doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.012

农用无人机播撒装置与技术研究综述

宋灿灿[1,2]　王国宾[1,2]　韩金钢[1,3]　兰玉彬[1,3]　王会征[1,3]　赵　静[1,3]

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东理工大学现代农业装备研究院, 淄博 255049;
3. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心山东理工大学分中心, 淄博 255049)

摘要: 随着精准农业航空的迅速发展,无人机凭借其高效且精准的优势在农业颗粒物料播撒领域得到广泛应用。飞播装置是实现无人机播撒的基础,飞播关键技术是改善无人机播撒效果的核心,与飞播配套的农艺管理是飞播质量的保障。首先概述了无人机播撒技术的发展历程,指出其在提高播种效率、减少劳动力和优化资源配置方面的重要性。重点阐述了现有的无人机飞播装置及其关键技术研究成果,包括关键部件结构优化、参数优选以及颗粒质量流量的检测方法。总结了无人机在大田播种、变量施肥、造林种草和生物防治等多个领域的应用情况。最后,分析了无人机播撒技术在农业实际应用中面临的挑战,提出未来研究内容包括:继续加强飞播装置创新设计,研发轻量化、模块化、智能化的飞播装置;研发适用于低空播撒的大载荷无人机,提升作业性能,降低作业成本;加强针对无人机播撒的配套农艺技术研究;加强无人机飞播过程控制和智慧决策。

关键词: 农用无人机; 播撒装置; 飞播

中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0110-13　　**OSID**:

Review of Research Progress on Agricultural UAV Spreading Devices and Technology

SONG Cancan[1,2]　WANG Guobin[1,2]　HAN Jin'gang[1,3]　LAN Yubin[1,3]　WANG Huizheng[1,3]　ZHAO Jing[1,3]

(1. *College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*
2. *Institute of Modern Agricultural Equipment, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*
3. *Sub-Center of National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*)

Abstract: With the rapid development of precision agriculture aviation, UAVs have been widely used in the field of agricultural particle spreading by virtue of their efficient and precise advantages. Aerial spreading device is the basis for realising UAV spreading, the key technology of aerial spreading is the key to improve the effect of UAV spreading, and the agronomic management supporting aerial spreading is the guarantee to ensure the quality of aerial seeding. First of all, the development history of UAV spreading technology was outlined, pointing out its importance in improving spreading efficiency, reducing labour and optimizing resource allocation. Existing UAV aerial spreading devices and their key technological research results were highlighted, including key component optimization, parameter preference and detection methods for particle mass flow. The applications of UAVs in various fields such as field seeding, variable fertilizer application, afforestation and grass planting and biological control were summarized. In conclusion, the challenges faced by UAV spreading technology in practical agricultural applications were analyzed, and future research was proposed as follows: continuing to strengthen the innovative design of the aerial spreading device, developing lightweight, modular and intelligent aerial seeding devices; doing research and development of large payload UAVs suitable for low-altitude spreading, improving operational performance and reducing operational costs; strengthening research on supporting agronomic technologies for UAV spreading and strengthening the process control and intelligent decision-making of aerial spreading.

Key words: agricultural UAV; spreading devices; aerial spreading

收稿日期: 2024-10-30　修回日期: 2024-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(32301716)和山东省自然科学基金项目(ZR2023QC047)

作者简介: 宋灿灿(1991—),女,讲师,博士,主要从事农用无人机精准播种与变量施肥技术研究,E-mail: songcc@sdut.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应用技术研究,E-mail: ylan@sdut.edu.cn

0　引言

中国是农业大国，但耕地环境复杂且多样，水田、泥地、丘陵等地面机械难以到达的区域占较大比例，严重制约着我国农业生产全程机械化、智能化、无人化发展进程[1]。无人机具有低空高速的作业优势，且操控灵活、适应性强，能够应对复杂环境下的田间作业，是对地面机械的重要补充[2-3]。自 2014 年我国开始加强农业航空建设以来，农用无人机在国内迅速发展，已成为现代农业不可或缺的重要部分[4-5]。颗粒物料是重要的农业生产资料，作物种子、颗粒肥、颗粒药剂、丸粒化物料等的播撒也是重要的农业生产活动。利用农用无人机播撒不仅可以有效提高作业效率，而且可以解决部分区域机械化作业难题，进一步扩大机械化播撒作业范围，对于全面提升我国农业生产机械化、智能化水平具有重要意义[6]。

随着农用无人机相关技术的不断更新和应用，无人机播撒技术研究也取得显著成果。目前，基于农用无人机的飞播技术已在造林种草、大田播种和施肥、生物防治等多个领域得到广泛应用，且呈现出持续增长的发展趋势，已成为国内农业航空领域的重要应用之一[7]。有必要对这方面的研究成果进行全面综述，以促进飞播技术的发展。本文首先概述国内农用无人机飞播技术的发展，然后分别从飞播装置设计、飞播关键技术、飞播技术应用和影响等方面阐述农用无人机播撒技术研究现状，讨论该领域亟待解决的关键问题并提出发展建议。

1　发展概况

据不完全统计，自 2015 年国内农用无人机迅速发展以来，无人机播撒相关专利申请数量逐年递增（图 1）。2015 年专利申请仅有 13 项，占所有相关专利的 3.15%，2021 年的申请数量为 90 项，占比 21.79%，随后 2 年专利申请量出现下降，但依然维持在 60 项以上。专利内容主要包括施肥、播种、性能优化、生物防治、造林种草等 7 个类别，其中与播种相关的占比最大，为 68.39%，其次为施肥（占比为 12.04%），在其他方面均不到 10%，体现了无人机播撒在大田播撒中的重要地位。

无人机播撒技术的发展不仅体现在专利申请数量上，更体现在播撒技术不断创新、播撒装置不断完善、应用领域不断扩大中。近几年，无人机播撒技术的研究主要集中在优化播撒装置、提升播撒效率、改善播撒质量和提高环境适应性等方面。从最初采用简易离心盘的抛撒方式提高作业效率到优化圆盘结构、设计离心罩等，提高了圆盘式播撒颗粒沉积均匀性[8]；从实现气力吹送式播撒到可以调节高速气流控制颗粒播撒幅宽[9]；从改装简易播撒装置挂载于无人机上到整机模块化、快拆式以及防护性设计，再到参数优选和沉积质量的优化，飞播技术逐渐成熟，飞播装置作业可靠且使用寿命延长[10-12]。从粗放式造林种草初试到针对特殊环境需求的大田精准播撒应用，从水田播种到旱地施肥，从无序撒播到有序条播[13-14]，应用范围不断扩大。这一系列技术创新不仅有效推动了无人机播撒技术发展，也极大地促进了现代农业高效化和可持续发展。

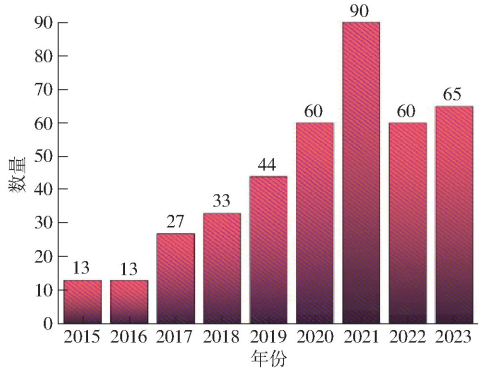


图 1　无人机播撒技术专利申请数量

Fig. 1　Patent applications related to UAV seeding technology

2　飞播装置与技术研究成果

2.1　无人机飞播装置类型

实现农用无人机播撒的关键是设计适用于无人机的飞播装置。经过多年研究，目前已有多种类型的飞播装置出现在农业领域，从播撒形式上主要分为撒播和条播：飞离无人机时颗粒无序分散的称为撒播，有序成行的称为条播。

