doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.001

大载荷农用无人机关键技术与应用综述

展义龙[1,2]　张晚霞[1,2]　张伊鹏[1,2]　王　丰[1,2]　解祥程[1,2]　黎志宏[1,2]　兰玉彬[1,2]

(1.华南农业大学电子工程学院(人工智能学院),广州 510642;
2.国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心,广州 510642)

摘要:在农业低空经济快速发展的背景下,农用无人机已成为推动农业现代化和智能农业建设的重要力量。随着作业规模扩大和任务复杂度提升,大载荷农用无人机凭借更强的载重能力和作业效率正逐渐成为农业航空装备的重要发展方向。本文系统综述了大载荷农用无人机的研究进展和应用现状,分析了大载荷农用无人机总体气动布局结构、能源系统及飞行控制系统等关键技术的发展趋势,总结了其在植保施药、播种施肥和农作物运输等领域的典型应用,并归纳了变量喷施、播撒机构优化与吊挂控制等关键技术的发展现状与应用成效。研究表明,大载荷农用无人机在提升作业效率、拓展无人化作业场景方面发挥了显著作用,但仍面临载荷能力、能源效率与飞控智能化等方面的技术瓶颈。未来研究应重点围绕高能效动力系统、智能决策控制、作业精度提升、安全与可靠性评估等方向展开,以促进其在农业生产中的规模化、智能化和可持续化发展。

关键词:大载荷;农用无人机;关键技术;应用现状

中图分类号:TP391.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)03-0001-15　　**OSID**:

Review on Key Technologies and Applications of Heavy-load Agricultural UAVs

ZHAN Yilong[1,2]　ZHANG Wanxia[1,2]　ZHANG Yipeng[1,2]　WANG Feng[1,2]　XIE Xiangcheng[1,2]
LI Zhihong[1,2]　LAN Yubin[1,2]

(1. *College of Electronic Engineering* (*College of Artificial Intelligence*), *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: With the rapid development of the low-altitude economy in agriculture, agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) have become an essential driving force in promoting agricultural modernization and the construction of smart agriculture. As the operational scale expands and task complexity increases, heavy-load agricultural UAVs—with their greater payload capacity and operational efficiency—are emerging as a key development direction for agricultural aviation equipment. The research progress and application status of heavy-load agricultural UAVs were systematically reviewed, and the development trends of key platform technologies such as aerodynamic configuration, power systems, and flight control systems were analyzed. Typical applications in pesticide spraying, seeding and fertilization, and agricultural material transportation were summarized, along with the progress and effectiveness of critical technologies such as variable spraying, spreading mechanism optimization, and sling-load control. The results indicated that heavy-load agricultural UAVs played a significant role in improving operational efficiencyand expanding unmanned operation scenarios, yet still faced technical challenges in payload capacity, energy efficiency, and intelligent flight control. Future research should focus on high-efficiency power systems, intelligent decision-making and control, improvements in operational accuracy, as well as safety and reliability assessment, so as to promote the large-scale, intelligent, and sustainable development of these systems in agricultural production.

Key words: heavy-load; agricultural UAVs; key technologies; application status

收稿日期:2025-10-30　修回日期:2025-11-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD200020101)和国家自然科学基金项目(32502528)

作者简介:展义龙(1995—),男,讲师,博士,主要从事农业航空技术与装备研究,E-mail:zylong@scau.edu.cn

通信作者:兰玉彬(1961—),男,教授,博士,主要从事精准农业航空研究,E-mail:ylan@scau.edu.cn

0 引言

我国农业生产地域广阔,作物种类复杂,尤其在南方丘陵地带和西部山区,地形起伏大、地面通行性差、耕地破碎,给农业机械化作业带来了巨大挑战[1]。农用无人机因其机动性强、操作灵活,不受地形和地况的影响等优点,逐渐成为应对复杂农业生产环境的重要智能装备[2-3]。截止 2025 年 6 月,全球农用无人机保有量突破 50 万架,2024 年中国农用无人机年作业量突破 26 亿亩次,已成为农业机械化体系增长最快的领域之一[4]。随着大田农业的发展和无人机作业任务的多样化,单架无人机的作业强度与作业面积持续增加[5]。在此背景下,大载荷农用无人机成为提升农业航空作业效率的重要工具。与中小型无人机相比,大载荷农用无人机具备更长的续航能力和更大的载荷性能。大载荷农用无人机不仅能显著提升大田作业效率和单次作业覆盖面积,拓展无人机农业应用场景,还可推动农业作业由分散型向规模化方向转变,对建立高效、可持续的现代农业体系有重要意义[6]。

随着国内外无人机平台的快速发展,大载荷农用无人机也取得了显著进展。目前,该类无人机已广泛应用于农药喷洒、播种施肥和农资运投等作业环节[7-9],特别是在丘陵山区等复杂环境中展现出了较高的适应性和作业效率[10]。在技术层面,学者针对大载荷农用无人机气动结构、动力系统及作业装置等方面开展了大量研究,推动了大载荷农用无人机在安全性、稳定性等方面的持续提升。有必要对大载荷农用无人机开展系统化综述归纳,以促进该领域的发展。基于此,本文系统综述大载荷农用无人机的发展概况、总体设计技术、关键技术进展与典型农业场景应用,分析其存在的主要问题与未来展趋势。

1 发展概况

大载荷农用无人机是指在农业生产领域中具备较强载重能力、较长续航时间,能够搭载喷洒、运输、监测等多类任务载荷的无人机平台[11]。目前国内外尚无统一的载荷分级标准,早期研究通常将有效载荷超过 10 kg 或药液容积超过 10 L 的农用无人机划入“大载荷”范畴[12-13]。然而,随着能源系统、材料工艺及飞行控制技术的快速发展,农用无人机的载荷能力已显著提升,主流机型已普遍超过 50 kg,部分机型的最大载荷已达到 100 kg,单次作业药液量可达 70 ~ 75 L。因此,本文将有效载荷 50 kg 以上的农用无人机平台定义为大载荷农用无人机。为更全面地反映农用无人机载荷能力与相关研究历程,本文在进行综述时将有效载荷超过 10 kg 的机型也纳入讨论范围。

当今,国内外的大载荷农用无人机产业均处在快速发展阶段。国际方面,日本和美国较早开展了大载荷农用无人机的研究,已经形成了较为完善的技术体系[14]。其中,日本在农用无人机领域起步最早,长期以固定翼与单旋翼机型为主,技术特点体现在作业稳定性与可靠性;美国则依托其先进的航空制造业与电子控制技术,重点发展多旋翼和混合动力平台,强调任务多样性与自主作业能力。国内市场起步稍晚,但发展极为迅速[15]。自 2018 年以来,在国家多种政策和项目的支持下发展迅猛,我国农用无人机的载荷能力和单架作业性能持续提升。图 1 为我国农用无人机代表企业 2019—2025 年每年发布的代表机型最大有效载荷,由图 1 可知,农用无人机的载荷能力呈显著上升趋势。

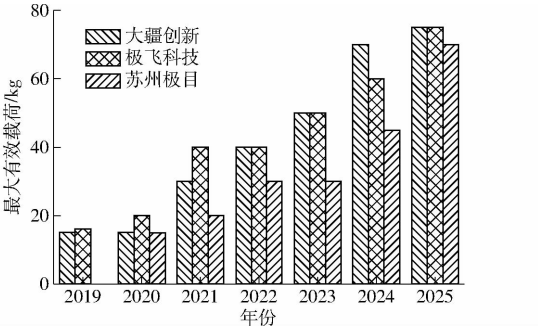


图 1 农用无人机最大有效载荷

Fig. 1 Maximum effective load capacity of agricultural UAVs

关于大载荷农用无人机的研究主要集中在优化结构设计、提升作业效率、改善作业质量和增强环境适应性等方面。为了兼顾轻量化与高强度,研究者采用有限元分析、拓扑优化及复合材料技术,使无人机机体结构在保证刚度的同时显著减轻自重[16-18];为了满足高载荷作业需求,桨臂一体化、折叠臂架和模块化结构成为新的发展方向[19-20];为了解决续航受限问题,电动与混合动力并行发展[21-22],以提升续航能力并满足长时间、大范围作业需求,同时电池热管理与能量利用效率也逐渐成为研究重点[23];为了实现控制的精准性,研究方向正由传统稳定控制向智能化与自适应控制发展,模糊逻辑、神经网络及强化学习等算法逐渐被引用,姿态稳定性和航迹精度显著提升[24-26];部分研究结合具体应用方向探索了变量喷施[27]和自动航线规划[28-29]等新技术,进一步提升了作业精准性与智能化水平。

目前植保作业仍是大载荷农用无人机的核心应用领域,但其功能正逐步向播撒、运输、果园采收等多场景拓展,大载荷农用无人机也正在从单任务设

备向多功能农业作业平台演进。总体来看，大载荷农用无人机的研究正朝着高载荷、长续航和智能化方向发展，为农业装备现代化提供了新动力，也对其关键技术体系的完善提出了更高的要求。

2　大载荷农用无人机总体关键结构研究进展

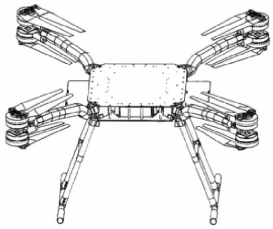
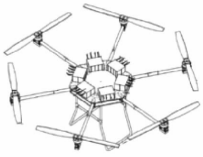
大载荷农用无人机主要由机体结构、能源系统和飞行控制系统决定自身的载荷能力、续航性能和作业稳定性。机体结构及气动布局是整机的基础，直接影响升力效率、抗风能力以及结构强度，是实现高载荷飞行的前提；能源系统为无人机提供能量，其功率密度和能量管理水平决定续航时间与作业强度；飞行控制系统则负责无人机飞行过程中姿态稳定、航迹控制与任务执行的协调，是保障安全与作业精度的关键环节。

