

高志政, 彭孝东, 林耿纯, 等. 无人机撒播技术在农业中的应用综述[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(6): 24–30.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.06.006

# 无人机撒播技术在农业中的应用综述

高志政<sup>1,2</sup>, 彭孝东<sup>1,2</sup>, 林耿纯<sup>2,3</sup>, 张泉勇<sup>2,4</sup>, 吕石磊<sup>1</sup>, 欧阳帆<sup>2,4</sup>

(1. 华南农业大学工程学院, 广东广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广东广州 510642;  
3. 华南农业大学数学与信息学院, 广东广州 510642; 4. 华南农业大学工程学院, 广东广州 510642)

**摘要:**我国农业现代化高速发展对农业机械化、信息化及自动化的要求越来越高, 为了响应农业可持续发展, 提高农业作业效率和作业效果, 精准农业航空概念随之而出。无人机撒播技术是精准农业航空的应用之一, 探讨无人机撒播技术在农业中的应用, 概述撒播技术特点, 研究无人机撒播技术的发展和方向, 分析现有无人机撒播技术的不足之处, 探讨无人机实现精准撒播的关键技术, 展望无人机精准撒播的未来。无人机撒播技术在农业生产管理中具有可行性和优越性, 是加速实现我国农业生产管理现代化进程的一个重要环节。

**关键词:**撒播技术; 农业航空; 无人机撒播; 精准农业

**中图分类号:** S252<sup>+</sup>.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2019)06-0024-07

2013 年农业部发布《关于加快推进现代农业植物保护体系建设的意见》, 提出鼓励有条件的地区发展无人机、直升机和固定翼飞机防治病虫害, 2014 年中央一号文件明确提出加强农业航空建设<sup>[1]</sup>, 我国农用无人机得到了空前的发展。2018 年政府工作报告中提出推进机械化全程全面发展, 农业农村部新闻发布会不止 1 次提出要组织实施好《农机装备发展推进行动方案》和农机购置补贴政策, 扩大无人机等农机新产品补贴试点, 进一步建设现代农业, 实现乡村振兴战略。

随着我国城镇化进程的加快, 农村的年轻人大量外出务工, 农村劳动力短缺日趋严重。我国作为农业大国, 有 1.2 亿  $\text{hm}^2$  农田, 农业发展由传统的人工作业转向机械化和自动化是大势所趋<sup>[2]</sup>。我国无人机行业快速发展及精准农业航空概念的提出<sup>[3]</sup>, 使农用无人机应运而生。农用无人机具有适用性好、效率高、操控人员安全系数高及作物损伤小等优点; 姜尚易等研究表明, 农用无人机的工作效率是人工的 30~60 倍<sup>[4]</sup>。为鼓励无人机的规模化发展, 部分省(市)地区试点相继出台了相应的补贴政策。农用无人机优势明显, 能有效解决劳动力短缺问题, 是未来农业生产管理全程自动化、机械化的有益补充。

目前, 我国农用无人机多用于植物保护方面, 无人机撒播作业还处于初步研究及试应用阶段。一些丘陵、山地、沼泽以及滩涂地带, 特别是一些网格化、小型化作业区域, 不太适宜传统的地面中大型撒播机械, 即使在平原地区, 中大型机械对地表的压实作用也会对种子的出苗率造成一定的影响<sup>[5-6]</sup>。农用无人机具有特有的空中优势, 不受作业地形的影响, 除了

适用于农药喷洒、遥感监测、辅助授粉等, 在种子、颗粒肥撒播等方面也有着良好的应用前景。

## 1 无人机撒播技术发展

### 1.1 撒播技术

传统的农业播种方式有撒播、点播、条播、精播等<sup>[7]</sup>。无论何种播种方式, 都是由人类撒播种植发展延伸而来, 最早的撒播作业是人用手将颗粒物抛撒出去。撒播的优点是可将种子或颗粒物料快速抛撒出去以达到完成作业的目的, 相比点播、条播及精播, 直接撒播能有效降低人力成本和节省时间。

现代撒播机械中, 可对直径在设备规定范围的颗粒物料进行撒播作业, 如种子、颗粒肥及颗粒饲料等。根据撒播方式的不同, 可分为离心式、气力式、均分杆式、摆管式等。撒播播量调控方式又可分为机械式、气力式等<sup>[6]</sup>。机械式播量调控技术有窝眼式、槽轮式、圆盘式、振动式、指夹式、带式、滚筒式、搅龙式、推杆式和环带孔式等<sup>[8]</sup>。现代地面撒播设备应用较为成熟, 撒播方式多为离心式和气力式 2 种, 颗粒在物料箱通过自身重力下落在撒播盘上, 离心式是利用撒播盘高速转动将物料撒播出去, 而气力式是利用风机将下落的物料吹撒出去<sup>[9]</sup>。

### 1.2 农业航空撒播技术的发展

**1.2.1 有人驾驶飞机撒播技术的发展** 最早使用有人驾驶飞机运用在农业方面的国家是美国, 1918 年美国首次尝试使用有人驾驶飞机用于农业作业<sup>[10]</sup>。

在 20 世纪 50 年代, 我国开始使用飞机进行播种造林。据相关记载, 1956 年时任广东省委书记的陶铸为解决山林荒化, 首次提出用飞机播种造林, 并在广东省湛江市吴川县进行了试验, 但由于经验不足和缺乏相关技术支撑, 试验最终以失败告终, 但却为我国造林指明了新的方向, 全国大面积进行飞播造林由此开始, 但都陆续宣告失败<sup>[11]</sup>。直到 1959 年, 四川省凉山彝族自治州成功通过飞机播种造林建成了我国首片飞播林。随后, 四川省凉山彝族自治州的成功经验开始在全国范围内推广。1982 年, 邓小平对飞机播种造林做出重要指

收稿日期: 2018-10-27

基金项目: 广东省自然科学基金(编号: 2016A030310453); 广东省科技计划(编号: 2016A020210088); 广东省重大科技计划(编号: 2017B010116003)。

