

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.10.002

林恒毅, 麦煜炬, 施琳琳, 等. 农业低空经济应用场景拓展与技术动态[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(10): 08–20

Lin Hengyi, Mai Yuju, Shi Linlin, et al. Expansion of application scenarios and technological developments in agricultural low-altitude economy [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(10): 08–20

农业低空经济应用场景拓展与技术动态*

林恒毅¹, 麦煜炬¹, 施琳琳¹, 陈恒旭¹, 罗明达¹, 李君^{1, 2, 3}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州市, 510642; 2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广州市, 510642; 3. 农业装备技术全国重点实验室, 北京市, 100083)

摘要: 农业低空经济作为一种新兴经济形态, 驱动传统农业产业体系变革。农用无人机是农业低空经济的核心载体, 已在提升农业生产效率、促进绿色发展与保障粮食安全等方面发挥重要的作用。系统梳理农用无人机在遥感测绘、植保施药、农资播撒等场景的应用现状, 延伸讨论其在巡检监测、灾害应对、生态修复、饵料投放、授粉制种、采摘修剪、载重运输等场景的拓展应用。在此基础上, 通过对农业低空技术体系的能源、通信、环境感知、决策控制等关键共性技术剖析, 归纳技术应用局限性, 并展望技术发展趋势。

关键词: 农业低空经济; 农用无人机; 应用场景; 共性分析

中图分类号: S25 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 10-0008-13

Expansion of application scenarios and technological developments in agricultural low-altitude economy

Lin Hengyi¹, Mai Yuju¹, Shi Linlin¹, Chen Hengxu¹, Luo Mingda¹, Li Jun^{1, 2, 3}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China;
2. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou, 510642, China;
3. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing, 100083, China)

Abstract: Agricultural low-altitude economy, as an emerging economic form, is driving the transformation of traditional agricultural industrial systems. Agricultural drones have significantly contributed to enhancing agricultural productivity, promoting green development, and ensuring food security serving as the core carriers of this economy. This paper systematically reviews current applications of agricultural drones in scenarios including remote sensing and mapping, plant protection spraying, and seeding, while extending the discussion to their expanded applications in inspection and monitoring, disaster response, ecological restoration, bait dispensing, pollination and seed production, harvesting and pruning, as well as cargo transportation. Building on this analysis, the paper examines key common technologies within the agricultural low-altitude technology system-covering energy supply, communication networks, environmental perception, and decision-making control-summarizes limitations in current technological applications, and outlines future development trends.

Keywords: agricultural low-altitude economy; agricultural drones; application scenarios; commonality analysis

0 引言

在全球人口持续增长与城市化加速发展的背景下,

传统农业面临劳动力短缺、生产效率低下及资源分配不均等多重挑战, 严重制约了农业的可持续发展。据预测, 到 2050 年全球粮食需求将较当前水平提高 50%, 但依

收稿日期: 2025 年 7 月 1 日 修回日期: 2025 年 7 月 29 日

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52375094); 国家荔枝龙眼产业技术体系项目(CARS-32); 华南农业大学高校学科建设项目(2023B10564002)

第一作者: 林恒毅, 男, 1997 年生, 广州人, 博士研究生; 研究方向为水果采摘无人机。E-mail: linhengyi@stu.scau.edu.cn

通讯作者: 李君, 男, 1978 年生, 湖南祁东人, 博士, 教授; 研究方向为农业装备、现代车辆的设计及其智能控制技术。E-mail: autojunli@scau.edu.cn

靠扩大耕种面积所实现的增产量却不足 5%^[1,2]。农业现代化通过集成应用机械化、信息化等现代科学技术,显著提高农业生产效率与竞争力,成为应对上述挑战、实现农业高质量可持续发展的重要路径^[3]。

农业低空经济作为一种新兴经济形态,在农业现代化进程中展现出巨大应用潜力。其中,农用无人机作为农业低空经济的核心装备,能够高效、精准、灵活地执行多样化农业生产任务。近年来,农用无人机的应用领域已逐步从传统的植保飞防拓展至遥感测绘、精准播撒、载重运输等多个方向,不仅有效提高农业生产效率,显著降低劳动力成本,也为传统农业转型升级提供了重要的技术支撑。在政策层面的积极推动下,我国农业低空经济已进入快速发展阶段^[4-7]。自 2020 年以来,中央和地方的农机补贴政策持续向高效、智能与绿色化的农用无人机倾斜,进一步刺激了市场需求的快速增长。相关研究预测,农用无人机产业的快速增长阶段将至少持续至 2030 年,期间市场规模将持续扩大,产业链布局将逐步完善^[8-10]。

基于当前农业低空经济的发展现状,本文将围绕农用无人机的应用场景及技术发展动态展开分析,深入梳理其不同场景中的具体应用现状及技术特点,探讨进一步拓展的潜在应用领域,进而剖析支撑上述应用的关键共性技术与未来研究趋势。

1 农用无人机规模化应用场景

当前农用无人机产业已形成较为成熟且经产业化验证的规模化应用场景,主要涵盖三大技术方向:(1)遥感测绘技术,以高精度地理信息采集为核心,通过多光谱遥感、三维建模等技术手段实现农田数字化与精细化管理;(2)低空植保施药技术,以变量施药方法为核心,利用精准导航与作业执行机构,实现农药的靶向与高效喷洒;(3)农资精量播撒技术,以无人机为搭载平台,实现种子、肥料等颗粒状农资的精准投放^[11-13]。上述技术方向逐步完成了从研发验证到商业化部署,在部分区域和农作物种类中实现了规模应用。

1.1 作物遥感测绘

现代农业生产过程中,作物的生长影响因素涵盖作物品种、土壤条件、光照强度、病虫害、外力破坏及水、肥管理措施等多个方面。无人机平台的低空遥感技术为上述因素的精准监测和管理提供了有效的解决途径^[14]。农用无人机搭载多光谱、热红外、激光雷达等遥感传感器,可高效采集农田多维度信息,进而生成作物生长监测、病虫害识别及土壤湿度分析等数字化处方图^[15-17],为精准农业提供数据基础。

无人机遥感技术通过高空俯视视角,能够实现跨

地形、多对象的高效监测作业,全面采集作物生长状态及农田环境变化信息,精确识别病害发生诱因、评估染病风险等级并预测扩散趋势。此外,无人机遥感测绘在产量预测领域的应用日益受到关注。现阶段,多光谱与热红外遥感数据结合机器学习算法,已实现在水稻、棉花、茶叶等主粮及经济作物中较高精度的产量预测建模和应用。目前该领域主要基于可见光图像分析技术进行产量预估,将原始数据转化为预测模型与管理工具^[14,15]。然而,即使经典机器学习算法与深度学习算法显著提升了原始遥感数据的信息转化率,但在害虫精准识别等更高精度遥感技术研究中尚未取得实质性突破^[16]。

未来遥感测绘技术的研究将集中于进一步提高遥感数据采集与分析精度、拓展农业监测应用领域,持续增强遥感技术在农业作物精准管理中的实用性与应用广度。

1.2 低空植保施药

低空植保技术在农业低空经济领域发挥重要作用,有效缓解农业生产中劳动强度高、作业效率低下的问题^[18]。通过无人机搭载高精度喷洒系统,融合智能导航与变量控制技术,可实现针对不同农业地形与作业条件的飞行路径规划与喷洒量精准控制,从而保障药液的高效均匀覆盖。

目前,植保无人机在作业实践中表现出显著的高效率、低药液浪费等优势。随着雾化效果和药液覆盖均匀性不断提升,无人机植保应用场景已从传统大田作业逐步扩展至果园、林地等复杂环境领域^[18-20]。产业实践显示,现阶段商用植保无人机系统普遍具备大容量药箱(≥ 15 L)及高效喷洒机构(作业效率 ≥ 3.33 hm²/h)等技术特点,其中部分大型无人机药箱最大容量可达 75 L,作业效率最高可实现 19 hm²/h,能够有效满足规模化农田植保需求。