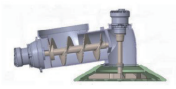
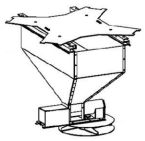
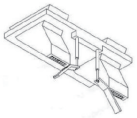
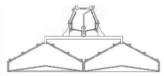
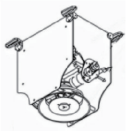
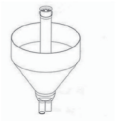
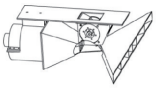
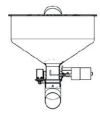
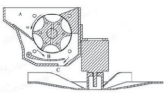
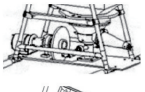
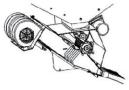
2.1.1　撒播装置

无人机撒播主要有两种方式：离心式和气力式。离心式播撒主要利用圆盘高速旋转产生离心力将颗粒甩出。该方式结构简单、适用性广，且抛撒范围大、效率高。气力式撒播利用高速气流将物料颗粒从装置中高速喷射或抛撒出去。该方式对颗粒损伤少，且能够吹送小粒径和轻质颗粒，但结构较复杂，需要气力输送系统[15]。

现有部分撒播装置如表 1 所示。从表 1 可以看出，离心圆盘多以水平圆盘和直线型叶片相结合的方式，安装在排料机构下方，二者或内置于物料箱底部，结构紧凑，体积小，或者外置于物料箱底部，以无人机脚架为依托固定。颗粒在离心圆盘上的落点也不同，有的在正中间，有的与圆盘中心有一定距离。气力式播撒装置的气力输送通道有圆筒、方管、锥形栅格等结构，排料口有水平、竖直和倾斜一定角度

表 1 撒播装置

Tab. 1 Spreading devices

年份	装置简图	结构特点	适应物料类型	撒播方式	文献序号
2024		采用螺旋输送器和离心圆盘组合，圆盘上有3个弧形叶片和3个直形叶片，中心对称分布，且圆盘上方内部安装了球形凸块的锥形圆盘罩	种子	离心式	[16]
2023		装置设有物料检测传感器，装置下方安装转轮下料装置	肥料	离心式	[17]
2022		采用自研料箱与播撒装置相结合，下端开口处固定有料管，另一侧安装有齿轮和挡板，底部连接播撒盘	种子	离心式	[18]
2022		采用离心甩盘播撒装置，设计螺旋输送式排种机构，快速组配挂接	种子	离心式	[19]
2022		该装置有2个出料口对称分布于无人机两侧，出料口呈长条状，且布满小孔，出料口开度由电动伸缩杆驱动的长条挡板控制	肥料	重力式	[20]
2021		播种机构与播种箱底端固定连通U形铝管，U形铝管两侧底端均固定连接有多个L形支撑杆，共同固定连接有锥形网罩	种子	气力式	[21]
2020		该装置采用双离心盘播撒，双离心盘旋转方向相反，采用双通道供料方式	肥料、种子	离心式	[22]
2020		该装置的离心圆盘内置在物料箱底部，采用螺旋输送器排种，且离心圆盘上安装了离心罩	种子	离心式	[23]
2020		该装置导风筒上端集成有涵道风扇，导风筒底部连接播撒盘，盘面密布经圆角处理的通料孔	肥料	气力式	[24]
2018		气力式撒播装置主要由风机、分流箱、排种槽轮和导流通道组成，设有独立分开的导流通道	肥料	气力式	[25]
2018		装置下种组件由种箱盖、载种箱、导流管及电动的限流挡板组成；播撒组件包括播撒安装板及由播撒电机驱动的播撒盘	种子	气力式	[26]
2018		该装置采用槽轮下料，离心盘下方设有特殊角度离心盘	种子	离心式	[27]
2017		该装置由物料箱、出料调节单元、流量检测单元、物料撒播单元和控制模块组成，物料播撒单元，独立安装于料箱下方	种子	离心式	[28]
2017		装置由匀种装置、调节装置和落种口组成，落种口用于连通种箱与离心摆管撒播装置	种子	离心式	[29]
2017		播撒装置设置在料箱底部，接料漏斗内有多层隔板，下方播撒装置为涡轮风扇	肥料	离心式	[30]
2016		采用多个排料轮对应多个隔料小腔，通过风机向隔料小腔吹风	肥料、种子	气力式	[31]

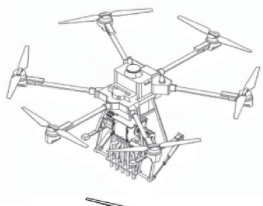
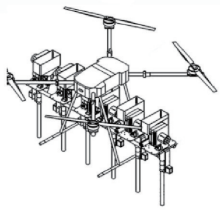
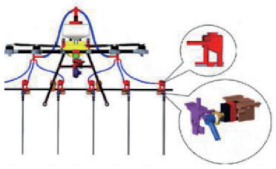
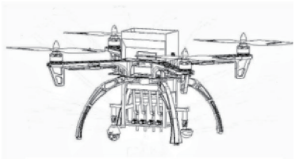
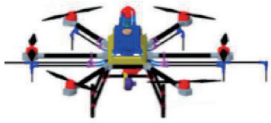
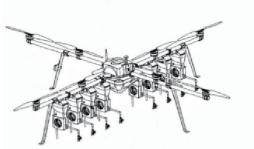
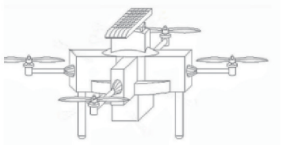
的，可以获得不同的扩散范围。此外，排料机构也各不相同，有简单的直插板、槽轮、螺旋输送器和电动伸缩杆等。离心式和气力式撒播装置是目前研究和应用较多的类型，前者对质量较大的颗粒比较友好，能够产生较大的离心力进而获得更大的幅宽，后者在适应性和灵活性上占据优势，可以初步调节颗粒运动方向，对轻质颗粒较为友好，但两者在播撒均匀性和精准度方面仍有提升空间。

2.1.2　条播装置

条播装置按照颗粒排放形式分为单体条播和集排条播。区别在于，单体条播装置是指由多个排放单元以一定间距横向固定在无人机上，各排放单元实质上为包含物料箱和排放机构的小型排种器，各排放单元的间距即为行距[32]。集排条播装置的颗粒从一个颗粒排放机构进入多个分料输料管，输料管的间距即为行距[33]。现有部分条播装置如表 2

表 2　条播装置

Tab. 2　Strip seeding devices

年份	整机结构简图	结构特点	条播方式	文献序号
2024		排射式播种结构包括供种机构、排射机构和角度调节机构等独立模块，可通过调整排射口的距离实现水稻宽窄行种植，排射式播种结构包括供种机构、排射机构和角度调节机构等独立模块，可通过调整排射口的距离实现水稻宽窄行种植	集排条播	[14]
2024		装载6列施肥单体，施肥单体间距可调节。其中，施肥单体包括肥箱、排肥器、气料混合管、颗粒加速装置、排肥管和排肥管折叠装置等	单体条播	[32]
2023		成条飞播装置各单体通过管夹固定在无人机平台承载杆上，并可在承载杆上调节装置安装间距，实现播种行间距调整	单体条播	[34]
2022		由无人机、气送式排种系统和折叠导种投种装置组成，气送式排种系统按照预设流量将种子流分成6股并输送到折叠式导种投种装置处	集排条播	[15]
2021		系统包括无人机主体及其顶部安装的播种装置，播种装置由储种箱、种子分流机构和气射机构组成	集排条播	[35]
2020		排种装置由种箱、充种漏斗、槽轮、外壳等组成，导种管出种口数量为8个，且均布在出种口支撑架上	集排条播	[36]
2020		整个系统由3个主要模块组成：飞行器、供种模块和种子分配与引导模块。在每一行中，种子通过软管和硬管移动，然后从播种管落向田地	集排条播	[37]
2019		种子直播装置包括壳体、储种腔以及内置于所述壳体中的种子吹射机构，拥有储种腔、运送种子的排种轮、间歇开合结构、吹射管道	单体条播	[38]
2019		装置由机体、机翼和控制本体组成，多个机翼以机体轴线为中心呈环形排列，下料装置位于机体下表面，与机体下表面固定连接	单体条播	[39]