作者简介: 高志政(1995—), 男, 广东河源人, 硕士研究生, 主要从事农业航空工程与技术研究。E-mail: 475553820@qq.com。

通信作者: 彭孝东, 博士, 副教授, 主要从事农业航空技术应用研究。  
E-mail: pxd2005@scau.edu.cn。

示,此项目被纳入国家计划。据相关数据统计,1995 年底,我国飞机播种造林 2 000 万  $\text{hm}^2$ ,有效面积达到 868 万  $\text{hm}^2$ <sup>[12]</sup>。

早期运用在农业航空方面的飞机以运-5 飞机为主,机舱通过简易改装,装置由种子箱、传动装置、搅拌器、搅拌器轴、风轮机及喷嘴等组成。物料装置通过搅拌器轴里的上、下缺口圆盘错位调整开度以达到控制流量的目的,种子由高速气流吹散开。这类装置无尺寸刻度标注,须技术熟练的机手操控,若操控不当,撒播均匀度不高,无法控制精度<sup>[13]</sup>。可见有人驾驶飞机飞播造林种树难以满足均匀性要求,适用于撒播对精度和均匀度要求不高的草本类植物<sup>[14]</sup>。

由于对精度和效率要求的提高,我国有人驾驶飞播造林趋势停滞不前。据相关数据统计,有人驾驶农业航空作业方面,共有 56 家通用航空公司开展农业航空作业。2014 年涉及农业航空作业的飞行时间为 38 220 h,但只有 3% 的时间用于飞机撒播播种<sup>[15]</sup>。而目前美国使用有人驾驶飞机撒播种植水稻已成规模化,美国农业机械化程度极高且农田多为大规模农场,适用于飞机撒播播种。美国有相当完善的法律法规支持,市场化运作,农业航空服务拥有完善的体系。据相关数据显示,美国水稻种植面积为 133.33 万  $\text{hm}^2$ ,全国从事水稻生产的约有 1.5 万人,平均每人约种植 86.67  $\text{hm}^2$ ,美国水稻单产率比中国高 23.6%<sup>[16]</sup>。我国耕地情况多为独立块状,人均耕地少,除了东北、新疆及我国三大平原地区外,其他地区少有大规模农场,尤其是南方田块网格化、丘陵化的地貌并不适用于有人驾驶飞机播种,农用无人机具备体积小、携带方便、操作灵活、自动化程度高等特点,非常适用于在此类地形上进行撒播作业。

1.2.2 无人机撒播技术的发展 随着工业化的发展,无人驾驶飞机开始出现在人们的视野中并逐渐从军事用途向民用发展,人们也开始利用无人驾驶飞机从事农业生产管理<sup>[17]</sup>。20 世纪 90 年代,日本北海道地区开始尝试使用遥控无人直升机对小块农田进行播种。实际生产作业证明,利用遥控无人直升机播种不仅节约时间,且产量和人工播种无太大差距<sup>[18]</sup>。2000 年,日本农业实验研究中心利用雅马哈公司研制生产的 R50 无人直升机对农田进行撒播颗粒肥,喷撒量可达 300  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,实际作业时间效率为 27.7%<sup>[19]</sup>。2004 年开始,日本在水稻生产中,使用农用无人机的数量已超越有人驾驶飞机,采用农用无人机进行农业生产已成为日本农业发展的趋势<sup>[20]</sup>。

目前,我国已有高校科研机构和高新科技公司对无人机撒播相关技术进行了研究。在国家知识产权局官网查询近 10 年我国关于无人机撒播技术的专利申请情况,如图 1 所示,可以看出 2014 年后的 4 年专利申请数量呈爆发性增长,我国对无人机撒播技术的研究已进入快速发展阶段,该技术也为精准农业航空撒播提供了全新的途径。

我国已有不少公司生产撒播无人机,目前市场上在售的撒播无人机有深圳高科新农技术有限公司的 M23-G 固态颗粒撒播无人机、深圳大疆创新科技有限公司的 MG 播撒系统、深圳飞客无人机科技有限公司的播种颗粒机、北京北方天途航空科技发展有限公司的天智 M8A 施肥撒播多功能无人机等,如图 2 所示,参数详见表 1。

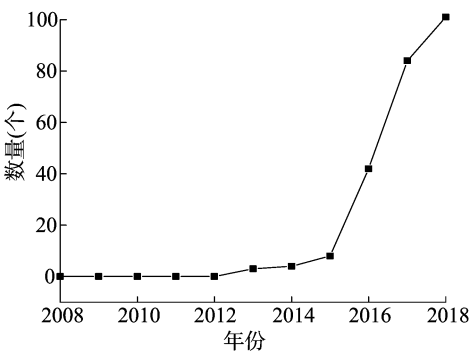


图1 无人机撒播技术相关专利数量变化趋势



图2 撒播无人机

表 1 无人机产品参数

产品	载荷 (kg)	容积 (L)	颗粒直径 (mm)	撒播半径 (m)	撒播速度
高科新农 M23-G	10	20	0~18.0	2~5	连续可调
大疆 MG 播撒系统	10	13	0.5~5.0	与多因素相关	连续可调
飞客播种颗粒机	10	10	2.0~5.0	2~5	阀门手调
北方天智 M8A	可定制	可定制	0.0~6.0	≤6	连续可调

2 无人机撒播作业体系

2.1 物料撒播机制

物料撒播机制主要涉及到机体、撒播装置以及物料种类等 3 个方面。

2.1.1 机体 机体是物料撒播作业装置的载体,支撑着无人机撒播作业体系。目前,农用无人机的主要机型分为单旋翼无人机和多旋翼(四旋翼、六旋翼、八旋翼等)无人机。单旋翼无人机的动力系统主要通过燃油机提供动力,续航及载重能力强,代表机型有日本雅马哈公司的 Fazer 系列无人机。徐雪松等设计了一种用于抛洒颗粒剂的单旋翼无人直升机,机身两侧设置物料桶,通过送料管将颗粒剂传输到转盘并均匀输出,配合单旋翼无人机的直线运动对无人机稳定性影响小,可使撒播更为均匀<sup>[21]</sup>。李才圣等设计了一种易拆装式单旋翼植物保护无人机,该机型通过无人机细小的零件设计拆分为多个模块,在拆装时只需将不同模块拆卸即可,保证了无人机的安全性和维修便利性<sup>[22]</sup>。多旋翼无人机多以锂电池提供动力,续航能力较弱但更为稳定,代表机型有深圳大疆创

