

水稻条播无人机无驱动折叠导种投种装置设计与试验

朱耀宗¹ 黄小毛^{1,2} 尹从龙¹ 朱权威¹ 石逸泽¹ 李文成^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为实现水稻成条飞播稳定的种子籽粒落地成条效果, 针对延长导种投种管引起电驱自动折叠困难而引发的飞行平台安全起降问题, 设计一种无驱动重力折叠型导种投种装置。通过分析无人机水稻条播作业过程中导种投种管内径、管构型组合、导种投种管长度与无人机飞行高度比例(长高比)等关键因素对种子籽粒成条效果的影响机理, 确定3个因素的取值范围。基于3WTYI6-20C型六旋翼植保无人机开展泥盒飞播优化试验, 结果表明, 当管内径为22 mm、长高比为0.714、管构型组合为Ⅳ时, 导种投种管对种子籽粒约束效果较好, 无人机飞行姿态平稳, 条带宽度达到62.1 mm, 成条指数为0.75。进一步开展1~5 m/s不同作业速度下的泥盒试验, 结果表明, 该六旋翼植保无人机的条带宽度范围为58.3~69.2 mm, 成条指数范围为0.72~0.77。而适配3WWDZ-60A型四旋翼无人机后的条带宽度范围为84.5~92.5 mm, 成条指数范围在0.63~0.66之间, 表明该装置可与多种机架构型的飞行平台相适配, 并在不同作业速度下实现稳定的水稻成条飞播效果。

关键词: 多旋翼无人机; 水稻条播; 导种投种装置; 无驱动重力折叠; 田间试验

中图分类号: S252 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)15-0189-13 **OSID:** 

Design and Experiment of Non-driven Gravity-based Foldable Seeding Device for Rice Strip-seeding UAV

Zhu Yaozong¹ Huang Xiaomao^{1,2} Yin Conglong¹ Zhu Quanwei¹ Shi Yize¹ Li Wencheng^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aiming to achieve a stable strip effect during rice aerial seeding and address the issue of safe unmanned aerial vehicle (UAV) take-off and landing caused by extending the seeding tube, a non-driven and gravity-based foldable seeding device was proposed. By analyzing the rice strip-seeding process based on UAV, it was determined that the inner diameter of the seeding tube, the ratio of tube length to UAV flight height (length-to-height ratio), and the configuration combination of the seeding tube influenced the degree of seed confinement, the disturbance intensity of ground diffusion airflow on seeds, and the stability of the UAV's flight posture, thereby affecting the strip effect of seeds. Based on the 3WTYI6-20C six-rotor agricultural spraying UAV, a mud-box seeding test was conducted for optimization. Results indicated that when the tube's inner diameter was 22 mm, the length-to-height ratio was 0.714, and the configuration combination was Ⅳ, the seed confinement effect of the seeding tube was optimal, the UAV's flight posture remained stable, and the strip width reached 62.1 mm with a strip index of 0.75. Using these factor values, mud-box experiments were performed at operation speeds ranging from 1 m/s to 5 m/s. Results showed that for the 3WTYI6-20C six-rotor agricultural spraying UAV, the strip width ranged from 58.3 mm to 69.2 mm, and the strip index ranged from 0.72 to 0.77. Meanwhile, the 3WWDZ-60A four-rotor agricultural spraying UAV equipped with the non-driven and gravity-based foldable seeding device achieved a strip width range of 84.5 mm to 92.5 mm and a strip index range of 0.63 to 0.66, which demonstrated the stable strip effect. These findings suggest that the non-driven and gravity-based foldable seeding device can be effectively adapted to various UAV architectures and achieve

收稿日期: 2025-05-16 修回日期: 2025-07-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075211)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(26622025GXPY006, 2662023GXPY002)

作者简介: 朱耀宗(1996—), 男, 博士生, 主要从事无人机有序播种技术与装备研究, E-mail: 760838147@qq.com

通信作者: 黄小毛(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农用无人机多功能利用研究, E-mail: huangxiaomao@hzau.edu.cn

stable rice strip-seeding effects across different operation speeds.

Key words: multi-rotor UAV; rice strip-seeding; seeding device; non-driven gravity-based folding; field test

0 引言

水稻是我国重要的粮食作物之一,播栽是其生产过程中机械化水平最低的环节^[1]。育苗移栽与直播是当前水稻主要的两种种植方式,前者通过提前播种育苗达到延长生育期和壮苗抗逆稳产高产而发展成为农业主管部门主推的生产技术,后者则因流程简化、设备简单而深受农户青睐^[2]。近年来,基于无人机的水稻直播方式,因其作业时不与地表接触而具备地面机器无法企及的高通过性和地形适应性,再加上高效、智能、无人的作业特点,得到了广泛关注^[3-9]。

目前基于多旋翼植保无人机平台的播撒技术经过多轮优化迭代后,已经广泛应用于水稻播种作业中。Song等^[10]提出气力式无人机水稻播撒装置,借助气流将水稻种子籽粒扩散吹向种床。极飞科技推出的扫振式垂直甩盘播撒装置,大疆农业以及四川农业大学等相关企业、科研院校推出的水平甩盘式播撒装置,利用甩盘提供的离心力离散种子籽粒,使其以一定播幅落入泥面种床^[11]。但过高的投种高度使得种子籽粒容易受到无人机旋翼风场的影响,种子籽粒落点呈无序散乱分布^[12-13],导致苗期田间管理便利性与土壤养分的高效均匀利用率不及地面播种机具的条播方式。

为实现飞播种子落地成行成条有序分布,需有效抑制旋翼下洗气流的扰动。对脱离排种系统的种子籽粒进行加重、加速或导种投种管约束是经常采用的手段。通过丸粒化加重种子提高抗干扰能力并利用高速电机产生的摩擦力^[14-15]、涵道风机产生定向气流^[16]或者高速射流^[17]缩短种子穿越下洗气流场的时间,可达到减小横向偏移量的目的。若种子存在初始横向速度或运动中受扰动出现微小横向偏移,加速反而会加剧其横向偏移量。黄小毛等^[18-21]在单体式条播装置中加装电驱动折叠型导种投种管,确保管长范围内下落种子籽粒不受旋翼气流干扰,并对下落种子的速度方向进行整定。但是过长的导种投种管会增加自动折叠的难度和成本,带来潜在操作风险。

针对延长导种投种管引起电驱自动折叠困难而导致飞行平台安全起降的问题,提出并设计一种无驱动重力折叠型导种投种装置,理论上可与任意植保飞行平台适配,实现稳定的水稻条播效果。通过

分析无人机水稻条播作业过程,明确导种投种管内径、管构型组合、导种投种管长度与无人机飞行高度比例(长高比)等关键因素取值范围,并开展泥盒飞播优化试验;开展不同飞行速度与不同机型条件下的条播效果验证试验,以验证该导种投种装置的适配性;最后开展田间试验,以期实现水稻成条飞播作业,为设计产品化的水稻成条飞播装置提供技术参考。

1 整机结构与工作过程

1.1 电驱自动折叠式条播装置

以3WTYI6-20C型植保无人机为飞行平台,一种基于电驱自动折叠式导种投种管的9行条播无人机整机结构如图1所示,由飞行平台、横杆以及若干套种箱、排种器和自动折叠型导种投种管组成,其中排种器和自动折叠导种装置沿用课题组前期油稻兼用型条播无人机设计方案。

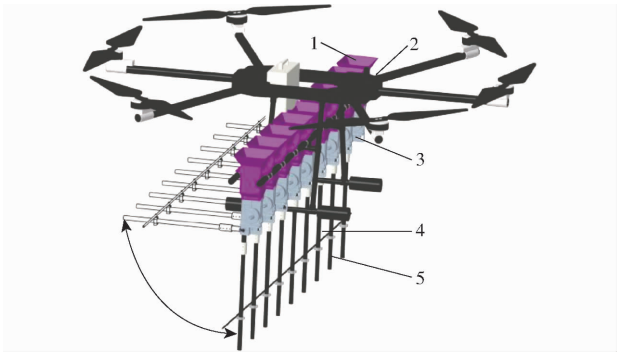


图1 水稻条播无人机总体结构图

Fig.1 Overall structure of rice strip-seeding UAV

1. 种箱 2. 飞行平台 3. 排种器 4. 横杆 5. 自动折叠型导种投种管

舵机驱动的自动折叠导种装置如图2所示,由折叠装置安装架、折叠舵机、舵盘、连杆、摇臂、旋转头和出种口组成^[20]。该装置作业前,导种投种管处于折叠状态,与地面保持平行。无人机起飞后,启动折叠电机,驱动导种投种管转动伸展至垂直状态。作业时,种箱内的种子籽粒在排种器作用下连续均匀地落入导种投种管中,种子籽粒顺着导种投种管进入旋翼气流场,最后被投送至种床,完成投种过程。作业结束后,通过折叠电机反向运动驱动导种投种管折叠恢复至水平状态,无人机降落。