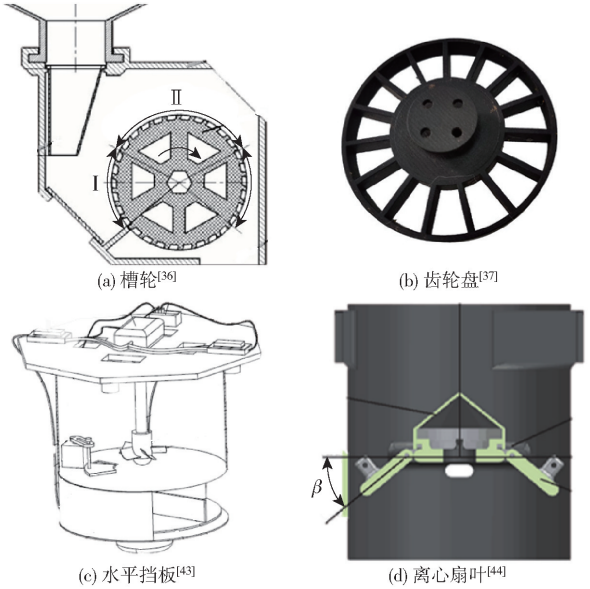
所示。从表中可以看出,条播装置多采用集排条播或单体条播方式,而大多条播无人机由多个单独条播装置组合而成。条播装置动力系统多采用气力式或离心式,给种子提供从条播装置排出后下落速度。此外,大多数条播装置可以根据具体作业对象和作业要求行间距调节排射口的距离。条播装置能够精确控制种子的有序排放和提高颗粒沉积的均匀性,从而提高作物生长质量。还可根据不同作物的生长需求,调整播种深度和行距,适用于多种农作物的播种。条播装置的发展将集中在提高智能化水平、优化排料机构设计和提升作业效率等方面。

2.2 关键部件优化与参数优选

无人机播撒属于低空高速作业,无人机作业参数和播撒装置的结构直接影响飞播效果。随着各种飞播装置的出现,学者开始注重性能的提升,在排料和播撒结构优化以及作业参数优选方面做了大量工作。

2.2.1 排料机构优化

排料机构是飞播装置的关键部件,主要用于将颗粒从物料箱中排出,调节排量[40]。排料机构需能够适应不同类型的颗粒物料(如种子、肥料、药剂等),并根据颗粒特性进行相应调整。为了实现不同颗粒需求,研究者针对多种类型的排料机构进行了优化设计。如图 2 所示,从简单的水平挡板、齿轮盘到槽轮、螺旋输送器和螺旋盘,从直槽到螺旋槽,从圆弧型凹槽到复杂曲线型凹槽[41-44],不仅排量范围增大,且实现了定量排料到连续变量调节的提升,排料更加精准可控,能够更好地适应无人机高速作业[45-46]。然而,现有排料机构虽然基本满足飞播需求,但颗粒物料特性各异,例如肥料吸潮、颗粒表皮粗糙等会导致堵塞,除了精准和流畅外,一机多用和轻量化也是未来研究方向。



(a) 槽轮[36] (b) 齿轮盘[37]

(c) 水平挡板[43] (d) 离心扇叶[44]

图 2 典型排料结构简图

Fig. 2 Sketch of typical discharge structure

2.2.2 播撒机构结构优化

对于圆盘式播撒,离心盘传动比、叶片结构和转速等结构参数会对播撒效果产生显著影响。现有部分飞播装置的结构优化研究成果如表 3 所示。离心式播撒装置的优化主要集中在通过改变颗粒运动轨迹从而提高颗粒分布均匀性方面[47-48]。学者通过获取颗粒沉积曲线,以均匀性、幅宽和沉积分布曲线变化为依据开展优化设计[47,49]。周志艳团队[16]创新设计了曲线型圆盘叶片,通过改变颗粒在圆盘上的运动轨迹提高颗粒分散度。黄小毛团队[23]设计了一种新型圆盘罩安装在离心圆盘上方,利用颗粒在圆盘罩上的反弹改变颗粒在空中的运动轨迹以提高沉积均匀性。吴辉等[50]针对圆盘设计,采取横向和纵向沉积曲线测定不同转速下的肥料均匀性,根据不同转速产生的肥料均匀性变化确定装置关键参数,进一步优化机构。对于气力式播撒,播撒效果会受气力输送管道排料口直径、排料角度等关键参数的影响。排料口大小影响物料的流动速度和均匀性,较小可能导致物料堵塞,过大可能造成播撒不均[31]。排料口的倾斜角度影响物料的投放距离和散布范围,合理的排料角度有助于改善颗粒分布。相关研究也多从气力通道出口尺寸和角度,以及输送管道空间分布等方面展开,通过改变排料结构与气力系统,逐渐实现更高速气流定向吹送种子颗粒[15,25,31]。例如,宋灿灿等[25]设计了一种锥形气力导流通道,将其置于槽轮下方,利用高速气流引导由槽轮下落到导流通道内的种子进入不同角度的通道内,初步实现精准定向撒播。WANG 等[51]设计了一种凹槽轮施肥装置,利用水平高速气流配合凹槽轮施肥装置,实现肥料快速填充与高效排放。

2.2.3 作业参数优选

飞播装置的参数优选可以有效提升飞播装置的性能,进一步提高播撒精度和效率,改善无人机播撒技术的应用效果。飞播作业参数的优选需要综合考虑飞行高度、速度、播种量、种子粒径、施肥方式、飞行路径等因素,并通过理论分析、模拟试验和田间试验等方法,最终确定最佳参数组合,以实现高效、精准的播种,提高飞播成功率,降低作业成本,并有效保护生态环境[52]。毕银丽等[53]通过试验研究表明,当无人机飞行高度逐渐升高时,播撒有效幅宽逐渐增大,均匀性变异系数逐渐减小;当飞行速度速度增加,有效幅宽出现下降趋势。SONG 等[54]通过地面沉积测试证明了随飞行高度增加,有效幅宽显著增加。较高的撒施高度可能导致物料在下落过程中

表 3　飞播装置的结构优化研究成果

Tab. 3　Optimization research results of aerial broadcasting devices

飞播装置	主要研究内容	优化参数	解决的问题或结论	文献序号
离心式	离心圆盘上弧形叶片的偏转角、圆盘罩上凸块的厚度、数量和位置对撒播分布的影响	叶片偏转角度，凸块数量、厚度和位置	改变颗粒在离心圆盘上和与圆盘罩撞击时的运动轨迹，提高了沉积均匀性	[16]
离心式	研究圆盘上颗粒喂入区大小、甩盘转速、甩肥高度对撒肥区域内肥料分布规律的影响	喂入角、甩盘转速	提高了颗粒肥撒施的均匀性和一致性	[47]
离心式	考察排肥齿轮结构参数对排肥均匀性的影响规律	排肥齿轮齿数、排肥间隙、轮齿压力角	解决了排肥器排肥不均匀的问题	[48]
气力式	研究种子在输送气流和无人机旋翼气流场中的运动轨迹和速度变化情况	种子输送管道	提高了种子离开装置的速度，加速颗粒下落，提高准确性	[15]
气力式	研究分流箱气流出口尺寸与出口风速的关系，以及导流通道锥角对导流通道内气流与气压分布的影响	气流出口直径、导流通道锥角	优化了导流通道的结构和锥角，扩大颗粒分散度	[25]
气力式	研究装置播种性能，根据评估方法，优化播种装置关键结构参数和运行参数	导向管尺寸参数	进一步提高了装置条播性能，改善播种均匀度	[33]

受自然因素影响偏离作业区域，而较低的撒施高度则可能影响工作效率。CHOJNACKI 等[55]针对无人机飞行高度对圆盘撒播装置播撒效果影响进行试验，结果表明作业高度较高时颗粒沉积量差异较小，高度较低时颗粒均匀性变异系数较大。

