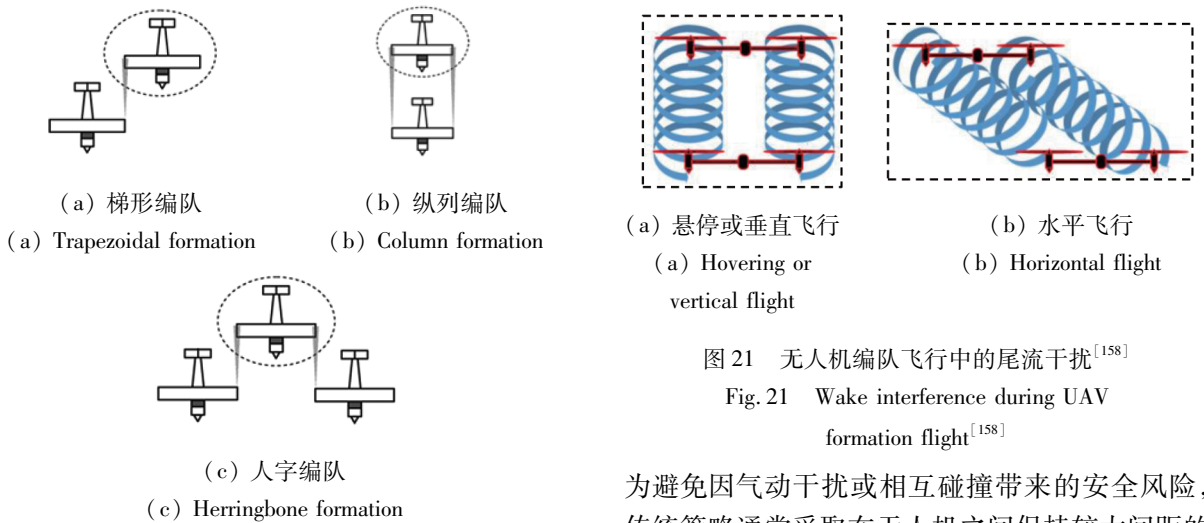


图 21 无人机编队飞行中的尾流干扰^[158]

Fig. 21 Wake interference during UAV formation flight^[158]

洗流和尾流的相互作用。当多架旋翼无人机在低空集群飞行时,每架无人机既受到上游机体旋翼下洗流的影响,又会受到邻机尾流与机体阻挡效应的叠加作用。这种干扰会导致推力分布不均、姿态波动和控制响应延迟,并随着编队机动、相对位置变化呈现非线性耦合特性。在悬停、垂直飞行状态下,上旋翼几乎不受干扰,而下旋翼受尾流影响显著,表现为推力系数下降,且下降幅度随横向和纵向间距、旋翼转速及飞行速度变化而变化;在水平飞行中,尾流影响随着速度增加而扩展^[158],如图 21 所示。

尽管现有研究中针对多机协同飞行下的气动干扰尚缺乏系统而深入的量化分析,但多无人机协同作业的案例已经相当丰富。在实际应用中,

为避免因气动干扰或相互碰撞带来的安全风险,传统策略通常采取在无人机之间保持较大间距的保守方法。但在任务环境受限或飞行空间狭小的场景下,这种过度保守的间距设计会显著降低任务执行效率,甚至导致部分任务无法顺利完成。为解决这一问题,将气动模型或下洗效应等物理约束融入飞行控制系统,成为提升多机协同效率与安全性的可行途径。

在控制与优化层面,国内外学者已经对无人机编队飞行开展了大量工作。Preiss 等^[159]提出了一种面向大型四旋翼编队的轨迹规划方法,在障碍物密集环境中考虑下洗效应,以确保密集编队飞行的安全性。实验验证了该方法在 32 架微型四旋翼上的可行性,仿真结果表明,其在多达 200 架无人机情况下仍具有高计算效率,可在数分钟内生成安全且平滑的轨迹。Shi 等^[160]提出一种结合名义动力学模型与正则化置换不变深度神经网络的多旋翼群体近距离非

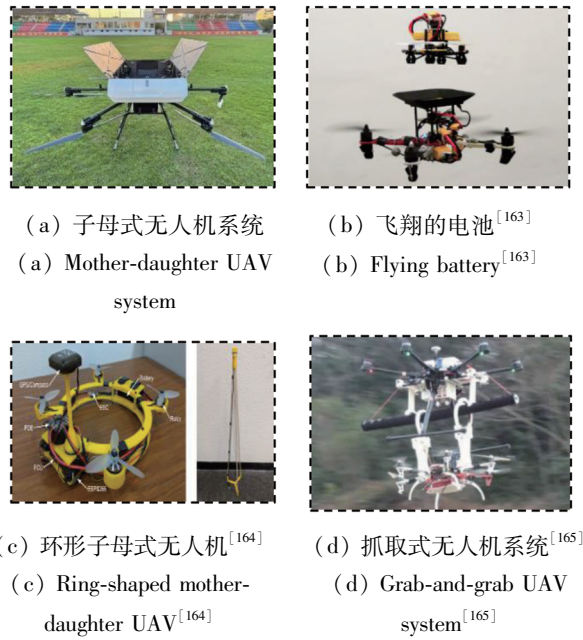
线性分布式控制器 (Neural-Swarm), 其可学习复杂气动相互作用, 避免传统方法所需的大安全距离。实验显示, 该控制器最差高度误差是基线的 1/4, 并可推广至更大规模群体。该团队^[161]还在 Neural-Swarm 基础上引入频谱归一化和异质深度集两种新技术, 提出了 Neural-Swarm2, 实现了对异质多旋翼集群的控制。实验结果表明, Neural-Swarm2 可推广至训练外更大规模群体, 性能显著优于基线非线性跟踪控制器, 最坏情况下的跟踪误差也有大幅度降低。Qu 等^[162]提出基于自适应粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 的多目标规划方法, 综合考虑气动干扰、轨迹安全性、动力学可行性与任务快速性, 实现了子母无人机系统的全局最优空中着陆轨迹设计。

数值模拟方法与气动实验的结合为理解多旋翼尾流特性及其干扰机理提供了支撑, 并推动了编队控制方法的发展。然而, 这类研究仍处于初步阶段, 多依赖低雷诺数小型风洞试验或二维数值模拟, 缺乏高雷诺数下的全三维实验验证。同时, 现有流场测量技术在捕捉多机编队非定常气动相互作用方面仍存在限制, 难以全面揭示动态失速的触发机制及演化过程。因此, 开展系统化、多尺度的机间气动干扰定量研究, 结合先进流场测量与数据驱动建模, 是未来提升编队飞行安全性与任务精度的重要方向。

3.3 低空非编队多无人机气动耦合干扰

随着低空任务复杂性增加, 单一类型无人机难以兼顾航程、载荷、机动性和操作精度等多重需求, 异构无人机系统成为低空作业的重要模式。这类无人机并非编队飞行, 任务过程中无人机间可能出现多种相对位置, 此时无人机需要面临来自周围无人机的非定常气动干扰。异构无人机编队通常由固定翼、旋翼以及子母机等不同类型平台组成, 各机型在飞行特性、推力生成方式和机动性能上存在显著差异。

近年来, 国内外多个研究团队围绕子母异构无人机的系统设计开展了探索性研究, 如图 22 所示, 推动了该模式的理论与技术发展^[119, 163-165]。子母机作为一类典型的异构场景, 兼具母机的长航时与高载荷能力, 以及子机的灵活机动与精细操作优势, 已在军事侦察、物流投放和环境监测等任务中展现出重要应用价值。然而, 由于子机在收放过程中必然进入母机旋翼流场, 且相对于母机体型较小, 其飞行稳定性易受气动干扰影响。相比常规编队飞行, 针对子母机构型的气动干扰



(a) 子母式无人机系统 (a) Mother-daughter UAV system
 (b) 飞翔的电池^[163] (b) Flying battery^[163]
 (c) 环形子母式无人机^[164] (c) Ring-shaped mother-daughter UAV^[164]
 (d) 抓取式无人机系统^[165] (d) Grab-and-grab UAV system^[165]