2.1　气动布局与结构

根据升力获取方式的不同，农用无人机的气动布局主要分为固定翼布局、单旋翼布局、复合翼布局和多旋翼布局，见表 1。在多种布局结构中，多旋翼布局因其结构简单、推力分布均匀、控制灵活、维护方便等优点，已成为当前大载荷农用无人机的主流设计形式。

表 1　农用无人机气动布局分类

Tab. 1　Classification of aeronautic layout of agricultural UAVs

类型		示意图	特点	典型载荷范围/kg	文献序号
单旋翼			升力效率高、载荷能力强，结构相对复杂，振动大、维护成本高	20~150	[30]
固定翼			依靠机翼升力维持飞行，适合长距离巡航，耗能低、航程远，但缺乏悬停与低速作业能力	5~50	[31]
复合翼			结合固定翼与旋翼优势，兼顾垂直起降与长航时飞行，但控制与结构设计复杂	10~60	[32]
多旋翼	共轴式		上下对转旋翼结构，升力密度高、抗风性强、机身紧凑，但气动干扰复杂、制造成本高	30~100	[33]
	纵列式		采用前后两组旋翼布局，通过增加纵向桨距获得更大升力与抗风性能，能有效提升载荷能力与能量利用率	40~120	[34]
	平面式		各旋翼分布在同一个平面内(如X型、V型、+型)，结构简单、控制灵活、维护方便	10~70	[35]

多旋翼农用无人机通常采用四旋翼、六旋翼或八旋翼布局。增加旋翼数量，可以在保证无人机飞行稳定的同时提高载荷能力和抗风性能。为满足重载作业需求，提升升力效率，学者在结构布局方面进行了多种优化探索。根据优化特征，多旋翼农用无人机可分为共轴式、纵列式与平面式。共轴式布局通过上下双层旋翼叠加实现紧凑机身与高升力密度，可有效缩小机体尺寸并提高推重比[36]。例如，陈泽荣等[37]基于共轴双旋翼对气动参数进行了优化，显著提升了无人机的飞行性能；李雯芮等[38]采用控制变量法调整旋翼叶片几何参数，建立了气动优化设计模型，优化后的旋翼升力性能得到了明显改善。纵列式布局通过上下多层桨盘布置可有效提升总推力密度。李继宇等[39]确定了多旋翼无人机纵列式布局中桨叶的最优间距，使升力性能提升12%，并降低了气动干扰效应。除了传统平面布局，

部分研究尝试采用新型结构形式以提升升力利用效率与能耗比。例如,KHAH 等[40]设计了大直径主旋翼与外置小旋翼组合的共轴复合结构,其气动效率较常规布局提升约 15%。

当前多旋翼农用无人机普遍采用 CFD 仿真与风洞实验相结合的方法,研究旋翼下洗流场、气动干扰和能量损失规律。学者发现合理优化桨距角和桨间距可以有效降低总能耗,提升升力效率。例如,雷瑶等[41]分析了不同旋翼间距比对无人机气动性能的影响,结果表明在最佳布局下整机功率载荷可提高 1.5%,悬停效率可提升 5.64%;BERRA 等[42]构建了共轴布局的干扰最小化控制模型,通过控制分配实现上下旋翼推力干扰抑制,使系统总升力提高 8%。未来研究应进一步进行结构拓扑优化与材料轻量化设计,以实现气动性能、结构强化和能耗效率的综合平衡。

2.2 能源系统

随着载荷能力的提升,无人机飞行所需要的功率增长,续航受限问题尤为突出[43]。因此,能源系统的选择与优化被认为是制约大载荷农用无人机发展的主要瓶颈之一。

目前,大载荷农用无人机的能源系统形式主要包括电池驱动、燃油动力、混合动力和氢燃料电池系统 4 类。电池驱动是应用最广泛的形式,特别是锂电池系统,以高比能、噪声小、维护简单和电驱系统集成度高的优势,在农用无人机中占主导地位[44]。燃油动力具有能量密度高、续航时间长、抗风能力强等优点,但存在噪声大、排放污染严重、维护复杂等问题,不利于绿色农业的发展[45]。混合动力系统通过燃油发动机与电池组合,能够在一定程度上平衡燃油动力提供的高载质量、长续航和电池驱动的高效率低排放等优点,但系统复杂性增加,可靠性和安全性仍待验证[46]。氢燃料电池作为一种前沿技术,具有高能量密度和零排放的优势,被认为是未来突破无人机续航能力的潜在方向,但其储氢安全性和成本问题仍然制约实际应用[47]。

国内外大载荷农用无人机典型机型的主要动力形式、续航和能耗等总结对比如表 2 所示。在当前主流的大载荷农用无人机中,常采用 20~40 A·h 容量的高倍率锂电池组,单次续航时间通常在 15~20 min。高功率输出能够满足大流量喷头和多旋翼大推力的需求,但也导致电池组在短时间内快速放电发热严重,限制了作业时间与寿命[48]。为了解决这一问题,学者开展了多种无人机电池热管理技术研究,包括风冷、热管冷却[49]及相变材料辅助散热[50](图 2)。实验结果表明,这些方法可将电池温度降低 5~10℃,有效延长了续航时间。为了进一步提升作业的连续性,多数机型采用模块化电池组配合集中充电的方式[51],显著减少了充电等待时间。同时,为了提升能源利用率与安全性,电池管理系统不断优化,可实现电压、电流与温度参数的实时检测,实现荷电状态[52]和健康状态[53]在线评估。

农业作业过程中,喷洒液体逐渐减少或物资装卸频繁均会导致无人机载荷动态变化。若电力系统在不同载荷阶段仍维持固定功率输出,易造成能量浪费。为了节约能源提升续航能力,近年来学者进行了能源载荷匹配的研究。该类研究方法通过建立载荷变化下的功率需求模型,实时调整动力系统的输出功率,使电机-螺旋桨-电池系统始终工作在高效区间[54]。在混合动力无人机中,能效匹配还体现

表 2 国内外典型大载荷农用无人机机型参数对比

Tab.2 Comparison of representative domestic and overseas heavy-payload agricultural UAVs and their parameters

国家	品牌型号	动力形式	续航时间	最大有效载荷/kg	作业效率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)	能耗评估
中国	DJIAgras T70P	电动多旋翼	空载约 18 min,满载 7~8 min	70	12~20	能耗中等,适合丘陵大田
	DJIAgras T100	电动多旋翼	空载约 18 min,满载 7~10 min	75	15~25	满载能耗高,但单位面积效率高,适合大田块作业
	XAGP150	电动多旋翼	满载续航 10~15 min	70	15~20	单位面积能耗中等偏高,但在高流量喷洒和大幅面播撒场景下综合能效较优
	XAGP200	电动多旋翼	满载续航 10 min	100	20~30	高流量喷撒下能耗较高,但大载荷减少往返次数、总体效率较高
美国	HylioAG-272	电动多旋翼(可增程)	配备 7 kW 航电增程系统时,满载续航 40 min	68	12~20	在中大规模农场的单位面积能耗表现较优,适合作业半径较大的场景
日本	Yamaha FAZER R G2	油动单旋翼	>60 min	50	20~30	单位时间油耗较高,但由于续航长、航速快,单位面积综合能耗处于中等水平,适合长航线作业

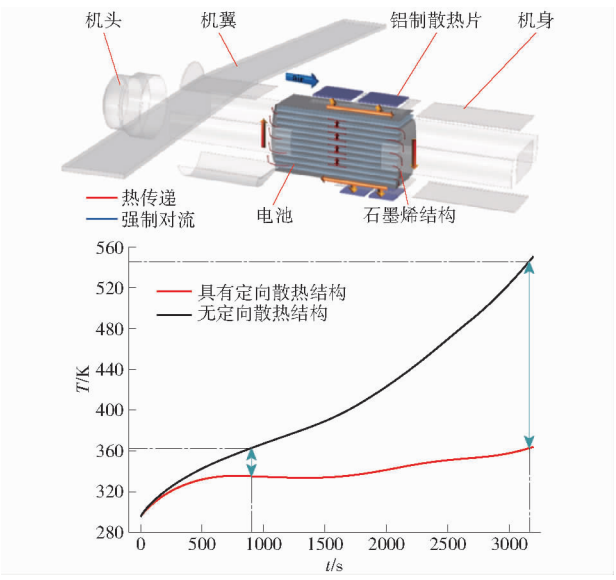


图 2　散热设计及散热效果[50]

Fig. 2　Heat dissipation design and heat dissipation effect

在双能源的协同调度，即在高载工况下优先使用燃油驱动，在低载或返航阶段采用电力续航，从而实现能源利用的最优分配[55]。

未来应继续这些方面的研究，设计轻量化能源系统，优化能源管理策略，寻找高效精准的热管理方法，以确保大载荷农用无人机在提升载荷的同时有较长的飞行时间和较高的飞行安全性。

2.3　飞控系统

与小型无人机相比，大载荷农用无人机在动力惯量、气动响应和载荷变化范围上有显著的差异，其控制系统需要在更复杂的动态条件下保持稳定性与精度。大载荷农用无人机飞行控制系统包括姿态控制、导航与定位控制以及任务控制 3 部分。姿态控制主要依赖于惯性测量单元、陀螺仪和加速度计，来实现飞机滚转、俯仰和偏航的闭环稳定控制；导航定位通常基于 GPS 数据，并辅以 RTK 技术以提升厘米级定位精度；任务控制主要负责航迹规划与作业参数调节，如喷头开闭控制、速度与高度等。