综上，该部分研究应继续深入探索飞播颗粒的运动规律及其影响因素，研究颗粒沉积分布特性与结构参数、作业参数等的关系，以进一步优化飞播装置的性能。

2.3　颗粒质量流量检测

颗粒质量流量检测不仅有助于获知区域内的实际播种和施肥信息，减少损失，还能实现排量的闭环控制，有助于提高播种和施肥的精准变量效果，是实现精准作业的重要基础[56]。为了充分发挥无人机低空高速的优势，并满足播种和施肥的农艺要求，飞播作业时颗粒流多呈现连续高通量的密相状态，这对颗粒质量流量的检测要求较高，既要快速准确，又要实时反馈，以便及时调整作业参数[57]。

目前该技术的研究主要分为两种：①基于现有的排料控制器间接检测排量，现有飞播装置的排料机构多由步进电机、伺服电机和舵机等驱动，电机的转速或转角可改变槽轮和离心圆盘的转速以及水平挡板开度，进而调整排量，二者之间存在一定的相关关系，通过检测电机转速或者角度等间接检测流量，这是目前比较常用的方法[25,36]。②基于现有传感器直接检测流量，SONG 等[58]设计无人机变量施肥系统时采用了对射式激光传感器，将发射端和接收端固定在物料箱与排肥器的连接管道外围，利用光电原理实时检测颗粒流动状态，实现了肥料颗粒质量流量检测。大疆创新公司将霍尔传感器固定在播撒装置的搅拌器上，随着搅拌器的转动霍尔传感器上的磁铁与播撒装置侧壁上的磁条产生间歇性吸引作用，不同流量的颗粒通过时对搅拌器产生的阻力不同，搅拌器转速变化，会引起霍尔传感器信号的变化，从而反映出颗粒流动状态[59]。

此外，现有农用无人机物料箱可方便从上部抽取，放置物料箱时只是固定支点与机身支架接触，其余则悬空，研究者尝试将称量传感器安装在支撑物料箱的机架上，与固定支点相对应，相当于将物料箱直接放置在称量传感器上，物料箱内的质量变化可以直接反映在称量传感器上，也是对颗粒质量流量的直接测量。该检测方法装置简单且能直接获得检测结果，但是无人机飞行作业时产生的振动会影响称量传感器的检测，尤其是大载荷农业无人机转弯、变速等运动状态发生改变时的振动更大。为了获得较为准确的检测结果，HUANG 等[57]设计了一种基于差分称量的检测装置，通过设置多个传感器检测振动噪声，并通过滤波处理提高检测精度。

3　飞播技术应用研究成果

3.1　无人机播种农艺

与常规的播种不同，利用无人机播种时，种子颗粒经空中运动后一般沉积在地表或泥面，影响播种效果的因素较多。为了确保飞播质量，学者积极探索了针对飞播的种植农艺模式。由于飞播种子入泥不深，为了不影响作物出苗，土地整理、飞播时间以及种子处理都非常有必要。合理利用前茬作物资源或者播前灌水等措施能够为种子提供安全的土壤环境，有利于发芽且避免种子裸漏损坏。适宜的播种时间能够确保种子在最佳温湿度条件下发芽、减少气候和土壤风险。飞播前用驱鼠剂和生根粉处理种子可以提高成苗率[56]。例如针对油菜飞播，赵燕

萍[60]指出,油菜的适宜播种期为 9 月下旬至 11 月上旬,前茬为中稻的一般为 9 月下旬,晚稻的一般为 10 月下旬至 11 月上旬,且在水稻收获前 3 d 内或收获后 3 d 内进行飞播。无人机播种效果还会受到飞播机型、飞播方式和种子特性等因素的影响。刁友等[61]指出水稻无人机直播涉及机型选择、稻田耕整等 9 个技术要点。

水稻种植模式相关研究表明,与水稻穴直播机和高速插秧机相比,无人机播种作业效率高、作业成本优势明显,但存在水稻根系较短等弊端[62-63]。随着无人机播撒技术的发展,飞播种植的应用将不断扩大,针对飞播的配套农艺也会逐步完善。未来,除了要结合精准播种技术、种子处理技术、自动导航和路径规划等技术实现高效且规范的播种以外,还要积极探索与不同的农艺模式相结合,形成专门针对无人机播种的种植模式,实现资源配置合理化,作物生长管理精细化。

3.2 无人机变量施肥

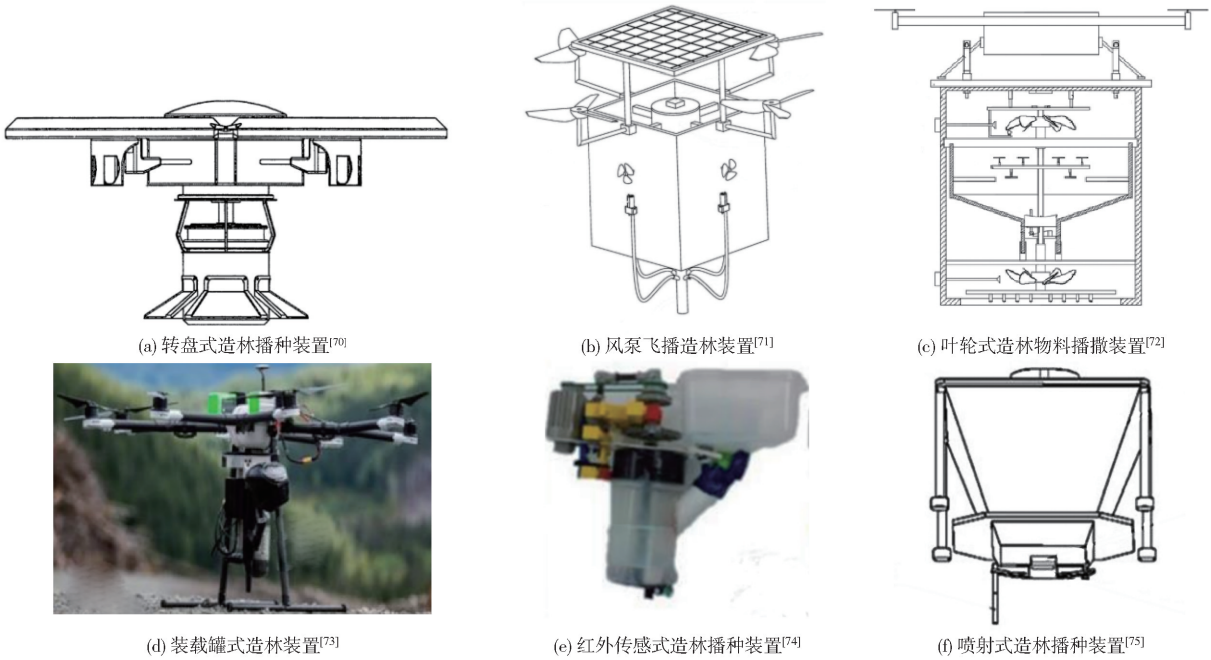
无人机变量施肥是一种将变量控制技术与无人机播撒技术相结合,实现高效精准作业的全新变量施肥方案,不仅效率高,而且可以更加精准地进行差异化施肥,已成为无人机播撒技术的主要应用之一。为了实现无人机变量施肥,学者进行了相关研究。SONG 等[58]通过槽轮转速与风机配合变化,实现肥料变量播撒,通过处方图进行精准变量。于丰华等[64]通过遥感影像与播撒无人机相结合,将遥感无人机获取的作业区域氮含量处方图作为作业依据,进行无人机变量施肥。包明艳等[65]通过遥感图像,对地块进行全面的监测,获取土壤湿度、养分含量、作物生长状况等信息,将信息作为指导变量施肥依据进行作业。SU 等[66]使无人机根据分析结果,实时调整播撒参数,如播撒速度、播撒角度和物料投放量,实现精准变量播撒。无人机变量施肥正逐渐变得更加精准,学者越来越重视无人机精准变量施肥问题,将无人机变量施肥与无人机遥感图像、高光谱图像等技术相结合,进一步提升变量施肥智能化与精准化。