无人机植保应用的核心需求在于降本增效,技术发展趋势应朝着智能化、精准化与高效协同作业的方向深入推进。尽管当前无人机植保技术已相对成熟,但未来仍需围绕无人机平台载重与续航能力提升、药液雾滴喷洒机理模型构建、喷洒执行机构的优化设计、多机协同作业策略与决策算法研究等方面进一步深入,以满足更高层次的农业生产需求。

1.3 低空农资播撒

低空农资播撒是指利用无人机搭载专用播撒设备,在预设航线引导下,精准控制农资播撒的量与空间位置,以实现肥料、种子等固态农资的精确投放,具体应用包括颗粒肥料播撒、种子撒播与点播等作业。当前领先企业推出的商业化农用无人机解决方案已具备

较高精准性和适应性,可有效应对复杂农田环境,播撒作业效果表现出均匀性和一致性。

无人机播撒技术的关键性能指标^[21]可归纳为3个核心维度:精准性、高效性与智能化水平。其中,在肥料、稻种等颗粒状物料的播撒过程中,如何提升物料沉积分布的均匀性、提高作业效率并实现播撒装置的轻量化,是当前技术攻关的重点与难点^[22-24]。而作业的智能化与自主性,则主要体现在决策控制系统的算法研发与系统集成能力上。

基于当前技术发展现状,该领域未来研究可重点聚焦两方面:一是加强无人机平台的算法能力与决策系统构建,进一步提升无人机智能水平;二是持续优化播撒装置的结构设计与功能模块^[25, 26],增强技术平台在普适性和特殊作业场景的表现。

2 农用无人机应用场景拓展

尽管遥感测绘、植保施药与农资播撒已形成较为成熟的商业化应用模式,但农用无人机技术的应用边界仍在持续拓展,正沿着多功能融合与跨领域协同的路径快速演进。根据技术成熟度与实施场景差异,依据技术成熟度与应用场景特征,目前农用无人机前沿场景的拓展与探索可归纳为3类:(1)农业遥感监测技术向生态环境与灾害管理领域拓展;(2)农资撒播技术向生态治理领域延伸;(3)无人机平台在水果采摘、授粉制种、修剪疏枝及载重运输等传统农业劳动替代领域的深入应用。

2.1 农业遥感监测拓展

2.1.1 环境与灾害监测

相比于面向作物生长状态的农情遥感监测,环境与灾害监测更侧重于对农业生态系统及其外部干扰因素的感知、识别与响应,监测对象包括自然生态区、非耕地资源与突发灾害。该类应用场景中,低空遥感平台具备灵活性与高时空分辨能力,广泛覆盖农田、草原、森林、水体等多类型生态区域。通过集成多源传感器与后端数据处理算法^[27],可对鼠害、蝗灾、赤潮、极端气象、地质灾害等生物、气候与地质扰动进行动态监测、风险评估与趋势预测,进而有效降低农业生产系统的生态风险与灾害损失。

此外,相比于农情遥感关注数据获取精度,环境与灾害遥感更依赖后端算法的处理能力。随着深度学习与多模态融合分析的快速发展,已有研究利用改进的深度卷积神经网络模型实现了对森林山火灾情的精准识别,识别准确率达95.8%^[28]。结合无人机平台,灾情预警分析技术可支撑灾前隐患预警、灾时应急响应及灾后损失评估^[29, 30],增强防灾减灾的韧性与效率。

2.1.2 自主巡检

自主巡检强调农用无人机在环境监测作业中的自主执行能力。该技术通过无人机与机场平台的紧密协同,实现周期性广域巡查,实时监测环境异常状况,自主判断并精准识别监测目标,从而显著提高巡检效率与目标识别精度,构建环境监测的自动化闭环管理模式^[31]。

自主巡检技术的主要特征包括:(1)基于边缘计算的实时环境异常检测;(2)融合多模态传感器数据的精准目标识别算法;(3)支持任务动态决策的自主路径规划系统。目前,自主巡检技术的成熟应用场景主要集中于电力线路、铁路巡查等领域^[32-34],而在农业领域的应用尚处于探索与起步阶段。鉴于其技术特征与农业环境监测需求高度契合,将该技术迁移至农田监测、渔业水域监控、水源地保护等典型农业相关场景中,有望显著提升农业领域环境监测的综合效率与精度。现有实践案例^[35-37]表明,在水产养殖排污、水源地环境巡检及海事监管等应用场景中,自主巡检技术表现出较人工巡检更高的目标识别精度、更快的响应速度和更高的作业效率,具备较强的工程可行性及应用前景。

2.2 生态环境干预

生态环境干预是指将无人机撒播技术向生态治理领域拓展,进而重塑传统生态工程的实施模式。该技术体系以空间智能化为核心,充分利用无人机平台的高机动性,系统集成精准投放、智能感知、自主决策等关键技术模块,并已在生态修复、生物防治和饵料投放等应用场景形成低空与地面相协同的作业模式。

从技术原理角度分析,其拓展性主要体现在3个维度:(1)空间维度,通过无人机低空作业突破地形可达性限制,实现崖坡、湿地等特殊地貌的精准干预;(2)时间维度,通过装备自主化缩短应急响应周期,显著提高生态治理的时效性;(3)效能维度,利用变量控制技术提升物资投放效率,实现经济效益与生态效益的协调统一。

当前生态环境干预技术的发展呈现出两个主要趋势:(1)通过多光谱遥感融合、仿生抓取等创新技术不断拓宽应用场景边界;(2)利用数字孪生技术构建“监测—模拟—干预—评估”的生态治理全周期管理闭环。这些趋势表明,生态治理模式正逐步从传统经验驱动转向数据驱动,为农业及其他生态领域的复杂问题治理提供了新型技术路径。

2.2.1 生态修复

农用无人机播撒技术在生态修复领域的拓展应用,包括荒漠化防治、矿山生态恢复及灾后森林植被重建等多个方面,成效良好。相比于传统设备及人工作

业方式,该技术具备作业受环境干扰小、能够有效突破地形限制及显著降低作业成本等优势。已有研究^[38-41]表明,无人机生态修复技术体系显著提高了生态治理的效率,在矿山生态修复等工程中使单位面积作业成本明显降低,同时与多种辅助手段配合使用能够有效缩短生态植被的恢复周期。

生态修复无人机作业技术体系主要通过 4 个环节构成完整的闭环管理流程:(1)利用遥感测绘技术获取高精度的地形与植被本底信息;(2)采用仿地飞行技术,确保无人机在复杂地貌条件下的稳定作业能力;(3)通过精准播撒控制系统,确保种子和肥料等生态修复物资的空间分布精度;(4)依靠基于多源数据融合的决策算法动态优化播撒参数。该技术体系以“感知—决策—执行”的实时联动机制为核心,显著提高了生态修复作业中植被的成活率,强化了固土及生态保护效能,并在荒漠化治理、边坡生态修复等应用场景中实现了生态效益的有效量化。

2.2.2 生物防治

生物防治是农用无人机播撒技术在绿色农业中的重要拓展方向,核心在于实现对生物防治剂的精准、高效释放。该技术的发展重点主要集中于投放装置与释放装置的结构设计与协同优化。其中,投放器的主要功能是确保生物防治物料从无人机平台稳定、均匀地投放至目标区域;而释放器则需保障防治剂的生物活性与释放效率,特别是在复杂或极端环境条件下仍能维持较高的释放性能。

以赤眼蜂投放为应用案例^[42],其系统研发需同时满足两方面关键技术要求:(1)具备自主航迹规划与作业调度能力,实现目标区域的智能覆盖;(2)优化投放器与释放器的协同设计,确保赤眼蜂等生物防治剂的有效释放率与空间分布均匀性。整体技术目标在于构建集感知、决策、控制于一体的作业闭环系统,从而提高生物防治的时效性、覆盖精度和生物剂的利用效率。

