

稻油兼用型成条飞播装置设计与试验

黄小毛<sup>1,2</sup> 刘宇<sup>1</sup> 朱耀宗<sup>1</sup> 李文成<sup>1,2</sup> 张顺<sup>1</sup>

(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:** 针对水稻和油菜飞播普遍采用漫撒播方式而造成的落种散乱无序等问题,设计了一种可同时适应水稻和油菜条播农艺要求的无人机播种装置。以成条飞播排种系统的兼用化、轻量化、电驱化和模块化为设计目标,采用电驱、工作长度可调的外槽轮组件作为排种器,以舵机带动连杆驱动的自动折叠导种管为投种部件,通过台架试验、场地泥盒飞播试验和田间试验3种方式,确定结构参数和工作参数并验证作业效果。试验结果表明,排种系统在排种电机额定转速及扭矩范围内,能够满足5 m/s以内飞行速度下,油菜播量6~7.5 kg/hm<sup>2</sup>、杂交稻播量15~45 kg/hm<sup>2</sup>及常规稻播量60~105 kg/hm<sup>2</sup>的农艺要求,且各行一致性变异系数、总排量一致性变异系数等性能参数优于行业标准要求,在作业高度1 m、作业速度4 m/s时,泥盒中油菜和水稻种子平均条带宽度分别为6.7、3.8 cm,播后30 d田间幼苗成条效果明显。

**关键词:** 无人机; 成条播种; 外槽轮排种器; 油菜; 水稻

中图分类号: S251      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2023)09-0111-11      **OSID:** 

Design and Experiment of Striped Aerial Seeding Device for Rice and Oil Rape

HUANG Xiaomao<sup>1,2</sup> LIU Yu<sup>1</sup> ZHU Yaozong<sup>1</sup> LI Wencheng<sup>1,2</sup> ZHANG Shun<sup>1</sup>

(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:** A drone seeding device was designed to address the problem of scattered and disorderly seed falling caused by the widespread use of diffuse sowing in rice and rapeseed aerial seeding, which can simultaneously meet the agronomic requirements of rice and rapeseed aerial seeding. The design goal was to achieve dual use, lightweight, electric drive, and modularization of the strip aerial seeding system. The external groove wheel component with electric drive and adjustable working length was used as the seeding device, and the automatic folding seed guide tube driven by the linkage driven by the servo was used as the seeding component. Through bench tests, on-site mud box aerial seeding tests, and field tests, the structural and working parameters were determined and the operational effect was verified. The test showed that the designed seed metering system can meet the agronomic requirements of 6~7.5 kg/hm<sup>2</sup> oil rape, 15~45 kg/hm<sup>2</sup> hybrid rice and 60~105 kg/hm<sup>2</sup> conventional rice at maxium flight speed of 5 m/s when in the range of rated speed and torque of seed metering motor, and the performance parameters such as the coefficient of variation of consistency of each row and the coefficient of variation of consistency of total discharge capacity were superior to the requirements of the industry standard. At height of 1 m and speed of 4 m/s, the average strip width of rapeseed and rice seeds in the mud box was 6.7 cm and 3.8 cm, respectively. The effect of seedling formation in the field was significant after 30 d of sowing.

**Key words:** UAV; sowing in strips; external grooved wheel seed metering device; oil rape; rice

0 引言

水稻和油菜是我国两种重要的大宗农作物,前

者是绝对主粮作物,后者是主力油料作物<sup>[1]</sup>,二者在我国的现有种植模式都是直播和移栽多种形式并存<sup>[2-6]</sup>。这其中,无人机播撒(飞播),作为效率和

地形地表适应性最好的直播方式,近年来在我国水稻和油菜的快速抢墒播种中发展迅速<sup>[5-7]</sup>。

从精量条播<sup>[8-13]</sup>到精密穴播<sup>[14-17]</sup>,水稻和油菜的机械化直播,在传统地面机具播种技术中已研究较为充分,但都是基于地面机具功能特点和作业特性进行的,与无人机的高速作业以及对搭载装置的电控化、模块化和轻量化要求不相符合,因此不能直接照搬使用。

