

# 无人机施药技术研究现状与趋势分析

沈德战<sup>1</sup>, 张园<sup>1,2</sup>, 韦丽娇<sup>1,3</sup>, 赵振华<sup>1,4</sup>, 陈晓垚<sup>1</sup>, 姜蕾<sup>5</sup>

(1.中国热带农业科学院农业机械研究所, 广东 湛江 524091; 2.广东省农业类颗粒体精量排控工程技术研究中心, 广东 湛江 524000; 3.湛江市类颗粒体动力学及精准精量排控重点实验室, 广东 湛江 524091; 4.农业农村部热带作物农业装备重点试验室, 广东 湛江 524091; 5.中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南 海口 571101)

**摘要:** 通过药物调控作物的生长和防控病虫害是农业生产的一项重要措施。随着现代物联农业的快速发展, 传统的施肥方式与技术已无法适应现代农业发展的需求, 与传统的人工施药相比, 无人机施药具有独特的优势, 其应用技术已成为农业机械行业的热点。文章对无人机喷洒装置的组成和工作机理进行了论述, 总结了无人机施药技术的应用优势和国内外技术现状, 对其在国内应用中存在的问题进行了成因分析, 结合行业研究方向提出了无人机施药技术发展对策及建议, 并展望了其发展趋势。

**关键词:** 无人机; 施药技术; 研究现状; 发展趋势

**中图分类号:** S252.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-2154 (2024) 01-0031-07

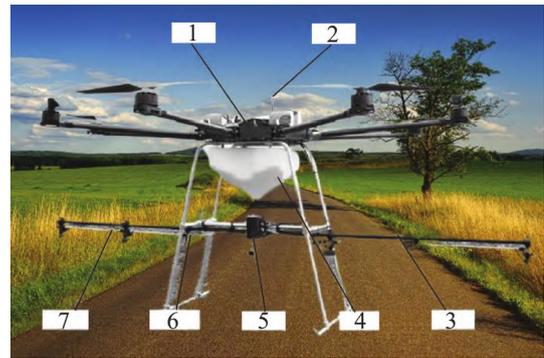
## 0 引言

我国是一个农业大国, 拥有 1.2 亿  $\text{hm}^2$  耕地<sup>[1]</sup>, 在农作物的生长发育过程中, 如何进行有效的病虫害防治是确保粮食安全和产量的关键。然而, 在我国的农业生产过程中, 植保施药仍然以人工或微型机器(电动)喷雾机为主, 与现代农业的规模化种植不相适应, 导致了监测与预警的分离; 与此同时, 人工施药劳动强度大、效率低, 施药人员中毒事故也时有发生。无人机施药作为一种新型施药技术, 由于其相对优势特点, 在农业领域的应用逐渐增多, 已经贯穿了作物的生长全过程<sup>[2-3]</sup>。因此, 加速推进无人机施药技术推广应用, 提高作物病虫害防治水平, 是保证粮食品质和安全、保护生态环境、推动农业可持续发展的需要。

## 1 概述

无人机施药是一种借助植保无人机携带药液在

作物上空喷洒药物的作业方式<sup>[4-6]</sup>, 其施药系统如图 1 所示, 主要由喷洒系统、控制系统和定位系统等组成。喷洒系统由药液管、喷头等组成, 用于施撒药剂的定点定量输送, 是植保无人机施药过程中的重要部分; 控制和定位系统是一种用于对无人机进行控制和决策的控制系统, 实现定位、导航和数据采集等功能<sup>[7]</sup>。



1. 控制系统; 2. 定位系统; 3. 喷杆; 4. 药液箱; 5. 泵;  
6. 喷头; 7. 药液管

图 1 无人机施药系统

收稿日期: 2023-07-19

基金项目: 海南省重点研发计划项目(ZDYF2024XDNY152); 广东省企业科技特派员专项项目(GDKTP2021008500); 湛江市农业类颗粒体精量排控工程技术研究中心(2022A105); 湛江市科技计划项目(2021A05194, 2020A05004)