2.2.3 饵料投放

基于无人机平台的饵料投放技术^[43]已有部分水产养殖领域应用案例,其具有提高投饵效率、降低劳动强度及实现饵料精准均匀投放等优势。该技术依托精准投放系统,在预设飞行路线与参数控制下,能够将饵料高效、均匀地撒布于指定区域,适用于大面积、高密度的水产养殖场景。例如在虾塘投饵实践中,无人机平台可在半天内完成约 33.33 hm² 养殖区域的饲料均匀投放,较传统人工方式在效率、均匀性与经济效益方面均表现出显著优势。

饵料投放系统的关键技术要素包括:(1)精准控制投放量与投放位置的饵料投放系统;(2)作业路线决

策与路径优化算法;(3)适应不同载荷与任务需求的飞行姿态调节算法;(4)平台结构与能源系统优化,以提升单架次作业能力与续航性能。这些模块共同决定了投放作业的覆盖效率、投放精度及无人机系统的综合作业能力。

除水产营养饵料的投放外,无人机在农业有害生物防治中的毒饵投放亦为重要的拓展应用方向,主要面向鼠害、兔害等动物的生态控制^[44, 45]。此类应用在投饵系统的基础上,需集成高精度引导系统,如基于图像识别技术的目标锚定模块,配合可调控投放量的变量投饵装置与智能化决策算法,以优化药剂投放精度。该系统的设计目标为实现农田鼠害的实时监测、活动规律识别与扩散趋势预测,进而建立“识别—投放—追踪—反馈”一体化的闭环管理流程,提升防治的精度与时效性,从而保障农田生物群落的动态稳定与作物产量安全。

2.3 其他应用场景

除前述场景外,当前研究与实践正逐步拓展至水果采摘、修剪疏枝、辅助授粉等精细化农业作业场景,以及载重运输等对平台稳定性和政策协调提出更高要求的新兴产业方向。

2.3.1 水果采摘

无人机技术在水果采摘领域的拓展应用,主要是利用无人机平台搭载专门设计的末端采摘机构,并辅以针对特定采摘场景优化的控制系统,实现目标果实的精确采收。相比于传统地面机械臂采摘装备存在的工作范围受限、灵活性不足,以及振动采收装备造成水果损伤率与杂质率高等缺陷,无人机平台的低空作业方式能够有效规避上述问题。

无人机水果采摘系统由飞行平台、采摘执行机构与控制系统 3 部分组成,各组件协同完成采摘任务。飞行平台作为系统的基础载体,其技术核心在于保障平台结构的稳定性与动力系统的可靠性。通过优化硬件结构与动力系统设计,提高无人机载荷能力,利用冗余升力实现采摘过程中精准的悬停与稳定移动,从而有效抵御侧向风场干扰与采摘过程中的瞬时载荷变化。

采摘执行机构的功能在于与目标水果进行精确物理交互,完成采摘动作。其核心技术难点在于通过结构优化减少机构自身对环境与传感器的干涉作用,降低作物冠层对设备的干扰,并最大限度减少对视觉、激光雷达等传感器的遮挡效应。末端执行器需根据不同水果特征进行差异化设计,常见方案包括多轴机械抓取机构、夹剪一体化机构或气动吸取机构等。执行机构的设计质量与优化程度直接决定水果采摘的最终效果与质量。

控制系统是水果采摘系统的核心部分,通过多维度控制策略实现无人机采摘作业全流程的精准执行。具体包含目标交互模块与飞行控制模块两部分。已有研究表明,目标交互系统通常采用视觉感知方法,要求同时实现高精度识别与设备轻量化设计。通过实时识别与反馈机制,精准锚定采摘目标位置,引导采摘执行机构完成采摘动作。飞行控制模块则根据环境感知信息实时调整无人机的姿态,兼顾平台安全性与作业效率,同时减少风场扰动与平台本身运动对采摘精度的影响。由于无人机飞行速度较快,且作业环境中存在多种扰动因素,控制系统的核心挑战是实现快速响应的决策控制机制。针对上述挑战,Kumar 等^[46]提出了一种位置映射系统,建立视觉识别结果与无人机实时位置的映射关系,实现垂直农业场景下苹果的精准采摘;Chen 等^[47]则提出精度更高的速度映射系统,以龙眼串果果梗为采摘目标,建立视觉识别与无人机移动速度的实时映射关系,实现了高精度的无人机水果采摘。

综上,无人机平台的低空作业优势使其可有效克服地面采摘装备的作业局限性,提高作业灵活性。此外,多无人机协同与多设备协作的方案^[48]显著提升了作业效率,特别适用于规模化果园及复杂环境的水果采摘任务。当前,水果采摘无人机的技术挑战主要集中于目标果实的快速识别技术、无人机精准悬停与抗干扰控制技术,以及适应不同水果特性的末端执行机构设计。

2.3.2 修剪疏枝

修剪疏枝作业是果树精细化管理中的关键环节,可优化树冠结构,改善通风透光条件,从而提高果实品质和产量并减少病虫害发生。基于无人机平台的修剪作业利用其高机动性可快速抵达目标枝梢区域,高度契合高大树木的精准作业场景。

当前应用中,通过挂载修剪装置与枝梢识别系统,无人机可在强光、弱光、冠层稀疏或密集等多种光照与枝叶结构条件下执行枝梢疏除任务^[49-51]。该系统的核心技术要素主要包括:目标枝梢的快速识别与定位算法、平台悬停的动态稳定控制能力,以及修剪执行机构在操作过程中对外力扰动的鲁棒性设计。整体技术架构与水果采摘系统相似,均依赖于“感知—决策—执行”的多模块协同机制,实现稳定、高效的自动化作业流程。

2.3.3 辅助授粉

无人机平台可利用旋翼产生的下洗风场对水稻、小麦等作物进行辅助授粉制种。当前技术难点在于掌握旋翼无人机授粉的流场特性^[22],探究不同机型田间

风场规律和花粉在母本厢行内的分布情况,研究旋翼转速、旋翼数量与位置对下洗风场分布的影响、匹配作物种植模式的行比和不同机型的参数,以及如何实现高航时的定高、定速、定航线、定宽飞行控制模式^[52-54]。

2.3.4 载重运输

根据国家邮政局公布的数据^[55],2024 年全国快递件 1 750.8 亿件,同比增长 21.5%,快递业务收入 1.4 万亿元,同比增长 13.8%,国内快递业务量农村地区占比超过 35%。农村地区快递业务量的高占比表明,农村地区快递服务网络正在加快下沉。无人机载重运输技术是该物流体系的重要一环^[56],目前国内部分地区已启动无人机物流运输试点,逐步探索其在农村、山区等复杂环境中的运行模式与可行性,为农村寄递最后一段寄送服务实现有效拓展。

无人机载重运输技术核心研究方向包括:结合低空空域优势,开发适用于多场景的载重结构与运载形式;优化能源系统与动力装置,提升续航能力与飞行稳定性;构建适应载重飞行的姿态控制与路径规划算法,以有效应对运输过程中的载重限制与飞行摆动问题。随着相关技术持续突破,无人机有望在复杂地形条件下实现安全、高效的物流作业,进一步提升农资物料与农产品的流通效率,增强农业供应链的时效性与柔性支撑能力。

3 农用无人机关键技术

基于上述农用无人机的应用现状和场景拓展,其作业性能依赖于一系列底层关键技术。因此,深入分析农用无人机作业关键技术,聚焦能源供给与管理、低空网联、飞行环境感知,以及智能决策与控制等技术模块。

3.1 能源供给与管理

当前商用无人机按动力类型分为油动、电动及其他能源驱动形式^[57],其中电动无人机凭借结构简单、使用便捷、维护成本低等优势,已成为当前市场的主导类型。农用无人机作为通用无人机技术在农业领域的延伸,考虑到作业续航时间和载重能力的特殊需求,其能源供给与能耗管理技术需进行差异化改进。