该方案的折叠动作由舵机驱动完成,对折叠过程中单个导种投种管所受力矩进行分析,如图3所示。舵机驱动平行四边形连杆结构需要克服导种投

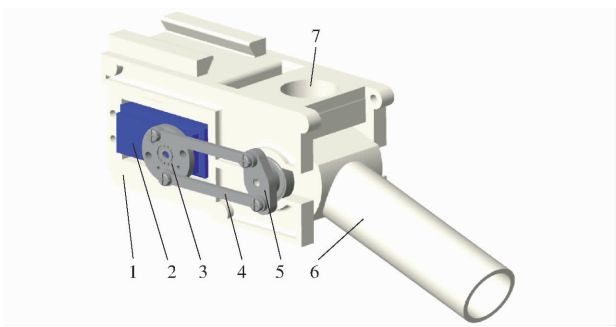


图 2 舵机驱动自动折叠导种装置结构示意图

Fig.2 Structural schematic of automatic folding seeding device driven by motor

1. 折叠装置安装架 2. 折叠舵机 3. 舵盘 4. 连杆 5. 摇臂
6. 旋转头 7. 出种口

种管自身重力 $m_{\text{tube}}g$ 和旋翼气流下压力 F_{air} 造成的合力矩,后者与导种投种管长度 L 、管径 D 等结构参数及所处角度 β 密切相关。

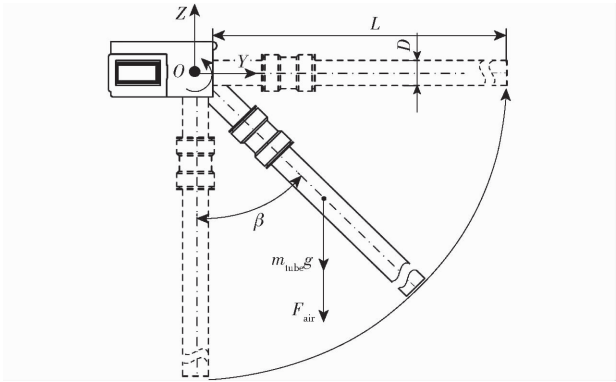


图 3 单个导种投种管折叠过程中的力矩分析示意图

Fig.3 Schematic of torque analysis during folding process of single seeding tube

假设旋翼下洗气流强度在导种投种管长度范围内随所处位置高度下降而线性递减,且导种投种管水平位置处的气流强度为 P_0 (Pa),则当导种投种管折叠至角度 β 时,气流对与转动点 O 距离为 l 处的单位长度导种投种管的下压力 F_{air} (N) 为

$$dF_{\text{air}} = (P_0 - kl\cos\beta) D \sin\beta dl \tag{1}$$

式中 k ——压强系数,其取值与旋翼尺寸、无人机载重等相关

进一步推导得到单位长度导种投种管所受气动力矩 T_{air} (N·m) 为

$$dT_{\text{air}} = (P_0 - kl\cos\beta) D l \sin^2\beta dl \tag{2}$$

对式(2)进行积分运算,得到整根导种投种管所受气动力矩为

$$T_{\text{air}} = DL^2 \sin^2\beta \left(\frac{1}{2} P_0 - \frac{1}{3} k L \cos\beta \right) \tag{3}$$

此时重力产生的力矩 T_g 为

$$T_g = \frac{1}{2} m_{\text{tube}} g L \sin\beta \tag{4}$$

式中 g ——重力加速度,取 9.81 m/s^2

设舵机通过舵盘、连杆、摇臂所组成的平行四边形机构输出的扭矩为 T_{servo} (N·m),该扭矩需克服重力和气动下压力产生的合力矩,结合式(3)、(4)可知导种投种管转动角度为 β 时, T_{servo} 为

$$T_{\text{servo}} = \frac{1}{2} L \sin\beta m_{\text{tube}} g + DL^2 \sin^2\beta \left(\frac{1}{2} P_0 - \frac{1}{3} k L \cos\beta \right) \tag{5}$$

由式(5)可知,折叠时舵机需克服的扭矩随导种投种管长度、重量以及旋转角度增加而显著增加。为有效抑制旋翼气流的干扰,当按需设置的导种投种管长度大于一定程度时,常规舵机将无法提供足够的扭矩及完成自动折叠动作。为在确保降落安全的前提下提高条播装置对不同载重大小无人机平台旋翼气流强度的适应性,需设计一种不依赖于电机驱动的导种投种管自动折叠方案。

1.2 无驱动重力折叠型导种投种装置

详细分析无人机由悬停至降落的全过程可知,随着旋翼转速的降低,所提供的升力逐步减小,飞机平台会在自身重力作用下下移直至完全着陆。充分利用此过程中飞机平台的自身重力,提出一种无驱动重力折叠型导种投种装置设计方案,如图 4 所示。

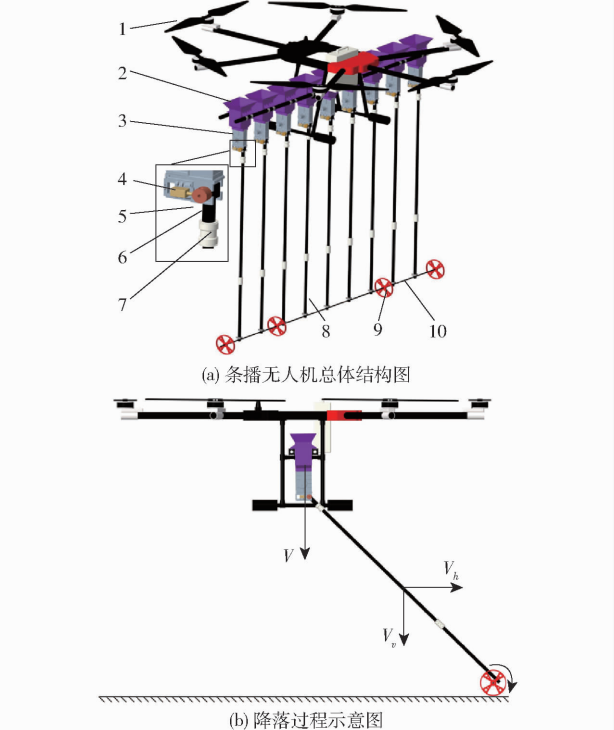


图 4 水稻条播无人机无驱动折叠导种投种装置

Fig.4 Non-driven gravity based foldable seeding device for rice strip-seeding UAV

1. 无人机 2. 种箱 3. 排种器 4. 常开型电磁铁 5. 限位圆柱
6. 关节式旋转接头 7. 快速接头 8. 碳纤维硬管 9. 辅助轮
10. 末端碳纤维硬管

如图 4a 所示,该装置由图 2 所示舵机驱动自动折叠导种装置演变而来,由常开型电磁铁、限位圆柱、关节式旋转接头、快速接头、碳纤维硬管、软关节、末端碳纤维硬管和滚轮等组成。限位圆柱固定在关节式旋转接头一端,圆周面上开有 90°间隔的 2 个限位孔,与电磁铁推杆配合实现导种投种管在作业及降落后 2 个状态的锁紧。基于模块化设计,快速拆装不同长度的碳纤维硬管,可根据需要灵活调整导种投种管长度,适配不同企业飞行平台的旋翼气流强度及飞行高度。

起飞前常开型电磁铁先通电、推杆脱离限位孔,随着无人机逐步脱离地面,导种投种管在自身重力作用下由水平状态展开至竖直状态。随后将电磁铁断电,推杆进入另一限位孔,锁紧限位圆柱,导种投种管保持竖直状态。作业时,导种投种管末端离地一定间隙,以“悬地”姿态投种作业。作业完成后,电磁铁再次通电、解锁导种投种管的旋转动作,无人机从悬停状态以一定速度 V 缓慢下降,末端辅助轮接触地面后在地面反作用力下滚动,引导导种投种管主体以速度 V_h 向后方移动,以速度 V_v 向下折叠,直至恢复至平行状态,如图 4b 所示。选择降落点时应为辅助轮滚动和导种投种管及机架等零部件预留充足空间,在地表凹凸不平时可考虑“边下降、边前移”的方式降落以确保安全。