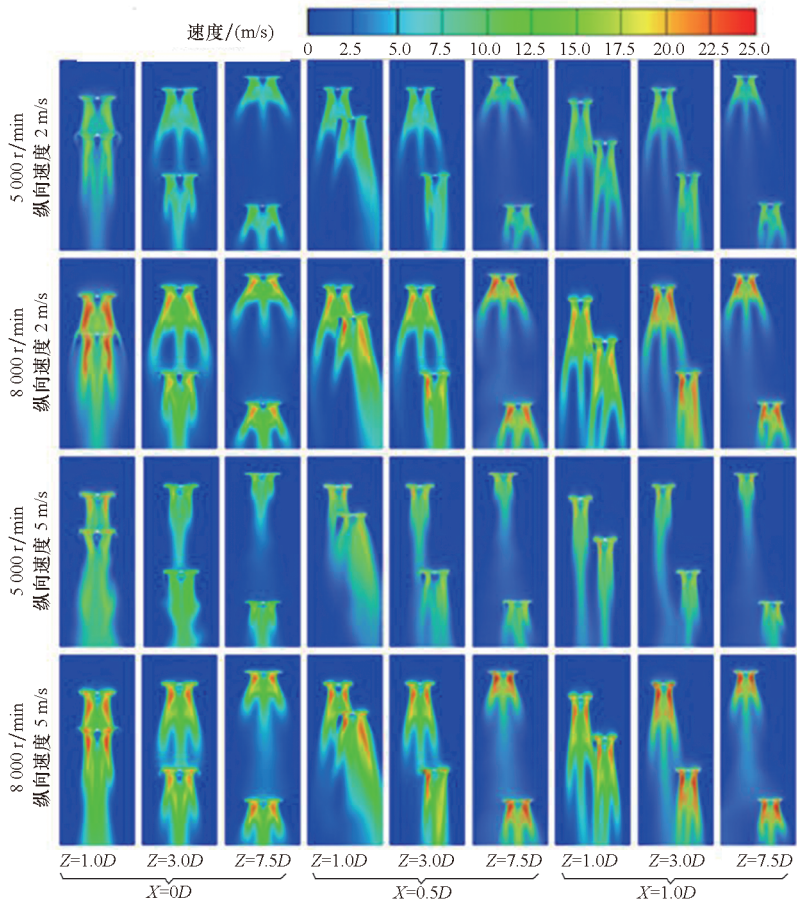
图 22 几种异构无人机系统

Fig. 22 Several heterogeneous UAV systems

机理研究仍相对不足, 缺乏系统的理论、数值与实验支撑, 这在一定程度上制约了其安全应用与飞控优化^[166]。在对子母式无人机气动干扰的研究中, Li 等^[119]通过将 CFD 与实验结合, 系统研究了子母式无人机的气动干扰特性, 明确了不同区域的升力变化与力矩特征, 并提出安全边界与推荐路径。在此基础上, Li 等^[167]进一步提出二维准定常动量源 (momentum source, MS) 方法, 通过时均化处理旋翼周期效应, 以较低计算代价实现多参数耦合干扰建模, 并在多种工况下展现出良好精度与泛化能力。

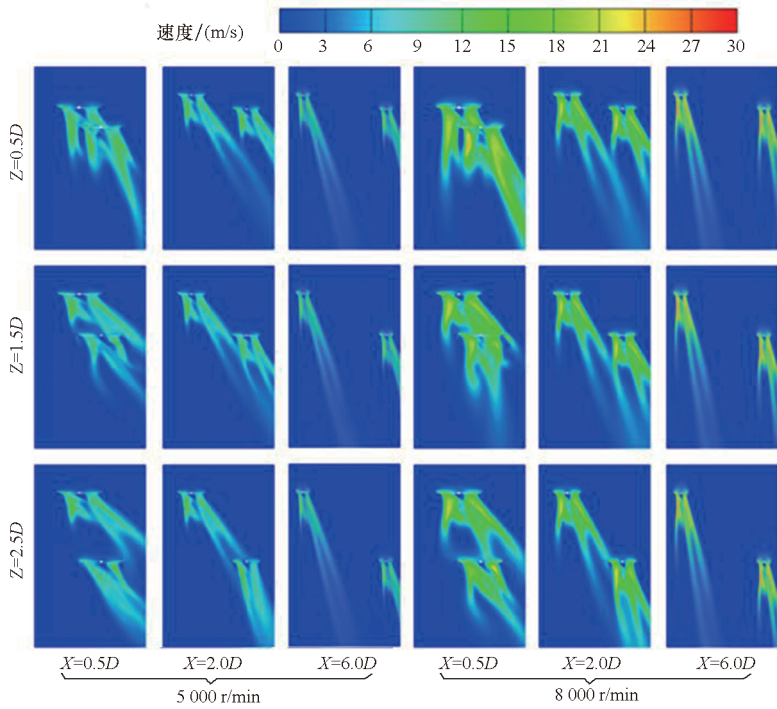
对于多旋翼无人机而言, 旋翼是尾流的主要来源, 会引发复杂的空气动力学干扰。这类干扰不仅削弱相邻旋翼的气动性能, 还可能对编队整体的飞行稳定性与安全性构成风险^[168]。在旋翼气动研究中, CFD 方法可以通过求解 Navier-Stokes 方程, 描述旋翼尾流的生成、演化以及多旋翼之间的相互作用规律。

现有的 CFD 方法能够数值求解旋翼尾流的生成与演化规律, 并在一定程度上模拟其远场传播规律。Liu 等^[158]通过风洞试验与 PIV 试验揭示了近距多旋翼无人机的气动性能主要受尾迹相互作用影响, 其影响随相对位置与来流条件显著变化, 流场分布如图 23 所示, 其中 X 为无人机水平距离, Z 为无人机纵向距离, D 为螺旋桨直径。由于尾流流场高度非定常, 试验观测和全尺寸测试存在困难, 因此高保真数值仿真成为研究旋翼气动干扰的重要手段。自 2016 年以来, NASA 艾



(a) 垂直飞行流场

(a) Vertical flight flow field



(b) 水平飞行流场(速度为 2 m/s)

(b) Horizontal flight flow field ($V=2\text{ m/s}$)

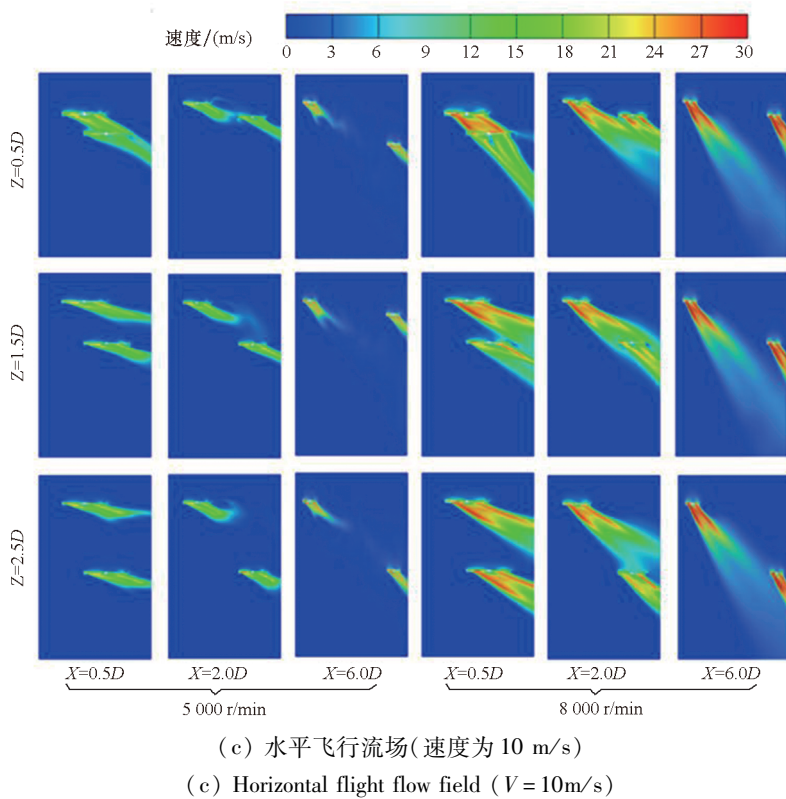


图 23 不同飞行状态下多旋翼无人机机间干扰的流场分布^[158]