为了实现对大载荷农用无人机更精准的控制，学者在控制算法和导航策略上进行了大量探索。储金城[56]提出了一种模型补偿-线性自抗扰控制的姿态控制算法，该算法可在风扰和载荷变化下保持快速响应与良好的稳定性。MADEBO[57]结合神经网络与模糊逻辑动态调整 PID 增益，实现了控制效率与自适应性的提升。在导航与任务上，精确定位与路径规划技术的结合逐渐成为研究热点。GUO 等[58]提出的融合势场引导和强化学习混合智能路径规划方法，可显著降低计算耗时；于少猛等[59]利用实景三维模型获取丘陵果园坐标，实现了复杂地形下的全覆盖路径规划；YANG 等[60]引入了基于 RRT 的路径规划算法，可以实现自主避障与动态航线规划。这些技术的不断发展，使得大载荷农用无人机能够在多场景环境下完成自主喷洒、播撒与吊运任务。

本文总结了目前大载荷农用无人机所用的算法类型，如表 3 所示。新一代飞控系统不仅需要保证飞行稳定性和姿态精度，还要在多任务、多环境下实现自适应控制和安全冗余管理。

3　大载荷农用无人机应用研究进展

大载荷农用无人机凭借较强的载重能力和作业续航优势，能够搭载更大容量的药箱、播撒装置或运输舱，在大田、丘陵及山区等复杂地形下执行高强度作业任务，已被应用在农药喷洒与植保防控、播种与施肥作业、农资与农产品运输等领域，显著提升了作业效率与作业半径。

3.1　植保施药

植保无人机是指搭载喷洒装置，通过地面遥控或者自主飞行完成农药、植物调节剂等喷施的无人机植保装备。据统计，我国农业航空技术中超 95% 的应用集中在农业植保领域，是农用无人机应用最广泛的方向[61]。其作业原理是利用旋翼下洗气流产生的二次气动扰动，使雾滴穿透作物冠层并均匀沉积于靶标表面，实现高效防治。实践表明，农用无人机在水稻、小麦、玉米、棉花、果树等多种作物的防治中，均能实现低容量、高沉积率的精准喷施。与传统的人工喷雾和地面机械喷药方式相比，农用无人机能够显著提高作业效率。刘晨浪等[62]在实验中发现无人机作业药液用量和作业用时分别仅为人工施药的 10% 和 12.5%；以防治柑橘木虱实验为例，无人机施药可以节省 96% 的药液用量，单位作业成本降低 69.95%[63]。

大载荷农用无人机喷施作业的质量受作物生长条件、喷雾参数及作业参数的影响。为提升雾滴沉积的均匀性和药效的稳定性，近年来的研究主要围绕变量喷施系统设计、喷头结构优化和作业参数优选 3 个关键环节展开。

3.1.1　变量喷施系统设计

随着精准农业的发展，植保无人机的施药模式正从“均匀喷洒”向“按需喷洒”转变。变量喷施系统是该转变中的关键技术之一，其核心目的是根据作物长势、病虫害分布及环境条件，实时调节喷施参数，实现精准施药。系统流程如图 3 所示，该技术能够有效减少药液浪费、降低飘移风险并提升防治效果[64]，已成为当前植保无人机智能化发展的核心方向。为了实现变量喷施，学者进行了相关研究。

表 3 农用无人机飞行控制算法对比

Tab. 3 Comparison of flight control algorithms for agricultural UAVs

类型	控制原理与核心思想	优点	缺点	应用场景
PID 控制	基于比例、积分、微分反馈调节,实现对姿态和位置的闭环控制	响应快、稳定性好、结构简单,易于实现,对大载荷平台惯量大、响应慢有一定鲁棒性	难以应对喷洒减载引起的强非线性与复杂扰动,参数整定依赖经验	大载荷多旋翼/油动无人机的姿态稳定控制
模糊控制	利用模糊逻辑推理,通过语言规则实现控制量输出	鲁棒性强,适应性强,可补偿载荷减小带来的推力变化	难以系统优化,规则库设计复杂,在强扰动环境下稳定性受限	大载荷无人机喷洒载荷变化的姿态控制、变量喷量控制
自适应控制	根据系统状态实时调整控制参数,补偿模型不确定性	能自动补偿负载变化、环境扰动	计算复杂,对传感器依赖高	载荷快速变化下的飞行控制
滑模控制	通过引入滑模面设计,实现状态变量在滑模面上的鲁棒控制	对外界扰动和模型误差不敏感,鲁棒性强,可抑制喷洒下洗气流和阵风的干扰	存在抖振问题,需要滤波或连续化处理	强风环境下姿态与高度保持
线性二次型最优控制	通过最优控制理论,最小化代价函数获得控制规律	动态性能好,能权衡响应与能耗	需要线性化模型,对大载荷无人机的线性简化误差较大,难以应对复杂农田扰动	大载荷农用无人机定高定速飞行、轨迹平滑控制
模型预测控制	利用系统模型预测未来状态并优化控制输入	精度高,抗扰动能力强,能在喷幅重叠下保持稳定,适合大载荷农用无人机	实时计算量大,对硬件要求高	精准航迹规划、大载荷无人机喷幅重叠稳定控制
神经网络控制	利用神经网络逼近系统非线性映射关系	非线性建模能力强,可自学习	可解释性差,依赖大量数据训练,在大载荷无人机载荷突变时预测不稳定	智能喷洒系统、作业自主导航控制
强化学习控制	通过与环境交互学习最优策略	无需显式模型,对随机风扰与非结构化农田有效	训练时间长,收敛性不稳定,在大载荷飞行中安全性验证不足	自主避障、动态航迹优化
混合控制	融合传统与智能控制策略	兼顾鲁棒性和精度,适合大载荷农用无人机的多约束作业	系统设计复杂,调试难度高	复杂作业区的综合飞行控制

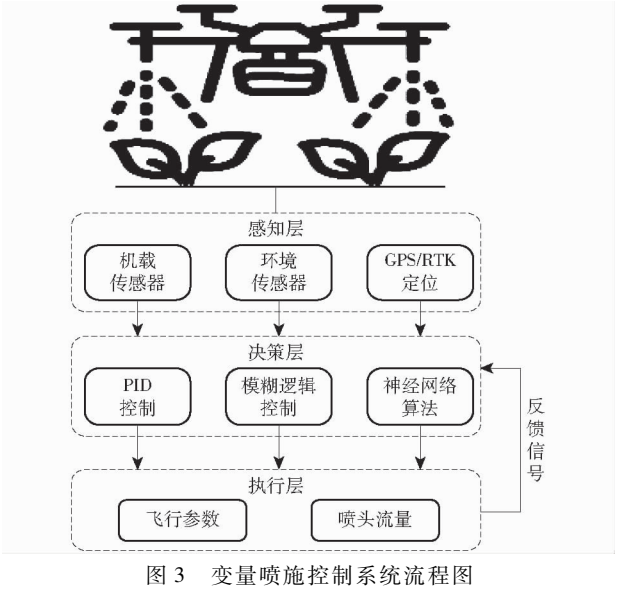


图 3 变量喷施控制系统流程图

Fig. 3 Flowchart of variable spraying control system

郭晗[27]搭建了农用无人机变量喷施系统并建立了仿真平台,田间试验表明该系统具有良好的喷施性能,能够满足变量喷施的需求。变量喷施的关键在于喷量控制策略和感知决策策略。为了优化喷量控制策略,WEN 等[65]设计了基于脉宽调制的变量喷雾系统,使流量偏差稳定在 2.16% 以下;WANG 等[66]提出基于回归森林模型的喷雾均匀度控制算法,能确保变异系数低于 30%。为了提升感知决策的精度,WANG 等[67]开发了基于视觉识别的喷施系统,可自动识别地块空区并在目标区域喷洒精确数量的农药;LIU 等[68]提出了基于激光雷达辅助的变量喷施系统,可根据作物生长状况实现精准喷施,节省药液达 30.1%。变量喷施系统显著提升了无人机喷雾的精准性与环境友好性,目前已在果树、棉花、小麦等高价值作物中实现应用。未来可以结合多源传感器与大载荷农用无人机群协同喷施,实现区域级变量喷施体系。

3.1.2 喷头结构优化

在植保无人机喷施作业时,喷头的结构不仅决定雾滴的粒径与飘移行为,也直接影响雾滴沉积的稳定性和穿透性[69-70]。为了提升喷施精度与药液的利用率,学者对喷头结构进行了大量优化设计。杨光玉[71]研制的 3 层离心喷头,可在不改变泵流量的前提下,实现施药流量的 4 级可调;胡启圣[72]提

出旋转雾化喷头，通过旋转结构改善雾化均匀性与喷雾细度。部分研究还引用了静电喷雾技术，通过电场力调控雾滴带电特性，实现更精细的雾化与沉积控制[73]。ZHAO 等[74]开发了静电喷雾平台，结果表明，利用静电作用可显著增强喷雾覆盖和药效利用率；张亚莉等[75]设计了单极性接触式航空静电喷雾系统，该系统能显著提升多旋翼植保无人机在作物背面的雾滴沉积效果（图 4）。喷头布局同样对雾滴沉积效果具有显著影响[76]。ZHANG 等[77]利用格子波尔兹曼方法探究了喷头位置对雾滴空间分布和速度分布的影响，发现当喷头安装在电机下方 0～0.2 m 时沉积效果最佳；廉琦[78]通过 CFD 仿真模拟和室外实验得出，喷头数量和布局直接影响雾滴沉积效果；XU 等[79]通过数值模拟与田间实测相结合的方法，验证了无人机喷雾系统中气动场与液滴沉积之间存在非线性耦合关系，合理的旋翼-喷头布局能实现气流能量与雾滴沉积效率的最优匹配。当前大载荷农用无人机喷头结构优化的研究已经取得显著进展，已经从传统的机械喷头向电控化轻量化的方向演进。未来研究可以注重喷头-气流-雾滴多场耦合机理研究，进一步提升大载荷农用无人机植保作业效果，开发具备自清洁、防堵和多种模式切换功能的智能喷头，以适应长航时、大流量的作业需求。