无人机直播是近年来随植保无人机逐步发展起来的一种新兴技术。罗锡文等<sup>[18]</sup>研制了一种搭载于六旋翼无人机的离心拨盘式播撒装置,宋灿灿等<sup>[19]</sup>设计一种气力式无人机播撒装置,高学梅等<sup>[20]</sup>研制一种可悬挂于多种无人机平台的水稻及绿肥播撒装置。大疆无人机公司于2018年6月推出一种离心甩盘式播撒装置,极飞无人机公司于2018年底推出一种与窝眼或槽轮滚筒排种器配合的气送涵道式播撒装置,2019年又相继推出“螺旋供种+水平离心甩盘”结合的睿播1.0和“螺旋供种+垂直离心甩盘”结合的睿播2.0播撒装置。因投种高度高、旋翼气流扰动强,以上这些飞播装置的作业效果均相对粗放,种子落地散乱无序、作业幅宽界限模糊,种子落点精度远低于无人机作业定位精度,发芽出苗后植株通风向阳效果、土壤肥效利用效率不及地面播种机具的条播和穴播方式。

为探讨旋翼气流对种子运移轨迹的影响,张青松等<sup>[21]</sup>建立了四旋翼无人机旋翼气流场仿真模型,研究了旋翼气流场对油菜种子的空中漂移运动轨迹的影响。黄小毛等<sup>[22]</sup>在分析极飞P20型四旋翼无人机下洗气流场分布规律的基础上,设计了一种与之配套的以人工拾举方式进行衔接的专用导种装置,抑制无人机旋翼气流对下落种子籽粒的扰动作用,基本实现了油菜的精量条播。但该装置导种管较长,无法实现自动折叠,黄小毛等<sup>[23]</sup>又基于六旋翼无人机平台,设计了一种自动折叠的导种投种管和气送集中排种式油菜专用排种系统,实现了油菜的条播。此外,珠海羽人无人机公司于2018年推出一款可实现水稻精量条播的无人机装置。

本文从成条飞播装置的通用性角度出发,设计、试制加工、试验优化和验证测试一种可同时适应水稻和油菜条播农艺要求的稻油兼用型成条飞播装置。

## 1 装置结构与工作原理

### 1.1 装置总体结构

以额定承载质量15 kg的六旋翼无人机为搭载

平台,整机总体结构如图1所示,由稻油兼用型成条飞播装置单体、无人机平台、承载杆组成,主要技术参数如表1所示。



图1 条播无人机总体结构示意图

Fig. 1 Overall structure diagrams of aerial seeding UAV

1. 稻油兼用型成条飞播装置单体 2. 无人机平台 3. 承载杆

表1 条播无人机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of aerial seeding UAV

| 参数                                       | 数值           |
|------------------------------------------|--------------|
| 外形尺寸(展开状态)/(m×m×m)                       | 2.0×1.5×0.75 |
| 作业行数                                     | 6            |
| 作业幅宽/m                                   | 1.8          |
| 作业速度/(m·s <sup>-1</sup> )                | 1~5          |
| 作业效率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 0.31~1.54    |
| 作业高度/m                                   | 1~2          |
| 种箱容积/L                                   | 1.5×6        |
| 续航时间/min                                 | 5~10         |