Fig. 23 Flow field distribution of inter-rotor interference of multi-rotor UAVs under different flight conditions^[158]

姆斯研究中心就开始系统地开展多旋翼 UAV 的高保真计算流体力学研究。Ventura Diaz 等^[169]结合重叠网格、低马赫数预处理和 DES 湍流模型,对多旋翼无人机及其尾流进行系统数值模拟,揭示了旋翼翼尖涡的多次相互作用及涡度沿流向对齐机制,分析了旋翼设计、组件布置及前向飞行条件对推力、效率、压力波动和飞行稳定性的影响,解析旋翼尾流至远域边界。

在流场建模方面,已有研究从单旋翼下洗流出发,逐步扩展至复杂构型的干扰分析。Khan 等^[170]基于动量理论建立螺旋桨滑流模型,能够较为准确地预测桨盘下方 8~10 倍桨径范围内的下洗速度分布。Lakshminarayan 等^[171]则利用嵌套网格技术,模拟了共轴双旋翼在不同间距与转速条件下的气动干扰规律,为多旋翼流场的数值分析提供了方法基础。Jain 等^[172]较早建立了基于下洗速度场的模型,结合螺旋桨推力受迎面气流影响的理论,定量描述了气动力与力矩扰动随相对位置的变化规律,但实验结果表明,模型在较大间距下吻合度较高,而在近距离条件下存在一定偏差。Caprace 等^[173]采用 LES 结合混合拉格朗日-欧拉涡粒子-网格(vortex particle-mesh, VPM)方法和沉浸升力线(immersive lift line, ILL)对旋翼桨叶建模,系统分析了尾流从近场高度三

维不稳定区到远场两条平行涡主导系统的演化过程,揭示了桨尖涡多次相互作用形成自激湍流及涡度沿流向对齐机制,为旋翼尾流的远场预测提供了参考。Nguyen 等^[174]提出了一种改进的旋翼尾流涡模型,考虑桨叶自然拍动引起的升力环量变化,结合尾流老化与空间传播模型描述尾流强度随时间和距离的衰减,实现了平飞和机动状态下多旋翼尾流相互作用的数值预测。Rau 和 Greenwood^[175]将叶素理论与动态入流模型耦合,实现了低成本下多旋翼尾流系统的物理特性模拟,计算效率显著提升,可在单核处理器中 90 s 内完成 20 转旋翼的仿真,为多机系统尾流建模提供了高效工具。Ko 和 Lee^[176]通过引入诱导环量因子,量化了多旋翼无人机中尾流相互作用对推力性能的影响,为建立多旋翼尾流干扰模型提供了理论基础。沈奥等^[177]基于 CFD 软件的 fan 边界模型,模拟了多旋翼无人机在平飞、爬升和下降时的流场分布,并结合试验数据验证了不同位置上无人机所受气动干扰的差异。牛嵩等^[178]针对多架直升机近距离起降,利用嵌套网格法计算了旋翼间距和外场风速对升力等气动参数的影响,流场涡量分布如图 24 所示。结果表明下风向旋翼受干扰显著,上风向旋翼受影响较小,为多机非编队任务的安全间距提供了参考。

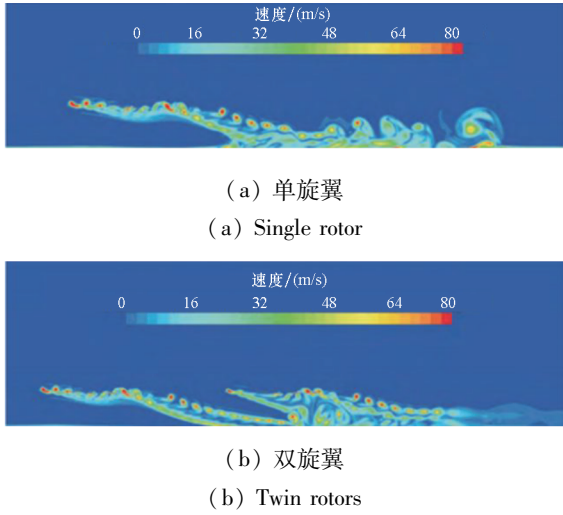


图 24 不同旋翼数量下顺风向流场剖面涡量图^[178]

Fig. 24 Vorticity diagrams of downstream flow field profiles with different numbers of rotors^[178]

然而,仅依赖数值模拟难以全面揭示机间气动干扰,实验研究在理解机间气动相互作用方面提供了关键补充。目前针对无人机非编队飞行的系统性研究仍相对匮乏,尤其是在机间尾流相互作用及其对整体飞行性能影响的定量分析方面。

现有研究中的多旋翼单机及旋翼间气动干扰实验研究可以为理解机间气动相互作用提供重要参考。这些研究通过分析旋翼尾流的生成、演化以及相互干扰机制,为预测多机编队中可能出现的空气动力学干扰奠定了基础,为编队设计、飞行控制策略优化以及安全评估提供了有益的数据支持。Throneberry 等^[179]利用烟流可视化和 PIV 试

验,揭示了低前进比下,强射流和大范围紊流区显著增强了尾流干扰,而随着前进比升高,攻角对尾流分布的影响逐渐减弱。在此基础上,他们通过更系统的风洞试验^[180],进一步研究了尾流在不同前进比下的传播规律,通过速度场测量揭示了尾流强度和分布的变化趋势,验证了高前进比有助于减弱尾流紊流区的传播。Zhu 等^[181]通过错列旋翼系统设计的推力实验台对同轴及错列旋翼系统进行研究,研究表明旋翼间的横向距离、轴向距离及转速显著影响推力和气动干扰,其中横向距离的影响最为显著。在 2024 年,Liu 等^[158]通过风洞试验与 CFD 仿真分析低空编队飞行中旋翼尾流对下部旋翼推力的影响,填补了这方面的空白。Guo 等^[151]以双机协同作业的农用无人机为对象,结合 CFD 数值仿真与叶轮式风速传感器测量,实现了下洗流耦合的定量分析与可视化,揭示了尾流涡生成、逃逸涡形成、耦合扩散及上卷气流交互的全过程,并分析了双机飞行间距对耦合区域气流速度的影响。Jain 等^[172]通过空速管与加速度计测量子机下方的下洗速度,并推导得到气动力与力矩模型。

国内学者陆浩^[182]搭建旋翼试验台,开展地面静态试验,并与数值计算结果对比验证。雷瑶^[183]则设计多种试验装置,系统研究了单旋翼、共轴双旋翼及非平面双旋翼间的干扰特性。Li 等^[119]搭建子母机地面试验平台,如图 25 所示,对所提二维准定常动量源方法进行了试验验证,证明其适用于实际飞行场景。