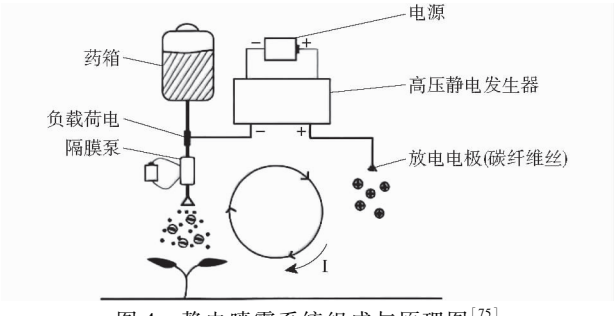


图 4　静电喷雾系统组成与原理图[75]

Fig. 4　Composition and principle of electrostatic spraying

3.1.3　作业参数优选

大载荷农用无人机施药效果受作业参数影响显著[80]。飞行高度、航速、喷幅、喷头喷量及雾滴粒径等因素共同决定了药液的空间分布、沉积密度与飘移损失[81-83]。陈盛德等[84]通过多次试验发现，无人机的飞行高度和速度对靶区内采集点上雾滴平均沉积量影响显著，但对雾滴沉积均匀性影响较小；ZHAN 等[85]发现载荷变化和飞行高度会导致无人机下方气流分布发生显著变化，合理利用旋翼下洗气流有助于提升雾滴沉积率与穿透性，改善喷施均匀性；孙涛等[86]通过对比实验发现，在同一作业高度下，增大喷施流量可降低雾滴覆盖率变异系数，提高喷施均匀性；LI 等[87]基于 CFD 仿真揭示了旋翼下洗流场的分布规律：沿飞行方向，旋翼下方的后方最大，中间次之，前方最小。综上所述，当前研究已基本揭示了无人机飞行高度、速度、喷量与雾滴沉积特性之间的关系，并在实验与仿真层面形成了可推广的参数匹配规律。未来应继续深入探索其间的关系，进一步提升大载荷农用无人机喷施的精确性与稳定性。

为提升大载荷农用无人机植保作业的作业效率、喷施均匀性和药液利用率，现有研究围绕喷施系统设计、喷头结构优化及作业参数等方面开展了大量实验与仿真研究。然而，与传统中小型无人机相比，大载荷农用无人机由于旋翼下压风场强度更大、气动干扰更复杂、喷雾流场覆盖范围更广，在作业过程中更容易引发雾滴飘移、沉积不均及作物冠层穿透不稳定等问题。因此在植保领域，大载荷农用无人机仍需进一步开展喷施参数自适应调控策略和喷头群协同控制等方面的研究，以实现复杂环境下的高精度喷施与药液利用率最大化。

3.2　播种施肥

利用大载荷农用无人机进行播种与施肥是提高作物种植效率和资源利用率的重要手段。与地面机械相比，无人机播种作业具有更高的灵活性、地形适应性等优势，尤其适用于山区、丘陵及水田等复杂地形[88]。其基本原理是利用机载供料与离心抛撒装置，在飞行过程中通过控制盘速与送料速率，实现物料的定量供给与空间分布调控。近年来，随着大载荷农用无人机播撒的广泛应用，学者对其关键技术做了大量研究以提升播撒效果。

3.2.1　播撒机构优化

播撒机构决定了物料颗粒的空间分布均匀性和作业稳定性。根据播撒方式不同，农用无人机播撒机构主要分为撒播和条播。撒播是通过旋转或气流实现物料的分散投放；条播则是通过定量排种和定向下落结构，将物料沿作业轨迹均匀投放。播撒机构类型见表 4。

目前主流撒播形式包括离心盘式和气动式两类。离心盘式因其结构简单、适应多种颗粒而被广泛应用[89]。WANG 等[90]设计了一种弯曲叶片圆盘结构，通过改变颗粒的运动轨迹来提高播撒的均匀性。气动式则通过风道或鼓风机输送颗粒物料，利用气流进行分配与喷射。宋灿灿等[91]设计的锥形气力式播撒装置，利用气流实现种子的多方向定向输送，提高了播撒精确性。条播的特点在于精准供料与定向排料。为了实现物料排放的定量定距，黄小毛等[92]设计了一种电驱排种器并配合辅助导管

表 4 无人机播撒装置主要类型

Tab. 4 Main types of UAVs spreading devices

类型	工作原理	特点	主要适用场景
离心式撒播	利用旋转叶片产生的离心力将物料颗粒沿径向甩出,实现空间扩散与均匀播撒	结构简单,维护方便,适配多种物料,但易受气流干扰,边缘覆盖不均匀	肥料、草料、饲料等中等粒径颗粒物料的广域播撒
气动式撒播	通过风道或鼓风机产生的高速气流将物料沿气流方向定向输送与喷射,实现远距离精准播撒	播撒定向性强,但能耗较高、气流易波动	小粒径种子、细颗粒肥料等高均匀性作业需求
条播	通过机械排种轮控制种子定向输出,使其沿飞行航迹定向落地	精度高、定距定量、重播率低,适合精准农业作业,但结构复杂、效率偏低	水稻、小麦、油菜、玉米等种子类作物的精量播种

装置,能够在飞行过程中保持稳定的种子流;吴子敬等[93]通过多排喷口布置与气流导向设计,改善了条播的轨迹一致性。总体来看,播撒机构的优化正由几何参数的调节转向多物料适应性设计,为大载荷农用无人机在复杂环境下的稳定播撒提供了技术支撑。

3.2.2 变量播撒技术

变量播撒技术结合无人机播撒与变量控制技术,通过图 5 所示流程动态控制播撒量,提升播撒均匀性与物料利用率,减少资源浪费与环境污染。为了实现无人机变量播撒,SU 等[94]采用加权系数学习改进单神经元自适应 PID 控制技术,实现了精准变量播撒,播撒相对误差仅为 7.02%;SONG 等[95]利用处方图控制实现了肥料的变量播撒;包明艳等[96]综合应用了无人机遥感、光谱影像分析及施肥处方图生成技术,实现了基于农情感知的变量施肥作业。尽管变量播撒技术显著提升了大载荷农用无人机播撒的智能化水平,但仍存在一些问题亟需解决与优化,以实现复杂环境下的稳态控制,例如,系统感知延迟和多喷口协同控制困难等。

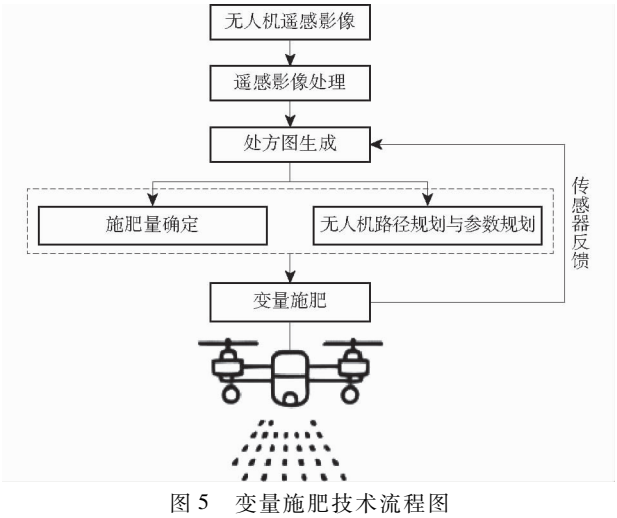


图 5 变量施肥技术流程图

Fig. 5 Technical process of variable fertilization

3.2.3 作业参数优选

大载荷农用无人机播撒效果易受飞行高度、速度、盘速及送料率等多参数影响。学者发现通过合理的参数组合能够显著改善物料覆盖率与播撒精度。例如,ZHU 等[97]研究发现,播撒均匀性随飞行速度增加而增强,随飞行高度的增加而下降;张青松等[98]通过仿真实验发现旋翼气流场对种子的空中漂移运动轨迹有较大影响,并根据无人机飞行速度与槽轮转速关系确定了旋翼气流场对种子变异系数影响较小的参数组合;WU 等[99]验证了播撒分布均匀性受飞行高度、播种盘旋转和挡板环角度的综合影响。

未来无人机播撒的发展会更加注重结构轻量化、控制智能化和参数最优化。结构优化解决“撒得稳”的问题,变量控制技术实现“撒得准”,而作业参数优选确保“撒得匀、撒得高效”。三者有机结合为大载荷农用无人机在农业播种与施肥领域的广泛应用奠定了基础。

3.3 农资吊运

农资吊运无人机是指利用具备较强载荷能力的多旋翼或复合翼无人机,将化肥、农药、饲料、果蔬、谷物等农用物资或农产品在农田、果园和收储点之间进行短距离空中运输的一种新型作业方式。与传统地面运输不同,大载荷农用无人机运输不受地形条件限制,可垂直起降、快速转场,特别适合用于丘陵山区、果园及道路不便地区的田间物流运输[100-102]。如图 6 所示,南宁一香蕉园正在利用农用无人机运输香蕉。研究表明,无人机运输在果园[103]、茶叶[104]等方面应用有显著的经济性与时效性,能够有效降低人工成本并提升农产品流通效率。使用无人机运输农用物资或农产品时,主要是利用缆绳将其悬挂于多旋翼无人机下方,形成无人机吊挂载荷系统,其最大可承载量达 80 kg[105]。然而,该系统在飞行过程中,悬挂的负载容易出现摆动,摆动幅度过大可能会影响无人机姿态不稳,引发偏航或失控等风险。因此为了抑制载荷摆动提升系统稳定性,张珂等[106]提出了一种基于能量分析的四旋翼无人机吊挂飞行系统非线性耦合防摆控制器,可在改变飞行目标位置、吊挂负载质量、附加初始摆动时