稻油兼用型成条飞播装置单体结构如图2所示,由管夹、种箱、排种器、导种投种管和导种管折叠装置组成。

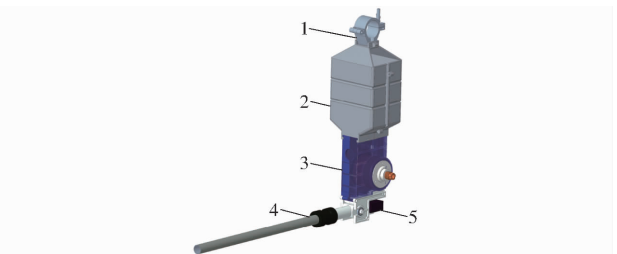


图2 稻油兼用型成条飞播装置单体

Fig. 2 Rice and oil rape dual-purpose aerial seeding device

1. 管夹 2. 种箱 3. 排种器 4. 导种投种管 5. 导种管折叠装置

其中外槽轮排种器结构如图3所示,由直流电机、壳体、清种毛刷、排种轮、调节轮、螺纹固定环和牵引套筒等组成。

### 1.2 工作原理

稻油兼用型成条飞播装置各单体通过管夹固定

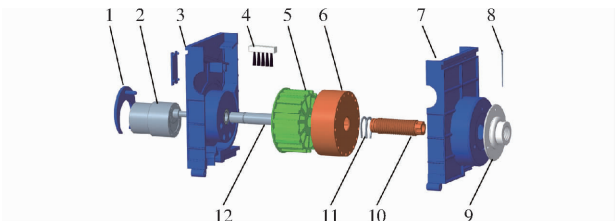


图 3 排种器结构爆炸图

Fig. 3 Exploded view of seed metering device

1. 电机盖板 2. 直流电机 3. 左壳体 4. 清种毛刷 5. 排种轮  
6. 调节轮 7. 右壳体 8. 销钉 9. 螺纹固定环 10. 牵引套筒  
11. 卡簧 12. 轴

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。作业时,无人机升空后,由导种管折叠装置驱动,将导种投种管由折叠状态变为伸展状态,进入作业航线后排种器进入作业状态。排种轮在清种毛刷配合下将定量种子从种群分离,经过运种后从排种器另一侧下方投入导种投种管,导种投种管屏蔽机翼平面下方急剧的气流干扰,使种子保持稳定的下落轨迹并最终落入土壤中,实现种子落地成条。播种作业结束后,导种投种管恢复至折叠状态,以便于无人机降落。

为满足油菜、水稻等多种不同作物的播量要求,事先通过手动旋转牵引套筒,带动套在排种轮上的调节轮实现左右运动,进而改变排种轮型槽的有效工作长度,达到调整单位时间排种量的目的。

2 关键部件设计

2.1 排种器排种过程分析

排种器是稻油兼用型成条飞播装置的关键部

件。如图 4 所示,排种过程为:种箱中种子在重力作用下进入排种器,在进种斜面引导下进入进种口,在充种腔中随排种轮转动形成不同程度的扰动,从充种腔底部开始逐步完成对型槽的充种,清种毛刷将多余种子清回充种腔,被囊种后种子经运种从出种口进入下方导种投种装置。

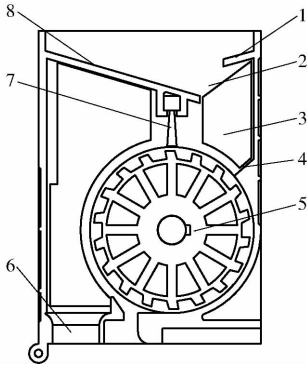


图 4 排种器结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of seed metering device

1. 挡种板 2. 进种口 3. 充种腔 4. 减阻斜面 5. 排种轮  
6. 出种口 7. 清种毛刷 8. 进种斜面

2.2 排种器进种口设计

为实现电驱化和轻量化,应尽量减小相关零部件的尺寸及质量,为此需合理控制充种、排种过程中的阻力,以减小对排种电机的扭矩要求。

选用种子长宽比较为典型的 2 种常规稻品种和 1 种典型油菜品种,经试验测定种子的物理特性参数(表 2),为相关设计计算过程提供依据。

2.2.1 充种排种过程受力分析

在实际试验试制过程中发现,在常规排种器充

表 2 典型品种水稻及油菜种子的物理特性参数

| Tab.2 Physical characteristics parameters of typical rice and rape seeds |            |            |            |           |             |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-------------|
| 品种                                                                       | 平均长度/mm    | 平均宽度/mm    | 平均厚度/mm    | 自然休止角/(°) | 千粒质量/g      |
| 江稻 501                                                                   | 7.96 ± 0.4 | 3.46 ± 0.2 | 2.32 ± 0.2 | 38.90     | 23.20 ± 0.2 |
| 黄华占                                                                      | 9.40 ± 0.2 | 2.00 ± 0.2 | 1.80 ± 0.2 | 32.54     | 23.60 ± 0.2 |
| 华油杂 62                                                                   | 1.64 ± 0.2 | 1.64 ± 0.2 | 1.64 ± 0.2 | 26.70     | 4.68 ± 0.2  |