在电池技术方面,锂电池因具有较高安全性且原材料供应链体系稳定,仍为当前无人机市场中应用最广泛的电源类型。受限于锂电池的能量密度,电源系统整体质量与体积偏大。现阶段采用锂电池的商用无人机续航平均时间为 40 min,在执行大面积农田作业任务时,需频繁更换电池,从而影响作业连续性与整体效率。针对上述局限,固态电池因采用固态电解质结

构,在安全性、工作温度区间和理论能量密度方面具备显著优势,成为解决传统锂电池瓶颈的重要替代方向。目前部分企业已研制出能量密度超过 400 Wh/kg 的固态电池雏形,理论上可实现无人机平台续航能力的数倍提升,且具备更优的环境适应性与循环寿命。尽管其在材料成本控制、电极界面稳定性等方面仍面临工程难点,但在航空无人系统领域的应用前景正日益受到重视。此外,为突破续航瓶颈,部分企业正积极探索以氢燃料电池为代表的新型动力系统,凭借其更高的能量密度,有望实现更长时间的稳定飞行^[58]。当前,包括中国、英国、韩国等在内的多家企业已推出基于氢燃料电池的多旋翼无人机,部分机型续航时间超过 2 h,最大有效载荷可达 25 kg^[59]。尽管该类技术在性能上展现出显著优势,但仍面临储氢系统体积大、储能密度不足以及系统动态响应能力较弱等工程瓶颈^[60],限制了其在农用无人机领域的规模化部署。

除推进电池类型创新外,部分研究也从能源获取与管理策略层面探索续航能力的提升路径。通过在无人机平台集成太阳能电池板构建光电混合供能系统,或引入由太阳能电池、锂电池与超级电容构成的复合储能体系;此外,还有研究提出激光引导供能系统,包括高功率激光发射、定位引导及机载光电转换模块等技术路径,尝试延长无人机航时。基于上述方法,徐伟诚^[61]、Khan^[62]等在太阳能供电或太阳能—二次电池混合供电领域展开研究;黄开^[63]提出了激光供能增加无人机群续航时长的方案。

在作业层面,由于无人机能源仍为受限资源,能耗管理成为延长任务时间与提升系统效率的重要方向。相关研究主要集中在作业能耗建模、功耗优化分配与能效路径规划等方面。李继宇等^[64]基于白盒建模方法构建了多旋翼农用无人机的能耗模型,并通过实测修正参数提升预测精度,为作业任务规划提供能耗估算依据。在能耗模型建立的基础上,可针对其中细分功能模块的构建能耗、功率输出效果等相关的加权奖励函数,引入强化学习模型对无人机作业过程的能耗优化问题进行求解。通过能效系数建模,范叶满等^[65]设计模拟退火算法实现山区环境下的最优路径规划,试验结果显示,该方法可在飞行速度为 2 m/s、不同负载条件下分别节约最高达 30.16% 的常规作业能耗与 32.04% 的实时变化负载作业能耗。

现阶段软件层面对功耗模块以及无人机作业方式的协调可有效提升能耗效率,但无人机的续航瓶颈仍主要受限于电源系统本身。随着未来电池技术和无线供能等关键领域的突破,农用无人机的续航能力有望得到显著改善,为其在大尺度、多场景农业作业中的

应用提供更强支撑。

3.2 低空网联通信技术

低空网联通信技术作为低空空域通用基础设施的重要组成部分,具备良好的跨领域适应性,可有效支撑农业低空作业中设备互联、信息传输及调度控制等核心环节的需求。该类通信系统能够对农业场景中的感知终端、作业无人机及管理平台等实现稳定、灵活的通信连接,进而推动农业生产的信息化与智能化。

随着 5G/6G 通信技术发展,传统面向地面用户的二维通信服务模式正在向三维立体通信体系演化。通过部署如多旋翼无人机及低轨卫星等空中移动通信节点,可构建空地融合的低空通信网络,显著提升通信系统在复杂农业环境中的覆盖范围与响应能力。在无人系统网络化、数字化与智能化持续演进的背景下,低空网联通信技术的发展已成为关键支撑路径之一。其核心技术体系主要包括 3 个方面:(1)低空通信立体覆盖增强技术,旨在实现复杂三维空间内的高效信号传输与动态感知覆盖;(2)低空组网与移动性管理机制,用于解决高速移动节点在动态拓扑结构中的链路维护与切换控制问题;(3)低空通信抗干扰与稳定性保障机制,重点应对密集通信环境下的信号冲突、链路干扰与频谱资源管理等问题^[66, 67]。

在提升低空通信的立体覆盖性能方面,当前研究普遍采用将无人机作为空中移动基站的策略,构建动态可调的通信拓扑结构。结合 6G 系统架构,可通过引入无蜂窝网络架构以及可重构智能表面(RIS)等前沿技术,有效增强通信系统对三维空间的覆盖能力。研究表明,围绕无人机与 RIS 之间的位置关系优化部署策略,或通过动态调整无人机在三维空间中的坐标及路径损耗因子,均可在不显著增加系统复杂度的前提下,显著提升通信系统的覆盖广度与能效表现。Abdel-Basset 等^[68]设计了一种增强型智能优化算法,用于提升 6G 架构中无人机移动基站的空间覆盖率。试验结果表明,该方法在满足通信约束条件的基础上,有效减少了实现既定覆盖率所需的基站数量,从而提升了网络部署的成本效益;Shakoor 等^[69]则进一步从高度与路径损耗补偿因子出发,优化无人机在三维空间中的部署策略,显著提升了通信网络的空间覆盖性能与吞吐能力。

在低空组网的移动性管理方面,由于无人机终端具有高速移动特性,常需与多个空中基站频繁建立与切换通信链路,从而引发网络频繁切换甚至链路中断的风险。为保障通信系统的连续性与稳定性,需在网络规划中重点优化链路切换频率、频谱利用效率以及切换过程中的中断概率等关键性能指标。当前相关研

究主要聚焦于提升网络服务的可用性、连续性与可靠性。Azari 等^[70]针对蜂窝网络下行链路中的服务性能展开分析,研究了同时为空中与地面用户提供服务的条件下,不同网络密度配置对用户体验的影响;Meer 等^[71]则提出了一种基于服务可用性的链路切换决策机制,通过降低切换带来的链路延迟,有效提升上行链路的通信稳定性,尤其适用于动态环境下的低空无人系统通信需求。

此外,现阶段无人机通信形式以空地通信为主,其干扰类型分为无人机与地面基站之间的上行链路干扰、地面基站向无人机的下行链路干扰以及无人机集群内部的同频干扰 3 类。为提升通信稳定性,亟须针对不同干扰类型开发高效的干扰抑制与隔离机制,其中信道自适应调度被认为是重要的技术路径之一。Li 等^[72]提出一种自适应干扰消除方法,其中每个地面基站可基于信道条件自适应地解码来自无人机的通信内容,以此应对空对地同频干扰。Liu 等^[73]则从空间域角度出发,构建了链路信噪比与无人机空间位置之间的映射关系,将传统信噪比约束转化为空间距离约束,并结合频谱资源的多信道分配策略,构建链路间的干扰隔离机制。该方法在保障网络最小信噪比的前提下,显著提升了空地通信系统的抗干扰能力。

随着 6G 网络体系的逐步完善与规模化部署,以及该网络体系在传输速率、覆盖范围与通信时延等关键性能指标上的提升,将进一步推动低空网联系统在农业等应用场景中的深度融合与高效运行。

3.3 飞行环境感知

飞行环境感知技术是农用无人机自主避障的基础,需在复杂农业作业场景下实现高精度识别障碍。按障碍物特征可将其分类为微小型、中小型、大型,无特征规律障碍物,前 3 类多为静态结构,如电线、树枝、房屋等;后者包括动态目标(如飞禽、行人)和表面反光或纹理模糊物体(如水体、大棚薄膜),具有显著不确定性。当前农用无人机感知技术中仍以微小型障碍和无特征规律障碍识别为技术难点^[74]。