2 关键结构参数确定

配备无驱动重力折叠型导种投种装置后的成条飞播作业过程如图 5 所示。

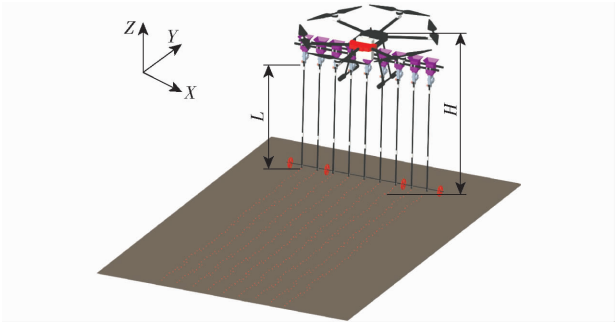


图 5 成条飞播过程示意图

Fig.5 Schematic of strip-seeding process

通过初步试验发现,在一定的作业飞行高度 H 及速度条件下,导种投种管内径、导种投种管长度 L (将其与飞行高度 H 的比值定义为长高比 K ,且 $K \in (0,1)$) 以及导种管构型组合是种子籽粒落点分布及成条效果主要的影响因素。为此,开展各因素对种子籽粒成条效果的影响机理分析,以明确以上 3 个关键因素的取值范围。

2.1 管内径

种子籽粒与导种投种管内壁之间存在非完全弹性碰撞。假设只考虑横向竖直平面内的情况,截面示意图如图 6 所示。设种子籽粒初始横向速度及其掉落至导种投种管末端时的横向速度分别为 V_{x0} 和 V_{x1} (m/s),则

$$V_{x1} = e_x^i V_{x0} \tag{6}$$

式中 e_x ——种子籽粒与导种投种管内壁之间的碰撞恢复系数

i ——种子籽粒与管壁的碰撞次数

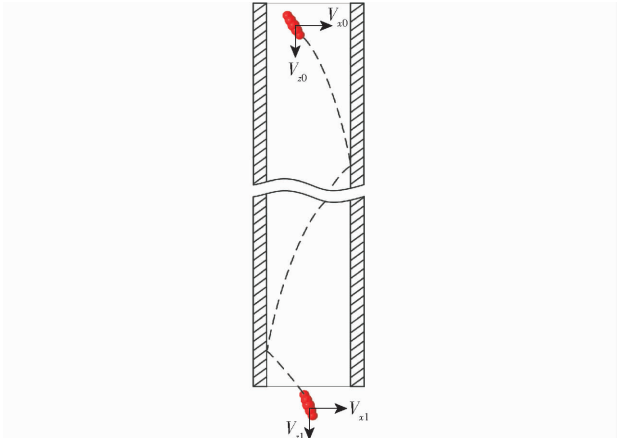


图 6 种子籽粒与导种投种管碰撞示意图

Fig.6 Schematic of collision between seed and seeding tube

由图 6 可知,导种投种管内壁之间碰撞次数与导种投种管内径密切相关。由式(6)可知,当种子籽粒初始速度 V_{x0} 一定时,在管内经历碰撞次数越多,其脱离管子末端时的横向运动速度 V_{x1} 越小,落地后成条效果越好。然而,过小的内径 D_{inner} 会增大种子籽粒堵塞的几率,而当管内径较大时,对种子籽粒的约束效果又减弱,可能增大种子籽粒横向位移,导致落地后散乱分布。

为确保种子籽粒在管内顺利下落,导种投种管内径应至少不小于 1.4 倍种子籽粒最大长度^[20]。参考不同种植区水稻品种最大尺寸^[22],黄华占为 (9.82 ± 0.26) mm、湘早籼 45 号为 (7.86 ± 0.20) mm、龙稻 6 号为 (7.26 ± 0.28) mm,确定最小管内径为 14 mm。综合考虑无人机搭载位置与载重能力等因素,确定最大管内径为 30 mm。后文将结合试验确定具体取值。

2.2 长高比

通过数值模拟^[23]可知,无人机旋翼气流演变过程中先后形成下洗气流与地面扩散气流,这两种气流的分布空间与无人机投种区域相互重叠。为尽可能减小气流对排种后种子籽粒下落过程的扰动,导

种投种管末端到泥面种床的距离 $h_{\text{tube_ground}}$ 应尽量小。尽管如此,地面扩散气流仍然会改变下落种子籽粒的横向运动状态,如图 7 所示。

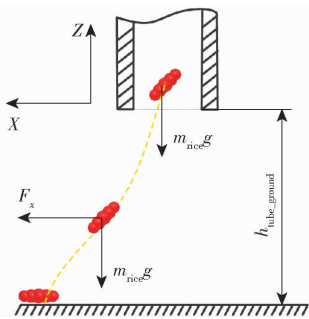


图 7 种子籽粒离开导种投种管末端后的运移过程示意图

Fig. 7 Schematic of seed migration after exiting seeding tube

设种子籽粒掉落至导种投种管末端时的竖直速度为 V_{z1} (m/s), 则

$$V_{z1} = \sqrt{2gL} = \sqrt{2gKH} \quad (7)$$

在此高度范围内,旋翼产生的气流以水平扩散流动为主。因此,可认为种子籽粒在竖直方向上仅受自身重力影响,而在横向上受气流所施加作用力的分力 F_x ,设种子籽粒在横向和竖向的加速度分别为 a_x 和 a_z (m/s²),其表达式为

$$S = V_{z1} \frac{\sqrt{2}(\sqrt{Kh_{\text{fuselage}}} + h_{\text{tube_ground}}} - \sqrt{Kh_{\text{fuselage}}} + \sqrt{Kh_{\text{tube_ground}}})}{\sqrt{g(1-K)}} + \frac{F_x \{ 2Kh_{\text{fuselage}} + (1+K)h_{\text{tube_ground}} - 2\sqrt{K[Kh_{\text{fuselage}}^2 + (1+K)h_{\text{fuselage}}h_{\text{tube_ground}} + h_{\text{tube_ground}}^2]} \}}{m_{\text{rice}}g(1-K)} \quad (13)$$

由式(13)可知,长高比对种子籽粒偏移量的影响机制极为复杂。当长高比减小时(飞行高度不变、导种投种管长度缩短,或导种投种管长度不变、飞行高度增加),种子籽粒暴露在气流场中的时间相对延长,下落轨迹中出现的横向位移会相应增加。而当长高比增大时,存在两种情况:飞行高度不变、导种投种管长度增加;导种投种管长度不变、飞行高度降低。第 1 种情况中,过长的导种投种管会导致无人机整体重量增加且重心下移较多,可能会加剧无人机飞行姿态的不稳定性和摆动,增加横向位移。第 2 种情况中,旋翼气流在近地面处形成的扩散气流流速较快,容易导致种子籽粒未落地前发生弥散现象。因此,为尽可能减小气流对排种后种子籽粒下落过程的扰动,同时避免地表不可预知障碍物造成的潜在飞行风险,根据前期预试验 $h_{\text{tube_ground}}$ 设定为 0.1 m,进一步考虑 3WTYI6-20C 型植保无人机机身高度 ($h_{\text{fuselage}}=0.5$ m) 及常规碳纤维导种管长度 (0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m) 后,结合式(9)计算无人机飞行高度为 1.1、1.6、2.1、2.6、3.1 m,最后将长高比 K 设定为 0.5:1.1 (0.455)、1.0:1.6 (0.625)、1.5:2.1 (0.714)、2.0:2.6 (0.769) 和 2.5:3.1

$$\begin{cases} a_x = \frac{F_x}{m_{\text{rice}}} \\ a_z = g \end{cases} \quad (8)$$

式中 m_{rice} ——种子籽粒质量,kg

飞行高度 H 、导种投种管长度 L 、机身高度 h_{fuselage} 和导种投种管末端到泥面种床距离 $h_{\text{tube_ground}}$ 之间几何关系式为

$$H = L + h_{\text{fuselage}} + h_{\text{tube_ground}} \quad (9)$$

种子籽粒脱离导种投种管末端后的竖直位移 $h_{\text{tube_ground}}$ 和竖直速度 V_{z1} 可分别表达为

$$h_{\text{tube_ground}} = V_{z1}t + \frac{1}{2}gt^2 \quad (10)$$

联立式(7)、(9)可得种子籽粒脱离导种投种管末端后的下落时间 t (s) 为

$$t = \frac{\sqrt{2}[\sqrt{Kh_{\text{fuselage}} + h_{\text{tube_ground}}} - \sqrt{K(h_{\text{fuselage}} + h_{\text{tube_ground}})}]}{\sqrt{g(1-K)}} \quad (11)$$