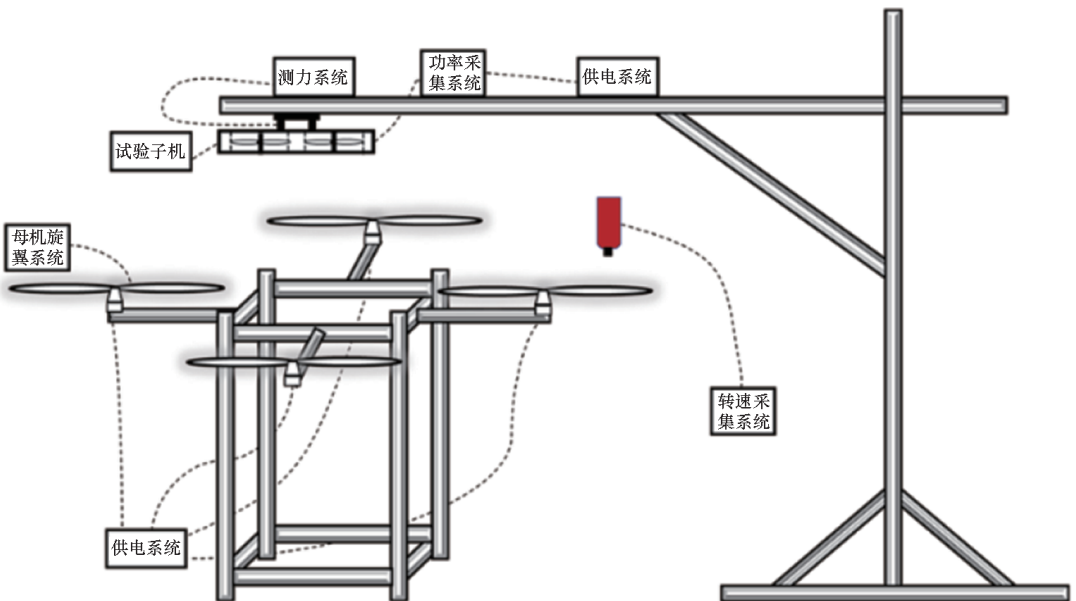


图 25 子母式无人机地面试验台^[119]

Fig. 25 Mother-daughter UAV ground test platform^[119]

4 总结与展望

综上所述,低空风场具有强非均匀性、强剪切和高度非定常的湍流特性,并且风场与建筑物相互耦合,形成多尺度、多结构的流动模式。这些复杂风场条件对无人机的飞行性能和控制稳定性产生显著干扰。现有研究多集中在风场的多尺度建模及对特定建筑场景的风场研究上。由于低空风场存在严重的多尺度耦合现象,并且建筑群种类十分复杂,因此很难找到可以快速预测风场信息的精准的通用模型。此外,对复杂风场下无人机流动机理的研究仍然不足,相关模型精度仍然较低。

对于无人机壁面效应研究,主要集中在地面效应,近年天花板及侧壁效应也开始得到了关注。对于复杂壁面,特别是多壁面耦合的研究较少,大部分研究集中在对单壁面效应的干扰进行气动建模,少部分通过试验以及 CFD 方法进行干扰机理研究。目前,对于单壁面存在倾斜角度时的研究尚不完全,并且缺少有限大小单壁面效应的有效气动模型。对于无人机的多壁面耦合干扰研究处于起步阶段,相关研究较少,尤其是缺乏额外的壁面对地面或天花板效应的耦合影响。现有大多数无人机壁面干扰下安全性分析研究基本是针对传统的平面单壁面,对于复杂壁面情况下的研究较少。

当前低空无人机多机气动干扰研究主要集中在旋翼尾流及下洗流的机理分析与建模上。CFD 数值模拟是研究旋翼尾流特性的主要工具,试验研究则在一定程度上弥补了数值模拟的不足。编队飞行是多机干扰中受气动干扰影响最为显著的场景,尾流作用会直接影响推力分布与姿态稳定性,对队形保持和任务精度提出更高要求。尽管已有部分研究尝试将 CFD 结果和试验观测纳入编队控制与路径规划设计,但整体上仍以定性分析为主,缺乏系统的定量模型与广泛验证。在气动建模、试验验证与编队应用之间存在较大改进空间。

随着低空无人机的快速发展与广泛应用,系统开展低空气动环境及其对无人机的影响研究意义重大。未来研究中,首先,亟须构建面向低空复杂环境的高精度无人机气动模型,在深入刻画多类干扰源与强非线性耦合机理的基础上,探索物理建模与机器学习方法相融合的建模新范式,实现复杂气动效应的高效表征与快速预测;其次,持续发展面向真实低空环境的风场试验与飞行验证

手段,突破复杂扰动环境复现与多尺度气动参数精确测量等关键技术瓶颈,为模型构建与方法验证提供可靠支撑;最后,应面向工程应用需求,系统提升低空无人机在复杂低空气动环境下的抗干扰能力与鲁棒飞行性能,为其在复杂任务场景中的安全高效运行提供理论基础与技术保障。

参考文献 (References)

- [1] 沈向洋,李世鹏,汤宇清,等. 低空经济发展白皮书(3.0)——安全体系[R]. 深圳:粤港澳大湾区数字经济研究院,2024.
SHEN X Y, LI S P, TANG Y Q, et al. Low altitude economy development white paper(3.0): safety system[R]. Shenzhen: International Digital Economy Academy, 2024. (in Chinese)
- [2] ZHOU Y K. Unmanned aerial vehicles based low-altitude economy with lifecycle techno-economic-environmental analysis for sustainable and smart cities [J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 499: 145050.
- [3] 全权,李刚,柏艺琴,等. 低空无人机交通管理概览与建议[J]. 航空学报, 2020, 41(1): 023238.
QUAN Q, LI G, BAI Y Q, et al. Low altitude UAV traffic management: an introductory overview and proposal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(1): 023238. (in Chinese)
- [4] 朱华勇,牛铁峰,沈林成,等. 无人机系统自主控制技术研究现状与发展趋势[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(3): 115-120.
ZHU H Y, NIU Y F, SHEN L C, et al. State of the art and trends of autonomous control of UAV systems[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(3): 115-120. (in Chinese)
- [5] 闫超,涂良辉,王聿豪,等. 无人机在我国民用领域应用综述[J]. 飞行力学, 2022, 40(3): 1-6, 12.
YAN C, TU L H, WANG Y H, et al. Application of unmanned aerial vehicle in civil field in China[J]. Flight Dynamics, 2022, 40(3): 1-6, 12. (in Chinese)
- [6] 崔敬魁. 面向电网巡线和森林火情监测的无人机路径规划算法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
CUI J K. Research on UAV path planning algorithm for power line inspection and forest fire monitoring[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] DUO C H, LI Y Q, GONG W W, et al. UAV-aided distribution line inspection using double-layer offloading mechanism [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2024, 18(13): 2353-2372.
- [8] DELMERICO J, MINTCHEV S, GIUSTI A, et al. The current state and future outlook of rescue robotics[J]. Journal of Field Robotics, 2019, 36(7): 1171-1191.
- [9] DONG C, ZHANG Y F, JIA Z Y, et al. Three-dimension collision-free trajectory planning of UAVs based on ADS-B information in low-altitude urban airspace [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, 38(2): 103170.
- [10] PARK W, WU X Y, LEE D, et al. Design, modeling and control of a top-loading fully-actuated cargo transportation multirotor[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(9): 5807-5814.
- [11] 张良阳,李占科,韩海洋. 微型无人机栖息设计技术综述[J]. 航空学报, 2023, 44(12): 027573.