种腔中,工作时排种轮逆时针转动,阻力来源于充种初始位置和从充种初始位置到清种毛刷位置的充种过程中。在充种初始位置,部分种子与转动的排种轮、排种器外壳产生摩擦阻力;在充种过程中,阻力则主要来自于充种腔中排种轮型槽附近种子的摩擦力和上方种群产生的压力。

将某个排种轮型槽刚进入充种腔的位置定义为初始充种位置,此位置种子的受力分析如图 5 所示,排种轮为种子提供充种动力,以克服种子与排种器壳体、种子间摩擦阻力和来自上方种子的压力。

忽略种子自身重力、种子及型槽的形状影响,分

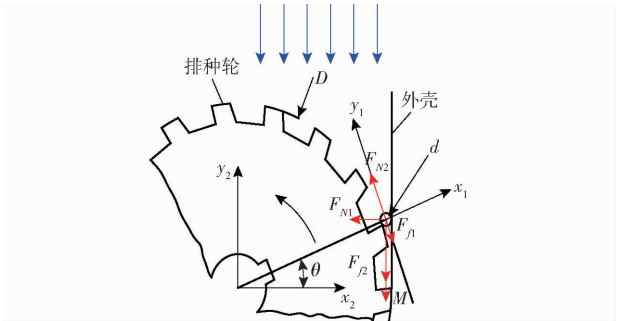


图 5 排种轮充种受力分析

Fig. 5 Analysis of seed filling resistance of seed metering wheel

析得到种子受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_y = F_{N2} - F_{f1} - F_{f2} \cos \theta - M \cos \theta \\ F_x = (F_{f2} + M) \sin \theta - F_{N1} \cos \theta \\ F_{f1} = \mu_1 M \sin \theta \\ F_{f2} = \mu_2 F_{N1} \\ M = \frac{[H - (D + d) \sin \theta] mg}{2\,000d} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\theta = \arccos \frac{D - d}{D + d} \quad (2)$$

- 式中
- $F_y$ ——种子在圆周方向上所受合力,N

$F_x$ ——种子在排种轮径向上所受合力,N

$F_{N2}$ ——排种轮型槽为种子提供的动力,N

$F_{N1}$ ——种子与排种器外壳之间的压力,N

$F_{f1}$ ——种子间摩擦阻力,N

$F_{f2}$ ——种子与排种器壳体间摩擦阻力,N

$M$ ——当前种子和垂直上方种子的重力总和,N

$\mu_1$ ——种子间摩擦因数

$\mu_2$ ——种子与排种器壳体之间摩擦因数

$H$ ——上方种箱中种子高度,mm

$D$ ——排种轮直径,mm

$m$ ——种子千粒质量,g

$d$ ——种子横截面直径,mm

$\theta$ ——种子在初始充种位置相对于排种轮中心坐标系的相位角,(°)

$g$ ——重力加速度,m/s<sup>2</sup>

考虑到排种轮厚度,在充种初始位置存在一层种子与排种轮、排种器外壳摩擦,结合式(1)整理得到排种轮在充种初始位置提供的最小动力应大于产生的阻力,即

$$F_N = \frac{F_{N2}L}{l_{\min}} > \frac{L}{l_{\min}} \frac{[H - (D + d) \sin \theta] mg}{2\,000d} \cdot \left( \mu_1 \sin \theta + \cos \theta + \frac{\mu_2 \sin \theta \cos \theta}{\cos \theta - \mu_2 \sin \theta} \right) \quad (3)$$

- 式中
- $F_N$ ——排种轮在初始位置应提供的最小动力,N

$L$ ——排种轮厚度,mm

$l_{\min}$ ——种子长度极小值,mm

在初始充种位置以外的其他相位角处,位于充种腔中的排种轮型槽也需使型槽中种子克服种子间摩擦力和来自上方种子的压力。在充种角度范围内,排种轮需提供克服阻力的最小动力为

$$F_f > \frac{Lmg}{2\,000dl_{\min}} \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \{ [2H - (D + d) \sin \varphi] \cdot (\mu_1 \sin \varphi + \cos \varphi) \} d\varphi \quad (4)$$