新科技有限公司的 MG 系列无人机。由于单旋翼无人机技术门槛较高,我国目前农用无人机以多旋翼为主。雷乾勇等设计了一种多旋翼无人机机臂折叠装置,可使旋翼机臂稳定切

换折叠和展开,节省空间,利于作业搬运<sup>[23]</sup>。单旋翼无人机与多旋翼无人机的优缺点见表 2。

表 2 单旋翼无人机与多旋翼无人机优缺点对比

项目		单旋翼	多旋翼
动力	油动为主	电动为主	
优点	载重能力强,续航时间较长,抗风强,单一下压风场更为稳定		操控较为简单,稳定性高,维护简单,价格更为亲民
缺点	操控难,价格贵,飞控研发技术复杂,实际作业时对于环境要求较高		多旋翼风场易扰乱,抗风差,续航与载重能力较差

2.1.2 撒播装置 撒播装置是无人机撒播作业体系的中心,关乎撒播作业效果的好坏。目前应用于农用无人机的撒播装置主要分为离心式和气力式 2 种。包胜军设计了一种飞机播撒装置,该装置使用的是离心圆盘式播撒装置,单片机控制第 1 电机带动甩盘旋转,控制第 2 电机用于开关出料口的闸门大小,通过双重控制,使出料口的流量达到按需分配的效果<sup>[24]</sup>。李晟华等设计了一种撒播无人机及其撒播器,该装置使用离心圆盘式撒播装置,撒播盘设有与落料口连通的滑道,通过单电机控制调节滑道开度及撒播盘转速进行物料流量控制<sup>[25]</sup>。以上 2 种装置均能较好地对物料流量进行控制,但离心撒播方式落种区为环形,若航线规划出现偏差,会出现重播和漏播现象。周志艳等设计了一种农用无人机挂载的物料撒播装置,该装置物料箱下使用了一个排料轮,通过调控排料电机控制器调整排料量;并在滚轮旁加装风机,采用风力将物料排出,撒播均匀度有所提高,易于操作<sup>[26]</sup>。该装置气力式的设计不易伤种,能较均匀地对物料进行撒播,但横截面为渐变长方形的物料抛撒出口设计,落种区为扇形,撒播效率不如离心圆盘式撒播装置。

2.1.3 物料种类 撒播物料种类是无人机撒播作业体系可行性的重要保障。撒播无人机搭载的物料箱容量有限,而撒播装置对于撒播物料的直径大小都有着严格的规定。若撒播颗粒物直径过大,考虑无人机的载重与物料箱容量,不适宜采用无人机撒播。如飞播造林中常用的松树种子,若采用无人机撒播,由于种子较大,无法大量搭载,大范围飞播造林效率不高,没有使用无人机撒播的必要。若撒播颗粒物直径较小,近于粉末状,在旋翼无人机下压风场的作用下,粉末会出现漂移现象,作业效果无法保障。根据目前商用的撒播无人机相关参数要求,无人机撒播作业中颗粒直径一般在 0.5~20.0 mm 之间。

2.2 物料撒播方向

随着农用无人机的快速发展和应用,利用无人机进行撒播生产作业主要体现在 4 个方面。

2.2.1 水稻种撒播 水稻田飞机播种是农业航空技术应用的一个方向。2014 年,华南农业大学科研人员在广州市白云区钟落潭农业科学院实验基地率先开展无人机撒播试验,运用自主设计的机载撒播装置进行稻种撒播,选定 3 个采样点进行测产,测量水稻株数和有效穗数。结果显示,0.09 hm<sup>2</sup> 农田只需 305 s 就可完成稻种撒播,水稻撒播田平均产量为 7 705.5 kg/hm<sup>2</sup>,平均有效穗数为 321 个/m<sup>2</sup>,平均穴数为 38 穴/m<sup>2</sup>,有效证明了无人机进行水稻种撒播的可行性<sup>[27]</sup>。

日本 JA 广岛中央农业为解决劳动力下降问题,采用无人机公司 enRoute 设计的六轴无人机进行种子撒播试验,只需 10 min 便可完成 12 kg 种子的撒播工作,而使用地面机械进行播种则需要 60 min,若采用人工播种则时间会更长,试验表

明无人机撒播能有效节省时间和劳动力<sup>[28]</sup>。葡萄牙科英布拉理工大学科研人员将播种装置和摄像装置与无人机结合使用,利用流体力学计算分析排除干扰,使播种效果更为精准,提高了播种的可操作性<sup>[29]</sup>。

2.2.2 颗粒肥撒播 施肥特别是追肥是农业作物种植中必不可少的一个环节,对颗粒肥(尿素、复合肥等)而言,地面撒肥机械会对作物造成侵入式损伤,人工撒肥效率低且劳动强度大,使用无人机能较好地解决此类问题。岑海燕等设计了一种变量施肥的无人机系统和方法,使用离心圆盘式撒播装置,转盘的周壁设有料槽,料槽承接来自料箱的物料,通过改变转盘转速和侧壁槽数来实现不同的施肥效率<sup>[30]</sup>。秦大鹏设计了一种无人机施肥装置设备,该设备以单旋翼无人机为载体,高清摄像机和全球定位系统(GPS)设置在无人机的前端,控制器根据反馈信息进行变量施肥,储料仓可通过隔板分隔为二,施肥组件通过调节施肥轮的转速及调节施肥轮上与粗料仓内的肥料直接接触料槽的个数来实现施肥量的调节,自动调节施肥量的下料速率,可一次性对 2 种肥料同时进行施肥<sup>[31]</sup>。张勇等设计了一种农用施肥无人机,该无人机装置的物料仓在出肥管上设置有电磁阀,工作时开启电磁阀,肥料经进料螺旋的作用从出料管落下,解决了现有技术中不利于肥料散开的问题<sup>[32]</sup>。