- ZHANG L Y, LI Z K, HAN H Y. A review of perching technology of micro-UAV [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(12): 027573. (in Chinese)
- [12] DI W C, DANG S H, GONG Z, et al. Skin-like airflow odometry for micro aerial vehicles based on distributed thermal anemometers [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2026, 8(1): 2500406.
- [13] LIU Y L, KAN Z, LI H D, et al. Analysis and modeling of the aerodynamic ceiling effect on small-scale propellers with tilted angles[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 147: 109038.
- [14] THEYS B, DIMITRIADIS G, ANDRIANNE T, et al. Wind tunnel testing of a VTOL MAV propeller in tilted operating mode[C]//*Proceedings of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014: 1064 – 1072.
- [15] MONIN A S. The atmospheric boundary layer[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1970, 2(1): 225 – 250.
- [16] 张宏昇, 张小曳, 李倩惠, 等. 大气边界层高度确定及应用研究进展[J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 522 – 536.
- ZHANG H S, ZHANG X Y, LI Q H, et al. Research progress on estimation of atmospheric boundary layer height[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 522 – 536. (in Chinese)
- [17] SAHA S, SHARMA S, KUMAR K N, et al. Investigation of atmospheric boundary layer characteristics using ceilometer lidar, COSMIC GPS RO satellite, radiosonde and ERA-5 reanalysis dataset over Western Indian Region [J]. *Atmospheric Research*, 2022, 268: 105999.
- [18] KOSOVIC B, BASU S, BERG J, et al. Impact of atmospheric turbulence on performance and loads of wind turbines: knowledge gaps and research challenges[J]. *Wind Energy Science*, 2026, 11(2): 509 – 555.
- [19] SERAFIN S, ADLER B, CUXART J, et al. Exchange processes in the atmospheric boundary layer over mountainous terrain[J]. *Atmosphere*, 2018, 9(3): 102.
- [20] ZAJIC D, FERNANDO H J S, CALHOUN R, et al. Flow and turbulence in an urban canyon[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(1): 203 – 223.
- [21] MOHAMED A, MARINO M, WATKINS S, et al. Gusts encountered by flying vehicles in proximity to buildings[J]. *Drones*, 2023, 7(1): 22.
- [22] ELIASSON I, OFFERLE B, GRIMMOND C S B, et al. Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(1): 1 – 16.
- [23] GAO L, CHENG J J, WU X, et al. Effects of sand-dust weather on wind speed fluctuation over near-surface of cotton fields in desert oasis area [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2025, 13: 1609235.
- [24] TRÄUMNER K, DAMIAN T, STAWIARSKI C, et al. Turbulent structures and coherence in the atmospheric surface layer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 154(1): 1 – 25.
- [25] ABRAHAM A, HONG J R. Characterization of atmospheric coherent structures and their impact on a utility-scale wind turbine[J]. *Flow*, 2022, 2: E5.
- [26] LEE J H, SUNG H J. Very-large-scale motions in a turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 673: 80 – 120.
- [27] LI M G, DE SILVA C M, CHUNG D, et al. Modelling the downstream development of a turbulent boundary layer following a step change of roughness [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 949: A7.
- [28] ALLOUCHE M, BOU-ZEID E, ANSORGE C, et al. The detection, genesis, and modeling of turbulence intermittency in the stable atmospheric surface layer [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2022, 79(4): 1171 – 1190.
- [29] LI W Y, GIOMETTO M G. The structure of turbulence in unsteady flow over urban canopies [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, 985: A5.
- [30] SATTAR A M A, ELHAKHEEM M, GERGES B N, et al. Wind-induced air-flow patterns in an urban setting: observations and numerical modeling[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, 175(8): 3051 – 3068.
- [31] MISHRA A, CARPENTIERI M, ROBINS A, et al. Experimental study of the turbulent characteristics in the wake of tall building clusters[J]. *Flow*, 2024, 4: E15.
- [32] 张凯, 赵天良, 曹乐, 等. 街道峡谷对近地层风场影响的观测和模拟分析 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(12): 4187 – 4195.
- ZHANG K, ZHAO T L, CAO L, et al. Observation and simulation analyses on influence of street canyon on near-surface[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(12): 4187 – 4195. (in Chinese)
- [33] SINGH S, SINGH L, JITENDRA PAL S. Impact of building configurations on fluid flow in an urban street canyon [C]//*Proceedings of Fluid Mechanics and Fluid Power*, 2022.
- [34] HUANG Y D, REN S Q, XU N, et al. Impacts of specific street geometry on airflow and traffic pollutant dispersion inside a street canyon [J]. *Air Quality, Atmosphere, & Health*, 2022, 15(7): 1133 – 1152.
- [35] BAIK J J, PARK R S, CHUN H Y, et al. A laboratory model of urban street-canyon flows [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(9): 1592 – 1600.
- [36] OKE T R. Street design and urban canopy layer climate[J]. *Energy and Buildings*, 1988, 11(1/2/3): 103 – 113.
- [37] BARLOW J F. Progress in observing and modelling the urban boundary layer[J]. *Urban Climate*, 2014, 10: 216 – 240.
- [38] 陈燕, 蒋维楣. 城市建筑物对边界层结构影响的数值试验研究[J]. *高原气象*, 2006, 25(5): 824 – 833.
- CHEN Y, JIANG W M. The numerical experiments of the effect of urban buildings on boundary layer structure [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(5): 824 – 833. (in Chinese)
- [39] OKE T R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects[M]. Dordrecht: Springer, 1995: 81 – 107.
- [40] KADAVERUGU R, SHARMA A, MATLI C, et al. High resolution urban air quality modeling by coupling CFD and mesoscale models: a review [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 55(4): 539 – 556.
- [41] ZHANG A S, GAO C L, ZHANG L. Numerical simulation of the wind field around different building arrangements [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93(12): 891 – 904.
- [42] KUSAKA H, IKEDA R, SATO T, et al. Development of a multi-scale meteorological large-eddy simulation model for urban thermal environmental studies: the "City-LES" model version 2.0 [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2024, 16(10): e2024MS004367.
- [43] SALIM M H, SCHLÜNZEN K H, GRAWE D, et al. The microscale obstacle-resolving meteorological model MITRAS

- v2.0: model theory [J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(8): 3427–3445.
- [44] ZHANG Y X, CAO S Y, CAO J X. A framework for efficient simulation of urban strong wind field during typhoon process using coupled WRF-UCM and embedded LES model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2024, 250: 105757.
- [45] 张少伟. 多尺度城市风环境特性的 CFD 数值模拟与实验研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
ZHANG S W. CFD numerical simulation and experimental study on the characteristics of multi-scale urban wind environment [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (in Chinese)
- [46] 周盛涛. 香港九龙湾沿岸城区 CFD 风场模拟及风灾易损性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHOU S T. CFD wind field simulation on Kowloon Bay coastal town in Hong Kong and wind disaster vulnerability analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [47] QIN P, RICCI A, BLOCKEN B. CFD simulation of pollutant dispersion in a street canyon with realistic car sources: the potential of green infrastructure configurations [J]. *Urban Climate*, 2025, 62: 102544.
- [48] ŽUŽUL J, RICCI A, BURLANDO M, et al. CFD analysis of the WindEEE dome produced downburst-like winds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2023, 232: 105268.
- [49] GRONEMEIER T, SURM K, HARMS F, et al. Evaluation of the dynamic core of the PALM model system 6.0 in a neutrally stratified urban environment: comparison between LES and wind-tunnel experiments [J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(6): 3317–3333.
- [50] ZHANG S W, KWOK K C S, LIU H H, et al. A CFD study of wind assessment in urban topology with complex wind flow [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 71: 103006.
- [51] MAO R, LAN Y E, LIANG L F, et al. Rapid CFD prediction based on machine learning surrogate model in built environment: a review [J]. *Fluids*, 2025, 10(8): 193.
- [52] BRENNER M P, ELDREDGE J D, FREUND J B. Perspective on machine learning for advancing fluid mechanics [J]. *Physical Review Fluids*, 2019, 4(10): 100501.
- [53] HE Y, LIU X H, ZHANG H L, et al. Hybrid framework for rapid evaluation of wind environment around buildings through parametric design, CFD simulation, image processing and machine learning [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 73: 103092.
- [54] BAITUREYEVA A, YANG T, WANG H S. Development of machine learning-aided rapid CFD prediction for optimal urban wind environment design [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2025, 121: 106208.
- [55] KASTNER P, DOGAN T. A GAN-based surrogate model for instantaneous urban wind flow prediction [J]. *Building and Environment*, 2023, 242: 110384.
- [56] CLARKE A, GILJARHUS K E T, OGGIANO L, et al. Deep learning for urban wind prediction: an MLP-Mixer approach with 3D encoding [J]. *Building and Environment*, 2025, 284: 113495.
- [57] FOLK S, MELTON J, MARGOLIS B W L, et al. Learning local urban wind flow fields from range sensing [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(9): 7413–7420.
- [58] ZHAO R, ZHONG S Y, YOU R Y. Application of convolutional neural network for efficient turbulence modeling in urban wind field simulation [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(10): 105169.
- [59] SHAO X Q, LIU Z J, ZHANG S Q, et al. PIGNN-CFD: a physics-informed graph neural network for rapid predicting urban wind field defined on unstructured mesh [J]. *Building and Environment*, 2023, 232: 110056.
- [60] LIU Y, WANG R P, GU Y, et al. Physics-inspired and data-driven two-stage deep learning approach for wind field reconstruction with experimental validation [J]. *Energy*, 2024, 298: 131230.
- [61] DAUNER M, KURZ M, KNOLL A, et al. Local wind vector measurements using multirotor urban air vehicle for the simulation of wind fields in urban areas via factorized Fourier neural operator [C] // *Proceedings of AIAA SCITECH 2025 Forum*, 2025.
- [62] 金瑞麒. 基于动态格栅的大气边界层实验模拟方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
JIN R Q. Research on experimental simulation method of atmospheric boundary layer based on active grid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. (in Chinese)
- [63] COUNIHAN J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 1969, 3(2): 197–214.
- [64] STANDEN N. A spire array for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnels: LTR-LA-94 [R]. National Research Council Canada, 1972.
- [65] BIENKIEWICZ B, CERMAK J E, PETERKA J A, et al. Active modeling of large-scale turbulence [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 13(1/2/3): 465–475.
- [66] NEUHAUS L, BERGER F, PEINKE J, et al. Exploring the capabilities of active grids [J]. *Experiments in Fluids*, 2021, 62(6): 130.
- [67] KISTNER J, NEUHAUS L, WILDMANN N. High-resolution wind speed measurements with quadcopter uncrewed aerial systems: calibration and verification in a wind tunnel with an active grid [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, 17(16): 4941–4955.
- [68] KILDAL O, LI L, HEARST R J, et al. On the use of an active turbulence grid in wind tunnel testing of bridge decks [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2023, 233: 105331.
- [69] TEUNISSEN H W. Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 1975, 9(2): 145–174.
- [70] RAJASEKARA BABU K B, HU G, NOACK B R, et al. From active grids to fan-array wind generators: a review of turbulence generation, control, and artificial intelligence integration in wind tunnels [J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(8): 081304.
- [71] WALPEN A, CATRY G, NOCA F. Real-scale atmospheric wind and turbulence replication using a fan-array for environmental testing and UAV/AAM validation [C] // *Proceedings of AIAA SCITECH 2023 Forum*, 2023.
- [72] LI S Q, LIU Y T, JIANG Z T, et al. Aerodynamic characterization of a fan-array wind generator [J]. *AIAA*