- 式中
- $F_f$ ——排种轮在充种腔中为克服种子间阻力

和上方种子压力需要提供的动力,N  
 $\varphi$ ——排种轮与种子接触时,种子位置相对于排种轮中心坐标系的相位角,(°),在初始位置等于  $\theta$

考虑驱动排种轮转动的最小扭矩要求,综合上述充种阻力,要求排种电机的扭矩  $T$  满足

$$\begin{cases} T \geq \frac{1}{2}FD \\ F = F_f + F_N \end{cases} \quad (5)$$

式中  $F$ ——在充种和排种过程中排种轮需要提供的最小动力,N

通过式(2)和图6所示几何关系,计算充种初始位置种子相对排种轮中心坐标系的相位角  $\theta$ 。当最大厚度或宽度的种子在此位置时,其他种子均可能存在与排种轮及排种轮外壳的摩擦,故种子横截面直径选用测量种子中宽度或厚度中的极大值,即  $d = 3.66\text{ mm}$ ,则充种初始位置,种子相对排种轮中心坐标系的相位角  $\theta = 28^\circ$ 。

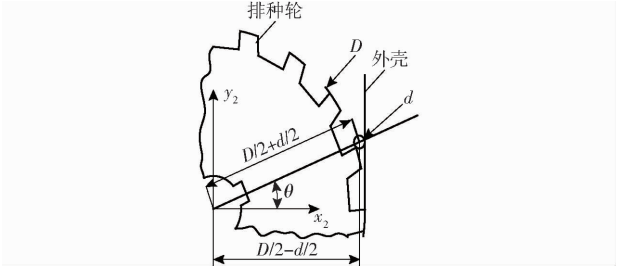


图6 充种起始角几何关系  
Fig.6 Calculation of seed filling starting angle

式(3)、(4)中, $H$ 为种箱中种子高度,根据整机布局及载重设计为180 mm;排种轮直径  $D$  计算时采取外槽轮常用值60 mm;为布局协调,排种轮厚度设计为与舵机同宽度,即  $L$  为30 mm;考虑在排种轮厚度方向上存在最多数量的种子, $l_{\min}$  为7.56 mm,种子横截面直径  $d$  为3.66 mm;实测摩擦因数  $\mu_1$  为0.6, $\mu_2$  为0.51。代入式(3)~(5),计算得到  $F = 81.32\text{ N}$ , $T \geq 2.44\text{ N}\cdot\text{m}$ 。而满足尺寸及质量要求的直流减速电机最大扭矩为0.5 N·m左右,无法满足要求,因此需要进行相应减阻设计。根据  $F = F_N + F_f$  分析可得,在排种轮运行过程中,来自上方种箱种子的阻力和压力对总阻力作用明显,故在充种腔上方设计挡种板,排种轮充种初始位置设计减阻斜面以减小种子与排种轮、排种器外壳的摩擦阻力。如图4所示,挡种板与进种斜面之间开口为进种口,使用充种初始位置,种子相对排种轮中心坐标系的相位角  $\theta = 28^\circ$  作为减阻斜面的倾角,可防止绝大多数种子与排种器外壳摩擦,减少阻力,经减阻设计后排种轮受力为



$$F = F_f \tag{6}$$

此时,初始充种位置处种子与排种器外壳阻力  $F_f$  消失,垂直方向种子高度从 180 mm 减少至 30 mm,代入验算数据得驱动排种轮所需最低扭矩  $T = 0.25 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

选取驱动电机为亿星科技 JGB37-520 型直流减速电机,电机参数为:直径 37 mm、长度 47 mm、转速 66 r/min、额定扭矩 0.45 N·m,满足设计要求。

2.2.2 进种斜面设计及进种口尺寸确定

为使种箱中种子在重力作用下稳定有序地进入充种腔,排种器上方设有引导种子进入充种腔的进种斜面。根据物料学分析,进种斜面倾角应大于种子自然休止角,种子方可顺利流动。经测量,水稻种子自然休止角在  $30^\circ \sim 40^\circ$  之间,故将进种斜面倾角设计为  $40^\circ$ 。