作者简介: 沈德战(1995—), 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向为农业机械化与信息化。E-mail: 1269612874@qq.com

通讯作者: 张园(1984—), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向为农业机械化与信息化。E-mail: 418727981@qq.com

## 2 应用优势

无人机施药技术在农业生产应用中具备一定的优势。

1) 相对安全、高效的作业模式。传统的人工喷药的有效性和稳定性较差,而且人工喷药时存在农药残留的危险,有损操作人员的身体健康。而无人机喷药采用远程控制,能有效地保障操作人员的安全。除此之外,无人机1次飞行可以喷洒10~15亩地(1亩=0.067 hm<sup>2</sup>),作业效率高<sup>[8]</sup>。一般1台无人机1天可以喷洒400~800亩,而人工1天仅喷洒8~10亩,效率高几十倍<sup>[9]</sup>。

2) 突出的防治省药节水能力。植保无人机施药时,其旋翼产生的向下气流可增加雾流对作物的渗透力,使叶片正反两面有药附着,渗透性强,能被作物均匀吸收,防治效果和农药利用率较人工喷药效果更好,可节约农药30%、节约用水量90%。

3) 良好的适应性和灵活性。据统计,我国山脉、高原和丘陵占全国总面积的69%<sup>[10]</sup>。先进的无人机施药技术可不受地形、作物高度、周边环境等因素的影响,适应性更强,很好地解决了高秆作物、果树、复杂地形等施药难的问题。

4) 有效避免机械损伤作物。与传统的农业机械相比,无人机喷洒的药滴更容易附着在作物的表面,可有效避免作物与器械多次接触造成的损伤、损坏。

## 3 发展现状

### 3.1 国外发展概况及关键技术

当前,美国和日本的植保无人机技术相对发达,处于世界领先水平。其次,澳大利亚、韩国等农业发达国家70%以上的农药喷洒都是通过无人机作业完成的。其中,日本是无人机植保技术最发达的国家,自90年代以来,日本已将农用无人机应用于大田作物、果树、蔬菜等作物的病虫害防治方面。近几年,日本农用植保无人机由于其单位面积施药量小、作业效率高、农药飘动小等优势而迅速发展。据统计,日本使用无人机进行害虫控制的面积超过45%。

当前美国的农业航天技术领域,以实时影像处理系统、变量喷洒系统设计和多种传感器信息系统的集成设计为研究重点,以实现施药作业实时可视化监控<sup>[11]</sup>;可变量喷射施药系统使农药资源的回收

利用更合理、有效,实现了高效节能和环保减排的目的;多传感器数据融合技术使复杂系统的综合表达方式更为完整和明确,改善了系统响应的精确度和快速性,减少了系统的决策风险。美国GT-MAX农机公司<sup>[12]</sup>的植保飞机,其飞行控制结构为内环式,并集成三轴式惯性加速度计、航向磁强计、声纳、雷达测高仪和DGPS等多个传感器的数据融合技术,可实现施药作业精确定位等功能。

韩国农业机械化水平较高,农业无人机施药技术依赖中国和日本出口,因其较为宽松的政策法规以及在农业无人机市场上较高的开放度和接受程度,农业无人机施药技术发展较为稳定。纵观国际现状,各发达国家不仅注重植保施药作业对环境的影响,也注重农用喷雾技术、遥感技术和精准导航控制技术等的研究,以减少农药喷洒漂移量,提高农药利用率。

#### 3.1.1 喷雾技术

喷雾技术是无人机施药作业的一项关键技术。自20世纪90年代以来,美国一直在生产最先进的空中静电喷雾器,用于各种小型螺旋桨驱动的飞机上。近年来,美国的专家和学者们一直在测试和研究空中静电涂层系统的抗漂移性能;美国农业部农业研究服务署(USDA-ARS)的CARLTON等<sup>[13]</sup>设计的电动旋转静电喷头能有效防止药液的漂移;美国喷雾系统公司<sup>[14]</sup>生产的额宽幅扁型喷头和低压扇形喷头具有自动控制的功能,可根据压力变化产生不同雾型,从而获得更好的附着效果。