- Journal, 2024, 62(1): 291–301.
- [73] LIU Y T, NOACK B R, HU G, et al. Aerodynamic characterization of a wind generator with 40×40 individually controllable fans [J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(2): 025117.
- [74] WANG B H, WANG D B, ALI Z A, et al. An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle[J]. *Measurement and Control*, 2019, 52(7/8): 731–739.
- [75] 黄梦渊. 旋翼飞行器风环境仿真建模及抗风扰研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
HUANG M Y. Wind environment simulation modeling and wind disturbance resistance of rotorcraft [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [76] ZAGAGLIA D, ZANOTTI A, GIBERTINI G. Analysis of the loads acting on the rotor of a helicopter model close to an obstacle in moderate windy conditions[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 78: 580–592.
- [77] TAN J F, WANG H W. Simulating unsteady aerodynamics of helicopter rotor with panel/viscous vortex particle method[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 30(1): 255–268.
- [78] 刘洋, 史勇杰, 徐国华. 低空复杂风场下旋翼气动干扰特性试验研究[J/OL]. *航空学报*. (2025–06–30) [2025–10–15]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20250628.1435.020>.
LIU Y, SHI Y J, XU G H. Wind tunnel investigation of rotor aerodynamic interference characteristics in complex low-altitude wind fields[J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*. (2025–06–30) [2025–10–15]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20250628.1435.020>. (in Chinese)
- [79] LUO J L, ZHU L F, YAN G R. Novel quadrotor forward-flight model based on wake interference[J]. *AIAA Journal*, 2015, 53(12): 3522–3533.
- [80] LV J Q, SHEN J H, XIA H W, et al. Fuzzy SMC for UAV to resist strong wind with disturbance approximation [C]// *Proceedings of 2018 Ninth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, 2018: 93–98.
- [81] BANGURA M, MAHONY R. Nonlinear dynamic modeling for high performance control of a quadrotor[C]//*Proceedings of the 2012 Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2012: 1–10.
- [82] BANNWARTH J X J, JEREMY CHEN Z, STOL K A, et al. Aerodynamic force modeling of multirotor unmanned aerial vehicles[J]. *AIAA Journal*, 2019, 57(3): 1250–1259.
- [83] MATUS-VARGAS A, RODRIGUEZ-GOMEZ G, MARTINEZ-CARRANZA J. Ground effect on rotorcraft unmanned aerial vehicles; a review[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2021, 14(1): 99–118.
- [84] SEMSCH E, JAKOB M, PAVLICEK D, et al. Autonomous UAV surveillance in complex urban environments [C]// *Proceedings of 2009 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, 2009: 82–85.
- [85] MOTLAGH N H, BAGAA M, TALEB T. UAV-based IoT platform; a crowd surveillance use case [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2): 128–134.
- [86] CHIANG W C, LI Y Y, SHANG J, et al. Impact of drone delivery on sustainability and cost: realizing the UAV potential through vehicle routing optimization [J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 1164–1175.
- [87] 赵博帆. 面向无人机城市空中物流配送的需求分析研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2023.
ZHAO B Z. Research on demand analysis of urban air delivery using UAVs [D]. Deyang: Civil Aviation Flight University of China, 2023. (in Chinese)
- [88] SANCHEZ-CUEVAS P J, HEREDIA G, OLLERO A. Multirotor UAS for bridge inspection by contact using the ceiling effect[C]// *Proceedings of 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2017: 767–774.
- [89] SEO J, DUQUE L, WACKER J. Drone-enabled bridge inspection methodology and application[J]. *Automation in Construction*, 2018, 94: 112–126.
- [90] LI Y, LIU C L. Applications of multirotor drone technologies in construction management [J]. *International Journal of Construction Management*, 2019, 19(5): 401–412.
- [91] LIU Y, CHEN H P, TANG Z M, et al. A bat-like switched flying and adhesive robot [C]//*Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2012: 92–97.
- [92] BETZ A. The ground effect on lifting propellers; NACA-TM-836[R]. United States: National Advisory Committee for Aeronautics, 1937.
- [93] KNIGHT M, HEGNER R A. Analysis of ground effect on the lifting airscrew; NACA-TN-835[R]. United States: National Advisory Committee for Aeronautics, 1941.
- [94] ZBROZEK J. Ground effect on the lifting rotor[J]. *ARC R & M*, 1950, 2347: 1–8.
- [95] CHEESEMAN I C, BENNETT W E. The effect of the ground on a helicopter rotor in forward flight; ARC/R&M-3021[R]. Aeronautical Research Council, 1955.
- [96] HAYDEN J. The effect of the ground on helicopter hovering power required [C]//*Proceedings of AHS 32nd Annual Forum*, 1976.
- [97] CURTISS H C, SUN M, PUTMAN W F, et al. Rotor aerodynamics in ground effect at low advance ratios [J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 1984, 29(1): 48–55.
- [98] ROSSOW V J. Effect of ground and ceiling planes on shape of energized wakes [J]. *Journal of Aircraft*, 1994, 31(5): 1227–1231.
- [99] DUWALDT F A. Wakes of lifting propellers (rotors) in ground effect[R]. Buffalo: Cornell Aeronautical Laboratory, Inc., 1966.
- [100] GRIFFITHS D A, ANANTHAN S, LEISHMAN J G. Predictions of rotor performance in ground effect using a free-vortex wake model[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2005, 50(4): 302–314.
- [101] ITOGA N, IBOSHI N, HORIMOTO M, et al. Numerical analysis of helicopter rotor hovering in close proximity to the ground with a wall [J]. *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2010, 58(680): 269–276.
- [102] LEE T E, LEISHMAN J G, RAMASAMY M. Fluid dynamics of interacting blade tip vortices with a ground plane[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2010, 55(2): 22005.
- [103] 覃燕华. 共轴双旋翼地面效应气动特性研究[D]. 南京:

- 南京航空航天大学, 2015.
- QIN Y H. Research on aerodynamic characteristics of coaxial twin rotors in ground effect [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [104] NAIR S, JOSEPH C, MOHAN R. An evaluation of ground effect modelling for rotors in hover[C]//Proceedings of the 6th Asian/Australian Rotorcraft Forum/Heli Japan, 2017: 1-9.
- [105] PAZ C, SUÁREZ E, GIL C, et al. CFD analysis of the aerodynamic effects on the stability of the flight of a quadcopter UAV in the proximity of walls and ground[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206: 104378.
- [106] KALRA T S. CFD modeling and analysis of rotor wake in hover interacting with a ground plane[D]. College Park, MD: University of Maryland, 2014.
- [107] KALRA T S, LAKSHMINARAYAN V K, BAEDER J D. CFD validation of micro hovering rotor in ground effect[C]//Proceedings of the 66th Annual Forum and Technology Display of the American Helicopter Society International, 2010: 1-22.
- [108] SANCHEZ-CUEVAS P, HEREDIA G, OLLERO A. Characterization of the aerodynamic ground effect and its influence in multirotor control[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2017, 2017(1): 1823056.
- [109] HE X, LEANG K K. Quasi-steady in-ground-effect model for single and multirotor aerial vehicles[J]. AIAA Journal, 2020, 58(12): 5318-5331.
- [110] OTSUKA H, KOHNO M, NAGATANI K. Fountain flow visualization in quadrotor wake decreasing rotor thrust in-ground effect[J]. Journal of Aircraft, 2024, 61(3): 761-773.
- [111] CARTER D, ZHONG Q, QUINN D. Using ground effect to model the performance of small near-water rotors [C]//Proceedings of AIAA SCITECH 2024 Forum, 2024.
- [112] WU Z L, ZHANG T Y, TAN H J, et al. Hovering rotor aerodynamics in extreme ground effect[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(7): 204-219.
- [113] DENEKE J A, CARTER D J. Rotor aerodynamics in boundary layer flow with ground effect[C]//Proceedings of AIAA SCITECH 2025 Forum, 2025.
- [114] 张威. 小型涵道式飞行器稳定性分析与流动控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- ZHANG W. Stability analysis and flow control of a ducted fan UAV [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [115] MI B G. Numerical investigation on aerodynamic performance of a ducted fan under interferences from the ground, static water and dynamic waves [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 100: 105821.
- [116] DENG S H, WANG S W, ZHANG Z. Aerodynamic performance assessment of a ducted fan UAV for VTOL applications[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 103: 105895.
- [117] AI T F, XU B, XIANG C L, et al. Aerodynamic analysis and control for a novel coaxial ducted fan aerial robot in ground effect[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(4): 1-15.
- [118] LUO Y W, AI T F, HE Y H, et al. Numerical investigation on unsteady characteristics of ducted fans in ground effect[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(9): 79-95.
- [119] LI H D, LIU Y L, LI D C, et al. Ground test and numerical simulation of aerodynamic interference of the marsupial UAS[J]. Aerospace, 2023, 10(2): 175.
- [120] ROVERE F, BARAKOS G, STEIJL R. Safety analysis of rotors in ground effect [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 129: 107655.
- [121] ROSSOW V. Effect of ground and/or ceiling planes on thrust of rotors in hover; NASA-TM-86754[R]. NASA, 1985.
- [122] ROBINSON D C, CHUNG H, RYAN K. Numerical investigation of a hovering micro rotor in close proximity to a ceiling plane[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 66: 229-253.
- [123] JARDIN T, PROTHIN S, MAGAÑA C G. Aerodynamic performance of a hovering microrotor in confined environment[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2017, 62(2): 1-7.
- [124] LUO Y W, AI T F, HE Y H, et al. Aerodynamic analysis on unsteady characteristics of a ducted fan hovering in ceiling effect[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2023, 17(1): 2196327.
- [125] HAO J J, ZHANG Y L, ZHOU C, et al. Aerodynamic performance of hovering micro revolving wings in ground and ceiling effects at low Reynolds number[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(1): 152-165.
- [126] CAI J L, GUNASEKARAN S, OL M. Effect of partial ground and partial ceiling on propeller performance [J]. Journal of Aircraft, 2023, 60(3): 648-661.
- [127] WANG X K, DU S S, LIU Y. Research on ceiling effect of quadrotor [C]//Proceedings of 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2017: 846-851.
- [128] CONYERS S A, RUTHERFORD M J, VALAVANIS K P. An empirical evaluation of ceiling effect for small-scale rotorcraft[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2018: 243-249.
- [129] HSIAO Y H, CHIRARATTANANON P. Ceiling effects for surface locomotion of small rotorcraft [C]//Proceedings of 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018: 6214-6219.
- [130] HSIAO Y H, CHIRARATTANANON P. Ceiling effects for hybrid aerial-surface locomotion of small rotorcraft [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5): 2316-2327.
- [131] KOCER B B, TIRYAKI M E, PRATAMA M, et al. Aerial robot control in close proximity to ceiling: a force estimation-based nonlinear MPC [C]//Proceedings of 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2019: 2813-2819.
- [132] JIMENEZ-CANO A E, SANCHEZ-CUEVAS P J, GRAU P, et al. Contact-based bridge inspection multirotors: design, modeling, and control considering the ceiling effect [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3561-3568.
- [133] KOCER B B, TJAHOJOWIDODO T, SEET G G L. Centralized predictive ceiling interaction control of quadrotor