进种斜面和挡种板之间为进种口,进种口高度满足大多数种子物料特性时,可使种子顺利进入充种腔。参考外槽轮型槽开口宽度设计原理,当型槽开口宽度为种子最大长度的 1.4 倍时,种子可顺利充入型槽<sup>[24-25]</sup>。故进种口从进种斜面下方至挡种板之间,高度尺寸大于 1.4 倍种子最大长度,结合布局,最后确定为 2 倍种子最大长度,即 20 mm。

2.3 排种器排种轮设计

2.3.1 排种轮型槽截面形状及尺寸确定

排种轮型槽常见截面形状主要为矩形、U 形和勺形。3 种槽型中,勺形型槽充种效果和排种均匀性更好<sup>[24-25]</sup>,故采用勺形截面设计型槽。

勺形截面型槽主要参数为开口宽度  $W_1$  和深度  $h$ 。水稻种子充入型槽时,以 2 粒横放及 1 粒纵放的情况最多<sup>[24-25]</sup>。故在勺形槽中,开口宽度由种子的最大长度决定,且其宽度应为种子最大长度的 1.1 倍。型槽深度取决于种子最大宽度和厚度的极值,型槽深度  $h$  应取种子最大宽度或厚度的 1.4 倍<sup>[24-25]</sup>。上述尺寸确定满足关系式

$$\begin{cases} W_1 = 1.1l_{\max} \\ h = 1.4d_{\max} \end{cases} \tag{7}$$

式中  $l_{\max}$ ——种子最大长度,mm

$d_{\max}$ ——种子最大宽度或厚度,mm

为适应杂交稻、常规稻和油菜等不同品种作物播量的大范围可调需求,除采用调节排种转速的方式,还需增加槽轮有效工作长度的可调性。设计与排种轮配合的调节轮,调节轮内齿与排种轮型槽结构互补,为便于加工并保证配合面灵活可靠,进一步将型槽截面设计为类勺型的直角梯形,如图 7 所示。此时,梯形槽开口宽度  $W_1$  为 11 mm、下底宽度  $W_2$  为 5 mm、深度  $h$  为 6 mm,型槽面积为  $48 \text{ mm}^2$ 。

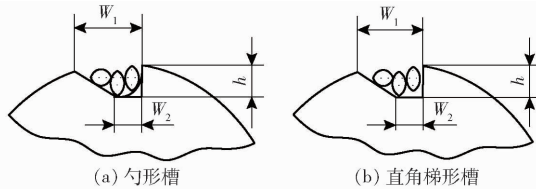


图 7 型槽截面形状及尺寸示意图

Fig. 7 Cross section shape and size of type groove

2.3.2 排种轮直径、型槽分布角和转速确定

排种轮直径和排种轮型槽的数量是影响排种质量的重要因素,文献[24-27]研究表明:排种轮直径过小,其上均布的型槽数量少,排种作业时为保证所需的播量,则需增加排种轮转速,而排种轮转速过大,型槽转经充种区时间变短,种子不能及时充入型槽内,易造成漏播,因此排种轮直径应取较大值,但排种轮直径过大,排种器及其附件尺寸增大,与设计要求相悖。常用的排种轮直径在 60 ~ 80 mm 之间<sup>[24-27]</sup>。排种轮直径应满足排种器布局要求,考虑到飞播装置的轻量化设计要求,同时调整播种行距时需排种单体在无人机脚架与侧 2 斜管间(间距 10 cm)穿梭,参照图 1b,排种器宽度应小于该间距,设计为 95 mm。另外,考虑排种器外壳的注塑件厚度(2 mm)以及预留投种空间 24 mm(应大于出种口直径 20 mm),排种轮直径最终取 67 mm。

排种轮单位时间供种量和排种轮转速、型槽数量等结构参数有关,各参数之间满足水稻理论供种公式<sup>[26]</sup>

$$\begin{cases} G_o = \frac{9nAZg_1}{25\phi z} \\ z = \frac{\pi k_1 a k_2 b k_3 c}{6} \end{cases} \tag{8}$$