设种子籽粒横向偏移量为 S (m), 则

$$S = V_{z1}t + \frac{1}{2} \frac{F_x}{m_{\text{rice}}} t^2 \quad (12)$$

将式(11)中 t 代入式(12),化简可得

(0.806) 共 5 个水平。

2.3 导种投种管构型组合参数

如图 8a 所示,多根导种投种管以相同间距 d (m) 安装在条播无人机两侧。随着导种投种管长度增加,无人机绕横滚轴的总转动惯量逐渐增大。当总转动惯量超过飞控系统阈值时,飞行平台横滚角出现周期性波动。设位于正中间位置和机身两侧第 n 根导种投种管绕横滚轴的转动惯量分别为 I_1 和 I_2 (kg·m²), 则

$$I_1 = \frac{1}{3}m_{\text{tube}}L^2 \quad (14)$$

$$I_2 = m_{\text{tube}} \left[(nd)^2 + \frac{L^2}{3} \right] \quad (15)$$

式中 n ——机身两侧的导种投种管序号,分别为 1、2、3 和 4

结合式(14)、(15),可推出导种投种管的总转动惯量 I_{tube} 为

$$I_{\text{tube}} = 3m_{\text{tube}}L^2 + 60m_{\text{tube}}d^2 \quad (16)$$

无人机绕横滚轴的总转动惯量 I_{total} 为无人机本体转动惯量 I_0 与导种投种管总转动惯量 I_{tube} 之和,其表达式为

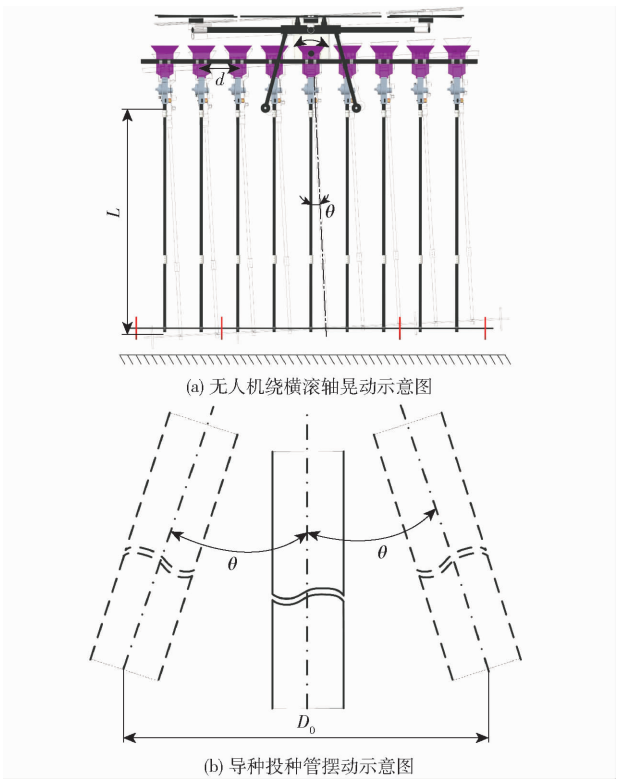


图 8 无人机绕横滚轴晃动时导种投种管摆动示意图

Fig. 8 Schematics of seeding tube swing as UAV shakes along roll axis

$$I_{total} = I_0 + 3m_{tube}L^2 + 60m_{tube}d^2 \tag{17}$$

在无外力输入的情况下,无人机绕横滚轴的转动仅受其初始横滚角速度 ω_0 的影响,系统能量在动能与势能之间转换,有

$$\frac{1}{2}C_{Torque}\theta^2 = \frac{1}{2}(I_0 + 3m_{tube}L^2 + 60m_{tube}d^2)\omega_0^2 \tag{18}$$

式中 C_{Torque} ——恢复扭矩刚度, $N\cdot m/rad$
 θ ——无人机横滚角度波动幅值, $(^\circ)$

C_{Torque} 取值与无人机控制系统性能、飞行平台气动特性等参数相关联。

对式(18)进行变形,可得横滚角波动幅值 θ 为

$$\theta = \omega_0 \sqrt{\frac{I_0 + 3m_{tube}L^2 + 60m_{tube}d^2}{C_{Torque}}} \tag{19}$$

由图 8b 与式(20)可知,导种投种管末端的摆动距离 D_0 为

$$D_0 = 2L\sin\left(\omega_0 \sqrt{\frac{I_0 + 3m_{tube}L^2 + 60m_{tube}d^2}{C_{Torque}}}\right) \tag{20}$$

当总转动惯量超过飞控系统调节阈值时,种子籽粒条带宽度会随着导种投种管质量 m_{tube} 、长度 L 和间距 d 的增加而增大。因此,对于特定飞行平台而言,若在配备大长度导种投种管后出现大幅度摆动现象,则有必要对部分导种投种管进行轻量化设计,

减轻整体导种投种管重量、减小间距 d 以提升飞行姿态稳定性^[24]。整体导种管轻量化设计如下:在中间及左右两侧采用碳纤维硬直管,以确保导种投种管整体稳定性;其余导种投种管则采用轻质柔性软管与碳纤维硬直管相结合的方式进行轻量化设计,软管与硬直管的安装位置以及长度比例关系如表 1 所示。结合柔性轻质软管外形可根据实际使用场景灵活调整的特性,在 I、II、III、IV、V、VI 号导种投种管构型组合中调节条播装置固定位置,实现沿无人机横向方向上的紧凑化布局,并确保末端间距(即播种行距)保持不变。轻量化设计后的整体导种投种管构型组合 II 与 V 如图 9 所示,其余导种投种管构型组合可根据表 1 中参数进行调节。

表 1 导种投种管构型组合参数

Tab. 1 Parameters of seeding tube configuration			
编号	上端	下端	上端与下端长度比
I	软管	软管	*
II	碳纤维管	软管	0.5
III	碳纤维管	软管	2.0
IV	碳纤维管	碳纤维管	**
V	软管	碳纤维管	2.0
VI	软管	碳纤维管	0.5

注: * 表示上端与下端的软管为连续的整体,并使用卡扣将其固定,以维持长直状态; ** 表示上端与下端的碳纤维管为连续的整体。

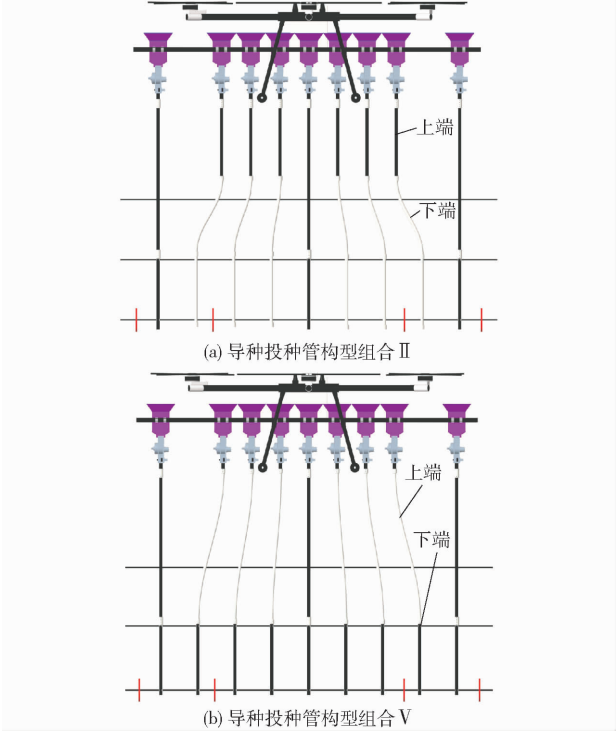


图 9 导种投种管构型组合示意图

Fig. 9 Schematics of configuration combination of seeding tubes

3 试验

3.1 试验条件与方法

基于 3WTY16-20C 型无人机开展泥盒飞播优化试验,以确定合适参数值。该机型采用 6 旋翼布局,旋翼尺寸为 36 寸,最大载荷为 20 kg。试验场地位于华中农业大学农业机械实训中心。试验方案如表 2 所示,在试验 1~5 中,长高比为 0.714,管构型为 IV,飞行速度为 3 m/s,管内径为 14、18、22、26、30 mm;在试验 6~10 中,管内径为 22 mm、管构型为 IV,飞行速度为 3 m/s,长高比为 0.455、0.625、0.714、0.769、0.806;在试验 11~16 中,管内径为 22 mm、长高比为 0.714,飞行速度为 3 m/s,管构型为 I~VI。水稻品种为黄华占,播量为 30 kg/hm²。试验前在场地内选定试验区域,并设置无人机飞行路径与作业参数。在试验区域内布置泥盒,泥盒位于无人机飞行路径正下方。泥盒长度为 3 m,宽度为 1.5 m。