#### 3.1.2 遥感技术

遥感技术是一种通过无接触的方式获得由目标自身和目标所表示的地区和事物的特征,并对所获得的数据进行处理和提取的技术。无人机携带遥感设备(高光谱、多光谱相机和热成像仪等),利用作物的光合作用和水分蒸发原理监测农业病虫害情况;在日本,大多数情况下都是使用微型无人机携带照相设备,通过SfM软件对其进行数据分析,获得稻米的长势等农业情况。美国无人机技术公司PrecisionHawk、Agribotix、DroneDeploy<sup>[15]</sup>研究的农业遥感技术应用于农作物的估产、土壤关键属性、农业灾害监测及精准农业服务等,通过遥感技术,利用无人机采集的数据生成精准农业NDVI指数图,

分析植被状况和植被覆盖度信息。

### 3.1.3 精准导航控制技术

精准农业空中施药技术是利用及时、准确的信息采集技术和现代信息处理技术,实现减少施药量、高效、省力的综合技术。用GPS确定无人机与需要喷洒地点的位置关系,用飞行控制器进行航路规划,并开启可变系统装置,进行精确、定点、超低量、高效喷洒。尹选春等<sup>[16]</sup>提出了由无人直升机携带伪卫星设备进行导航控制,并验证了导航精度和可靠性比GPS高;IWAHORI等<sup>[17]</sup>开发了一种由无人直升机携带的3D GIS地图系统,用于精确的空中测量;美国雅马哈发动机公司研制的RMA X型工业无人直升机采用精确喷药的方法控制水稻病虫害;SUZUKI等<sup>[18]</sup>拟把非线性模型控制算法用于小型无人机自动避障控制与导航中;NONAKA等<sup>[19]</sup>设计了外部干扰、地面控制站和无人机动力学模型,利用滑模控制算法减弱外部干扰,降低模型误差,实现了无人机顺利起降及悬停于空中的平稳控制。

## 3.2 国内发展概况

农业无人机在中国起步较晚,但发展迅速<sup>[20]</sup>。2008年,国家“863”计划课题——“水田超低空,低体运用技术研究及装备创新”的正式落地,表明我国科研机构正式步入无人机运用技术探索时期<sup>[21]</sup>。2010年,我国第1架自主研发的施药无人机成功问世<sup>[22]</sup>。2014年,中央一号文件提出“加快农用航空建设”,推进生态友好型农业。2015年,农业农村部编制了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动计划》,以及个别省份地方性补贴政策的出台,促进了无人机施药的快速发展。2017年,农业农村部首次将农业无人机纳入农机补贴。到2020年,通过产学研等合作方式,中国农业无人机产业得到了迅猛发展,诞生了大疆创新、极飞科技、汉和、极目等诸多代表性农业无人机品牌。2021年,大疆T30植保无人机搭载了枝向对靶技术和球型雷达系统,提高了作物对药液的吸收以及解决了植保无人机在极端天气无法及时避让障碍物的问题。极飞无人机配置的RTK导航系统提高了施药的精确度,其研发的离心变量喷洒系统解决了传统无人机因轴承摩擦而产生的喷药效率和药液漂移问题。

在农业无人机自主研发和创新方面,我国虽已达到了相当的高度,但依然有较大的提升空间。无人机的可变量施药是植保技术发展的首要趋势之一,通过系统控制喷洒药量可以解决农药过量使用的问题,提高农药使用效率。王玲<sup>[23]</sup>设计的基于PWM的变量喷雾测控系统可以通过软件远程调整无人机的应用状态和参数;王大帅等<sup>[24]</sup>开发了基于LabVIEW的软件来控制地面站,并使用了多个传感器相结合技术进行实时监控施药参数的变化;王林惠等<sup>[25]</sup>采用图像处理技术识别作物区与非作物区,绘制出作物处方图,然后控制喷头实施精准施药,理想条件下,减施率可达32.7%。