针对微小型与无规律障碍识别的难点,研究人员围绕感知传感器及障碍检测方法持续开展探索^[75]。由于单一传感器难以满足复杂环境下的感知需求,近年来多传感器融合技术逐渐成为研究重点,涵盖向量数据、点阵数据与特征数据等多类型信息的融合策略。其中,向量数据融合主要基于 IMU、GNSS 等传感器输出,通过滤波算法对旋转角、速度等状态信息进行估算与校正,以抑制传感器误差和解算漂移。点阵数据融合则多依赖于可见光相机、LiDAR、红外热像仪等成像设备,通过数据混合或数据堆叠实现多源信

息融合。前者通过设定权重进行加权叠加,生成更具判别力的综合信息;后者则将多通道图像数据直接拼接以丰富信息维度,尽管不产生新信息,但可增强模型表达能力。需强调的是,两种方法都要求各传感器针对同一目标的成像点在空间上对齐,确保融合效果具备有效性与一致性。

基于上述方法,Donati 等^[76]采用卡尔曼滤波方法,将无人机机载 GPS、惯性测量单元(IMU)、超声波传感器数据与三维低复杂度地图信息相结合。张博等^[77]提出融合毫米波雷达与视觉相机的感知系统,通过坐标系转换完成空间信息对齐,分别提取障碍物的距离与图像特征,提升避障决策准确性。张红蕾等^[78]结合改进贝叶斯算法,将二维激光雷达与深度相机生成的点云信息进行融合,弥补激光雷达在特定方向的感知盲区,增强环境感知完整性。

在特征数据融合方面,常规方法通过指标计算从原始感知数据中提取光谱、纹理、结构、温度等特征并加以融合。基于纹理与结构特征的融合方法可用于障碍物识别,但较依赖专家经验,且特征选择与回归算法设计增加了系统复杂性。近些年来,深度学习方法的引入为特征融合提供了新的路径。其通过模型训练自动提取障碍物特征,可突破传统融合方式对数据类型和处理流程的限制,提升识别精度与系统适应性,逐渐成为该领域的重要研究方向^[79]。Singla 等^[80]提出一种深度学习强化网络,将带有深度信息的图片输入带有注意力机制的强化学习网络,利用历史观测信息迭代训练,从而提高障碍物识别精度。Wang 等^[81]引入 YOLOv3 深度学习算法检测无人机飞行过程中遇到的障碍物,利用深度相机获取障碍物类别、轮廓和三维空间位置等属性。

经过十余年发展,无人机感知微小静态障碍物已实现较高技术精度。然而,对于形态不固定、特征不稳定的动态或复杂表面障碍物,仍存在感知瓶颈。随着传感器灵敏度提升及感知算法的持续优化,农用无人机对非结构化障碍的感知能力有望进一步加强。

3.4 智能决策与控制

农用无人机智能决策与控制系统是智慧农业的重要技术支撑,能够根据任务目标自主规划执行路径与作业流程,并结合低空通信网络与机载感知模块,实时获取作业环境、机体状态及任务进度等关键参数,实现对各功能子系统的动态调度与最优控制。应用案例有基于无人机场的周期性自主巡检、无人机集群的协同作业以及与其他农业智能体的多机协同任务等。当前,农用无人机智能决策系统主要基于经典控制策略、启发式算法、机器学习与深度学习等方法开展推理与

执行。决策系统关联航线规划、飞行避障、故障诊断等任务模块;控制层面则聚焦于飞行器位姿的自适应调控与精确执行。

在农用无人机航线规划与避障方面,系统需基于任务要求与环境感知信息,动态生成最优飞行路径,在飞行过程中识别并规避潜在障碍物。现阶段相关研究聚焦于航线规划与避障算法的优化,如经典算法、元启发式算法、深度学习算法等^[82],经典算法基于确定性启发策略,为特定问题设计局部优化机制,目标在于快速生成可行解,尽管不保证全局最优,但在结构清晰的任务场景中表现出较高的计算效率,典型代表包括 A* 算法、D* 算法等^[83, 84];元启发式算法则提供一种与问题无关的全局搜索框架,通过模拟自然演化或群体行为以实现对解空间的广域探索,强调局部最优与全局最优之间的动态平衡,具备一定的随机性与自适应性,适用于复杂路径优化任务,如遗传算法、粒子群优化算法、神经网络算法等^[85],通过改进上述算法在复杂环境下提升了路径规划效率与鲁棒性。此外,在深度学习方面,路径决策的强化学习框架逐渐成为研究热点。Sonny 等^[86]基于 Q-learning 算法,提出一种具备静态与动态避障功能的无人机路径规划方法,并引入最短路径优先排序原则。滕菲等^[87]则基于深度强化学习构建动态避障模型,通过引入改进的近端策略优化算法(PPO)与碰撞检测奖励函数,有效提升系统对障碍边界的感知精度与路径安全性。

在故障诊断方面,农用无人机需具备系统的健康管理能力,能够在遭遇环境威胁或机载系统异常时,及时向上位机或操作终端发出预警,必要时依据预设安全阈值自主接管飞行控制系统,并执行风险规避操作,如自动返航或紧急降落。现有研究包括设计观测器与卡尔曼滤波器等经典方法^[88, 89],以及基于专家经验与深度学习的智能诊断法。传统方法如卡尔曼滤波器与故障观测器模型,依赖于对系统状态变化的实时估算,可实现对部分故障征兆的早期识别。然而,该类方法对系统建模精度与噪声假设存在较强依赖,难以应对复杂工况下的非线性干扰。近些年来,以知识驱动和数据驱动相结合的智能诊断方法逐渐兴起。Kladis 等^[90]通过图论工具和伪布尔表达式来建立多源信息约束关系,用于推断故障潜因,虽显著提升诊断精度,但对规则系统构建者的经验依赖较强;Ahmad 等^[91]基于 Transformer 框架提出一种面向传感器异常检测的深度学习方法,能自动建模多维时间序列中的关联模式,在多类故障情形下展现出良好性能,但在数据获取成本与复杂环境下模型泛化能力方面仍面临挑战。

此外,在基于无人机的自适应控制研究中,重点在

于实现系统在非结构化环境中的稳定运行。该过程依赖无人机对内部状态和外部扰动的感知能力,通过调节控制策略以抵消系统不确定性与外部干扰,从而确保运行状态精确跟踪任务目标,如在水果采摘、修剪疏枝等高精度作业场景,姿态控制的稳定性与响应能力是保障操作精度与执行效率的关键因素。当前相关研究主要集中于自适应控制算法的设计,杨永琳等^[92]提出基于反演方法的动态逆控制器实现对预设飞行轨迹的稳定跟踪;姜雪莹等^[93]构建基于自适应滑模控制的姿态调节算法增强无人机在干扰环境下的悬停稳定性。

当前,农用无人机智能决策与控制系统已形成经典算法与深度学习等新兴算法融合的技术体系,在路径规划、故障诊断以及运行状态自适应调节等方面取得显著进展。随着轻量化决策模型与控制理论的迭代发展,未来无人机智能决策系统将能够在更复杂的作业场景下高效率作业。

4 展望

系统梳理并总结农业低空经济领域的规模化应用场景及拓展方向,首先回顾农用无人机在农情遥感、植保作业和施肥播种等规模化应用领域的技术现状,随后深入探讨无人机技术向巡检监测、灾害应对、生态修复以及采摘、修枝、授粉作业替代等领域的应用延伸,并对相关领域无人机的关键共性技术进行分析。

从关键技术层面来看,能源技术制约了无人机大规模应用。现阶段研究集中于能耗管理策略和无线供电等技术,以期有效延长无人机续航时间,但总体上仍显著受限于电池能量密度的提升速度。继能源问题之后,通信技术是无人机应用的另一关键挑战。目前低空网联通信技术的研究重点主要包括提升三维空间的信号覆盖强度、数据传输效率及通信系统的抗干扰能力等方面,但实际应用仍高度依赖通信基础设施的建设及低空通信标准的制定。在环境感知技术方面,当前技术方案已能够较为精准地识别电线等微小型障碍物,但面对无规律特征障碍时仍存在明显的感知不足,这需要进一步提高传感器灵敏度以及优化多源数据融合算法。决策与控制技术的研究现状呈现经典算法优化与前沿人工智能算法并行发展的特征,面临的主要挑战包括高效数据采集方法和动态复杂环境下控制系统的鲁棒性问题。