表 2 泥盒飞播试验方案

Tab.2 Single-factor experimental scheme

试验序号	管内径/ mm	长高比	管构型	飞行速度/ (m·s ⁻¹)
1~5	14~30	0.714	IV	3
6~10	22	0.455~0.806	IV	3
11~16	22	0.714	I~VI	3

试验时,无人机根据预设飞行路径和参数飞跃泥盒并完成投种后,在泥面中放置 40 mm×40 mm 的黑色校准板,操控 DJI Air 2S 型航拍无人机悬停于泥盒正上方采集图像数据。试验在天气状况良好,自然风速小于 1 m/s 的情况下进行,每组试验重复 3 次。

3.2 籽粒成条效果评估方法与指标

在 Matlab 中对采样图像进行图像识别,提取籽粒坐标,并进一步分析种子籽粒成条效果,如图 10 所示。基于校准板、种子籽粒与泥面在 RGB 色彩空间中的差异,对前两者的像素区域进行分割提取^[16],并统计单个校准板所包含的像素总数 N ,随后计算单个像素对应的实际长度 λ (mm)

$$\lambda = 1\,600/N \tag{21}$$

计算种子籽粒像素区域的质心坐标,将其横向坐标值代入公式

$$w_i = \lambda \max |X_j - X_k| \tag{22}$$

$$w = \frac{\sum_{i=1}^R w_i}{R} \tag{23}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{w}{d_1} \tag{24}$$

式中 w_i ——第 i 个籽粒条带的宽度
 X_j, X_k ——条带中任意种子籽粒横向坐标, mm
 R ——籽粒条带总数,取 9
 d_1 ——播种行距,取 250 mm
 w ——籽粒条带宽度平均值
 ε ——成条指数

籽粒条带宽度平均值 w 越小且成条指数 ε 越大,则种子籽粒成条效果越好。

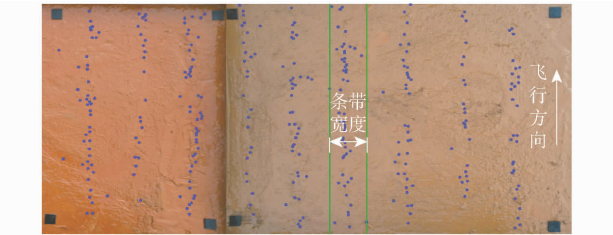


图 10 种子籽粒成条性评估方法

Fig.10 Evaluation method of seed strip effect

3.3 试验结果分析

3.3.1 管内径对种子籽粒成条效果的影响

在长高比为 0.714、管构型为 IV 的情况下,分析导种投种管内径为 14、18、22、26、30 mm 时对种子籽粒条带宽度平均值 w 和成条指数 ε 的影响,试验结果如图 11 所示。

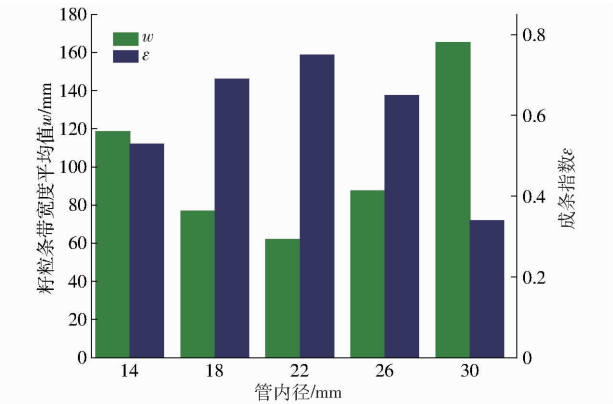


图 11 不同管内径时试验指标柱状图

Fig.11 Bar graph of test indicators with different inner diameters

随着导种投种管内径的增大, w 呈先减小后增大的变化趋势, ε 呈先增大后减小的变化趋势,种子籽粒成条效果先改善后劣化。结合图 12 与表 3 分析可知,当导种投种管内径为 14 mm 时,约有 88.5% 的种子籽粒分布在中心线两侧各 20 mm 的距离范围内(对应的条带宽度为 40 mm),约有 11.5% 的种子籽粒离散分布在中心线两侧各 40 mm 距离外(对应的条带宽度大于 80 mm)。

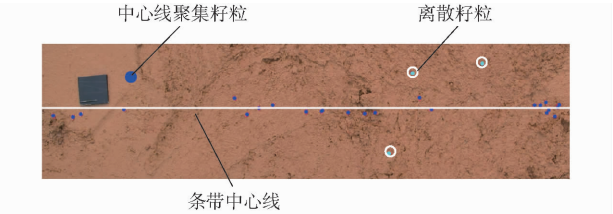


图 12 内径为 14 mm 时的种子籽粒“沿中心线聚集-边缘离散”分布模式

Fig. 12 Distribution pattern of seeds with “aggregation along centerline and dispersion at edge” when inner diameter was 14 mm

表 3 不同内径下种子籽粒在各距离范围内的数量占比

Tab. 3 Proportion of seeds within each distance range under different inner diameters															%
内径/ mm		条带中心线两侧各距离/mm													
		0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	90 ~ 100	100 ~ 110	110 ~ 120	> 120	
14		69.2	19.3	0	0	3.8	0	7.7	0	0	0	0	0	0	
18		62.4	29.2	4.2	0	4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	
22		51.9	37.0	7.4	0	3.7	0	0	0	0	0	0	0	0	
26		48.9	26.7	11.0	6.7	6.7	0	0	0	0	0	0	0	0	
30		25.0	21.4	25.0	7.1	7.1	0	3.6	0	3.6	0	3.6	0	3.6	

此,在中心线两侧较小距离范围内(0 ~ 30 mm),种子籽粒的数量占比由 14 mm 时的 88.4% 分别提升至 18 mm 时的 95.8% 和 22 mm 时的 96.3%。当导种投种管内径由 22 mm 增大至 26 mm 时,种子籽粒在中心线两侧 0 ~ 30 mm 距离范围内的数量占比减小至 86.6%,在 30 ~ 50 mm 距离范围内的数量占比增大至 13.4%。当内径由 26 mm 增大至 30 mm 时,导种投种管对种子籽粒的约束力逐渐下降,导致中心线两侧各个距离范围内均出现种子籽粒落点,条带中种子籽粒呈弥散状分布,成条效果显著减弱,如图 13 所示。

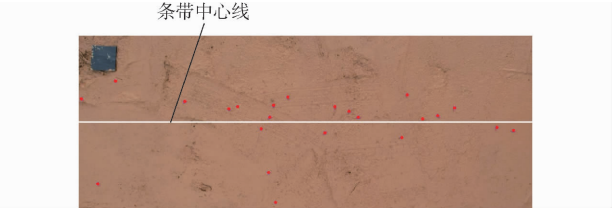


图 13 管径为 30 mm 时的种子籽粒弥散状分布模式

Fig. 13 Dispersed distribution pattern of seeds when inner diameter was 30 mm

为实现稳定的种子籽粒成条效果,应适当增大导种投种管内径以减少旋翼气流引起的导种投种管摆动对种子籽粒造成的扰动,同时还需确保导种投种管对种子籽粒具有足够的约束能力。经综合考虑,确定导种投种管内径为 22 mm。

3.3.2 长高比对种子籽粒成条效果的影响

在管径为 22 mm、管构型为Ⅳ的情况下,分析长高比为 0.455、0.625、0.714、0.769、0.806 时对种子

这种“沿中心线聚集-边缘离散”的种子籽粒分布模式形成原因主要有:过小导种投种管内径增大了种子籽粒与导种投种管内部的碰撞概率且小管径的导种投种管整体质量轻,易受旋翼气流影响而产生摆动;在这两个因素的影响下,与管内壁接触的种子因瞬时横向速度变化而脱离大部分种子籽粒,最终呈离散分布状态。当导种投种管内径由 14 mm 增大至 22 mm 时,种子籽粒与导种投种管内部的碰撞概率减小,且旋翼气流引起的导种投种管摆动对种子籽粒有序运移状态的扰动程度也逐渐减小。因