自主避障是无人机提升适用性的必然选择,兰玉彬等<sup>[26]</sup>比较了各种农用无人机避障技术的适用范围,并对其主要避障传感器进行了比较,提出了多种避障技术组合、实时主动避障技术、建立辅助避障体系和避障程序规范等方面的研究方向;李海林等<sup>[27]</sup>提出一种基于激光位移传感器的避障技术,实现了飞行过程中的动态避障。肖儒亮<sup>[28]</sup>利用开源APM作为四旋翼无人机的核心,完成了避障系统的软硬件设计,实现了避障测距与控制。

药水漂移是影响无人机施药效果的重要因素,降低药水漂移的方法主要有研制减漂喷头、添加飞防助剂、优化喷洒技术等。张亚坤<sup>[29]</sup>对喷嘴的内腔直径、V型槽角、相对切深进行了优化,并设计了用于控制漂移的喷嘴;董祥<sup>[30]</sup>将雾滴的沉积分为界面接触期、水平扩散期、收缩期和弹离期4个阶段,在收缩期结束后,雾滴是否还有足够的能量从界面中分离出来,这是导致雾滴是否发生反射或沉淀的重要因素;王潇楠<sup>[31]</sup>提出了一种基于水滴运动速率和水滴直径的水滴漂移模型,可以有效地预测出水滴的漂移潜能,并得出了2个水滴喷嘴在一定程度上叠加后,水滴的直径增大,水滴的动能增大,并减小了漂移的结论。赵春江等<sup>[32]</sup>研制了一种用于航空农用的药雾分布和漂移趋势预测系统,可实现药物雾气漂移趋势预测。张瑞瑞等<sup>[33]</sup>研制的飞机喷雾滴沉积特征分析系统由雾滴采集介质、感染区识别编码、沉淀特征分析3部分组成,可实现药液快速精准检测。

静电喷射系统是以电荷的相反吸收原理为基础,通过电场力、重力、喷射压力等因素的影响,使液

滴远离靶板,从而改善了沉积性能。茹煜等<sup>[34]</sup>为使旋翼内的湍流流动转化成层流,并使电极保持干燥,采用了一种具有8 kV的锥形电极,既能较好地降低水滴的漂移,又能显著地增加水滴的沉积量。王继环设计的静电喷嘴,其内部为不锈钢环形电极,外部为PVC,其优点是重量轻,绝缘性能好,比无静电喷嘴更好。

## 4 面临的主要问题

目前,我国植保无人机研究仍处于初级阶段,仍存在许多问题需要解决<sup>[35]</sup>。

### 4.1 核心关键技术研究滞后

1)不能实时自主避障。在自动飞行模式下,可以通过GPS定位和软件预先规划好飞行的轨迹,避让已知的障碍点,但不可以避让突然出现的障碍物(如飞行生物),此时无人机仍是按预先规定的轨迹飞行,无法进行实时自主避障。

2)电池续航时间短。目前植保无人机飞防作业时,2个飞行起降就需要换1组电池,时效短,给飞防作业带来很大的不便。

3)喷施组件和特定的剂量供给不足。目前,无人机在植物防护作业中所采用的喷嘴大多是常规喷嘴,雾滴谱宽、粒径不可调、雾化喷涂效果较差,对航空专用喷头、药物添加剂的研制也较落后,可供选择的种类和性能无法满足实际需求。植保无人机喷洒的农药要想发挥良好的杀虫杀草效果,药剂应该具备漂移系数小、难挥发、难蒸发、耐雨水冲刷、易渗透等特点。然而,目前尚未有制药企业生产这类农药。

### 4.2 作业人员缺少植保专业技术

目前,市场上的无人机作业团队基本上都是以飞行操作手为主,面对种类繁多的作物对象,尤其是热带特色经济作物,无人机作业人员并没有一定的农药选择和农药配比知识。农用无人机的飞行稳定性和准确性比商用的要求更高,而目前我国缺乏专门从事农业无人机施药的操作人员。