2.2.3 飞播造林 飞播造林历史由来已久,使用无人机飞播造林可以有效进行流量控制,提高精度和均匀性,进一步降低造林成本。英国创业公司 Biocarbon Engineering 研制了一款种树无人机系统,该无人机将遥感技术、无人机技术和机器智能技术相结合,该系统由 6 架无人机组成,只需 1 个工作人员操控,采用定位系统和视觉技术创建 3D 地图,然后进行数据整理分析,划定种植范围,确定范围后利用空气压缩的方法将种子射入土里,从而达到精准种植<sup>[33]</sup>。

付博设计了一种小型无人机精准飞播结构,该播种装置呈三角形,设置有多根竖管贯通横管,竖管底部有播种口,横管内设有播种轮轴,利用重力分捡和弹性播种<sup>[34]</sup>。

2017 年,我国国家级湿地公园湖南莲湖湾湿地公园为了加快建设,做好保护工作,采用无人机撒播技术对生态植被进行恢复<sup>[35]</sup>。同年,河南省计划飞播造林 1.33 万 hm<sup>2</sup>,首次开展无人机飞播造林试验<sup>[36]</sup>。

2.2.4 颗粒食物撒播 撒播颗粒食物是无人机撒播的另一个应用,目前鱼塘和山地养殖(鸡、鸭等)场,投食几乎都是通过人工作业来完成的,劳动强度大。通过无人机进行投食,可以解决劳动力少的问题。尤其是在农田、鱼塘以及养殖场为一体的大型农场,一台撒播无人机可集播种、施肥以及投食为一体,实现资源的高效利用。

虽然我国目前有关无人机撒播技术的应用已有一些新闻

报道和实际产品,但大都缺乏相关应用成效的报道。相比有人驾驶飞机撒播,无人机撒播在农业生产上大范围应用仍有许多技术问题须要解决。

### 2.3 物料撒播运动研究

**2.3.1 旋翼气流** 农用无人机通过旋翼旋转产生向上的力,但旋翼旋转也产生了下洗旋翼气流。旋翼气流可影响物料撒播运动过程,深入探讨应用农用无人机进行撒播作业具有重要意义。Tan 等为研究农用无人机旋翼下洗气流的速度,提出了一种下洗旋翼气流速度分布的测试方法,通过设计模拟六旋翼无人机旋转实验台并利用风速仪对不同位置产生的下洗旋翼气流进行测速,可知旋翼产生的下洗气流纵向变化不大,在接近地面处受影响导致气流整体变小<sup>[37]</sup>。杨知伦等通过单旋翼农用无人机下洗气流实地试验可知,旋翼所形成的下洗气流由旋转中心向外,气流呈逐渐增大状分布<sup>[38]</sup>。张文星设计了桨叶弧面分布多旋翼(四旋翼、六旋翼)的农用无人机,采用 1 对大桨构建“共轴纵桨”与 1 对小桨构建“共杆反桨”的结构,通过连接碳纤维管和固定件形成左右镜像对称、前后不对称的旋翼无人机,可有效降低下洗气流的流速,增大下洗气流的面积<sup>[39-40]</sup>。李继宇等设计了一种检测由无人机旋翼气流引起的冠层倒伏锥体的方法,通过无人机收集的图像资料进行分析,可直观判断农用无人机旋翼气流的形态参数<sup>[41]</sup>。

**2.3.2 物料撒播均匀度** 物料撒播均匀度是农用无人机撒播作业体系的核心所在,直接决定着无人机撒播作业的成效。宋灿灿等通过对气力式无人机撒播装置进行设计与参数优化,在作业田地上设置不同采集点,经数据收集分析得到导流通道锥角为 130°时为最佳锥角,撒播均匀性标准差为 0.90<sup>[42]</sup>。吕金庆等通过建立圆盘及空气中的运动模型,结合颗粒肥自旋性的影响,得到影响撒播均匀性和撒播幅宽的主要因素是撒播装置的叶片长度、倾角以及撒播圆盘转速<sup>[43]</sup>。孙妮娜等通过对撒播装置喷嘴结构的对比研究,经仿真与试验验证,平嘴相对于圆弧嘴和扁喇叭嘴更适合应用于撒播装置<sup>[44]</sup>。齐兴源等通过对气力式变量施肥机关键部件的研究,排料管道的长度会对排料出口风速产生影响,出口安装的高度也会对排料滞后性产生影响,为尽可能减小排料滞后对均匀性的影响,排料管道应避免过长且出口高度不高于入口<sup>[45]</sup>。

**2.3.3 物料颗粒运动特性** 与植保无人机喷雾化施药液滴运动受旋翼气流影响不同,物料颗粒运动特性受旋翼气流影响较小。颗粒肥在锥盘式撒播机构中抛撒运动特性的研究分析为撒播颗粒肥进一步在无人机的研究和应用上提供了参考。董向前等通过建立肥料颗粒受力方程,深入研究喂入角、施肥转速以及施肥高度对施肥分布的影响,提供了最优的参考数据<sup>[46]</sup>。张睿等通过分析颗粒肥料在离心圆盘撒播运动过程中的受力情况,得出颗粒肥撒播脱离圆盘时的速度函数关系与颗粒肥撒播幅宽的函数关系<sup>[47]</sup>。邵志威等为探究冰草种子丸包衣运动特性,通过 Hertz 接触理论的振动模型和转动模型对物料流动特征的分析,可知引入振动可增加惯性力,增大雷诺数,提高颗粒间的运动不规则程度,从而提高种子丸粒化包衣合格率<sup>[48]</sup>。