- VTOL UAV[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 76: 455–465.
- [134] ROBINSON D C, CHUNG H, RYAN K. Computational investigation of micro helicopter near-wall effect [C]// *Proceedings of the 19th Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC)*, 2014: 1–4.
- [135] ROBINSON D C, CHUNG H, RYAN K. Computational investigation of micro rotorcraft near-wall hovering aerodynamics [C]// *Proceedings of 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014: 1055–1063.
- [136] AI T F, XIANG C L, XU B, et al. Influence of wall effect on comprehensive controllability for ducted fan aircraft[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2020, 29(4): 581–591.
- [137] CARTER D J, BOUCHARD L, QUINN D B. Influence of the ground, ceiling, and sidewall on micro-quadrotors[J]. *AIAA Journal*, 2021, 59(4): 1398–1405.
- [138] DING R Z, BAI S N, DONG K X, et al. Aerodynamic effect for collision-free reactive navigation of a small quadcopter[J]. *npj Robotics*, 2023, 1: 2.
- [139] LEE D, AWAN A U, KIM S, et al. Adaptive control for a VTOL UAV operating near a wall[C]// *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2012.
- [140] NAKATA T, PHILLIPS N, SIMÕES P, et al. Aerodynamic imaging by mosquitoes inspires a surface detector for autonomous flying vehicles [J]. *Science*, 2020, 368(6491): 634–637.
- [141] 王心旷. 旋翼无人机的近面效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
WANG X K. Proximity effect study of rotorcrafts [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [142] MILLUZZO J I, MARTINEZ A, DRAYTON S, et al. Experimental investigation of rotors hovering above inclined surfaces[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2021, 66(2): 1–11.
- [143] DING R Z, HSIAO Y H, JIA H Y, et al. Passive wall tracking for a rotorcraft with tilted and ducted propellers using proximity effects[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 1581–1588.
- [144] GAROFANO-SOLDADO A, SANCHEZ-CUEVAS P J, HEREDIA G, et al. Numerical-experimental evaluation and modelling of aerodynamic ground effect for small-scale tilted propellers at low Reynolds numbers[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 126: 107625.
- [145] GAROFANO-SOLDADO A, HEREDIA G, OLLERO A. Aerodynamic interference in confined environments with tilted propellers: wall effect and corner effect [C]// *Proceedings of 2021 Aerial Robotic Systems Physically Interacting with the Environment (AIRPHARO)*, 2021: 1–8.
- [146] LIU Y, SHI Y J, AZIZ A, et al. Numerical study on rotor-building coupled flow field and its influence on rotor aerodynamic performance under an atmospheric boundary layer[J]. *Aerospace*, 2024, 11(7): 521.
- [147] OTSUKA H, AKABA S, HARA T, et al. Thrust variations in small rotors due to corner and vertex effects on the ground side[J]. *The Aeronautical Journal*, 2025, 129(1334): 1077–1095.
- [148] MARTIN T, GUÉNARD A, TEMPEZ V, et al. Flying in air ducts[J]. *npj Robotics*, 2025, 3: 16.
- [149] LIU Y L, LI D C, ZHAO S W, et al. Aerodynamic analysis of a small-scale propeller under ground-sidewall coupling interference[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2026, 170: 111541.
- [150] THRONEBERRY G, HOCUT C M, ABDELKEFI A. Multi-rotor wake propagation and flow development modeling: a review [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2021, 127: 100762.
- [151] GUO Q W, HUANG F T, HOU C J, et al. Numerical simulation and validation of downwash airflow during dual-aircraft collaborative operations of quad-rotor agricultural UAVs[J]. *Measurement*, 2025, 247: 116782.
- [152] FERNANDO H J S, PARDYJAK E R, DI SABATINO S, et al. The MATERHORN: unraveling the intricacies of mountain weather [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(11): 1945–1967.
- [153] SHAO Z, YAN F, ZHOU Z, et al. Path planning for multi-UAV formation rendezvous based on distributed cooperative particle swarm optimization[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(13): 2621.
- [154] CHAN J C, WANG P C, HESSE H. Aerodynamic interactions in formation flight for wake vortex surfing[C]// *Proceedings of AIAA AVIATION 2023 Forum*, 2023.
- [155] QIAO N X, MA T L, WANG X S, et al. An approach for formation design and flight performance prediction based on aerodynamic formation unit: energy-saving considerations[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(3): 77–91.
- [156] BANGASH Z A, SANCHEZ R P, AHMED A, et al. Aerodynamics of formation flight [J]. *Journal of Aircraft*, 2006, 43(4): 907–912.
- [157] GUPTA S G, GHONGE M M, JAWANDHIYA P M. Review of unmanned aircraft system (UAS) [J]. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 2013, 2(4): 1646–1658.
- [158] LIU C, LI B Q, WEI Z Q, et al. Effects of wake separation on aerodynamic interference between rotors in urban low-altitude UAV formation flight [J]. *Aerospace*, 2024, 11(11): 865.
- [159] PREISS J A, HÖNIG W, AYANIAN N, et al. Downwash-aware trajectory planning for large quadrotor teams [C]// *Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017: 250–257.
- [160] SHI G Y, HÖNIG W, YUE Y S, et al. Neural-Swarm: decentralized close-proximity multirotor control using learned interactions [C]// *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020: 3241–3247.
- [161] SHI G Y, HÖNIG W, SHI X C, et al. Neural-Swarm2: planning and control of heterogeneous multirotor swarms using learned interactions [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, 38(2): 1063–1079.
- [162] QU X C, WANG L, CHEN H L, et al. Aerial landing trajectory planning of sub-mother UAV system based on PSO algorithm considering aerodynamic interference [C]// *Proceedings of 2025 6th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM)*, 2025: 188–198.
- [163] JAIN K P, MUELLER M W. Flying batteries: in-flight

- battery switching to increase multirotor flight time [C] // Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020: 3510 - 3516.
- [164] ROCHA R, ROBINSON S K. Toward autonomous in-flight docking of unmanned multi-rotor aerial vehicles [C] // Proceedings of AIAA SCITECH 2020 Forum, 2020.
- [165] MIYAZAKI R, JIANG R, PAUL H, et al. Airborne docking for multi-rotor aerial manipulations [C] // Proceedings of 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018: 4708 - 4714.
- [166] CALHOUN P. DARPA emerging technologies [J]. Strategic Studies Quarterly, 2016, 10(3): 91 - 113.
- [167] LI H D, LI D C, BIE D W, et al. Aerodynamic interference analysis and modeling of heterogeneous rotors [J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 151: 109249.
- [168] WANG C H J, NATHANAEL J C, NG E M, et al. Framework for the estimation of safe wake separation distance between same-track multi-rotor UAS [C] // Proceedings of the AIAA SCITECH 2021 Forum, 2021.
- [169] VENTURA DIAZ P, YOON S. High-fidelity computational aerodynamics of multi-rotor unmanned aerial vehicles [C] // Proceedings of 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.
- [170] KHAN W, NAHON M, CAVERLY R. Propeller slipstream model for small unmanned aerial vehicles [C] // Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies (MST) Conference, 2013.
- [171] LAKSHMINARAYAN V K, BAEDER J D. Computational investigation of microscale coaxial-rotor aerodynamics in hover [J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(3): 940 - 955.
- [172] JAIN K P, FORTMULLER T, BYUN J, et al. Modeling of aerodynamic disturbances for proximity flight of multirotors [C] // Proceedings of 2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2019: 1261 - 1269.
- [173] CAPRACE D G, CHATELAIN P, WINCKELMANS G. Wakes of rotorcraft in advancing flight: a large-eddy simulation study [J]. Physics of Fluids, 2020, 32(8): 087107.
- [174] NGUYEN N T, BARTOLINI G, BACULI J E, et al. Wake vortex interaction of urban air mobility aircraft [C] // Proceedings of AIAA SCITECH 2022 Forum, 2022.
- [175] RAU R F, II, GREENWOOD E. A dynamic wake model for multirotor aircraft [C] // Proceedings of AIAA AVIATION 2022 Forum, 2022.
- [176] KO J, LEE S. Quantification of wake interaction effects on multi-rotor configurations in forward flight [J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 135: 108188.
- [177] 沈奥, 周树道, 王敏, 等. 多旋翼无人机流场仿真分析 [J]. 飞行力学, 2018, 36(4): 29 - 33.
- SHEN A, ZHOU S D, WANG M, et al. Simulation and analysis of multi-rotor UAV flow field [J]. Flight Dynamics, 2018, 36(4): 29 - 33. (in Chinese)
- [178] 牛嵩, 田旭, 徐宝石, 等. 多机起降旋翼间气动干扰数值模拟研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(2): 173 - 178.
- NIU S, TIAN X, XU B S, et al. Numerical simulation of aerodynamic interactions between multiple rotors during take-off and landing [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(2): 173 - 178. (in Chinese)
- [179] THRONEBERRY G, TAKESHITA A, HOCUT C M, et al. Experimental investigation on the drone-wake interaction of multi-rotor systems in forward flight [C] // Proceedings of AIAA SCITECH 2021 Forum, 2021.
- [180] THRONEBERRY G, TAKESHITA A, HOCUT C M, et al. Wake propagation and characteristics of a multi-rotor unmanned vehicle in forward flight [J]. Drones, 2022, 6(5): 130.
- [181] ZHU H, DENG S Q, WEI S X, et al. Experimental investigation on thrust performance of a small-scale staggered rotor system in hover [J]. Drones, 2023, 7(11): 677.
- [182] 陆浩. 基于螺旋桨等效盘模型的滑流影响研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- LU H. Numerical investigation of propeller slipstream effects with actuator disk model [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [183] 雷瑶. Hex-rotor 无人机多旋翼流场数值模拟与试验研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- LEI Y. Aerodynamics of a Hex-rotor SUAV: numerical simulation and experimental study [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)