同时未来变量施肥可以结合人工智能和大数据分析不同作物品种和地域特点的施肥差异,根据肥料类型和施肥节点等开展针对性施肥作业,提高施肥适用性和专业性。该技术有望实现更智能化的决策支持,进一步提升农业生产效率和可持续发展能力。

3.3 无人机造林种草

利用高效的无人机播撒技术播撒树种和草籽能够覆盖大面积的区域,缩短造林和种草的时间,提高植被恢复的效率[67-68],多用于荒地、矿区或受灾区域进行植被恢复工作。这方面研究主要包括种子投放和飞播后生态恢复情况[69]。其中相关类型造林种草装置,按照排料类型分为离心式和气力式,具体装置如图 3 所示。离心式造林播种装置,通过颗粒物下料落到转盘方式甩出,提高造林种草效率[70]。气力式造林播种装置,通过风泵装置产生种子下落动力,带动种子播撒,实现定向区域作业[76]。

无人机可以通过配备精准的导航系统和传感器,确保种子在最佳位置和合适密度下投放,增加发



(a) 转盘式造林播种装置[70] (b) 风泵飞播造林装置[71] (c) 叶轮式造林物料播撒装置[72]

(d) 装载罐式造林装置[73] (e) 红外传感式造林播种装置[74] (f) 喷射式造林播种装置[75]

图 3 无人机造林种草相关装置

Fig. 3 UAV afforestation and grass planting related devices

芽率[77]。同时，为了提高无人机飞播造林成效，需要对无人机飞播后采取封育保护、复播、病虫害防治等措施[78-79]。以腾格里沙漠东北缘为例，学者针对飞播后的区域进行样带、样方法，调查研究区内植物种类、数量、高度等生长指标，计算各物种重要值及其多样性指数，分析飞播造林区不同恢复年限植被生长及物种多样性变化特征，调查结果显示飞播有利于腾格里沙漠东北缘飞播造林区沙地植被恢复与重建[71]。

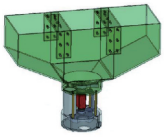
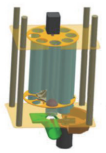
利用无人机造林种草可以为生态恢复和植被建设提供新的解决方案，通过提升效率、降低成本和保护环境，助力实现可持续发展目标。

3.4　无人机生物防治

无人机生物防治是指使用无人机投放有益生物（如昆虫或微生物）以控制害虫或疾病的传播，该方法对生态环境比较友好，应用潜力较大[80]。在生物防治领域，目前研究较多的是赤眼蜂的投放[81]。多采用将赤眼蜂卵卡置于球型赤眼蜂丸中，利用播撒装置将赤眼蜂丸播撒到目标区域，达到投放赤眼蜂的目的[82]，现有的可搭载于无人机的赤眼蜂投放装置如表 4 所示。

表 4　生物防治投放装置特性与结构特点

Tab. 4　Characteristics and structural features of biological control deployment devices

年份	装置结构图	结构特点	播撒颗粒类型	文献序号
2023		由储球箱、拨杆、缓存管、舵机、U型联轴器、槽轮和底壳等组成，根据排种器相关理论设计了双层水平圆盘式蜂球投放器	赤眼蜂丸	[83]
2023		旋转存储机构固定在上下支撑板之间，主要包括储球管和夹持机构，储球管径向安装在夹持板上，夹持板通过轴固定装置与旋转电机的旋转轴连接，从而实现多个储球管的圆周运动	赤眼蜂丸	[84]
2023		投放器主要由导流装置、十字转盘、舵机和发射装置等组成，锥形导流装置的设计有助于蜂丸的流动，同时采用摩擦轮挤压式发射装置发射蜂丸	赤眼蜂丸	[85]
2021		由锥形胶囊储存箱、搅拌装置、拨叉装置、光电传感器和控制器组成，由伺服电机使拨叉旋转控制胶囊释放	赤眼蜂丸	[86]

在生物防治中需要精准的投放技术以确保有益生物能够有效覆盖目标区域。无人机飞行高度、速度、风场等因素会对无人机定点投放产生偏差[87]。为实现无人机精准投放，学者开展了相关研究。例如，研究无人机飞行方向与风向不同角度情况下无人机的投放最优距离，量化无人机飞行的稳定性，并给出稳定性与命中精度之间的关系，研究如何调整最优飞行姿态以保持无人机作业稳定[88]，利用流体力学和空气动力学相关知识分析无人机的最优飞行姿态角以及飞行高度[89]。综上，利用无人机投放不仅能够显著提高作业效率，而且可实现定点投放，未来无人机投放技术将成为生物防治领域的重要技术。

3.5　其他方面

随着无人机技术进步和市场需求变化，无人机也被用于喷洒颗粒药剂和饵料等其他农业颗粒物料。例如，用于喷洒杀虫剂、除草剂和改良颗粒（如石灰、有机肥、渔业饲料）等。这些药剂通常是以颗粒形式出现，通过无人机的精准投放达到预期效果[87]。刘志华[90]通过无人机实际试验对 8 种主要杀蚁饵剂在颗粒大小、无人机不同飞行速度、飞行高度以及不同撒播盘转速等多种情况下进行测试，通过测试结果选择出最适合无人机投放生物药剂的最优参数。其它方面投放装置如表 5 所示。

4　问题分析与发展展望

4.1　问题分析

无人机播撒技术实现了农用无人机与固体颗粒物料播撒装置相结合的低空播撒，为部分地区机械化播撒作业提供了很好的解决方案。现有各类播撒装置不仅能够定量撒播或条播，而且可以精准变量施肥、精准定点投放等，基本能够满足播撒需求，且有些已经实现商品化，得到广泛应用。但还是存在以下不足：

（1）飞播装置设计不足

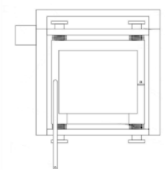
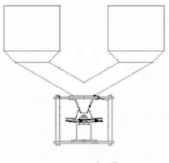
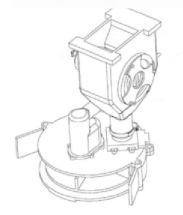
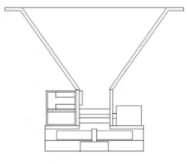
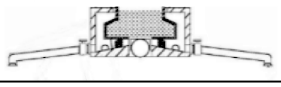
目前播撒装置多为某一无人机机型专用，无人机更新换代较快，播撒装置也需要及时更换，增加成本。某些飞播装置虽能完成特定颗粒的播撒作业，但自重较大，限制了无人机飞行时间和播撒的灵活性，小面积飞播作业效果不佳。颗粒排放不够连续、排量不够大，较难与无人机高速作业匹配。有些播撒方式对颗粒飞离装置的运动调控不够，分散的种子、肥料、颗粒物等不能均匀覆盖目标区域。

（2）农用无人机设计不足

为了适应飞播需求，农用无人机的载荷有了较大提升，但同时机身尺寸和自重也增大，这就导致低

表 5 其它方面投放装置特性与结构特点

Tab. 5 Characteristics and structural features of other aspects of delivery device

年份	装置结构图	结构特点	播撒颗粒类型	文献序号
2022		装置设有凸轮配合弹性复位组件，放置框通过滑动组件进行上下滑动，产生成上下抖动的震荡运动	植物授粉	[91]
2019		转盘内壁面上沿周向呈螺旋状且等间隔布置导向槽，在底板顶面布置有8条凸起的导流条	颗粒药剂	[92]
2018		料斗上设有进料通道，料斗上设有用于调节料斗下料速度的下料速度调节机构，采用固定转速的下料电机驱动槽轮	农业物料	[93]
2016		装置包括支撑架、水箱和配重底座，通过四脚架顶部的加料箱与输送机构配合设置，设有传感器与加料开关配合	农业物料	[94]
2015		装置设有凸轮转动，凸轮与筛盘的底部相接触，实现筛盘抖动	农业物料	[95]