### 2.4 物料撒播方法研究

**2.4.1 机体控制** 飞控是农用旋翼无人机机体控制的核心,是无人机撒播作业的大脑。根据旋翼无人机的飞行原理可

知,飞控通过电调传输控制信号调节电机转速,从而带动旋翼旋转,旋翼间的转速调节导致力矩的差异形成旋翼无人机作业的各种飞行姿态。刘浩蓬等通过研究四旋翼植保无人机的姿态解算与飞行原理,设计出以 STM32 微处理器为核心的飞控系统,利用 AHRS 模块航姿参考系统解算无人机飞行姿态参数,结合模糊比例-积分-微分控制器(PID)控制算法调节电机的输出量进而控制飞行姿态以达到稳定作业的目的<sup>[49]</sup>。刘超等建立纵向线性化模型,通过经典 PID 控制理论设计了满足农用无人机纵向运动的姿态控制系统<sup>[50]</sup>。漆海霞等针对农用无人机作业对速度恒定的要求,通过模糊比例-积分控制器(PI)双闭环控制仿真,证明模糊 PI 控制可有效提高农用无人机作业的抗干扰能力<sup>[51]</sup>。王宽田等通过搭载四旋翼无人机控制系统平台,采集姿态信息并进行解算,验证卡尔曼滤波器适用于四旋翼无人机控制系统<sup>[52]</sup>。李永伟等针对农用无人机作业时载荷发生变化导致控制性能和抗干扰能力下降等问题,通过对农用无人机作业分析与建模,提出一种模糊自适应 PID 控制算法以提高系统的稳定性<sup>[53]</sup>。

**2.4.2 播量控制** 播量控制是撒播均匀性的重要前提,影响无人机撒播作业的成效。彭孝东等设计了一种用于物料流量控制的无人机撒播装置及其控制方法,该装置可通过控制模块接收流量监测单元的数据,进而通过出料调节单元动力机构调节出料口的开关挡板来控制物料撒播,以达到多旋翼无人机均匀撒播物料的目的<sup>[54]</sup>。李才圣等设计了一种固体颗粒均匀撒播的装置,该装置物料箱下的入料口与撒播装置的出料口间通过一个播撒轮连接,控制旋转动源带动播撒轮转速来达到控制播撒物料的撒播量<sup>[55]</sup>。易青设计了一种用于农业播种的具有调节功能的节能型无人机,该装置控制组件控制进入喷料管内的物料量,喷料管顶端设有导风装置,通过改变进入喷料管的空气量,控制物料喷洒出去<sup>[56]</sup>。马荣朝等设计了一种小型无人机便携式螺旋精量播种机,通过无线遥感技术远程控制物料流量调节装置从而控制物流速<sup>[57]</sup>。

**2.4.3 作业模式** 目前农用无人机的作业模式以人为手持遥控器操纵为主,撒播作业区域全覆盖是无人机撒播作业的必然要求。徐博等通过仿真基于遗传算法和旅行商(TSP)问题得到农用无人机作业区域间的优化顺序,并调度航线规划,从而实现农用无人机作业的全局规划<sup>[58]</sup>;且针对不规则区域作业使农用无人机规划高效作业路线,减少作业多余覆盖区域,提出一种作业方向不规则的区域作业航线规划算法<sup>[59]</sup>。彭孝东等设计了基于 GPS 的坐标无线传输系统,通过目视遥控农用无人机,得到农用无人机的直线飞行特点与作业效果,同时也得出目视与遥控农用无人机作业难以达到精准作业的结论<sup>[60]</sup>。武锦龙针对多作业区域障碍物影响,通过实际作业环境建模赋予属性值,将粒子群算法应用于作业航线规划<sup>[61]</sup>。韩宾等针对农用无人机作业转弯效率低下的问题,设计出一种新的弯道姿态控制算法提高转弯效率<sup>[62]</sup>。王宇等为解决农用无人机作业地理环境复杂等问题,基于引力搜索算法设计出一种适用于三维地形的农用无人机路径规划方法<sup>[63]</sup>。

## 3 无人机撒播技术重点与难点

### 3.1 无人机撒播作业体系缺陷

#### 3.1.1 撒播装置的普适性

目前应用在无人机上的撒播装

置多以离心圆盘式为主,离心圆盘式撒播装置通常会出现重播、漏播的现象,难以达到撒播均匀性的要求。撒播装置多与飞机配套,多为固定某种种子或大小相仿的颗粒物料使用。此方式在实际作业中,不具普适性,只能撒播同一类颗粒,不能达到效益最大化。设计撒播装置须综合考虑可进行撒播作业的颗粒物料,使其尽可能多地支持各类颗粒物料的撒播,达到效益最大化。

**3.1.2 撒播均匀性控制** 颗粒在密度分布上的均匀性是无人机撒播技术的核心,就播种而言,若作物单位面积的植株数量超过一定值,产量不一定高,植株密度过大会导致植株之间通风性差,容易生病生虫,养分跟不上<sup>[64]</sup>。若植株密度太稀疏,在浪费了土地资源的同时产量也不高。现有的撒播装置虽可通过调节出料口大小控制撒播流量,但撒播均匀性与多方面因素相关,如物料颗粒大小、物理特性的差异<sup>[65]</sup>、飞行姿态、速度、高度以及转盘旋转速度等。由于受多方面因素的影响,物料颗粒抛撒过程中的运动规律,无论是定量或是定性分析都具有一定难度。

**3.1.3 气流影响** 旋翼旋转产生了下洗气流风场,旋翼下洗气流风场分布不明晰,难以找到其规律<sup>[66-67]</sup>。在撒播过程中,颗粒做离心运动,可沿着圆盘切线方向甩出,在不考虑旋翼下方气流影响的情况下,可通过正交试验探讨圆盘转速、飞行高度以及飞行速度与颗粒撒播半径的规律;若考虑旋翼下方气流的影响,涡旋气流扰动区域与机身底部的距离呈正相关<sup>[42]</sup>。当颗粒被抛出进入气流扰动区,其运动轨迹将发生改变,颗粒的最后落点位置与这种扰动气流强弱有关。