针对农用无人机在能源、通信、感知以及决策与控制技术领域的研究进展及现存局限性,未来的发展可着重从四个方面展开:(1)加强高能量密度电池技术的研发,持续优化能耗管理系统;(2)积极推动低空智能网联通信技术与通信服务产业的融合发展,合理布局低空通

信基础设施;充分运用物联网技术,实现无人机与其他农业装备之间的位置、速度等信息共享和实时通信;(3)进一步提升环境感知传感器的精度与响应效率,构建多传感器数据融合的复合识别算法;(4)提高经典算法在特定应用场景下的计算效率,同时推进面向复杂动态环境的智能决策与控制算法的研究与应用。

除无人机自身的技术进步外,下述因素对农业低空经济产业发展同样至关重要:(1)政策体系与行业标准化建设:政府持续通过补贴优惠政策、低空空域开放等措施,有效推动农业低空经济的发展。未来,伴随应用场景的不断拓展和技术成熟度的提高,覆盖研发、生产、应用及管理全流程的行业标准体系建设将逐步完善。(2)产业协同与生态体系建设:农业低空经济的发展有效促进无人机制造、传感器技术、通信技术以及数据处理与分析等多产业领域的深度协同。在技术进步过程中,以农用无人机为核心的农业低空经济生态体系正在形成,包括无人机地面站、通信定位中继站、数据服务平台和装备维护中心等地面支撑设施,将为农业现代化提供更为完善的技术支撑体系。

综上,以农用无人机为核心的农业低空经济及相关技术体系,不仅是推动农业现代化的重要动力,也是实现乡村振兴与农业可持续发展的关键途径。未来,伴随技术创新、政策扶持与应用场景的协同发展,农业低空经济在农业领域中的战略地位和应用价值将持续提升。

参 考 文 献

- [1] Food and Agriculture Organisation of the United Nations. The future of food and agriculture: Trends and challenges [EB/OL]. <https://www.fao.org/fsnforum/resources/reports-and-briefs/future-food-and-agriculture-trends-and-challenges>, 2017.
- [2] The Global Network Against Food Crises. 2025 Global report on food crises [EB/OL]. <https://www.fsinplatform.org/grfc2025>, 2025.
- [3] 国务院公报. 中共中央 国务院关于积极发展现代农业扎实推进社会主义新农村建设的若干意见 [EB/OL]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content_548921.htm, 2006-12-31.
- [4] 乔金亮. 强化现代农业基础支撑——2022年中央一号文件述评之二 [EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-02/25/content_5675552.htm, 2022-02-25.
- [5] 新华社. 国务院印发《“十四五”推进农业农村现代化规划》 [EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-02/11/content_5673141.htm, 2022-02-11.
- [6] 国务院,中央军委. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例 [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888799.htm, 2024-09-03.
- [7] 王伟中. 政府工作报告——2024年1月23日在广东省第十四届人民代表大会第二次会议上 [EB/OL]. https://www.gd.gov.cn/gkmlpt/content/4/4341/post_4341257.html#45, 2025-01-27.
- [8] 新华社. “低空经济”发展一年间 [EB/OL]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202502/content_7004451.htm, 2025-02-19.
- [9] Fortune Business Insights. Agriculture drone market size, share & industry analysis: Report ID: FBI102589 [R]. Pune: Fortune Business Insights, 2025.
- [10] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见 [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/17/content_5074120.htm, 2024-09-03.
- [11] Liu Y, Fan Y, Feng H, et al. Estimating potato above ground biomass based on vegetation indices and texture features constructed from sensitive bands of UAV hyperspectral imagery [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 220: 108918.
- [12] 何勇, 王月影, 何立文, 等. 低空经济政策和技术在农业农村的应用现状与前景 [J]. *农业工程学报*, 2025, 41(8): 1-16.
- He Yong, Wang Yueying, He Liwen, et al. Current status and prospects of low-altitude economy policies and technologies in agriculture and rural areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(8): 1-16.
- [13] 李继宇, 胡潇丹, 兰玉彬, 等. 基于文献计量学的2001—2020全球农用无人机研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 328-339.
- Li Jiyu, Hu Xiaodan, Lan Yubin, et al. Research advance on worldwide agricultural UAVs in 2001—2020 based on bibliometrics [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(9): 328-339.
- [14] 朱姜蓬. 农用多光谱低空遥感多旋翼无人机系统开发及作物长势监测应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- Zhu Jiangpeng. Development of agricultural multi-spectral low-altitude remote sensing multi-rotor unmanned aircraft system and its application on crop growth monitoring [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [15] Da H, Li Y, Xu L, et al. Advancing soybean biomass estimation through multi-source UAV data fusion and machine learning algorithms [J]. *Smart Agricultural Technology*, 2025, 10: 100778.
- [16] Subeesh A, Kumar S P, Chakraborty S K, et al. UAV imagery coupled deep learning approach for the development of an adaptive in-house web-based application for yield estimation in citrus orchard [J]. *Measurement*, 2024, 234: 114786.

- [17] Kouadio L, El Jarroudi M, Belabess Z, et al. A Review on UAV-based applications for plant disease detection and monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(17): 4273.
- [18] 兰玉彬, 陈盛德, 邓继忠, 等. 中国植保无人机发展形势及问题分析[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 217—225.
Lan Yubin, Chen Shengde, Deng Jizhong, et al. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(5): 217—225.
- [19] 薛秀云, 杨振宇, 梁馨琪, 等. 雾化网格在果树植保喷雾中的应用与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 1—10.
Xue Xiuyun, Yang Zhenyu, Liang Xinqi, et al. Application and experiments of the atomization mesh used on the plant protection spraying in orchards [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(18): 1—10.
- [20] 胡淑芬, 曹昕奕, 邓勇杰, 等. 植保无人机飞行参数对油茶授粉雾滴分布及坐果率的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(20): 92—100.
Hu Shufen, Cao Xinyi, Deng Yongjie, et al. Effects of the flight parameters of plant protection drone on the distribution of pollination droplets and the fruit setting rate of camellia [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(20): 92—100.
- [21] NY/T 3881—2021, 遥控飞行播种机质量评价技术规范[S].
- [22] 何伟灼, 刘威, 姜锐, 等. 无人机点射式水稻播种装置控制系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 51—61.
He Weizhuo, Liu Wei, Jiang Rui, et al. Control system design and experiments of UAV shot seeding device for rice [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(18): 51—61.
- [23] Zhou H, Yao W, Su D, et al. Application of a centrifugal disc fertilizer spreading system for UAVs in rice fields [J]. *Heliyon*, 2024, 10(8): 29837.
- [24] Xunwei W, Zhiyan Z, Boqian C, et al. Distribution uniformity improvement methods of a large discharge rate disc spreader for UAV fertilizer application [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 220: 108928.
- [25] 广州极飞科技有限公司. 撒播器、撒播装置及植保设备[P]. 中国专利: CN209834003U, 2019—12—24.
- [26] 张青松, 张恺, 廖庆喜, 等. 油菜无人机飞播装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(14): 138—147.
Zhang Qingsong, Zhang Kai, Liao Qingxi, et al. Design and experiment of rapeseed aerial seeding device used for UAV [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14): 138—147.
- [27] Rohi G, Ejofodomi O T, Ofualagba G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones [J]. *Heliyon*, 2020, 6(1): 03252.
- [28] Zheng S, Zou X, Gao P, et al. A forest fire recognition method based on modified deep CNN model [J]. *Forests*, 2024, 15(1): 111.
- [29] Suzuki T, Shiozawa S, Yamaba A, et al. Forest data collection by UAV lidar-based 3D mapping: Segmentation of individual tree information from 3D point clouds [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2021, 15(3): 313—323.
- [30] 王宇唯, 马旭, 谭穗妍, 等. 无人机遥感与地面观测的多模态数据融合反演水稻氮含量[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(18): 100—109.
Wang Yuwei, Ma Xu, Tan Suiyan, et al. Inverting rice nitrogen content with multimodal data fusion of unmanned aerial vehicle remote sensing and ground observations [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(18): 100—109.
- [31] Jin X, Luo Z, Shi J, et al. Two-layer intelligent deployment of capsule airports and unmanned aerial vehicles for providing emergency communication services [J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 238: 121795.
- [32] Yang L, Fan J, Liu Y, et al. A review on state-of-the-art power line inspection techniques [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(12): 9350—9365.
- [33] Liu K, Liu M, Tang M, et al. Power inspection UAV task assignment matrix reversal genetic algorithm [J]. *Cognitive Robotics*, 2024, 4: 245—258.
- [34] Chen J, Liu Z, Wang H, et al. Automatic defect detection of fasteners on the catenary support device using deep convolutional neural network [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 67(2): 257—269.
- [35] 广东海事局. “空中鹰眼”赋能巡航新模式 广州南沙海事处无人机精准查获排污船[EB/OL]. <https://gd.msa.gov.cn/25a7cf34838c331dfa99113dcf4a60e9/e51b9cf916214daca0d04f1e7df59bbc.jhtml>, 2025—02—11.
- [36] 广州市生态环境局. 更高更广更精准 市生态环境局开展无人机专项巡查[EB/OL]. https://sthjj.gz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10200/post_10200856.html#644, 2025—04—07.
- [37] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加强入河入海排污口监督管理工作的实施意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/02/content_5676459.htm, 2022—03—02.
- [38] Wang R, Sun Y, Zong J, et al. Remote sensing application in ecological restoration monitoring: A systematic review [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(12): 2204—2204.