空飞行灵活性和稳定性受限,尤其是在复杂地形或空间受限的环境中尤为突出,这极大地阻碍了飞播技术的应用。

(3)飞播过程控制不足

与无人机施药类似,无人机飞播也属于低空作业,颗粒沉积质量会受到无人机旋翼风场、环境因素以及无人机作业参数等多种因素的影响。然而无人机飞播技术研究相对较晚,现有研究多注重如何实现颗粒飞离播撒装置,较少关注颗粒如何在地面沉积及其与影响因素的关系,对颗粒扩散和沉积过程的控制不够,这也是导致颗沉积分布偏离目标区域的主要原因。

(4)缺少飞播配套农艺

无人机施药多是将药液喷施在作物茎叶表面,而飞播的颗粒种子经低空运动会沉积在泥地或水田表面,若是管理不好会影响发芽和出苗。目前使用无人机飞播的用户多是直接按照传统模式进行土地整理,作物种植和田间管理,未充分考虑无人机飞播特点,导致作物长势差异较大。

(5)颗粒流量检测不足

与液体不同,固体颗粒粒径和质量较大,且实际流量范围较大,精准检测较难。无论是播种和施肥这种高密相连续颗粒流还是投放赤眼蜂丸这种稀疏颗粒流,都需要获取颗粒排量信息,现有技术多通过检测排料机构的驱动电机转速间接获得排量信息,较少会安装专用传感器检测实时颗粒流量,而电机转速与颗粒实际排量之间会存在差异,这就导致漏播或者重播,偏离单位面积目标用量。

(6)飞播作业额外成本高

无人机作业本身效率高,但续航和载荷有限,大面积作业需要多次往返断点更换电池和加料,这些额外成本的增加,降低了作业的经济性和整体作业效率。

4.2 发展展望

基于目前研究现状、尚存在的问题以及未来发展需求,面向精准智能播撒要求,未来农用无人机飞播技术应加强以下方面研究:

(1)继续加强飞播装置创新设计,研发轻量化、模块化、智能化的飞播装置。进一步轻量化装置设计,增加大排量功能,确保播撒均匀性。无人机飞播装置需要进行轻量化设计,以降低设备的整体重量,从而提高无人机飞行稳定性和作业续航能力。在飞播装置材料选择上,可以考虑使用强度较高、材料轻质(如碳纤维或铝合金)来减轻装置的重量。可以利用气流动力学优化设计播撒装置颗粒出口结构,确保在不同飞行高度和速度下种子、肥料和颗粒物的均匀播撒,减少局部播撒沉积过密或过稀问题,以提高作物生长均匀性和产量。继续开发多种适用于

不同作物和环境的无人机播撒设备，满足更多的颗粒播撒或投放作业要求。

(2)研发适用于低空播撒的大载荷无人机，提升作业性能，降低作业成本。开发具有更强的动力系统，并改良大载荷无人机气动设计，确保无人机在复杂环境中的稳定飞行。针对创新无人机进行控制系统的优化设计，提高无人机在低空飞行的操纵性和稳定性。对无人机进行模块化设计，便于无人机维护和升级，有效降低生产和运行成本，提升整体经济性。

(3)加强针对无人机播撒的配套农艺技术研究。与无人机施药不同，无人机播撒颗粒物料不仅需要考虑当时颗粒沉积的均匀性，而且要考虑播撒前后的农业资源配置和农事问题。例如探索适合无人机播撒的种植模式，包括前期土地整理、无人机播种和施肥时间的安排。在无人机播撒作业前期，应该对土地相关信息进行整理，例如土壤测试、翻耕及平整，确保土壤条件适合飞播种子生长。合理的播种和施肥时间是探索无人机播撒种植模式所需考的重要因素，例如选择合适的气候条件和土壤湿度，以此提高种子的发芽率和肥料的有效利用率。研究适用于飞播的种子处理技术，以改善飞播效果。研发新型种子包裹材料和处理工艺，为种子提供更好的物理保护和化学保护。探索使用生物降解材料的种子包裹工艺，增强种子对抗病虫害和环境应激能力。针对不同作物的生长需求，定制种子的处理技术，控制种子的发芽时间和提高初期生长速度，保证种子在撒播后能够迅速适应环境能力。

(4)加强无人机飞播过程控制和智慧决策。无人机飞播属于低空高速作业，颗粒排放和空中扩散的过程决定了沉积效果。可借鉴无人机精准变量施药技术研究成果，研究更高精度的颗粒流量检测传感器和实时数据处理算法，开发闭环控制系统，提高颗粒流量监测的准确性和稳定性，实现对颗粒流量实时反馈和调整。提高对颗粒播撒的过程控制，精细化调节作业参数，以获得更加精准的播撒作业质量。利用导航技术、大数据和人工智能等高新技术，从全局角度优化路径规划，综合考虑作业环境、作业对象、作业时间、设备能耗及人力成本，预测最优的作业路线和作业策略，以提高颗粒沉积质量，节省颗粒用量，以降低无人机能耗和提高作业效率，增强无人机连续作业能力。

参 考 文 献

[1] 罗锡文，胡炼，何杰，等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报，2024，40(1)：1－16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1－16. (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] LIU Z, LI J. Application of unmanned aerial vehicles in precision agriculture[J]. Agriculture, 2023, 13(7): 1375.

[4] WAN Junjie, QI Lijun, ZHANG Hao, et al. Research status and development trend of UAV broadcast sowing technology in China [C]// Annual International Meeting of ASABE, 2021: 2100017.

[5] 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)

[6] 宋灿灿，王国宾，赵静，等. 颗粒肥撒施过程中的沉积分布模式研究进展[J]. 农业工程学报，2022，38(14)：59－70.
SONG Cancan, WANG Guobin, ZHAO Jing, et al. Research progress on the particle deposition and distribution characteristics of granular fertilizer application[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(14): 59－70. (in Chinese)

[7] KIM J, KIM S, JU C, et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: a review of perspective of platform, control, and applications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 105100－105115.

[8] 阮波. 无人机播种施肥装置：201521123128.3[P]. 2016－05－25.

[9] 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和方法：201610654440.8[P]. 2017－02－22.

[10] 隋艳利. 一种高效播种的无人机装置：202022550395.6[P]. 2021－07－20.

[11] 周乐，马泽豪. 播撒装置及无人机：202120053132.6[P]. 2021－11－19.

[12] 曾荣，罗建军，张卓. 一种有序撒播无人机：202221150044.9[P]. 2022－09－13.

[13] 刘木华，周博聪，陈雄飞，等. 水稻直播无人机：201930548777.5[P]. 2020－05－22.

[14] 王晴晴，黄鑫，姜春霞，等. 一种排射式播种无人机：202410700459.6[P]. 2024－08－09.

[15] 黄小毛，张顺，朱耀宗，等. 气送式油菜飞播装置投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报，2022，38(17)：31－41.
HUANG Xiaomao, ZHANG Shun, ZHU Yaozong, et al. Seeding process analysis and test of the air conveying rapeseed aerial seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 31－41. (in Chinese)

[16] WANG Xunwei, ZHOU Zhiyan, CHEN Pengchao, 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.