**3.1.4 种子存活率** 种子存活率是无人机上撒播播种应用的关键因素之一,与传统的撒播机可以覆土掩埋种子不同,无人机撒播出来的种子暴露在田地表面上,暴风雨、太阳的暴晒或是鸟类寻食都会影响种子的生根发芽,因此种子的存活率难以保障。王爱勤等提出用大粒化包衣剂包裹种子,包衣里有种子所需的营养物质,但包衣剂制作工序过于复杂,成本较高,不适合大规模播撒种子使用<sup>[68]</sup>。利用空气压缩将种子射入土里的方法虽然能少受外界因素干扰,但对飞行高度要求极为严格,飞行较高时种子不易射入土中,飞行太低则对飞行控制难度加剧,且土地松软程度不一,在射入土里的过程中,种子受到外力撞击极大,若没有合理的保护措施,种子容易遭到破损导致无法发芽存活<sup>[69]</sup>。此外,若采用离心圆盘式撒播装置,转盘旋转速度也是须要考虑的一个因素。部分种子(如水稻种)须发芽再进行撒播,若转盘旋转速度过快,有可能因撞击导致种子芽受损而影响存活率。

## 3.2 平台与政策

**3.2.1 撒播飞行平台** 无人机实际应用在农业中,飞行轨迹路线多为手持遥控控制或半自主导航,控制精度较低。实现均匀撒播、不重复、不遗漏的重要前提是无人机飞行平稳、匀速、不偏离航线以及在田地飞行时能实现平稳定高飞行。因此,全自主飞行是无人机实现均匀撒播作业的重要前提之一。农田的工作环境十分复杂,会有一些小房子、电线杆、树木和鸟类等障碍物,而我国目前无人机避障技术仍处于研发阶段<sup>[70]</sup>。在全自主飞行撒播作业中,要求无人机具备主动避障功能,若不能有效避开障碍物,容易发生撞击坠机事故造成严重损失。此外,无人机的续航能力也是一个有待解决的问题,

目前商用的大多数电动农用无人机在满载情况下,1 块电池只能续航 10 ~ 20 min,若大面积作业,须同时携带多块电池,一方面电池的价格较昂贵;另一方面,野外作业也不便携带过多的电池。同时,就目前而言,熟练飞手的缺口十分巨大,缺乏相应的法律法规和标准等问题导致如今的飞手培训市场较为混乱,很难培养出高水平的飞手<sup>[71]</sup>。

**3.2.2 政策法规** 我国农用无人机正处于高速发展阶段,市场潜力和发展空间巨大,政府相关部门不断强调要支持农业航空的发展,部分地方政府试点加大购机补贴以支持农用无人机的发展。由于农用无人机管理较为复杂,目前缺乏相应的法律法规、管理制度以及相关标准,导致农用无人机行业准入标准无法统一,须加强政府监管和行业协会协同管理,严格执行适航资格、飞行资质、计划申报等相关手续<sup>[72-73]</sup>,推进我国农业航空的发展。

## 4 展望

### 4.1 技术突破

**4.1.1 多技术融合** 遥感技术、地理信息系统、全球定位系统和自主避障技术的快速发展并集成应用到农用无人机当中,为无人机在农业中的应用提供了指路标<sup>[74-77]</sup>。遥感技术通过无人机平台利用传感器接收地面物体发射或反射的电磁波信号并传回地面,在无人机撒播作业中,利用土壤可见-近红外光谱中的反射率特性,可在撒播播种前期分析土壤的有机质。在撒播播种后,由于病虫害作物的反射光谱和正常作物可见光到热红外波段的反射光谱有明显差异,遥感图像还可用于检测病虫害。遥感测绘的硬件和软件技术,可用于分析植株的成苗率。地理信息系统在农业中的应用是农业信息化的重要技术手段,可用于收集遥感数据、定位数据和统计数据等信息,高效管理海量数据,可方便快捷地用于农业信息的查询、统计、分析和建模应用。厘米级定位精度的载波相位差分(RTK)技术在无人机上的广泛应用,已成为精准农业技术定位自主航行应用上的重要技术支撑。目前我国毫米波雷达开发已进入 77 GHz 频段研发并取得一定成效,可提高农用无人机作业时的安全性和智能化程度,为撒播连续作业提供保障。多技术融合为无人机撒播作业提供了技术支撑,可满足数据处理、管理、共享和分析等要求,农用无人机采集数据后可生成 2D 地图、3D 模型、点云数据和数字地表模型(DSM),数据传回地面设备,用户可按照需要选择分析工具,从而获取想要的的结果,实现精准飞行和均匀撒播作业。

**4.1.2 电池突破** 续航能力有待提高是农用无人机急需解决的问题之一,目前农用无人机使用的电池多为传统锂电池。正常情况下,农用无人机满载工作续航时间不长。半固体锂电池研发已有所突破,并将在未来成为现实<sup>[78]</sup>。该电池容纳的能量是传统锂电池的 2 倍。一旦半固体锂电池投入生产使用,搭载这种电池的无人机续航时间更持久,为农用无人机大规模作业提供了更可靠、更稳定的动力保障。

### 4.2 政策方向

**4.2.1 农业土地整合** 我国农耕地现状多为零星化分布,不利于农作物大规模机械化作业,作业成本过高。土地整合是土地改革的重点工作,对零星分布的土地进行整合集中化处理,能有效解决土地进行大规模机械化作业成本高的问题。

实现土地规模化、连片化耕作,提高农民的种植生产能力。规模化的土地耕种有利于无人机进行大规模撒播作业。

4.2.2 政策法规与市场规范化 我国无人机市场迎来了快速发展,目前无人机监管普遍采用质量单一维度进行无人机监管分类,辅以场景设置进行限制或管理。我国民航局、工信部和农业农村部等有关部门不断出台一系列关于无人机管理、规范、应用等方面的法律法规和通知公告,旨在规范无人机市场的秩序,为无人机市场健康发展提供了重要保障,体现了我国对无人机产业的重视。据相关数据显示,自 2017 年以来,已有 17 条相关法规政策出台<sup>[79]</sup>。在农用无人机方面,为了鼓励农用无人机的规模化发展,部分地区相继试点出台了相应的补贴政策<sup>[80]</sup>。任何事物的发展都是从产品标准化到服务标准化,从孤立到协作,从割裂到融合。农用无人机的发展正处于这一过程,市场逐渐变得规范化。我国农用无人机市场迎来了走向规范、有序、健康发展的有利时机,未来或将实现新一轮快速增长。