### 4.3 农业无人机行业标准体系尚不健全

虽然相关部门一直在完善农业无人机行业的标准体系和政策规程,规范农业无人机行业的发展,切实保障广大农民的根本利益,但植保无人机的制

造和作业标准规范仍不完善,缺少细化的作业规范和作业质量标准,相关部门监管困难。

### 4.4 无人机锂电池易受温度影响

锂电池具有工作性能稳定、能量密度与功率密度高、寿命长、质量轻等优点,被作为电动无人机动力源广泛使用。而无人机在飞行过程中,尤其是在极端的高温条件下,由于太阳直射无人机机体而引起光热效应,机体内积蓄大量热量,如果无人机内部没有散热系统,高温将严重影响锂电池的寿命和容量,甚至产生爆炸的危险。据相关研究表明,锂电池内部的电化学活性在温度低于15℃时明显减弱,当温度高于45℃时,电池-电解液加速的副反应作用会造成锂电池容量的衰减,故多将45℃作为锂电池工作温度的上限<sup>[36-37]</sup>。相比较于高温环境,低温环境对电池的性能影响更大。在低于-15℃的低温环境时,无人机起飞耗电量大;在低于-25℃的更低温环境时,无人机无法正常飞行<sup>[38]</sup>。无人机作业时还会遇到极端天气,如果不及时改进,将会造成不必要的损失。

### 4.5 非人为原因引起无人机失控失联

无人机在空中飞行时一旦失去控制,短时间内会以各种姿态从高处坠落,对地面的人员和设备构成严重的威胁。无人机受风力干扰或电磁干扰也会引起失联、失控的情况<sup>[39]</sup>。当无人机在飞行时遇到恶劣天气时,无人机会受到强烈的气流扰动,很容易撞击建筑物或坠入山谷;无人机在飞行过程中受到高大建筑或是山林遮挡会影响GPS信号,导致定位不准,无法完成航行,容易引起坠机事故<sup>[40]</sup>。

## 5 发展对策及建议

### 5.1 加速解决安全隐患

1)针对无人机起飞前安全检查缺失、飞行操作手操作失误、姿态模式飞行、电量耗尽和非人为因素引起的无人机失控坠落和失联问题,应及时做出预警、强化保护装置设计,例如桨叶保护罩、机身整体保护罩和降落伞防坠装置等,解决无人机因碰撞而导致的失控问题,避免因高空坠落导致的人员伤害和经济损失。

2)为有效解决无人机塑料外壳热导率较低的问题,可均布式设计铜制均热片,提高设备散热效率,

但需考虑随着铜制均热片长度的不断增加，无人机重量线性增加的问题。针对极端天气环境，可通过内设恒温系统帮助机体散热，调节机体电池周围温度，提高无人机的工作稳定性和安全性<sup>[41]</sup>。

### 5.2 加强植保无人机施药标准制定

全方位推进技术创新，提升植保无人机的稳定性能，适应多地区、多农作物类型的推广应用。为进一步规范行业发展，加大管理力度，制定更加完善和细化的施药标准和作业技术标准及规范。

### 5.3 充分发挥相关机构的协同作用

各有关科研单位、企业要加强协同合作，制定行业、产品、技术标准，对检验机构的建设给予高度的重视；各相关单位可以通过建立信息共享的平台或者产业网络，不断提高技术业务的衔接紧密度，实现产业资源的共享<sup>[42]</sup>。

### 5.4 完善无人机植保市场

无人机农业植保市场的规范是产业健康发展的重要前提，要充分发挥政府的主导作用。一是建立健全相关法律法规制度，营造良好的市场氛围，明确具体市场需求，建立并优化相关准入机制，强化市场的规范度，从根本上保障无人机性能符合农业植保切实需求，为市场的后续管理奠定基础。二是相关政府部门应充分认识到政策扶持在产业市场完善过程中的作用，逐步引导农业从业人员接受无人机施药，助力无人机植保市场。