[17] 毕银丽,马少鹏,高雅坤,等. 一种离心式无人机用颗粒撒播装置:202323331365.6[P]. 2024-07-09.
[18] 张宏新,路峰. 一种水稻种子播撒装置:202221961648.1[P]. 2023-01-10.
[19] 高学梅,游兆延,吴惠昌,等. 基于无人机平台的绿肥种子撒播装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):76-85.
GAO Xuemei, YOU Zhaoyan, WU Huichang, et al. Design and experiment of green manure seed broadcast sowing device based on unmanned aerial vehicle platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(11):76-85. (in Chinese)
[20] 何皓良. 一种植保无人机施肥装置:202223422752.6[P]. 2023-06-09.
[21] 郝一军,王万勇,郭靖,等. 一种农用播种无人机:202121849732.X[P]. 2022-03-18.
[22] 徐智芹,陈章. 一种播撒装置以及无人机:202023061066.1[P]. 2021-10-08.
[23] WU Z J, LI M L, LEI X L, et al. Simulation and parameter optimisation of a centrifugal rice seeding spreader for a UAV[J]. Biosystems Engineering, 2020, 192: 275-293.
[24] 王国初. 无人机用颗粒物料播撒装置:202011088647.6[P]. 2020-12-11.
[25] 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 ricesowing device for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 80-88,307. (in Chinese)
[26] 谢景鑫,戴思慧,李明,等. 一种无人机播撒装置:201821997279.5[P]. 2019-09-17.
[27] SONG C, ZHOU Z, LUO X, et al. Design and test of centrifugal disc type sowing device for unmanned helicopter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018,11(2):55-61.
[28] 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:201710946278.1[P]. 2018-03-06.
[29] 陈雄飞,周博聪,刘木华,等. 一种离心摆管式播种无人机:201711439666.7[P]. 2018-04-13.
[30] 王佳程,李哲铭. 播撒无人机:201720036559.9[P]. 2017-09-12.
[31] 叶元文,肖元庆. 气力式多功能播撒机:201610678397.9[P]. 2017-01-04.
[32] 韩玉宝,姬江涛,张瑞瑞,等. 固体颗粒撒施无人机槽轮结构优化设计与试验[J]. 农机化研究,2024,47(3):1-10.
HAN Yubao, JI Jiangtao, ZHANG Ruirui, et al. Structural optimization design and test of groove wheel apparatus for solid particle spreading UAV[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,47(3):1-10. (in Chinese)
[33] LIU W, ZHOU Z, XU X, et al. Evaluation method of rowing performance and its optimization for UAV-based shot seeding device on rice sowing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,207:107718.
[34] 黄小毛,刘宇,朱耀宗,等. 稻油兼用型成条飞播装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):111-121.
HUANG Xiaomao, LIU Yu, ZHU Yaozong, et al. Design and experiment of striped aerial seeding device for rice and oil rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(9):111-121. (in Chinese)
[35] 尹飞,李振宇,肖勇,等. 一种用于丸粒化种子的无人机播种系统:202111204766.8[P]. 2021-12-21.
[36] 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)
[37] HUANG Xiaomao, ZHANG Shun, LUO Chengming, et al. Design and experimentation of an aerial seeding system for rapeseed based on an air-assisted centralized metering device and a multi-rotor crop protection UAV[J]. Applied Sciences,2020,10:8854.
[38] 陈博. 具有同步喷施功能的水稻精量直播无人机:201920358783.9[P]. 2019-12-06.
[39] 周敏. 一种播种无人机的均匀下料装置:201911111878.1[P]. 2021-05-14.
[40] SONG C, ZANG Y, ZHOU Z, et al. Test and comprehensive evaluation for the performance of UAV-based fertilizer spreaders[J]. IEEE Access, 2020, 8: 202153-202163.
[41] 宋灿灿,周志艳,王国宾,等. 施肥无人机槽轮式排肥器槽轮结构参数优选[J]. 农业工程学报,2021,37(22):1-10.
SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, WANG Guobin, et al. Optimization of the groove wheel structural parameters of UAV-based fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(22):1-10. (in Chinese)
[42] 陈博. 机载吹射式种子直播设备及播种无人机:CN108715225A[P]. 2019-09-10.
[43] LI J, LAN Y, ZHOU Z, et al. Design and test of operation parameters for rice air broadcasting by unmanned aerial vehicle[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9: 24.
[44] 任万军,吴振元,李蒙良,等. 水稻无人机撒肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(3):88-98.
REN Wanjun, WU Zhenyuan, LI Mengliang, et al. Design and experiment of UAV fertilization spreader system for rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):88-98. (in Chinese)
[45] 常子敬,冯壮,黄稀荻. 播撒装置及其控制方法、以及植保无人机:201780025550.0[P]. 2018-12-21.
[46] 余敏昊,周博聪,陈雄飞,等. 一种与无人机配套的螺旋匀种离心圆盘式水稻播种机:201810430764.2[P]. 2018-08-24.
[47] 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.
DONG Xiangqian, SONG Jiannong, ZHANG Junkui, et al. Working performance and experiment on granular fertilizer spreader with cone disk[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 33-40. (in Chinese)
[48] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等. 间隙啮合渐开线齿轮排肥器的结构优化仿真及试验[J]. 华中农业大学学报,2020,39(1):171-179.

DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Optimization simulation and experiment of structure of interval meshing involute gear fertilizer apparatus[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2020,39(1):171 - 179. (in Chinese)
[49] 宋卫堂,封俊,刘亚佳. 地轮驱动离心式化肥撒布机的设计与试验[J]. 农业机械学报,2002,33(1):39 - 42.
SONG Weitang, FENG Jun, LIU Yajia. Design and performance test of a centrifugal type of fertilizer broadcaster with land-wheel driven[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 39 - 42. (in Chinese)
[50] 吴辉,王秀,张晋国,等. 圆盘式施肥机抛撒模型中圆盘转速的试验研究[J]. 农机化研究,2007,29(7):136 - 139.
WU Hui, WANG Xiu, ZHANG Jinguo, et al. Study on speed of spinning disc in model of spinning disc spreader[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(7): 136 - 139. (in Chinese)
[51] WANG Xunwei,JIANG Rui,ZHOU Zhiyan,et al. Discharge rate consistency of each channel for UAV-based pneumatic granular fertilizer spreader[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2023,16(4): 20 - 28.
[52] COETZEE C J, LOMBARD S G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertilizer[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109: 308 - 325.
[53] 毕银丽,张龙杰,白雪蕊. 无人机飞播参数优选与 DSE 浸种荞麦生态修复效应研究[J]. 矿业科学学报,2023,8(5):695 - 703.
BI Yinli, ZHANG Longjie, BAI Xuerui. Study on parameters optimization of unmanned aerial vehicle and ecological remediation of buckwheat stained with DSE[J]. Journal of Mining Science and Technology,2023,8(5):695 - 703. (in Chinese)
[54] SONG C,LIU L,WANG G, et al. Particle deposition distribution of multi-rotor UAV-based fertilizer spreader under different height and speed parameters[J]. Drones,2023,7(7):425.
[55] CHOJNACKI J, BERNER B. The influence of air stream generated by drone rotors on transverse distribution pattern of sown seeds[J]. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2018, 63(3): 9 - 12.
[56] 朱海滨,胡群,陆喜瞻,等. 无人飞播水稻生育特征与丰产关键技术研究进展[J]农业工程学报,2024,40(11):1 - 13.
ZHU Haibin, HU Qun, LU Xizhan,et al. Research progress in growth characteristics and key techniques for the highyield of unmanned aerial seeding rice[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(11):1 - 13. (in Chinese)
[57] HUANG J, HE W, YANG D, et al. Quantity monitor based on differential weighing sensors for storage tank of agricultural UAV[J]. Drones,2024, 8(3): 92.
[58] 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.
[59] HUANG X D, ZHANG C. Material detecting mechanism of sowing machine, sowing machine, and unmanned aerial vehicle for protecting plants: US20200137948A1[P]. 2020 - 05 - 07.
[60] 赵燕萍. 稻草全量还田油菜免耕飞播轻简化栽培技术[J]. 世界热带农业信息,2024(7):47 - 49.
[61] 刁友, 朱从桦, 任丹华,等. 水稻无人机直播技术要点及展望 [J]. 中国稻米, 2020,26(5):22 - 25.
[62] 周为华,戴勤珍. 水稻三种机械化种植模式比较[J]. 农业开发与装备,2024(2):115 - 117.
[63] 左丛山,陈柳清,宋承琦,等. 不同品种水稻无人机飞播与人工撒播对比试验[J]. 湖北农业科学,2021,60(1):36 - 38.
ZUO Congshan, CHEN Liuqing, SONG Chengqi, et al. Contrast test between unmanned aerial vehicle(UAV) aerial sowing and artificial sowing on production of different rice varieties[J]. Hubei Agricultural Sciences,2021,60(1):36 - 38. (in Chinese)
[64] 于丰华,曹英丽,许童羽,等. 基于高光谱遥感处方图的寒地分蘖期水稻无人机精准施肥[J]. 农业工程学报,2020,36(15):103 - 110.
YU Fenghua, CAO Yingli, XU Tongyu, et al. Precision fertilization by UAV for rice at tillering stage in cold region based on hyperspectral remote sensing prescription map[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(15):103 - 110. (in Chinese)
[65] 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.
BAO Mingyan, LUO Tingbao, LU Liangxuan. Integration of unmanned aircraft spectral imaging and variable fertiliser application technology in rice fertiliser application[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2023,29(10):144 - 147. (in Chinese)
[66] SU Dongxu,YAO Weixiang,YU Fenghua, et al. Single-neuron PID UAV variable fertilizer application control system based on a weighted coefficient learning correction[J]. Agriculture,2022,12(7):1019.
[67] 袁耀,马中平,郭昊,等. 青海省飞播造林工程[J]. 林业科技通讯,2023(1):42 - 45.
YUAN Yao, MA Zhongping, GUO Hao, et al. Aerial seeding afforestation project in Qinghai Province[J]. Forest Science and Technology,2023(1):42 - 45. (in Chinese)
[68] 李玉田,沈雪健. 商洛市飞播造林历史回顾与成效分析[J]. 安徽农学通报,2023,29(16):68 - 71.
LI Yutian, SHEN Xuejian. Historical review and effectiveness analysis of fly sowing forestation in Shangluo City[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2023,29(16):68 - 71. (in Chinese)
[69] 富勇武. 无人机飞播造林种草技术研究[J]. 山西林业,2023(3):40 - 41.
[70] 马雅莉,石长春,刘喜东,等. 一种基于无人机的飞播造林播种装置:202310905599.2[P]. 2023 - 09 - 22.
[71] 高苗苗,蒙仲举,高永,等. 腾格里沙漠东北缘飞播造林对植被多样性的影响[J]. 农业与技术,2022,42(19):69 - 73.
GAO Miaomiao, MENG Zhongju, GAO Yong, et al. Impacts of fly-seeding afforestation on vegetation diversity at the northeastern edge of the Tengger desert[J]. Agriculture and Technology,2022,42(19):69 - 73. (in Chinese)
[72] 王鹏飞. 一种农林无人机物料撒播装置:202310412598.4[P]. 2023 - 06 - 23.