## 5 结语

国家政策补贴对农用无人机的大力支持、我国农用无人机飞速发展,使得无人机撒播的应用得到广泛推广,尤其是对于颗粒肥撒播、养殖业投食等对均匀性要求不高的应用;但对于无人机播种(如稻田),均匀性要求较高,目前的技术还无法达到均匀撒播;飞播造林仍以有人驾驶飞机作业为主。相关科研单位和企业对无人机撒播技术的深入研究,能为无人机撒播提供更好的技术方案,更高效地完成撒播作业,提供可靠的数据支持和参考,有望在无人机撒播技术上取得重大突破,积极推进农业生产信息化、机械化与自动化,加速我国现代化农业进程。

## 参考文献:

- [1] 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心. 2016 年我国农用植保无人机发展形势分析与政策建议[Z]. 广州,2016.
- [2] 范树学. 农村劳动力转移对农业生产的影响探讨[J]. 南方农业,2018,12(11):102-103.
- [3] Lan Y B, Thomson S J, Huang Y B, et al. Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in the USA [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2010, 74(1):34-38.
- [4] 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.
- [5] 李朝苏,汤永禄,吴春,等. 播种方式对稻茬小麦生长发育及产量建成的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(18):36-43.
- [6] 宋灿灿,周志艳,罗锡文,等. 农业物料撒播技术在无人直升机中应用的思考[J]. 农机化研究,2018,40(9):1-9.
- [7] 张宁,廖庆喜. 我国小粒径种子播种技术与装备的应用与研究进展[J]. 中国农机化,2012(1):93-96,103.
- [8] 张宇文. 机械式多功能精密排种器的设计[J]. 农业机械学报,2005,36(3):51-53.
- [9] 孙妮娜. 风送式水稻撒播机的研制及试验[D]. 泰安:山东农业大学,2016.
- [10] 朱邦长. 谈飞机播种牧草改良我国南方山丘草地问题[J]. 中国草原,1986(1):72-75.
- [11] 李国雷,刘勇,郭蓓,等. 我国飞播造林研究进展[J]. 世界林业研究,2006,19(6):45-48.
- [12] 赵晓彬. 我国飞播造林技术研究概述[J]. 陕西林业科技,2017(5):90-94.
- [13] 周鸿鹰. 我国飞播造林主要设备概况[J]. 林业机械与木工设备,1981(1):56-58.
- [14] 李晓芳. 中国飞播种草近 30 年的回顾与展望[J]. 草原与草坪,2007(6):73-76.
- [15] 周志艳,明锐,臧禹,等. 中国农业航空发展现状及对策建议[J]. 农业工程学报,2017,33(20):1-13.
- [16] 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.
- [17] 王坤兴. 无人机正在走向民用领域[J]. 机器人技术与应用,1999(4):27.
- [18] 成训妍. 利用遥控直升飞机播种[J]. 新农村,1998(6):25.
- [19] 孙秀芝. 日本用无人驾驶直升飞机进行水稻田间管理作业[J]. 农业机械,2000(4):22-23.
- [20] 刘开新. 俄日韩等国家农业航空产业发展现状[J]. 时代农机,2015,42(7):169.
- [21] 徐雪松,邓喜军,姬晓晨,等. 一种用于抛撒颗粒剂的单旋翼无人直升机:CN106005415A[P]. 2016-10-12.
- [22] 李才圣,梁景堂,谭冰,等. 一种易拆装式单旋翼植保无人机:CN207403940U[P]. 2018-05-25.
- [23] 雷乾勇,朱国民. 一种多旋翼无人机机臂折叠装置:CN207759024U[P]. 2018-08-24.
- [24] 包胜军. 一种播撒装置及飞机播撒装置:CN205336838U[P]. 2016-06-29.
- [25] 李晟华,李杰孙. 撒播无人机及其撒播器:CN207135485U[P]. 2018-03-27.
- [26] 周志艳,宋灿灿,罗锡文,等. 一种农用无人机挂载的物料撒播装置:CN205952320U[P]. 2017-02-15.
- [27] Li J Y, Lan Y B, Zhou Z Y, et al. Design and test of operation parameters for rice air broadcasting by unmanned aerial vehicle[J]. International Journal Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(5):24-32.
- [28] 凤凰网. 日本农民试用无人机播种,速度快 6 倍[EB/OL]. (2018-06-04) [2018-08-30]. <http://mini.eastday.com/mobile/180605220144110.html#>.
- [29] 环球网. 无人机种树一年十亿棵[EB/OL]. (2017-09-01) [2018-08-30]. <http://uav.huanqiu.com/2017-09/11202728.html>.
- [30] 岑海燕,万亮,何勇,等. 一种变量施肥的无人机系统和方法:CN107097958A[P]. 2017-08-29.
- [31] 秦大鹏. 一种无人机施肥装设备:CN107736117A[P]. 2018-02-17.
- [32] 张勇,刘刚强,蒲继斌,等. 一种农用施肥无人机:CN207725626U[P]. 2018-08-14.
- [33] Erico P F. Seed plant drone for reforestation[J]. The Graduate Review, 2017, 2:13-26.
- [34] 付博. 一种小型无人机精准飞播结构:CN207135486U[P]. 2018-03-27.
- [35] 大湘网. 衡阳莲湖湾国家湿地公园利用无人机撒播植被种子[EB/OL]. (2017-05-20.) [2018-08-30]. <http://hn.qq.com/a/20170520/007459.htm>.
- [36] 河南日报. 我省今年计划飞播造林 20 万亩将首次采用无人机