- [39] Robinson J M, Harrison P A, Mavoa S, et al. Existing and emerging uses of drones in restoration ecology [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(9): 1899–1911.
- [40] Buters T M, Bateman P W, Robinson T, et al. Methodological ambiguity and inconsistency constrain unmanned aerial vehicles as a silver bullet for monitoring ecological restoration [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1180.
- [41] Ridge J T, Johnston D W. Unoccupied aircraft systems (UAS) for marine ecosystem restoration [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7438.
- [42] 郭长乐, 丁力, 梁振普, 等. 基于无人机的赤眼蜂卵投放系统设计与试验[J]. *河南农业大学学报*, 2023, 57(5): 764–775.
- Guo Changle, Ding Li, Liang Zhenpu, et al. Design and experiment of a precise delivery system for *Trichogramma* eggs based on unmanned aerial vehicle [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2023, 57(5): 764–775.
- [43] 沈启扬, 朱虹, 于庆旭, 等. 河蟹养殖智能化投饵装备适用性能试验研究[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(12): 51–59.
- Shen Qiyang, Zhu Hong, Yu Qingxu, et al. Experimental research on applicable performance of intelligent feeding equipment for river crab culture [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(12): 51–59.
- [44] 杨丽艳, 贺有龙, 罗雪云, 等. 基于无人机低空投饵技术的高原鼠兔防控效果研究[J]. *青海畜牧兽医杂志*, 2024, 54(1): 35–42, 56.
- Yang Liyan, He Youlong, Luo Xueyun, et al. Study on the population control effectiveness of plateau pika based on low-altitude baiting technology by unmanned areial vehicles (UAV) [J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2024, 54(1): 35–42, 56.
- [45] 花立民, 柴守权. 中国草原鼠害防治现状、问题及对策[J]. *植物保护学报*, 2022, 49(1): 415–423.
- Hua Limin, Chai Shouquan. Rodent pest control on grasslands in China: Current state, problems and prospects [J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(1): 415–423.
- [46] Kumar A, Behera L. Design, localization, perception, and control for GPS-denied autonomous aerial grasping and harvesting [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(4): 3538–3545.
- [47] Chen H, Wu K, Lin H, et al. A real-time vision guidance method for autonomous longan picking by the UAV [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 229: 109735.
- [48] 满忠贤, 何杰, 刘善琪, 等. 智能农机多机协同收获作业控制方法与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 40(1): 17–26.
- Man Zhongxian, He Jie, Liu Shanqi, et al. Method and test for operating multi-machine cooperative harvesting in intelligent agricultural machinery [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(1): 17–26.
- [49] 李君, 姚中威, 李灯辉, 等. 基于力矩平衡原理的无人机除梢装置及其控制方法[P]. 中国专利: CN115843563A, 2024–06–07.
- [50] 李君, 周浩波, 周峥琦, 等. 一种无人机的平衡采摘及除梢装置[P]. 中国专利: CN116018951A, 2023–04–28.
- [51] 李君, 李灯辉, 周峥琦, 等. 一种基于视觉定位的无人机自动除梢装置及其控制方法[P]. 中国专利: CN114995494A, 2022–09–02.
- [52] 周志艳, 钟伯平, 刘爱民, 等. 涵道风扇式高地隙杂交水稻制种授粉机设计[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 1–8.
- Zhou Zhiyan, Zhong Boping, Liu Aimin, et al. Design of ducted-fan pollination machine based on high-clearance chassis for hybrid rice [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(9): 1–8.
- [53] 翁晓星, 徐锦大, 赵晋, 等. 多旋翼无人机辅助籼梗杂交水稻制种授粉研究[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(9): 24–29.
- Weng Xiaoxing, Xu Jinda, Zhao Jin, et al. Study on seed production and pollination of *Indica japonica* hybrid rice assisted by multi-rotor UAV [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(9): 24–29.
- [54] 张海艳, 兰玉彬, 文晟, 等. 植保无人机旋翼风场模型与雾滴运动机理研究进展[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 1–12.
- Zhang Haiyan, Lan Yubin, Wen Sheng, et al. Research progress in rotor airflow model of plant protection UAV and droplet motion mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(22): 1–12.
- [55] 国家邮政局. 国家邮政局公布 2024 年邮政行业运行情况[EB/OL]. https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/youzheng/202501/t20250124_4163116.html, 2025–01–20.
- [56] 民航局. “十四五”航空物流发展专项规划[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/16/content_5673982.htm, 2022–02–16.
- [57] 李学龙. 无人机续航能力[J]. *中国科学: 信息科学*, 2023, 53(7): 1233–1261.
- Li Xuelong. Endurance of unmanned aerial vehicles [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2023, 53(7): 1233–1261.
- [58] 向锦武, 马凯, 阚梓, 等. 氢能源无人机关键技术研究进展[J]. *航空学报*, 2025, 46(5): 261–290.
- Xiang Jinwu, Ma Kai, Kan Zi, et al. Review of key