均有良好的控制效果；杜昊等[107]针对四旋翼吊挂系统的位置跟踪与容错控制问题，设计了基于裁剪机制近端策略优化算法的控制方案，实现了载荷摆动的有效抑制和系统鲁棒性的提升。大载荷农用无人机运输中的另一个关键问题是识别与导航定位。为了解决复杂环境下目标识别精度不足的问题，谢纪元等[108]提出了一种改进的 YOLO v10 检测模型，可实现复杂场景中小目标的精准识别；尹旖旎等[109]构建了面向三维导航的双分支神经网络模型，显著提升了无人机导航系统在三维空间中的定位与路径预测精度，为自主导航与避障提供了技术支持。无人机运输为解决农业物流“最后一公里”问题提供了新途径，在农业领域有很大的发展前景。未来学者应继续在更大负载下探索提升系统的稳定性，将运输场景拓展到农机具领域。同时创制大载荷农用无人机与地面车辆协同工作，负责短程运输，此技术的应用将会进一步提升农业作业效率。



图 6　农用无人机运输香蕉

Fig. 6　Agricultural UAVs transport bananas

4　问题分析

大载荷农用无人机发展取得显著性成果，部分机型已能实现喷洒、播撒、运输等多种作业模式，为丘陵、果园等复杂环境提供了稳定作业的能力，对提高农作物生产效率、减少农药使用量、促进绿色农业发展发挥了积极作用。但仍存在以下不足亟待研究与完善：

（1）载荷能力不足，结构可靠性偏低

尽管部分机型能达到 100 kg 以上，但是载荷受限仍是制约大载荷农用无人机发展的问题之一。高载荷下的结构可靠性和气动稳定性也存在不足。多旋翼布局在高载荷状态下容易出现机臂振动和桨盘干扰，影响姿态稳定；复合翼与倾转翼机型虽然可提升升阻比，但结构复杂、维护困难，对材料强度和加工精度要求极高。目前的机体结构多采用碳纤维与铝合金组合，尚未形成针对重载作业的标准化结构设计体系。部分机型在长时间高负载作业中容易出现机架疲劳、连接部件松动等问题，安全性仍需提高。

（2）续航时间短，能源效率低

电力系统是当前大载荷农用无人机发展的主要瓶颈。纯电动系统虽然清洁可靠，但受电池能量密度限制，单次作业时间普遍仅为 15 ~ 20 min，难以满足大面积田块连续作业的需求。混合动力系统虽然可延长续航，但结构复杂、系统重量增加，功率匹配与能源转化效率仍有待提高。部分机型在高负荷条件下电机发热严重，能耗高、效率低，影响整机寿命与安全性。此外，电池热管理与快充技术尚不完善，电芯温差过大、循环衰减快等问题依然突出，导致长期使用成本偏高。

（3）飞行稳定性欠佳，作业精度不足

大载荷农用无人机的惯量大、载荷变化范围广，对飞控系统响应速度和鲁棒性提出了更高的要求。目前大多数机型仍采用改进 PID 控制或有限的自抗扰算法，该类算法结构简单、适应性较差，在突发风场、地势起伏和载荷变化时易出现姿态波动和轨迹偏差。复杂环境下的抗风能力不足，尤其在风速超过 6 m/s 时，喷洒或播撒精度明显下降。虽然部分研究引入了模糊控制、神经网络和强化学习算法，但大多数停留在仿真验证阶段，尚未形成可靠的工程应用。变量喷施、精准播撒和群体协同控制仍受限于传感器精度、感知延迟及算法稳定性，难以在实际作业中长期保持高精度。

（4）农业应用场景限制，配套技术发展不足

大载荷农用无人机在植保施药、播种施肥和农资吊运等典型作业中，对喷雾沉积控制、播撒均匀性、吊挂稳定性、落点预测等关键技术均有较高要求，但目前相关技术发展仍不完善。下洗气流、侧风和障碍物影响显著，易造成喷洒沉积不均、播撒偏移及吊挂摆动，作业一致性较难保证。在上述应用场景中还存在喷效控制、变量播撒、吊挂抗摆、作业参数实时感知等能力不足，使得无人机在多地形、多作物和变载工况下的作业稳定性与质量难以全面满足农业生产需要。

（5）安全保障不足，行业标准滞后

随着大载荷农用无人机的功率和作业强度提升，其潜在风险显著增加。我国对无人机飞行管理实行严格分级监管，大载荷机型通常被划为中大型无人机类别，必须满足民航和农业主管部门的双重审批要求。现行法规对 25 kg 以上无人机的飞行高

度、作业范围和操作人员资质均有明确限制,导致部分机型无法在复杂地形或高强度作业场景中灵活运行。与此同时,国内尚缺乏针对 50 kg 以上无人机的系统性适航与安全评估标准。多数产品由企业自行测试,缺乏统一的质量认证与可靠性检测体系。作业过程中若出现电机故障、电池失效或通信中断,仍缺少完善的冗余保护和应急处理机制。此外,不同厂商在通信协议、数据接口和飞控参数上存在较大差异,行业标准化程度低。现阶段作业标准尚未统一,还缺乏作业质量评估体系,以致于同类机型在不同地区使用效果差异较大。监管体系也尚未完全覆盖农田作业领域,对无人机的作业备案、维修档案和数据追溯缺乏统一标准,影响了监管效率和行业透明度。

(6)应用推广困难,运维体系不完善

大载荷农用无人机的作业成本和维护门槛较高。整机价格普遍在数万元至数十万元之间,电池组与其他备用零件价格昂贵,农户个人购买积极性不足。由于机体体积大、动力系统复杂、载荷惯量大,操作控制难度明显高于中小型无人机,对飞手的技能和经验要求更高。目前行业普遍要求驾驶员具备较高级无人机操作资质或参加专项培训,但系统化培训资源有限,合格飞手数量不足。飞手在复杂环境下需同时关注高度、速度、载荷状态及喷洒参数,操作强度大,稍有不当便可能引发倾覆或碰撞风险。在运维体系方面,部分地区缺乏稳定的售后服务与零部件供应渠道,设备维护周期长,停机率高,作业季节性强的问题更加突出。

5 发展展望

大载荷农用无人机在气动结构、电力系统、飞控技术以及多任务作业能力等方面取得了显著进展,已具备喷洒、播撒和运输等多功能作业能力,成为农业装备现代化的重要机械结构。针对其在载荷结构强度、续航能力、飞行稳定性、作业精度、安全管理与应用场景适用性不足等问题,未来大载荷农用无人机的研究应重点集中在以下方面:

(1)针对结构强度不足,可推进轻量化结构设计与结构可靠性提升。未来,强度高、材料轻的碳纤维复合材料和高强铝合金将成为主流,还应结合拓扑优化与有限元分析,来实现“轻量而高强”的设计目标。结构设计可以向模块化和可维护化方向发展,设计机臂、旋翼等关键部件可快速更换与维护,以提升效率和作业可靠性。继续增加臂桨一体化和复合翼结构的应用,以改善升阻比并降低能耗。

(2)针对续航与能效瓶颈,可发展高效率电力系统与多能源协同技术。短期内可以通过改进电池热管理和电机效率来提高电力系统的续航能力。中长期则可以通过发展混合动力和氢燃料电池系统。混合动力平台可在作业时自动分配发动机与电驱系统功率,实现油电协同;氢燃料电池具备能量密度高、噪声低、排放少等优势,是未来绿色动力的主流。模块化电池仓和快速更换装置将进一步增强作业连续性。

(3)针对飞行稳定性与作业精度不足,可加强飞行智能化与精准作业技术研究。飞控系统可以融合视觉识别、激光雷达和惯性导航,来实现环境自适应和路径重规划。在喷施作业中应继续引用人工智能控制算法,实时学习飞行特征,自动调整姿态与喷洒参数,以显著提高作业稳定性。在精准作业中,可以将变量喷撒技术与作物识别、长势检测深度融合,实现按需喷施和精准播撒。

(4)针对应用场景中关键技术发展不足,可提升场景适应性与作业智能化水平。为解决复杂地形、作物高度差异、风场扰动和变载作业节奏等应用端难点,未来将重点发展多模态环境感知技术,实现对地形、作物冠层和局部风场的实时监测。建立风场自适应补偿、播撒偏移预测和喷雾飘移控制模型,减少实际作业中的质量波动。构建变载作业管理与智能补给规划机制,提高碎片化田块中的作业组织效率,并逐步形成多作物、多区域的统一作业标准体系。

(5)针对标准化不足与应用推广困难,可推动平台标准化与多场景综合应用体系。未来大载荷农用无人机将从单一作业逐步发展为能适应多场景、多任务的综合作业系统。通过实现喷洒、运输、检测等任务模块的快速更换和通用接口,实现无人机具备一机多能的作业能力,提高不同生产企业、不同平台之间的互操作性。多场景应用的发展不仅能提升设备利用率,也将推动大载荷农用无人机由单一装备向农业综合智能作业系统转变。

参 考 文 献

[1] 罗锡文, 胡炼, 廖娟,等. 水稻无人化智慧农场探索与实践[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 277 – 290.
LUO Xiwen, HU Lian, LIAO Juan, et al. Exploration and practice of unmanned smart rice farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 277 – 290. (in Chinese)

[2] 兰玉彬, 赵德楠, 张彦斐,等. 生态无人农场模式探索及发展展望[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 312 – 327.
LAN Yubin, ZHAO Denan, ZHANG Yanfei, et al. Exploration and development prospect of eco-unmanned farm modes[J].

Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 312 - 327. (in Chinese)
[3] 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. (in Chinese)
[4] 《农业无人机行业白皮书(2024/2025)》在京发布[J]. 农村新技术, 2025(9): 48 - 49.
[5] 罗锡文, 廖娟, 胡炼,等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8 - 17,15.
LUO Xiwen,LIAO Juan,HU Lian, et al. Rsearch progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8 - 17,15. (in Chinese)
[6] 原鹏丽,陈胜娜,慕军营,等. 低空经济赋能农业新质生产力专利技术分析[J/OL]. 中国农业文摘——农业工程,1 - 10. [2025 - 10 - 27]. https://doi.org/10.19518/j.cnki.cn11 - 2531/s.20251104.006.
[7] REJEB A, ABDOLLAHI A, REJEB K, et al. Drones in agriculture: a review and bibliometric analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198:107017.
[8] CHEN H, LAN Y, FRITZ B, et al. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 38 - 49.
[9] 孙竹, 顾伟, 崔龙飞,等. 智能植保装备关键技术研究现状与发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(4): 1 - 23.
SU Zhu,GU Wei,CUI Longfei, et al. Research status and development trends of key technologies for intelligent plant protection equipment[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 1 - 23. (in Chinese)
[10] QUAN X, GUO Q, MA J, et al. The economic effects of unmanned aerial vehicles in pesticide application: evidence from Chinese grain farmers[J]. Precision Agriculture, 2023, 24(5): 1965 - 1981.
[11] 李博勋, 刘先宝, 冯志军,等. 橡胶树叶部病害大载荷植保无人机防治技术规程[J]. 热带农业科学, 2023, 43(11): 52 - 59.
LI Boxun,LIU Xianbao,FENG Zhijun, et al. Technical cord for prevention and control technology of rubber leaf diseases by heavy-load plant protection unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2023, 43(11): 52 - 59. (in Chinese)
[12] 吴和龙, 白越, 裴信彪,等. 基于 CPF - EKF 算法的大载荷植保无人机姿态解算方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 24 - 31,77.
WU Helong,BAI Yue,PEI Xinbiao, et al. Attitude calculation method based on CPF - EKF for large load plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 24 - 31,77. (in Chinese)
[13] 宋文杰, 罗子乐. 大载荷无人机平台设计与选型[J]. 工程建设与设计, 2019(18): 118 - 120.
SONG Wenjie,LUO Zile. Design and selection of UAV platform with large load[J]. Construction & Design for Project, 2019(18): 118 - 120. (in Chinese)
[14] 薛新宇, 顾伟, 徐阳,等. 农用无人飞机法规与标准制定现状分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 1 - 10.
XUE Xinyu,GU Wei,XU Yang, et al. Review on current state of agricultural UAS regulations and standards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 1 - 10. (in Chinese)
[15] 王爱芸, 陆驰. 基于 CiteSpace 的我国农用无人机研究趋势可视化分析[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2025, 9(3): 23 - 31.
WANG Aiyun,LU Chi. Visualization analysis of research trends in agricultural drones in China based on CiteSpace[J]. Journal of Southwest Forestry University (Social Sciences), 2025, 9(3): 23 - 31. (in Chinese)
[16] 卞青青. 农用无人机结构拓扑优化与增材制造研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(5): 197 - 201.
BIAN Qingqing. Structural topology optimization and additive manufacturing of agricultural UAV[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(5): 197 - 201. (in Chinese)
[17] 朱贺, 黄辰雷, 杨利明,等. 基于响应面法和拓扑优化的四旋翼无人机机架结构优化研究[J]. 机械设计, 2023, 40(增刊 2): 130 - 135.
ZHU He,HUANG Chenlei,YANG Liming, et al. Optimization of quadrotor UAV frame structure based on response surface method and topology optimization[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(Supp.2): 130 - 135. (in Chinese)
[18] 王志鹏, 刘辉, 操建. 四旋翼无人机机架结构多性能约束拓扑优化设计[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(6): 173 - 176.
WANG Zhipeng,LIU Hui,CAO Jian. Multi-performance constraint topology optimization design of quadrotor uav frame structure[J]. Machine Design and Research, 2022, 38(6): 173 - 176. (in Chinese)
[19] 罗利龙, 郭文杰, 常亮. 模块化可重构无人机机翼结构优化方法研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 164 - 170.
LUO Lilong,GUO Wenjie,CHANG Liang. Study on optimization method of the modular reconfigurable UAV's wing structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 164 - 170. (in Chinese)
[20] 左晓军, 齐元胜, 马克西姆. 基于 ANSYS Workbench 新型折叠翼无人机机翼仿真优化分析[J]. 智能制造, 2021(6): 113 - 119.
[21] 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. (in Chinese)
[22] 雷涛, 闵志豪, 付红杰,等. 燃料电池无人机混合电源动态平衡能量管理策略[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 293 – 307.
LEI Tao, MIN Zhihao, FU Hongjie, et al. Dynamic balanced energy management strategies for fuel-cell hybrid power system of unmanned air vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(12): 293 – 307. (in Chinese)
[23] RAIJMAKERS L, DANILOV D, EICHEL R, et al. A review on various temperature-indication methods for Li-ion batteries [J]. Applied Energy, 2019, 240: 918 – 945.
[24] ZHAO Z, JIN X. Adaptive neural network-based sliding mode tracking control for agricultural quadrotor with variable payload [J]. Computers & Electrical Engineering, 2022, 103:108336.
[25] HE Z, GAO W, HE X, et al. Fuzzy intelligent control method for improving flight attitude stability of plant protection quadrotor UAV[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6): 110 – 115.
[26] FU H, LI Z, ZHANG W, et al. Research on path planning of agricultural UAV based on improved deep reinforcement learning [J]. Agronomy-Basel, 2024, 14(11):2669.
[27] 郭晗. 农用无人机变量喷施控制系统设计与效果评价方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
GUO Han. Design of variable rate spray control system and spray characteristics evaluation for agricultural unmanned aerial vehicle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
[28] 覃剑波. 农业无人机植保作业全覆盖航线科学规划方法研究[J]. 南方农机, 2023, 54(16): 24 – 26,51.
[29] 曹光乔, 李亦白, 南风,等. 植保无人机飞控系统与航线规划研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 1 – 16.
CAO Guangqiao, LI Yibai, NAN Feng, et al. Development and analysis of plant protection UAV flight control system and route planning research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 1 – 16. (in Chinese)
[30] 金永奎, 薛新宇, 秦维彩,等. 电动单旋翼植保无人机性能试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3): 56 – 61.
JIN Yongkui, XUE Xinyu, QIN Weicai, et al. Performance test of electric powered single-rotor UAV for plant protection[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3): 56 – 61. (in Chinese)
[31] 王俊凯. 基于设计心理学的固定翼植保无人机造型设计研究[J]. 农业装备技术, 2022, 48(4): 16 – 18,26.
[32] AI L, XIA H, YANG J, et al. A study on the aerodynamic impact of rotors on fixed wings during the transition phase in compound-wing UAVs[J]. Aerospace, 2024, 11(11):945.
[33] 张荣昕, 伊丽丽, 兰玉彬,等. 共轴双桨植保无人机结构设计与仿真[J]. 农机化研究, 2023, 45(9): 29 – 35.
ZHANG Rongxin, YI Lili, LAN Yubin, et al. Structural design and simulation of coaxial double propeller plant protection UAV[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(9): 29 – 35. (in Chinese)
[34] 何志辉, 高万林, 何雄奎,等. 纵列式电动无人直升机在农药喷洒中的应用前景[J]. 农药科学与管理, 2020, 41(4): 24 – 27.
HE Zhihui, GAO Wanlin, HE Xiongkui, et al. Application prospect of tandem electric unmanned helicopter in pesticide spraying[J]. Pesticide Science and Administration, 2020, 41(4): 24 – 27. (in Chinese)
[35] 李永超. 六旋翼农用无人机的集成设计及其气动特性分析[D]. 青岛: 青岛农业大学, 2022.
LI Yongchao. Integrated design and aerodynamic characteristics analysis of six rotor agricultural UAV[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[36] 陈铭. 共轴双旋翼直升机的技术特点及发展[J]. 航空制造技术, 2009(17): 26 – 31.
CHEN Ming. Technology characteristic and development of coaxial rotor helicopter [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(17): 26 – 31. (in Chinese)
[37] 陈泽荣, 储远振, 孙伟鹏,等. 重载无人机共轴双旋翼系统的气动性能分析[J]. 机电工程技术, 2025, 54(9): 132 – 137.
CHEN Zerong, CHU Yuanzhen, SUN Weipeng, et al. Aerodynamic analysis of coaxial twin rotor system for heavy-loaded UAV [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(9): 132 – 137. (in Chinese)
[38] 李雯芮, 何杰, 张建成,等. 共轴双旋翼无人机气动优化研究[J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(4): 26 – 34.
LI Wenrui, HE Jie, ZHANG Jiancheng, et al. Research on aerodynamic optimization of the coaxial twin rotor unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2025, 39(4): 26 – 34. (in Chinese)
[39] 李继宇, 展义龙, 欧阳帆,等. 多翼单臂纵列式布局电动无人机旋翼间距优化及能耗试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 87 – 95.
LI Jiyu, ZHAN Yilong, OU Yangfan, et al. Optimization of rotor spacing and energy consumption test for multi-rotorsingle arm tandem electric UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 87 – 95. (in Chinese)
[40] KHAH M, ESMAILIFAR S, SAADAT S. Design and development of a novel multirotor configuration with counter-rotating coaxial propellers[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):11580.
[41] 雷瑶, 叶艺强, 王恒达,等. 不同旋翼间距下共轴双旋翼无人机的气动特性[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(3): 487 – 492.
LEI Yao, YE Yiqiang, WANG Hengda, et al. Study on aerodynamic characteristics of coaxial rotors UAV with different rotor spacing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(3): 487 – 492. (in Chinese)
[42] BERRA A, SOTO M, HEREDIA G. Aerodynamic interaction minimization in coaxial multirotors via optimized control allocation[J]. Drones, 2024, 8(9):446.