籽粒条带宽度平均值 w 和成条指数 ε 的影响,试验结果如图 14 所示。当长高比范围由 0.455 增大至 0.714 时,种子籽粒条带宽度平均值 w 持续减小,成条指数 ε 逐渐增大。当长高比范围由 0.714 增大至 0.769 时,种子籽粒条带宽度平均值 w 迅速增大,成条指数 ε 迅速减小。相对应地,种子籽粒成条效果先改善后恶化。当长高比增大至 0.806 时,无人机出现剧烈摆动,无法进行试验。

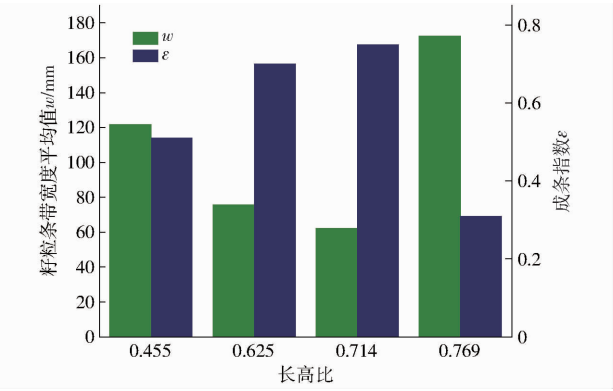


图 14 不同长高比时试验指标柱状图

Fig. 14 Bar graph curves of test indicators with different length-to-height ratios

结合图 15 和表 4 进一步分析可知,当长高比为 0.455 时,种子籽粒并未集中分布在中心线两侧特定距离范围内,而是在中心线两侧各个距离范围内均有分布,整体呈现出弥散状态。

根据旋翼气流演变过程可知,当飞行高度较低时,下洗气流持续冲击地面,在地面附近形成一个高

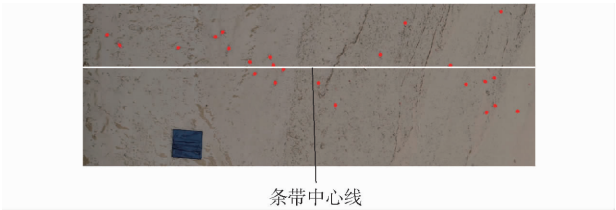


图 15 长高比为 0.455 时的种子籽粒分布

Fig. 15 Distribution of seeds when length-to-height ratio was 0.455

表 4 不同长高比下种子籽粒在各距离范围内的数量占比

Tab.4 Proportion of seeds within each distance range under different length-to-height ratios														%	
长高比	条带中心线两侧各距离范围/mm														
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	90 ~ 100	100 ~ 110	110 ~ 120	> 120		
0.455	17.9	14.3	21.4	0	14.3	7.1	14.3	7.1	0	3.6	0	0	0		
0.625	32.4	20.6	14.7	14.7	11.8	0	2.9	2.9	0	0	0	0	0		
0.714	51.9	37.0	7.4	0	3.7	0	0	0	0	0	0	0	0		
0.769	7.7	2.6	25.6	0.0	7.7	15.4	15.4	5.0	7.7	2.6	2.6	0	7.7		

进一步降低了其对种子籽粒的扰动强度,使得种子籽粒成条效果逐步改善。例如,当长高比由 0.625 增加至 0.714 时,种子籽粒在较小距离范围内(0 ~ 10 mm、10 ~ 20 mm)的数量占比分别由 32.4% 和 20.6% 增长至 51.9% 和 37.0%。

当长高比增大至 0.769 时,条带宽度平均值急剧增大至 171.6 mm,成条指数降低至 0.31。究其原因,可能是随着导种投种管的延长,无人机重心高度下降。重心位置的改变使得飞控算法难以准确迅速地调节无人机姿态,导致飞行姿态难以维持稳定,引发无人机横滚角的周期性波动。这一飞行姿态的波动通过机械连接结构传递至投种过程,导致种子籽粒与导种投种管发生频繁碰撞,最终导致条带中的种子籽粒呈弥散状分布,成条效果显著降低,如图 16 所示。

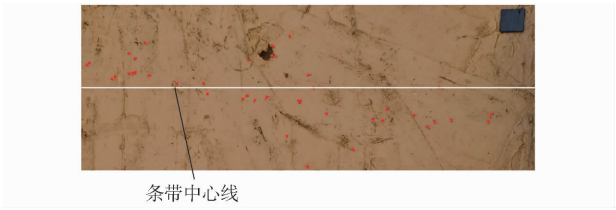


图 16 长高比为 0.769 时的种子籽粒分布

Fig. 16 Distribution of seeds when length-to-height ratio was 0.769

为有效降低地面扩散气流对种子籽粒的扰动,同时最大程度减少无人机作业过程的安全风险,经综合考量,确定长高比为 0.714。不过,需要注意的是,该参数并非适合于所有机型。将此导种投种装置应用于其他机型进行试验之前,需依据所选作业机型的飞行高度限制范围确定长高比。随后,在松软地块或者草地中观察不同长高比情况下的机身摆

能量、高速度的气流区域。该区域内的气流带动空气向四周扩散,从而形成地面扩散气流。当长高比为 0.455 时,从导种投种管末端至泥盒表面这一高度内的地面扩散气流直接作用于下落过程中的种子籽粒,使其横向运动速度发生改变,最终导致种子籽粒在落入泥盒之前就发生弥散。随着长高比的增加,下洗气流在流动过程中会经历一定程度的衰减才形成地面扩散气流。这一过程中的气流能量损耗

动幅度;在确认机身无明显摆动后,进一步通过泥盒飞播试验确定最优长高比参数。

3.3.3 导种投种管构型组合参数对种子籽粒成条效果的影响

在长高比为 0.714、导种投种管内径为 22 mm 的情况下,分析导种投种管构型组成为 I ~ VI 时对种子籽粒条带宽度平均值 w 和成条指数 ε 的影响,结果如表 5 所示。

表 5 不同导种投种管构型组合的试验指标

Tab.5 Test indicators of different configuration combination of seeding tubes						
试验指标	导种投种管构型组合					
	I	II	III	IV	V	VI
条带宽度平均值/mm	149.3	121.6	134.5	62.1	63.7	66.0
成条指数	0.40	0.51	0.46	0.75	0.75	0.74

当导种投种管构型组合为 I、II 和 III 时,导种投种装置由等距安装于机身两侧调整为向机身中心聚拢布局,且整体重量有所降低。然而,条带宽度平均值与成条指数并未呈现出明显改善趋势。主要原因在于软管在下洗气流、地面扩散气流以及前方来流的共同作用下持续剧烈摆动,导致种子籽粒与软管内壁连续碰撞,最终种子籽粒在下落过程中逐渐分散。因此,从成条作业效果的角度出发,不优先考虑 I ~ III 导种投种管构型组合。

结合图 17a 与表 5 分析可知,当导种投种管构型为 IV 时,种子籽粒条带宽度平均值为 62.1 mm、成条指数为 0.75,成条效果明显,表明种子籽粒可平稳通过导种投种管内部并顺利落入泥面。结合图 17b 与表 5 分析可知,相较于 II 型、VI 型的条带宽

度平均值与成条指数分别提升了 45.7% 和 45.1% ; 结合图 17c 与表 5 可知,相较于Ⅲ型,V型的条带宽度平均值与成条指数分别提升了 52.6% 和 63.0% ; 这一成条效果改善的原因在于,末端竖直碳纤维管可使在软管中已经处于失稳状态的种子籽粒流逐渐恢复至稳定状态。