- technologies for hydrogen powered unmanned aerial vehicles [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(5): 261–290.
- [59] 张广孟, 李增山, 阳柳, 等. 一种长航时多旋翼燃料电池无人机的总体设计[J/OL]. *航空动力学报*, 1–12 [2025–07–15].
Zhang Guangmeng, Li Zengshan, Yang Liu, et al. Overall design of long-endurance multi-rotor fuel cell UAV [J/OL]. *Journal of Aerospace Power*, 1–12 [2025–07–15].
- [60] 戴月领, 贺云涛, 刘莉, 等. 燃料电池无人机发展及关键技术分析[J]. *战术导弹技术*, 2018(1): 65–71.
Dai Yueling, He Yuntao, Liu Li, et al. Development of fuel cell UAV and analysis of key technology [J]. *Tactical Missile Technology*, 2018(1): 65–71.
- [61] 徐伟诚, 陈凯, 张铭, 等. 基于太阳能的植保无人机续航提升方案[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(11): 62–68.
Xu Weicheng, Chen Kai, Zhang Ming, et al. Life lifting scheme for plant protection UAV based on solar [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(11): 62–68.
- [62] Khan M A, Khan A, Ahmad M, et al. A study on flight time enhancement of unmanned aerial vehicles (UAVs) using supercapacitor-based hybrid electric propulsion system (HEPS) [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46: 1179–1198.
- [63] 黄开. 激光供能技术在无人机续航中的应用研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
- [64] 李继宇, 张植勋, 赵胤伟, 等. 农用多旋翼无人机作业能耗白盒模型构建与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(8): 87–96.
Li Jiyu, Zhang Zhixun, Zhao Yinwei, et al. Construction and experiment of white box model for energy consumption of agricultural multi-rotor UAV operation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 87–96.
- [65] 范叶满, 沈楷程, 王东, 等. 基于模拟退火算法的无人机山地作业能耗最优路径规划[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 34–41.
Fan Yeman, Shen Kaicheng, Wang Dong, et al. Optimal energy consumption path planning of UAV on mountain region based on simulated annealing algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(10): 34–41.
- [66] 张学军, 刘法旺, 张祖耀, 等. 低空智能网联体系[J]. *北京航空航天大学学报*, 2025, 51(6): 1793–1815.
Zhang Xuejun, Liu Fawang, Zhang Zuyao, et al. Overview of low-altitude intelligent networked system [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, 51(6): 1793–1815.
- [67] 夏泳, 田洛. 面向低空经济的空联网络组网关键技术研究综述[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2024, 36(4): 619–632.
Xia Yong, Tian Luo. Survey of key technologies for networking in air-connected networks for the low-altitude economy [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2024, 36(4): 619–632.
- [68] Abdel-Basset M, Abdel-Fatah L, Eldrandaly K A, et al. Enhanced computational intelligence algorithm for coverage optimization of 6G non-terrestrial networks in 3D space [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 70419–70429.
- [69] Shakoor S, Kaleem Z, Do D T, et al. Joint optimization of UAV 3–D placement and path-loss factor for energy-efficient maximal coverage [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(12): 9776–9786.
- [70] Azari M M, Rosas F, Pollin S. Cellular connectivity for UAVs: Network modeling, performance analysis, and design guidelines [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(7): 3366–3381.
- [71] Meer I A, Ozger M, Schupke D A, et al. Mobility management for cellular-connected UAVs: Model-based versus learning-based approaches for service availability [J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2024, 21(2): 2125–2139.
- [72] Li P, Xie L, Yao J, et al. Cellular-connected UAV with adaptive air-to-ground interference cancellation and trajectory optimization [J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(6): 1368–1372.
- [73] Liu K, Zheng J. UAV trajectory planning with interference awareness in UAV-enabled time-constrained data collection systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 73(2): 2799–2815.
- [74] 兰玉彬, 王林琳, 张亚莉. 农用无人机避障技术的应用现状及展望[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(9): 104–113.
Lan Yubin, Wang Linlin, Zhang Yali. Application and prospect on obstacle avoidance technology for agricultural UAV [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(9): 104–113.
- [75] Ahmed S, Qiu B, Ahmad F, et al. A state-of-the-art analysis of obstacle avoidance methods from the perspective of an agricultural sprayer UAV's operation scenario [J]. *Agronomy*, 2021, 11(6): 1069.
- [76] Donati C, Mammarella M, Comba L, et al. 3D distance filter for the autonomous navigation of UAVs in agricultural scenarios [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1374.
- [77] 张博, 陈至坤, 程朋飞. 多传感器结合的无人机障碍物识别方法研究[J]. *激光杂志*, 2021, 42(2): 52–56.
Zhang bo, Chen Zhikun, Cheng Pengfei. Study on the of

- method multi-sensor UAV obstacle recognition [J]. Laser Journal, 2021, 42(2): 52–56.
- [78] 张红蕾, 盛志超, 叶林, 等. 基于多传感器融合的无人机自主避障方法[J]. 激光杂志, 2024, 45(1): 229–235.
Zhang Honglei, Sheng Zhichao, Ye Lin, et al. Autonomous obstacle avoidance method for UAV based on multi-sensor fusion [J]. Laser Journal, 2024, 45(1): 229–235.
- [79] 王家亮, 董楷, 顾兆军, 等. 小型无人机视觉传感器避障方法综述[J]. 西安电子科技大学学报, 2025, 52(1): 60–79.
Wang Jialiang, Dong Kai, Gu Zhaojun, et al. Review of obstacle avoidance methods for small UAVs using visual sensors [J]. Journal of Xidian University, 2025, 52(1): 60–79.
- [80] Singla A, Padakandla S, Bhatnagar S. Memory-based deep reinforcement learning for obstacle avoidance in UAV with limited environment knowledge [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 22(1): 107–118.
- [81] Wang D, Li W, Liu X, et al. UAV environmental perception and autonomous obstacle avoidance: A deep learning and depth camera combined solution [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105523.
- [82] 刘玄冰, 周绍磊, 肖支才, 等. 无人机避障方法研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(5): 40–47.
Liu Xuanbing, Zhou Shaolei, Xiao Zhicai, et al. Review on UAV obstacle avoidance methods [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(5): 40–47.
- [83] Vachtsevanos G, Kim W, Al-Hasan S, et al. Autonomous vehicles: From flight control to mission planning using fuzzy logic techniques [C]. Proceedings of 13th International Conference on Digital Signal Processing. IEEE, 1997, 2: 977–981.
- [84] Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments [C]. Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1994: 3310–3317.
- [85] 赵畅, 刘允刚, 陈琳, 等. 面向元启发式算法的多无人机路径规划现状与展望[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1102–1115.
Zhao Chang, Liu Yungang, Chen Lin, et al. Research and development trend of multi-UAV path planning based on metaheuristic algorithm [J]. Control and Decision, 2022, 37(5): 1102–1115.
- [86] Sonny A, Yeduri S R, Cenkeramaddi L R. Q-learning-based unmanned aerial vehicle path planning with dynamic obstacle avoidance [J]. Applied Soft Computing, 2023, 147: 110773.
- [87] 滕菲, 王迎春, 姚永辉, 等. 基于深度强化学习的无人机动态避障规划[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1–13[2025–06–01].
Teng Fei, Wang Yingchun, Yao Yonghui, et al. Dynamic obstacle avoidance planning for UAV based on deep reinforcement learning [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1–13[2025–06–01].
- [88] Zuo L, Yao L, Kang Y. UIO based sensor fault diagnosis and compensation for quadrotor UAV [C]. 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2020: 4052–4057.
- [89] Skriver M, Helck J, Hasan A. Adaptive extended kalman filter for actuator fault diagnosis [C]. 2019 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS). IEEE, 2019: 339–344.
- [90] Kladis G P, Economou J T, Knowles K, et al. Digraph matrix reliability analysis for fault assessment for A UAV platform application. A fault-tree analysis approach [C]. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2008: 1–6.
- [91] Ahmad M W, Akram M U, Ahmad R, et al. Intelligent framework for automated failure prediction, detection, and classification of mission critical autonomous flights [J]. ISA Transactions, 2022, 129: 355–371.
- [92] 杨永琳, 李志宇, 郭剑东. 四旋翼无人机反演-动态逆控制器设计与仿真[J]. 电子设计工程, 2018, 26(12): 15–19, 25.
Yang Yonglin, Li Zhiyu, Guo Jiandong. Design and simulation of quad-rotor UAV controller based on backstepping-dynamic inversion [J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(12): 15–19, 25.
- [93] 姜雪莹, 苏成利, 徐亚鹏, 等. 四旋翼无人机飞行姿态的自适应反演滑模控制(英文)[J]. 中南大学学报(英文版), 2018, 25(3): 616–631.
Jiang Xueying, Su Chengli, Xu Yapeng, et al. An adaptive backstepping sliding mode method for flight attitude of quadrotor UAVs [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(3): 616–631.