### 5.5 重视新产品的更新

要最大程度发挥无人机在农业植保领域中的作用，多元化的无人机种类必不可少。相关企业要不断丰富无人机种类，切实满足实际的农业植保需求。应充分认识到实效性提升的重要性，从而在最大程度上避免出现相关功能“创新性有余、实效性不足”的现象。可以借助实际试验研究工作，收集分析植保作业过程中的信息，切实提升应用过程中的精细化程度，通过精细化工作的优化，解决具体运行过程中的操作、维护以及各种边缘化问题，以此延伸产业链条。

### 5.6 健全产品推广体系

生产的本质是服务应用，要有效发挥无人机在农业植保领域产业的作用，必须从提高相关使用人员的使用意识入手<sup>[43]</sup>。因此，应利用多样化的手段

不断完善推广体系：一是出台农机使用补贴政策，提高相关人员的积极性；二是充分发挥基层作用，通过村镇牵头宣传教育，向相关人员宣传无人机在农业植保领域中的优势，提高接受程度；三是加强培训，让机手学习和掌握无人机的使用及配套技术，为开展高质量的农业植保工作打下基础。

## 6 发展趋势

无人机施药技术是农业植保的一个重要组成，正朝着以下方向发展。

1) 精准施药。精准施药既能提高农药利用率，降低农药残留量，也能保护施药区周边的生态。而GIS和航空遥感技术相结合，可以有效地改善喷雾的可变控制<sup>[44]</sup>。因此，如何有效地利用航空遥感技术，实现雾滴沉积、漂移、均匀分布、图像处理等高科技的开发与应用，就显得非常重要。

2) 稳定安全的移动操作平台。在植保无人机技术日趋成熟、智能化的今天，将植保无人机与移动终端有机地结合在一起，对其进行智能控制具有十分重要的意义<sup>[45]</sup>。通过手机App进行远程控制，可实现自动避障、自动飞行、GPS跟踪和虚拟摇杆操纵等功能。而上述功能的实现，而更加稳定且可靠的自主飞行控制系统，更具平稳的移动操作平台必不可少<sup>[46]</sup>。

3) 高载质量、高效率、长航时技术。植保无人机存在载重不足(30~40 kg)、飞行时间短等缺点，因此须重视电池的整体性能和储存容量，不断优化电池使用效果，增强电池功率和续航能力，以及提高无人机承载能力，延长飞行时间和增加载药量，提高无人机运行效率。随着单位面积喷灌收益的提高及土地的流转，市场对高负荷、高效率、超长使用寿命的无人机需求将会逐渐显现。因此，高载质量、高效、长航时的植保无人机将成为今后发展的重点<sup>[47]</sup>。

4) 静电超低容量施药技术。常规喷洒农药仅有25%~50%的农药在作物表面且发生了大量漂移。静电喷施能明显地增加化学溶液的粘附率、降低漂移和提高化学溶液的利用率，并能有效地控制漂移，降低对环境及土壤的污染。随着科技水平的提高以及对环境的要求越来越高，静电施药技术在农业航

空植保机械上将会有越来越广泛的应用<sup>[48]</sup>。

综上所述,农用无人机具有安全、高效、智能的优势,市场前景广阔,加快农用无人机的研发和应用,有助于促进农业绿色发展,给农业插上科技的翅膀<sup>[49]</sup>。随着无人机技术的不断进步,未来农用无人机将在农业植保领域发挥越来越重要的作用。