[43] KUMAR S S G, GUDIPALLI A. A comprehensive review on payloads of unmanned aerial vehicle[J]. Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2024, 27(4): 637 – 644.

[44] JIAO S, ZHANG G, ZHOU M, et al. A comprehensive review of research hotspots on battery management systems for UAVs [J]. IEEE Access, 2023, 11: 84636 – 84650.

[45] 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. (in Chinese)

[46] 徐楷, 王步宇, 帅石金. 多旋翼无人机串联混合动力系统能量管理仿真[J]. 航空动力学报, 2024, 39(6): 221 – 232.
XU Kai, WANG Buyu, SHUAI Shijin. Numerical investigation on the energy management strategies of a series hybrid unmanned multirotor aerial vehicle[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(6): 221 – 232. (in Chinese)

[47] 刘莉, 曹潇, 张晓辉,等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 6 – 33.
LIU Li, CAO Xiao, ZHANG Xiaohui, et al. Review of development of light and small scale solar/hydrogen powered unmanned aerial vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 6 – 33. (in Chinese)

[48] 刘小杰, 张英, 刘洋,等. 锂离子电池热管理系统综述[J]. 电池, 2022, 52(2): 208 – 212.
LIU Xiaojie, ZHANG Ying, LIU Yang, et al. A review on thermal management system for Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2022, 52(2): 208 – 212. (in Chinese)

[49] 杨菁国, 杜鸿达, 郑心纬, 等. 无人机用锂离子电池散热设计[J]. 自动化应用, 2017(9): 65 – 68.

[50] WANG S, WANG H, CHANG M, et al. A novel battery thermal management system for an unmanned aerial vehicle using the graphene directional heat transfer structure[J]. Journal of Power Sources, 2023, 588:233726.

[51] XIAO C, WANG B, ZHAO D, et al. Comprehensive investigation on lithium batteries for electric and hybrid-electric unmanned aerial vehicle applications[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 38:101677.

[52] 史卫豪. 大型无人机锂离子电池荷电状态在线估计方法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
SHI Weihao. Research on online estimation method of Li-ion battery state of charge for large UAV[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[53] 胡晓亚, 郭永芳, 张若可. 锂离子电池健康状态估计方法研究综述[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 126 – 133.
HU Xiaoya, GUO Yongfang, ZHANG Ruoke. Review of state-of-health estimation methods for lithium-ion battery[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 126 – 133. (in Chinese)

[54] 林晋立. 多旋翼农用无人机能源载荷匹配技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
LIN Jinli. Research on energy load matching technology of multi rotor agricultural UAV[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[55] 胡春明, 闫丁洋, 刘娜,等. 油电混合动力无人机能量管理策略的对比仿真研究[J]. 内燃机工程, 2022, 43(4): 74 – 83.
HU Chunming, YAN Dingyang, LIU Na, et al. Comparison and simulation research on energy management strategies of oil-electric hybrid unmanned aerial vehicle[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(4): 74 – 83. (in Chinese)

[56] 储金城. 直线型倾转多旋翼植保无人机飞行控制方法研究[D]. 镇江: 江苏大学,2024.
CHU Jincheng. Research on flight control method of linear tilting multi-rotor plant protection UAV[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024. (in Chinese)

[57] MADEBO N W. Hybrid adaptive PID control strategy for UAVs using combined neural networks and fuzzy logic[J]. PloS One, 2025, 20(8): e0331036.

[58] GUO L, SHU X, ZHU Y. Smart farming with swarm intelligence: hybrid algorithm for optimal multi drone plant protection paths[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2025, 62(2): 215 – 225.

[59] 于少猛, 闫铭, 王鹏飞,等. 丘陵山地果园植保无人机三维路径规划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59(3): 635 – 642.
YU Shaomeng, YAN Ming, WANG Pengfei, et al. 3D path planning of plant protection UAVs in hilly mountainous orchards [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2025, 59(3): 635 – 642. (in Chinese)

[60] YANG F, FANG X, GAO F, et al. Obstacle avoidance path planning for UAV based on improved RRT algorithm[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022, 2022:4544499.

[61] 白志坤, 陈兵, 高山,等. 农用无人机施药技术应用研究现状[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(9): 54 – 61.
BAI Zhikun, CHEN Bing, GAO Shan, et al. Current status of research on the application of agricultural UAV application technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(9): 54 – 61. (in Chinese)

[62] 刘晨浪, 韩海亚, 徐淑,等. 植保无人机施用苏云金杆菌制剂对荔枝尺蛾的田间防治效果[J]. 中国果业信息, 2024, 41(11): 76 – 79.

[63] 詹欣坚, 黄锐浩, 徐淡云,等. 大疆 T20 植保无人机在防治柑橘害虫中的应用研究[J]. 南方农机, 2022, 53(21): 32 – 36.
ZHAN Xinjian, HUANG Ruihao, XU Danyun, et al. Study on the application of DJI Agras T20 plant protection drone in the control of citrus pests[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(21): 32 – 36. (in Chinese)

[64] 陈盛德, 廖玲君, 徐小杰,等. 中国植保无人机及其施药关键技术的研究现状与趋势[J]. 沈阳农业大学学报, 2023,

54(4): 502 - 512.
CHEN Shengde, LIAO Lingjun, XU Xiaojie, et al. Research status and trends of plant protection UAV and its key technology of spraying in China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(4): 502 - 512. (in Chinese)
[65] WEN S, ZHANG Q, DENG J, et al. Design and experiment of a variable spray system for unmanned aerial vehicles based on PID and PWM control[J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(12):2482.
[66] WANG P, HANIF A, YU S, et al. Development of an autonomous drone spraying control system based on the coefficient of variation of spray distribution[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227:109529.
[67] WANG L, LAN Y, YUE X, et al. Vision-based adaptive variable rate spraying approach for unmanned aerial vehicles[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(3): 18 - 26.
[68] LIU X, LIU Y, CHEN X, et al. LiDAR-assisted UAV variable-rate spraying system[J]. Agriculture, 2025, 15(16):1782.
[69] 谢英杰, 王国宾, 王宝聚, 等. 植保无人机喷施除草剂喷头选择及参数优化[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 61 - 69.
XIE Yingjie, WANG Guobin, WANG Baoju, et al. Selection of nozzle type and parameter optimization in herbicide spraying process of plant protection UAV[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4): 61 - 69. (in Chinese)
[70] CHEN S, LAN Y, ZHOU Z, et al. Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV[J]. Agronomy, 2020, 10(2):195.
[71] 杨光玉. 大载荷植保无人机智能变量喷施系统研制与试验[D]. 淄博:山东理工大学, 2022.
YANG Guangyu. Development and test of intelligent variable spraying system for large-load plant protection UAV[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)
[72] 胡启圣. 一种植保无人机雾化旋转喷头: 202322608946.3[P]. 2024 - 05 - 21.
[73] 赵德楠, 兰玉彬. 植保无人机静电喷雾技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12): 15 - 28.
ZHAO Denan, LAN Yubin. Review and prospects of electrostatic spraying technology for plant protection UAVs[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(12): 15 - 28. (in Chinese)
[74] ZHAO D, COOPER S, CHIMA P, et al. Development and characterization of a contact-charging electrostatic spray UAV system[J]. Agriculture, 2024, 14(3):467.
[75] 张亚莉, 李万坚, 兰玉彬, 等. 基于尖端放电技术的接触式航空静电喷雾系统[J]. 农机化研究, 2025, 47(11): 177 - 183.
ZHANG Yali, LI Wanjian, LAN Yubin, et al. Contact-type aerial electrostatic spray system based on corona discharge technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(11): 177 - 183. (in Chinese)
[76] GATKAL N, NALAWADE S, BHANAGE G, et al. Review of UAVs for efficient agrochemical spray application[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(1): 1 - 9.
[77] ZHANG H, WEN S, CHEN C, et al. Downwash airflow field distribution characteristics and their effect on the spray field distribution of the DJI T30 six-rotor plant protection UAV[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(2): 10 - 22.
[78] 廉琦. 六旋翼植保无人机下洗气流变化机理及喷头安装位置的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
LIAN Qi. Study on the variation of downwash and theinstallation position of nozzles in a six-rotor plantprotection drone[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[79] XU X, CHEN S, LI Z, et al. Distribution characteristics of rotor airflow and droplet deposition of plant protection UAVs under varying rotor-nozzle distances[J]. Agriculture, 2025, 15(19):1995.
[80] 王雪儿, 邱林, 丁文兵, 等. 植保无人机飞行参数对不同生育期水稻上雾滴沉积分布的影响[J]. 中国植保导刊, 2025, 45(6): 67 - 71.
[81] 张海艳, 兰玉彬, 文晟, 等. 无人机旋翼风场作用下雾滴在水稻植株上的黏附量模型构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 40 - 50.
ZHANG Haiyan, LAN Yubin, WEN Sheng, et al. Modelling approach of spray retention on rice in plant protection using unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(18): 40 - 50. (in Chinese)
[82] 张瑞瑞, 李龙龙, 文瑶, 等. 植保无人机喷施雾滴沉积特性的荧光示踪分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 47 - 55.
ZHANG Ruirui, LI Longlong, WEN Yao, et al. Fluorescence tracer method for analysis of droplet deposition pattern characteristics of the sprays applied via unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 47 - 55. (in Chinese)
[83] 王昌陵, 宋坚利, 何雄奎, 等. 植保无人机飞行参数对施药雾滴沉积分布特性的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 109 - 116.
WANG Changling, SONG Jianli, HE Xiongkui, et al. Effect of flight parameters on distribution characteristics of pesticide spraying droplets deposition of plant-protection unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 109 - 116. (in Chinese)
[84] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 40 - 46.
CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiyu, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 40 - 46. (in Chinese)

[85] ZHAN Y, CHEN P, XU W, et al. Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 32 – 45.