[73] ANDRIO A. Development of UAV technology in seed dropping for aerial revegetation ractices in Indonesia[C]// IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2019:308012051 - 012051.
[74] BARMAN S,ROUF R R, ISLAM S, et al. Proposed design for automated agro-quadcopter "agro-ropter"[C]//1st International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science,2017:22 - 23.
[75] LI J Y, LAN Y B, ZHOU Z Y,et al. Design and test of operation parameters for rice air[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016,9(5):9.
[76] 康安成,张新超,刘团会,等. 一种飞播造林用无人机:202122793134.1[P]. 2022 - 04 - 12.
[77] 郭建军. 飞播造林 GPS 导航与人工地面导航的比较研究[J]. 内蒙古林业调查设计,2022,45(3):71 - 72,86.
GUO Jianjun. Comparative study of GPS navigation and artificial ground navigation in afforestation by air seeding[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design,2022,45(3):71 - 72,86. (in Chinese)
[78] 张来霞. 提高阿尔泰山飞播造林成效技术措施[J]. 农村科技,2019(1):48 - 50.
ZHANG Laixia. Technical measures to improve the effectiveness of fly-seeding afforestation in Altai Mountains[J]. Rural Science and Technology,2019(1):48 - 50. (in Chinese)
[79] 胡林立,范霞. 浅论提高飞播造林成效的途径[J]. 种子科技,2019,37(10):99.
[80] 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 aerial vehicles (UAV)[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences,2024,54(1):35 - 42,56. (in Chinese)
[81] 赵玲丽,周志艳,宋灿灿,等. 基于无人机精准投放赤眼蜂的探讨[J]. 农机化研究,2022,44(10):1 - 6,36.
ZHAO Lingli,ZHOU Zhiyan, SONG Cancan, et al. Discussion on precise release of trichogramma based on unmanned aerial vehicle(UAV)[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(10):1 - 6,36. (in Chinese)
[82] 王庆雨,宋灿灿,单常峰,等. 基于赤眼蜂的生物防治技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2023,44(5):71 - 80.
WANG Qingyu,SONG Cancan,DAN Changfeng, et al. Research status and the prospect of biological control technology based on Trichogramma[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(5):71 - 80. (in Chinese)
[83] 王庆雨. 多旋翼无人机赤眼蜂丸定点投放系统的设计与试验[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
WANG Qingyu. Design and testing of a multi-rotor UAV red-eye wasp pellet spotting system[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2023. (in Chinese)
[84] SONG C, WANG Q, WANG G,et al. Study on the design and experiment of trichogramma ball delivery system based on agricultural drone[J]. Drones, 2023, 7: 632.
[85] 姬生征. 面向复杂风场的赤眼蜂丸投放系统设计与试验研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
JI Shengzheng. Design and experimental study of a red-eye wasp pellet delivery system for complex wind fields[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2023. (in Chinese)
[86] ZHAN Yilong, CHEN Shengde, WANG Guobin, et al. Biological control technology and application based on agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) intelligent delivery of insect natural enemies (*Trichogramma*) carrier[J]. Pest Management Science,2021,77(7):3259 - 3272.
[87] 董卉,唐伟,徐红星,等. 不同类型飞防除草颗粒剂飘移特性初探[J]. 农药科学与管理,2023,44(10):48 - 53.
DONG Hui, TANG Wei, XU Hongxing, et al. Study on the drift of different types of herbicide granules by unmanned aerial vehicles[J]. Pesticide Science and Administration,2023,44(10):48 - 53. (in Chinese)
[88] 胡盈,李涵,付丽娜. 无人机定点投放问题探讨[J]. 科技视界,2024,14(11):51 - 54.
HU Ying, LI Han, FU Li'na. Exploring the problem of targeted drone placement[J]. Science and Technology Vision,2024,14(11):51 - 54. (in Chinese)
[89] 唐彭晨,葛城羽,陆连兴. 基于优化模型的无人机定点投放问题的研究[J]. 长江信息通信,2024,37(4):25 - 28.
TANG Pengchen, GE Chengyu, LU Lianxing. Research on UAV fixed point delivery problem based on optimization mode[J]. Changjiang Information & Communications,2024,37(4):25 - 28. (in Chinese)
[90] 刘志华. 杀蚁饵剂无人机播撒技术参数测定及应用[J]. 数字农业与智能农机,2023(11):40 - 44.
LIU Zhihua. Determination of technical parameters and application of unmanned aerial dispersal of termiticide baits[J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery,2023(11):40 - 44. (in Chinese)
[91] 阙仁文,王新宇,徐德胜,等. 一种能够调节授粉量的无人机用授粉盒:202220740568.7[P]. 2022 - 08 - 30.
[92] 刘越,王美美,徐雪松,等. 无人机撒播装置防治水稻杂草试验[J]. 农药科学与管理,2019,40(9):45 - 51.
LIU Yue, WANG Meimei, XU Xuesong,et al. Field efficacy trials on the control of weeds in rice by UAV spread[J]. Pesticide Science and Administration,2019,40(9):45 - 51. (in Chinese)
[93] 刘新华,陈长卿,陈灵峰,等. 一种无人机播种机的下料装置:201820290855.6[P]. 2018 - 10 - 23.
[94] 王胜. 一种无人机施肥机空中加料装置:201620733078.9[P]. 2017 - 01 - 04.
[95] 陈梦洋. 多喷撒头振动筛料播种农业无人机:201510818099.0[P]. 2016 - 03 - 30.