## 参考文献

- [1] 薛洲, 高强. 从农业大国迈向农业强国: 挑战、动力与策略 [J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2023, 23(1): 1-15.
- [2] 娄尚易, 薛新宇, 顾伟, 等. 农用植保无人机的研究现状及趋势 [J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 1-6, 31.
- [3] 宋雷洁, 李建平, 杨欣, 等. 植保无人机施药技术研究进展 [J]. 现代农业科技, 2019(11): 125-128.
- [4] 于金友, 尚德林, 兰玉彬, 等. 植保无人机药箱防晃性能检测试验台设计与试验 [J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 60-66.
- [5] 周俊平. 农用无人植保机远程控制系统操作终端设计 [J]. 农机化研究, 2020, 42(12): 101-106.
- [6] 兰玉彬. 美国精准农业航空技术现状与发展趋势 [J]. 农机市场, 2022(5): 57-59.
- [7] 刘剑君, 贾世通, 杜新武, 等. 无人机低空施药技术发展现状与趋势 [J]. 农业工程, 2014, 4(5): 10-14.
- [8] 栾庆华. 植保无人机施药技术研究现状与展望 [J]. 中国设备工程, 2020(11): 200-201.
- [9] 李继宇, 兰玉彬, 施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 104-118.
- [10] YANG A M, WANG H, TANG K W, et al. Soil erosion characteristics and control measure in china[C]. Beijing: 12th ISCO Conference, 2002.
- [11] 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 194-201.
- [12] 刘剑君, 贾世通, 杜新武, 等. 无人机低空施药技术发展现状与趋势 [J]. 农业工程, 2014, 4(5): 10-14.
- [13] CARLTON J B, ISLER D A. Development of a device to charge aerial sprays electrostatically [J]. Agricultural Aviation, 1966, 8(2): 44-51.
- [14] 董福龙, 周宏平. 国外植保喷头技术开发进展 [J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(4): 866-874.
- [15] 田志伟, 薛新宇, 李林, 等. 植保无人机施药技术研究现状与展望 [J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 37-45.
- [16] 尹选春, 兰玉彬, 文晟, 等. 日本农业航空技术发展及对我国的启示 [J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 1-8.
- [17] IWAHORI T, SUGIURA R, ISHII K, et al. Development of 3-D GIS map generation system using an unmanned helicopter[C]//2005 ASAE Annual Meeting. St Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005: 1.
- [18] SUZUKI S, ISHII T, AIDA Y, et al. Collision-free guidance control of small unmanned helicopter using nonlinear model predictive control [J]. SICE JCMSI, 2014, 7(6): 347-355.
- [19] NONAKA K, SUGIZAKI H. Integral sliding mode altitude control for a small model helicopter with ground effect compensation[C]//Proceedings of the 2011 American Control Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2011: 202-207.
- [20] 冷志杰, 蒋天宇, 刘飞, 等. 植保无人机的农业服务公司推广模式研究 [J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 6-9.
- [21] 李俏. 农业社会化服务体系研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [22] 刘泽锋, 唐宇, 骆少明, 等. 多旋翼植保无人机变量喷洒系统设计 [J]. 农机化研究, 2018, 40(12): 47-54.
- [23] 王玲. 多旋翼植保无人机低空雾滴沉积规律及变量喷洒测控技术 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [24] 王大帅, 张俊雄, 李伟, 等. 植保无人机动态变量施药系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 86-93.
- [25] 王林惠, 甘海明, 岳学军, 等. 基于图像识别的无人机精准喷雾控制系统的研究 [J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 23-30.
- [26] 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.
- [27] 李海林, 吴开华, 王文杰, 等. 基于激光位移传感器的障碍物检测与模式识别 [J]. 传感器与微系统, 2018, 37(1): 120-123.
- [28] 肖儒亮. 植保无人机避障技术应用研究 [D]. 西安: 西京学院, 2017.
- [29] 张亚坤. 农用飞行器喷雾系统性能研究与分析 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [30] 董祥. 植保机械喷头雾滴撞击植物叶面过程试验测试及仿真研究 [D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2013.
- [31] 王潇楠. 农药雾滴飘移及减飘方法研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