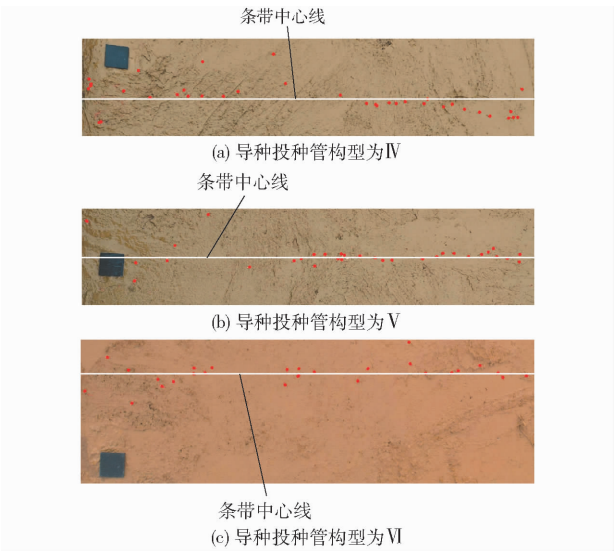


图 17 管型构型组合为Ⅳ~Ⅵ时的种子籽粒分布
Fig. 17 Seed distribution when configuration combination of seeding tubes was from Ⅳ to Ⅵ

在Ⅳ、Ⅴ与Ⅵ导种投种管构型组合中,种子籽粒条带宽度平均值的最大差值为 3.9 mm,成条指数的最大差值为 0.01;在中心线两侧 0~40 mm 距离范围内的种子籽粒数量占比分别为 96.3%、93.3% 和 89.4%,表明 3 种构型组合下的种子籽粒成条效果相差不大,且均能实现稳定条播作业效果。这是因为在长高比为 0.714 的情况下,导种投种管构型组合为Ⅳ~Ⅵ时的重量变化所产生的干扰力矩未超过该飞行平台的调整阈值,系统能及时驱动旋翼电机有效地补偿力矩变化,从而维持绕横滚轴转动状

态的相对稳定。

但是,不同飞行平台的性能参数存在差异。例如,部分飞行平台的最低飞行高度不低于 2.0 m,为保证导种投种管末端与地面距离保持恒定,需要对该管进行适当延长。这一改动会导致无人机绕横滚轴的转动惯量增加,飞行平台极有可能出现大幅度摆动。在降低操作风险与实现理想的成条效果之间寻求平衡,对导种投种管实施轻量化设计显得尤为重要。特别是将无驱动折叠型导种投种装置应用于最低飞行高度限制为 2.0 m 以上的飞行平台时,可优先采用导种投种管构型组合Ⅴ,即上端采用大长度轻质柔性管,下端采用较短碳纤维管。下文将通过特定机型的泥盒飞播试验,验证导种投种管构型在解决因飞行平台安装大长度导种投种管而引发飞行不稳定问题的实际效果。

4 关键承重连接部件强度仿真分析

条播作业过程中,导种投种条播装置与无人机的连接部件需承载较大重量,极易发生形变。这不仅会影响种子籽粒成条效果,还会破坏机身稳定性,导致条播无人机难以顺利起降作业。因此,结合三维建模软件 Creo 和 ANSYS Workbench 仿真软件建立条播无人机起飞、飞行和降落时的动力学仿真模型,并对相关连接部件进行强度校核,保证种子籽粒落地成条的同时满足无人机安全起降作业。利用三维建模软件 Creo 对条播无人机进行三维实体建模,并进行适当简化,去除包含复杂曲面且对模型整体质量影响不大的旋翼^[25]。将简化后的模型导入 ANSYS Workbench 中,设置材料属性和零件接触方式,并划分网格设定模型运动参数。仿真结果如图 18 所示。起飞、飞行和降落 3 种工况下,关键承重连接部件分别为连接管夹组、挂载横杆

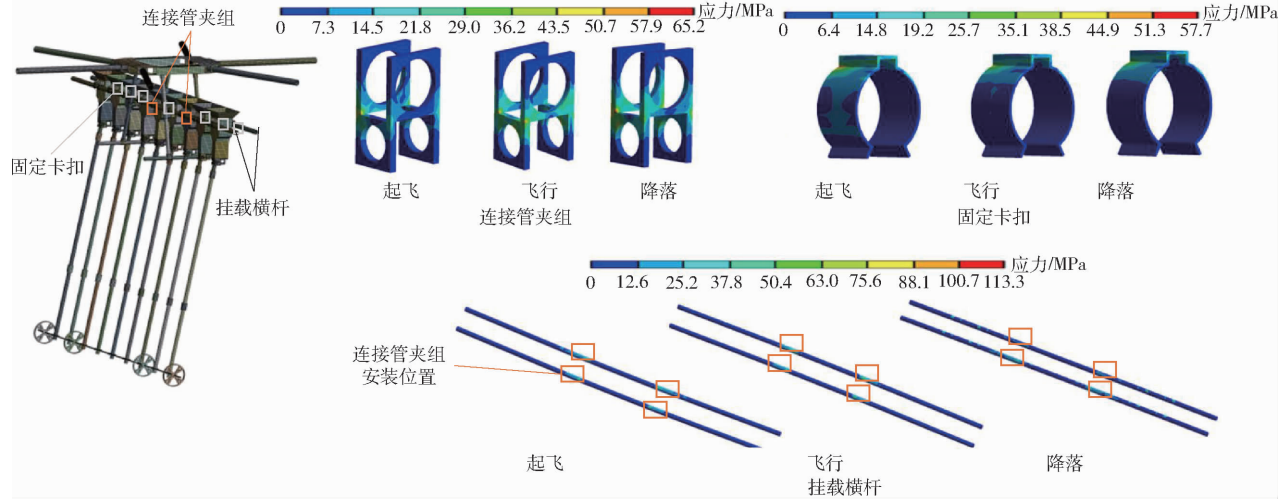


图 18 关键承重连接部件应力分布

Fig. 18 Stress distribution of key load-bearing connection components

和固定卡扣。

结合图 18 和表 6 可知,3 种工况下,连接管夹组的应力主要分布在管夹间的连接部位,其最大应力为 65.2 MPa,最大变形量为 0.016 3 mm;挂载横杆的应力集中于与连接管夹组的连接部位,最大应力为 113.3 MPa,最大变形量为 0.007 5 mm;固定卡扣的应力集中于顶部,最大应力为 57.7 MPa,最大

变形量为 0.002 3 mm。连接管夹组和固定卡扣采用铝合金 6061-T6 材料,许用应力为 184.6 MPa。挂载横杆整体为 T300 碳纤维复合材料,许用应力为 4 870 MPa^[25]。在起飞、飞行和降落工况下,各个部件的最大应力均小于其许用应力,最大变形量在允许范围之内,表明连接部件满足条播无人机作业过程中的强度要求。

表 6 关键承重连接部件的材料特性、最大应力及最大变形量

Tab. 6 Material properties, maximum stress and maximum deformation of key loading-bearing connection components								
部件	材料	许用应力/ MPa	最大应力/MPa			最大变形量/mm		
			起飞	飞行	降落	起飞	飞行	降落
挂载横杆	T300 碳纤维复合材料	4 870	113.3	106.5	62.9	0.007 5	0.006 5	0.003 3
连接管夹组	铝合金 6061-T6	184.6	65.2	62.5	26.2	0.016 3	0.011 4	0.002 9
固定卡扣	铝合金 6061-T6	185	57.7	55.7	42.7	0.002 3	0.001 7	0.001 3

5 适配试验与田间试验

为进一步验证无驱动重力折叠型导种投种装置在不同作业速度和不同机型条件下的适配性能,基于 3WTYI6-20C 和 3WWDZ-60A 型无人机开展作业速度为 1~5 m/s 时的适配试验。其中 3WTYI6-20C 型无人机试验场景如图 19a 所示。另外 3WWDZ-60A 为极飞 P150 2024 款农业无人机,采用四旋翼布局,旋翼尺寸为 60 寸,最大载荷为 60 kg,最低飞行高度为 2.0 m。



图 19 适配试验场景
Fig. 19 Adaptation test scenario

由 3.3.1 节与 3.3.3 节结论可知,将该导种投种装置应用于其他机型时,需先观察不同条件下的机身摆动程度,再据此确定关键参数的取值。根据 3.3.2 节导种投种管内径试验结果,确定内径为 22 mm。根据 3WWDZ-60A 型无人机最低飞行高度,确定长高比为 0.769。由 3.3.2 节可知,当长高比超过 0.714 时,无人机绕其横滚轴呈现较大幅度摆动。因此,需要对导种投种管进行轻量化设计以匹配 3WWDZ-60A 型的作业参数。

在调试过程中,当导种投种管构型为 IV 时,无人机起飞后机身出现大幅度摆动,无法安全作业,如图 19b 所示。而当导种投种管构型为 V 时,无人机飞行姿态平稳,无明显摆动等现象,如图 19c 所示。