[86] 孙涛, 张宋超, 薛新宇,等. 小麦不同生育期单旋翼植保无人机施药作业参数优化[J]. 植物保护学报, 2021, 48(3): 501 – 509.
SUN Tao,ZHANG Songchao,XUE Xinyu, et al. Optimization of operation parameters for single-rotor plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) at different growth stages of wheat[J]. Journal of Plant Protection, 2021, 48(3): 501 – 509. (in Chinese)

[87] LI H, ZHU H, JIANG Z, et al. Performance characterization on downwash flow and spray drift of multirotor unmanned agricultural aircraft system based on CFD[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(3): 1 – 8.

[88] 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):e29837.

[89] 宋灿灿, 王国宾, 韩金钢,等. 农用无人机播撒装置与技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2025,56(1): 110 – 122.
SONG Cancan,WANG Guobin,HAN Jingang, et al. Review of research progress on agricultural UAV spreading devices and technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 110 – 122. (in Chinese)

[90] WANG X, ZHOU Z, CHEN B, 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.

[91] 宋灿灿, 周志艳, 姜锐,等. 气力式无人机水稻撒播装置的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 80 – 88,307.
SONG Cancan,ZHOU Zhiyan,JIANG Rui, et al. Design and parameter optimization of pneumatic rice sowing device for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 80 – 88,307. (in Chinese)

[92] 黄小毛, 徐胡伟, 张顺,等. 油菜成条飞播装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 78 – 87.
HUANG Xiaomao,XU Huwei,ZHANG Shun, et al. Design and experiment of a device for rapeseed strip aerial seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 78 – 87. (in Chinese)

[93] 吴子敬, 杨国平, 蔡佳盛,等. 水稻无人机多排型槽式条直播排种装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(10): 99 – 106.
WU Zijing,YANG Guoping,CAI Jiasheng, et al. Design and experiment of multi-row slot stripping direct sowing device for rice UAV[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(10): 99 – 106. (in Chinese)

[94] SU D, YAO W, YU F, et al. Single-neuron PID UAV variable fertilizer application control system based on a weighted coefficient learning correction[J]. Agriculture, 2022, 12(7):1019.

[95] SONG C, ZHOU Z, ZANG Y, et al. Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180:105832.

[96] 包明艳, 骆庭宝, 鲁良宣. 无人机光谱影像与变量施肥技术在水稻追肥中的集成应用[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(10): 144 – 147.

[97] ZHU Y, HUANG X, YIN C, et al. Key parameters determination based on seed movement process simulation for rice strip aerial seeding via UAV[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237:110596.

[98] 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 CSAE, 2020, 36(14): 138 – 147. (in Chinese)

[99] WU Z, LI M, LEI X, et al. Simulation and parameter optimisation of a centrifugal rice seeding spreader for a UAV[J]. Biosystems Engineering, 2020, 192: 275 – 293.

[100] 孟凯宁, 李娟, 钟婉汝. 低空农用无人机研究现状与工业设计赋能农业发展路径[J]. 包装工程, 2025, 46(16): 55 – 69,14.
MENG Kaining,LI Juan,ZHONG Wanru. Research status of low-altitude agricultural UAVs and the path of industrial design empowering agricultural development[J]. Packaging Engineering, 2025, 46(16): 55 – 69,14. (in Chinese)

[101] 段洁利, 李伟希, 徐兴, 等. 山地果园无人机运送关键技术及其应用前景分析[J]. 中国农机装备, 2023(7): 1 – 9.

[102] 宋月鹏, 张红梅, 高东升,等. 国内丘陵山地果园运输机械发展现状与趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 50 – 55,67.
SONG Yuepeng,ZHANG Hongmei,GAO Dongsheng, et al. Development status and trend of domestic orchard transportation machinery in hilly and mountainous areas[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(1): 50 – 55,67. (in Chinese)

[103] 王学昌, 徐文波, 郑永军,等. 果园低空经济产业的现状与发展趋势[[J/OL].智慧农业(中英文),1 – 23. [2025 – 10 – 27]. https://link.cnki.net/urlid/10.1681.S.20250728.1529.002.
WANG Xuechang,XU Wenbo,ZHENG Yongjun, et al. Current status and development trend of the low-altitude economy industry in orchards[J/OL]. Smart Agriculture, 1 – 23[2025 – 10 – 27]. https://link.cnki.net/urlid/10.1681.S.20250728.1529.002. (in Chinese)

(下转第 37 页)

2025, 13: 3917 – 3928.

[21] 宁凯凯. 面向森林巡护与扑救的无人机路径规划算法研究[D]. 西安：西安理工大学, 2023.
NING Kaikai. Research on UAV path planning algorithms for forest patrol and firefighting[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)

[22] 王盛. 最短任务时长的多无人机协同全覆盖路径规划方法[D]. 武汉：华中科技大学, 2021.
WANG Sheng. Multi-UAV collaborative complete-coverage path planning for minimum mission time[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[23] 张志宇,寇家俊,张重远,等. 基于本征正交分解和克里金代理模型的油浸式变压器绕组温度场快速计算方法[J]. 电工技术学报, 2025,40(7): 2215 – 2225.
ZHANG Zhiyu, KOU Jiajun, ZHANG Zhongyuan, et al. A fast calculation method for temperature field of oil immersed transformer windings based on proper orthogonal decom positionand kriging surrogate model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(7): 2215 – 2225. (in Chinese)

[24] 习凤,林逢春. 结合模拟退火算法与遗传算法的动态协同路径规划研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(19): 161 – 164.
XI Feng, LIN Fengchun. Research on dynamic collaborative path planning combining simulated annealing algorithm and genetic algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(19): 161 – 164. (in Chinese)

[25] 叶胜挺,王凯,曾中荣,等. 基于遗传-变邻域搜索算法的堆垛机作业调度优化[J]. 电子设计工程, 2024, 32(19): 6 – 10, 15.
YE Shengting, WANG Kai, ZENG Zhongrong, et al. Optimisation of stacker job scheduling based on genetic-variable neighbour hoodsearch algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(19): 6 – 10, 15. (in Chinese)

[26] 陈海, 何开锋, 钱炜祺. 多无人机协同覆盖路径规划[J]. 航空学报, 2016,37(3): 928 – 935.
CHEN Hai, HE Kaifeng, QIAN Weiqi. Cooperative coverage path planning for multiple UAVs[J]. Journal of Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 928 – 935. (in Chinese)

[27] 周枫,王卫东. 一种基于改进人工蜂群算法的无人机航迹规划方法[J]. 计算机与数字工程, 2024, 52(10): 2890 – 2896.
ZHOU Feng, WANG Weidong. A UAV path planning method based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Computer & Digital Engineering, 2024, 52(10): 2890 – 2896. (in Chinese)

[28] 李佳阳,王振华,张继红,等. 基于改进自适应遗传算法的渠系优化配水分析[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(11): 1150 – 1156, 1188.
LI Jiayang, WANG Zhenhua, ZHANG Jihong, et al. Optimal water allocation in canal systems based on an improved adaptive genetic algorithm[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(11): 1150 – 1156, 1188. (in Chinese)

(上接第 15 页)

[104] 刘天熙. 多旋翼无人机运送高山茶青技术及其前景[J]. 福建茶叶, 2025, 47(5): 140 – 143.

[105] 袁肖卓尔, 诸兵. 四旋翼无人机——吊挂载荷系统建模与控制综述[J]. 信息与控制, 2020, 49(4): 385 – 395.
YUAN Xiaozhuoer,ZHU Bing. Survey on modeling and control of quadrotor UAV-slung load system[J]. Information and Control, 2020, 49(4): 385 – 395. (in Chinese)

[106] 张珂, 赵笠焱, 石怀涛,等. 四旋翼无人机吊挂系统防摆控制方法研究[J]. 控制工程, 2023, 30(2): 222 – 230.
ZHANG Ke,ZHAO Liyan,SHI Huaitao, et al. Research on anti-swing control method of quadrotor UAV hanging system[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(2): 222 – 230. (in Chinese)

[107] 杜昊, 郭玉英, 黄志. 基于强化学习的无人机吊挂系统容错与抗摆控制研究[J/OL]. 控制工程,1 – 11. [2025 – 10 – 27]. https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20241022.
DU Hao,GUO Yuying,HUANG Zhi. Reinforcement learning based fault tolerance and anti-swing control for quadrotor UAV with a slung load[J/OL]. Control Engineering of China, 1 – 11. [2025 – 10 – 27]. https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20241022. (in Chinese)

[108] 谢纪元, 张东彦, 牛圳,等. 基于 YOLOv10 – MHSA 的“三北”工程内蒙古地区植树位点精准检测研究[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(3): 108 – 119.
XIE Jiyuan,ZHANG Dongyan,NIU Zhen, et al. Accurate detection of tree planting locations in Inner Mongolia for the three north project based on YOLOv10 – MHSA[J]. Smart Agriculture, 2025, 7(3): 108 – 119. (in Chinese)

[109] 尹旖旎, 孙迅, 蒋林,等. 卫星拒止条件下基于双分支神经网络模型的 GNSS 组合定位算法[J]. 遥测遥控, 2025, 46(5): 36 – 44.
YIN Yini, SUN Xun, JIANG Lin, et al. Dual-branch neural network for GNSS localization prediction in GNSS-denied environments[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(5): 36 – 44. (in Chinese)