- [32] 赵春江, 郑文刚, 董大明. 航空施药中药雾分布与飘移趋势遥测系统及方法: ZL201110209409.0[P]. 2013-08-21.
- [33] 张瑞瑞, 文瑶, 伊铜川, 等. 航空施药雾滴沉积特性光谱分析检测系统研发与应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 80-87.
- [34] 茹煜, 金兰, 贾志成, 等. 无人机静电喷雾系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 42-47.
- [35] 胡维月, 席玉强, 尹新明. 中国农用植保无人机施药技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2022(10): 95-99.
- [36] 何云华, 王艳萍, 贺拾贝, 等. 无人机用锂电池热管理研究及优化设计[J]. 设备管理与维修, 2021(16): 100-101.
- [37] 张晓瑛. 锂电池在植保无人机中的应用研究[J]. 当代农机, 2017(5): 73-75.
- [38] 李念思, 刘小勇, 李亮, 等. 无人机锂离子电池高低温极端环境适应性研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(8): 177-182.
- [39] 张伶俐, 金兴昌, 马义超. 多旋翼无人机失控保护装置概述[J]. 长江信息通信, 2022, 35(6): 117-119.
- [40] 陈谋, 马浩翔, 雍可南, 等. 无人机安全飞行控制综述[J]. 机器人, 2023, 45(3): 345-366.
- [41] 阳湘林. 我国无人植保技术推广现状及前景[J]. 农机科技推广, 2019(10): 31-34.
- [42] 兰玉彬, 王国宾. 中国植保无人机的行业发展概况和发展前景[J]. 农业工程技术, 2018, 38(9): 17-27.
- [43] 刘剑君, 贾世通, 杜新武, 等. 无人机低空施药技术发展现状与趋势[J]. 农业工程, 2014, 4(5): 10-14.
- [44] 姜尚易, 薛新宇, 顾伟, 等. 农用植保无人机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 1-6, 31.
- [45] CHAN K W, NIRMAL U, CHEAW W G. Progress on drone technology and their applications: A Comprehensive Review Progress on Drone Technology and their Applications: A Comprehensive Review [C]. AIP Conference Proceedings, 2018.
- [46] ZHANG C, KOVACS JM. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(6):693-712.
- [47] 高云飞. 植保无人机, 或将成为推动农业植保升级的“蒸汽机”[J]. 中国农村科技, 2016(4): 52-55.
- [48] 王军, 邹学庆, 卢蓓蓓, 等. 基于 nRF24L01 植保无人机无线数据传输系统设计[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(6): 52-55.
- [49] 方金花. 农用无人机在植保应用发展中的探讨[J]. 农业工程技术, 2021, 41(27): 33-34.

## Current Situation and Trend Analysis of UAV Spraying Technology

SHEN Dezhan<sup>1</sup>, ZHANG Yuan<sup>1,2</sup>, WEI Lijiao<sup>1,3</sup>, ZHAO Zhenhua<sup>1,4</sup>, CHEN Xiaoyao<sup>1</sup>, JIANG Lei<sup>5</sup>

(1.Agricultural Machinery Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524091, China; 2.GuangDong Engineering Technology Research Center of Precision Emission Control for Agricultural Particulates, Zhanjiang 524000, China; 3.Zhanjiang Key Laboratory of Dynamics and Precision Emission Control for Particulates, Zhanjiang 524091, China; 4.Key Laboratory of Agricultural Equipment for Tropical Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R.China, Zhanjiang 524091, China; 5.Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

**Abstract:** Regulating crop growth and controlling diseases, pests, and weeds through drugs has always been an important agricultural measure in agricultural production. With the rapid development of modern IoT agriculture, traditional fertilization methods and technologies can no longer keep up with the speed of agricultural production development. Compared with traditional manual spraying, drone applications have unique advantages, making drone spraying technology a hot topic in the agricultural machinery industry. The article discusses the composition and working mechanism of drone spraying devices, summarizes the application advantages and current status of drone spraying technology at home and abroad, analyzes the causes of its problems in domestic application, proposes development strategies and suggestions for drone spraying technology based on industry research directions, and predicts the development trend of drone spraying technology.

**Key words:** UAV; application technology; research status; development trend