- [EB/OL]. (2017-06-03) [2018-08-30]. <https://www.henandaily.cn/content/fzhan/snjijiao/2017/0603/48542.html>.
- [37] Tan F, Lian Q, Liu C L, et al. Measurement of downwash velocity generated by rotors of agriculture drones[J]. Inmatch - Agricultural Engineering, 2018, 55(2): 141-150.
- [38] 杨知伦, 葛鲁振, 祁力钧, 等. 植保无人机旋翼下洗气流对喷幅的影响研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 116-122.
- [39] 张文星. 桨叶弧面分布四旋翼的农用无人机: CN105438454A[P]. 2016-03-30.
- [40] 张文星. 桨叶弧面分布六旋翼的农用植保无人机: CN105438455A[P]. 2016-03-30.
- [41] 李继宇, 朱长威, 兰玉彬, 等. 一种检测由无人机旋翼气流引起的冠层倒伏锥体的方法: CN106595603A[P]. 2017-04-26.
- [42] 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.
- [43] 吕金庆, 孙 贺, 兑 瀚, 等. 锥形撒肥圆盘中肥料颗粒运动模型优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 85-91, 111.
- [44] 孙妮娜, 许令峰, 王金星, 等. 风送式水稻撒播机关键部件设计及试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 137-141.
- [45] 齐兴源, 周志艳, 杨 程, 等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 20-26.
- [46] 董向前, 宋建农, 张军奎, 等. 锥盘式颗粒肥撒施机构抛撒性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 33-40.
- [47] 张 睿, 王 秀, 孟志军, 等. 肥料抛撒机颗粒肥料抛撒运动分析[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 54-57.
- [48] 邵志威, 陈 智, 侯占峰, 等. BYW-400 型冰草种子振动丸粒化包衣机种子丸化运动特性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 57-64.
- [49] 刘浩蓬, 龙长江, 万 鹏, 等. 植保四轴飞行器的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 71-77.
- [50] 刘 超, 张长利, 王树文, 等. 农用无人机纵向姿态控制系统设计及仿真[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 6-10, 46.
- [51] 漆海霞, 兰玉彬, 杨秀丽, 等. 无人机电控速度模糊 PI 双闭环控制仿真研究[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 31-37.
- [52] 王宽田, 党选举, 郑飞宇, 等. 基于卡尔曼滤波四旋翼无人机控制系统设计[J]. 电子世界, 2017(8): 103-104.
- [53] 李永伟, 王红飞. 六旋翼植保无人机模糊自适应 PID 控制[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(1): 59-65.
- [54] 彭孝东, 兰玉彬, 魏志良, 等. 一种用于物料流量控制的无人机撒播装置及其控制方法: CN107750542A[P]. 2018-03-06.
- [55] 李才圣, 梁景堂, 张晓刚. 一种固体颗粒均匀播撒的装置以及无人机: CN107690897A[P]. 2018-02-16.
- [56] 易 青. 一种用于农业播种的具有调节功能的节能型无人机: CN107826241A[P]. 2018-03-23.
- [57] 马荣朝, 周 龙, 李蒙良, 等. 一种小型无人机便携式螺旋精量播种机: CN206615401U[P]. 2017-11-07.
- [58] 徐 博, 陈立平, 徐 旻, 等. 多作业区域植保无人机航线规划算法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 75-81.
- [59] 徐 博, 陈立平, 谭 彧, 等. 基于无人机航向的不规则区域作业航线规划算法与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 173-178.
- [60] 彭孝东, 张铁民, 李继宇, 等. 基于目视遥控的无人机直线飞行与航线作业试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 258-263.
- [61] 武锦龙. 基于粒子群算法的植保无人机航线规划[J]. 山西电子技术, 2018, 197(2): 5-7, 63.
- [62] 韩 宾, 吴开华, 王文杰. 全自动植保无人机弯道姿态控制算法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(4): 142-144.
- [63] 王 宇, 陈海涛, 李海川. 基于引力搜索算法的植保无人机三维路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 28-33, 21.
- [64] Anderson G W, Batini F E. Pasture, sheep and timber production from agro-forestry systems with subterranean clover sown under 15-year-old *Pinus radiata* by a method simulating aerial seeding[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1983, 23(121): 123-130.
- [65] Horabik J, Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206-225.
- [66] 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.
- [67] 杨风波, 薛新宇, 蔡 晨, 等. 多旋翼植保无人机悬停下洗气流对雾滴运动规律的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 64-73.
- [68] 王爱勤, 张 琨, 刘瑞凤. 飞播用种子大粒化包衣剂: CN1739349A[P]. 2006-03-01.
- [69] 叶 楠. 冲击载荷对植物种子存活率的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [70] 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.
- [71] 李杜潮. 农业喷药无人机千亿美元市场空间下的难题[J]. 南方农机, 2016(2): 46.
- [72] 张璐晶. 无人机市场有了“规矩”农用市场前景看好[J]. 中国经济周刊, 2016(2): 56-57.
- [73] 蒋姣丽, 郑凯仁, 宋瑜清. 加快广东省农用植保无人机推广应用的思考与建议[J]. 现代农业装备, 2017(3): 20-23.
- [74] 王利民, 刘 佳, 杨玲波, 等. 基于无人机影像的农情遥感监测应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 136-145.
- [75] 赵 星. 基于移动 GIS 的农业信息采集系统[J]. 农业工程, 2018, 8(5): 31-34.
- [76] 袁玉敏. 农业植保无人机高精度定位系统研究与设计——基于 GPS 和 GPRS[J]. 农机化研究, 2016(12): 227-231.
- [77] Johnson E N, Calise A J, Watanabe Y, et al. Real-time vision-based relative aircraft navigation[J]. Journal of Aerospace Computing Information & Communication, 2007, 4(4): 707-738.
- [78] 宇辰网. 首批半固体锂电池将用于无人机[EB/OL]. (2018-6-27) [2018-08-30]. <http://www.yuchen360.com:8080/news/17992-0-0.html>.
- [79] 无人机网. 一年半 17 条政策法规 我国无人机的春天正在到来[EB/OL]. (2018-7-30) [2018-08-30]. <http://www.81uav.cn/uav-news/201807/30/40318.html>.
- [80] 项义妹. 三部门在六省市开展植保无人机应用试点, 单机补贴额不超 3 万[J]. 农药市场信息, 2017(26): 15.