分析其原因可知,相对于 IV 型导种投种管,V 型导种投种管整体质量减少约 60%,有效缓解了因导种投种管重量和长度增加而导致的横滚惯量增大问题。因此,无人机在飞行过程中的平稳性得到显著提升。试验过程中的试验条件、方法等与 3.1 节中保持一致。

试验过程中,两款无人机飞行姿态平稳,机身未出现大幅度摆动现象。试验结果如表 7 所示,同一机型在不同飞行速度下的种子籽粒条带宽度平均值和成条指数均维持稳定,其中 3WWDZ-60A 型无人机的条带宽度平均值处于 84.5~92.5 mm 之间,成条指数范围在 0.63~0.66 之间;3WTYI6-20C 型无人机的条带宽度平均值范围为 58.3~69.2 mm,成条指数范围为 0.72~0.77。这表明条播投种装置具有良好的作业速度适应能力,能够满足条播无人机在各种规模田块中的作业需求。进一步对比分析可知,在相同飞行速度下,不同机型种子籽粒条带宽度平均值的最大差值不超过 30.0 mm,成条指数最大差值小于 0.12,说明针对机型架构与作业高度参数适配了合适的导种投种管参数后,特定飞行平台也可实现稳定种子籽粒落地成条效果。

于 2024 年 5 月华中农业大学校内试验田开展田间试验。试验田块面积为 0.33 hm²,水稻品种为黄华占,播种行距为 0.25 m,作业速度为 3 m/s,播量设置为 45 kg/hm²。试验中选用了成条效果较优的 3WTYI6-20C 型无人机。试验 15 d 后苗情如图 20 所示,水稻植株成条分布效果明显。田间试验结果表明,无驱动折叠导种投种装置在大范围试验田块中具备稳定的条播作业性能。

表 7 不同无人机型号与飞行速度下的试验结果

Tab.7 Test results under different UAV versions and flight speeds

无人机型号	试验指标	飞行速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)				
		1	2	3	4	5
3WTYI6-20C	条带宽度平均值/mm	63.8	58.3	62.1	69.2	64.4
	成条指数	0.74	0.77	0.75	0.72	0.74
3WWDZ-60A	条带宽度平均值/mm	89.6	84.5	88.4	92.5	85.2
	成条指数	0.64	0.66	0.65	0.63	0.66

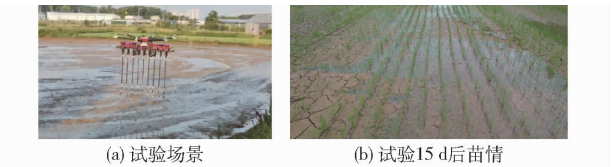


图 20 田间试验场景及出苗成条效果

Fig.20 Field test and strip effect after seedling

6 结论

(1)设计了一种可实现无驱动重力折叠型导种投种装置,通过分析无人机水稻条播作业过程,明确了导种投种管内径、导种投种管长度、无人机飞行高度比例(长高比)和管构型组合等关键因素的取值范围。

(2)基于 3WTYI6-20C 型六旋翼植保无人机开展泥盒飞播优化试验,结果表明,当管内径为 22 mm,长高比为 0.714、管构型为Ⅳ时,导种投种管对种子籽粒约束效果较好,无人机飞行姿态平稳,条带宽度平均值达到 62.1 mm,成条指数为 0.75。进一步基于该关键参数取值开展不同飞行速度下的泥

盒飞播试验,结果表明,条带宽度平均值范围为 58.3~69.2 mm,成条指数范围为 0.72~0.77,种子籽粒成条效果稳定。

(3)为考察该导种投种装置与其他机架构型植保无人机适配后的成条飞播效果,基于 3WWDZ-60A 型四旋翼植保无人机开展泥盒飞播试验。适配 3WWDZ-60A 型无人机后的条带宽度平均值处于 84.5~92.5 mm 之间,成条指数在 0.63~0.66 之间,说明通过匹配飞行平台作业参数与导种投种装置参数,特定机型可实现稳定的水稻成条飞播效果。

(4)开展条播装置与无人机之间的关键承重连接部件强度仿真分析,结果表明,起飞、飞行和降落 3 种工况下,关键承重连接部件分别为连接管夹组、挂载横杆和固定卡扣。其中连接管夹组、固定卡扣和挂载横杆的最大应力分别为 65.15、57.67、113.32 MPa。各个部件的最大应力均小于其许用应力,最大变形量在允许范围之内,连接部件满足条播无人机作业过程中的强度要求。

参 考 文 献

[1] 李泽华,马旭,李秀昊,等.水稻栽植机械化技术研究进展[J].农业机械学报,2018,49(5):1-20.
Li Zehua, Ma Xu, Li Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):1-20. (in Chinese)

[2] 罗锡文,王在满,曾山,等.水稻机械化直播技术研究进展[J].华南农业大学学报,2019,40(5):1-13.
Luo Xiwen, Wang Zaiman, Zeng Shan, et al. Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019,40(5):1-13. (in Chinese)

[3] 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 Jin'gang, 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)

[4] 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)

[5] Wang X Y, Yang G D, Pan X C, et al. Feasibility of improving unmanned aerial vehicle-based seeding efficiency by using rice varieties with low seed weight[J]. Rice Science, 2022,29(4):299-303.

[6] Sun X B, Cai M C, Liu L H, et al. Numerical simulation analysis and experimental research on liquid sloshing in herbicide tank of the plant protection UAV[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,227:109532.

[7] Wang J W, Chen H X, Li Q H, et al. Study on rice sprout damage in UAV direct seeding with auger mechanisms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,229:109809.

[8] 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)

[9] 展义龙,张晚霞,张伊鹏,等. 大载荷农用无人机关键技术与应用综述[J]. 农业机械学报,2026,57(3):1–15.

Zhan Yilong, Zhang Wanxia, Zhang Yipeng, et al. Review on key technologies and applications of heavy-load agricultural UAVs [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(3):1–15. (in Chinese)

[10] Song C C, Zhou Z Y, Zang Y, et al. Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 180: 105832.

[11] Wu Z J, Lim 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.

[12] Li W C, Li C Y, Huang X M, et al. Operation quality control of rapeseed strip aerial seeding system via under-constrained seeding technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107693.

[13] 王玲,朱嘉旺,刘骋,等. 随机侧风影响下植保无人机下洗流场分布规律与预测模型研究[J]. 农业机械学报,2026, 57(3):140–152.

Wang Ling, Zhu Jiawang, Liu Cheng, et al. Distribution patterns and prediction models of downwash airflow of plant protection unmanned aerial vehicles under random crosswinds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(3):140–152. (in Chinese)

[14] Liu W, Zou S S, Xu X L, et al. Development of UAV-based shot seeding device for rice planting[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(6): 1–7.

[15] Liu W, Zhou Z Y, Xu X L, 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.

[16] 陈博. 机载吹射式种子直播设备及播种无人机:CN201810443455[P]. 2018–10–30.

[17] 廖一隆,杨得帅,林键沁,等. 脉冲射流式水稻播种无人机一分四路分流装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2026, 57(3):57–66.

Liao Yilong, Yang Deshuai, Lin Jianqin, et al. Design and testing of one-point-four-way diversion device for pulse-jet rice seeding drone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(3):57–66. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 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)

[20] 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)

[21] Zhu Q W, Zhu Y Z, Shi Y Z, et al. Development of an integrated UAV-based precision aerial seeding system for rice-paddy artwork[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 246: 111652.

[22] 李汉青,颜丙新,武广伟,等. 双轨道弹射式水稻精量直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):60–72.

Li Hangqing, Yan Bingxin, Wu Guangwei, et al. Design and experiment of double-track ejection rice precision direct seeding metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(2): 60–72. (in Chinese)

[23] Zhu Y Z, Huang X M, Yin C L, 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.

[24] 陈立平,欧鸿,张瑞瑞,等. 制种玉米去雄无人机旋切装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(4):53–63.

Chen Liping, Ou Hong, Zhang Ruirui, et al. Design and experiment of rotary-cutting device for corn seed production detasseling UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 53–63. (in Chinese)

[25] 李鹏,石永康,万晓燕. 四旋翼农业无人机模块化设计及有限元分析[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 210–216.

Li Peng, Shi Yongkang, Wan Xiaoyan. Modular design and finite element analysis of quadrotor agricultural UAV[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(5): 210–216. (in Chinese)