式中  $G_o$ ——单位时间内排种轮供种量,g/min

$n$ ——排种轮转速,r/min

$A$ ——型槽横截面积, $\text{mm}^2$

$Z$ ——型槽长度,mm

$\phi$ ——型槽分布角, $(^\circ)$

$g_1$ ——种子千粒质量,g

$z$ ——单个种子理论平均体积, $\text{mm}^3$

$k_1$ ——种子长度修正系数,江稻 501 取 0.89,黄华占取 0.772

$a$ ——种子长度,mm

$k_2$ ——种子宽度修正系数,取 1.00

$b$ ——种子宽度,mm

$k_3$ ——种子厚度修正系数,江稻 501 取 0.96,黄华占取 0.932

$c$ ——种子厚度,mm

式(8)中型槽分布角为相邻两型槽中心点间所

对应的圆心角,对应型槽数量,当型槽截面形状参数和宽度一定时,与排种轮转速一起决定排种轮供种量及排种器排量。

而根据农艺上的作物密度要求,排种器单位时间排量与无人机作业速度、作物播种行距和播量之间满足

$$s=\frac{Slv}{1\,111}$$

(9)

式中  $s$ ——排种器单位时间排量,g/min

$S$ ——作物播量,kg/hm<sup>2</sup>

$l$ ——作物播种行距,cm

$v$ ——无人机作业速度,m/s

按照前述典型水稻品种江稻 501 和黄华占的常用播量 60 ~ 105 kg/hm<sup>2</sup> (常规稻)<sup>[28-29]</sup>,当无人机作业速度为 5 m/s 时,根据式(9)计算得到排种器单位时间排量  $s$  为 540 ~ 945 g/min。再将该排量当成供种量,查表 2 两种典型品种水稻三轴尺寸(对应式(8)中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ),并将型槽截面积(48 mm<sup>2</sup>)和排种电机转速 50 r/min(所选驱动电机额定转速 66 r/min,30 r/min 以上可以提供较为稳定的扭矩输出,取值为额定值 80% 左右)等代入式(8)中,计算得到满足江稻 501 播量时的排种轮型槽分布角为 18.7° ~ 32.5°,满足黄华占播量时的排种轮型槽分布角为 21.4° ~ 37.5°。型槽分布角小于理论计算范围时,型槽数量越多,越能满足排量要求。而当型槽分布角小于 14° 时,型槽间会出现干涉(小于型槽开口对应的圆心角 14°)。为保证排种轮结构完整性,同时综合考虑其结构强度,确定型槽分布角为 20°,对应排种轮上型槽数量为 18。

2.4 导种管折叠装置设计

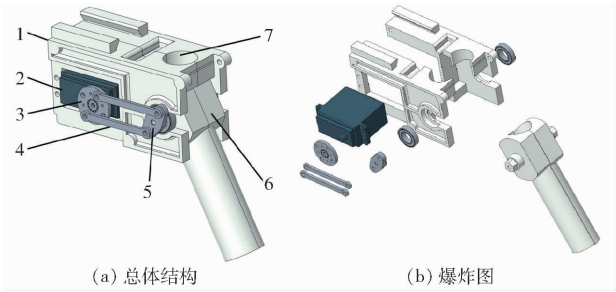
2.4.1 导种管折叠装置结构与工作原理

为实现种子落地成条,需尽量减少种子在下落过程中受到的气流扰动,故在条播装置上设计导种投种管。为实现导种投种管在无人机作业前后的折叠,以保证无人机安全起降,条播装置设计有导种管折叠装置,结构如图 8 所示。

工作时,舵机通过连杆驱动中空旋转头转动,旋转头下方连接导种投种管。无人机在地面时,舵机驱动旋转头及导种投种管至水平状态。在无人机起飞进入工作航线时,舵机驱动旋转头及导种投种管至竖直状态。

2.4.2 导种管参数设计

无人机作业速度较快,为确保飞行安全,设置的作业高度应大于 1 m。而飞行中下方旋翼下洗气流、地面上洗气流和无人机飞行迎面来流的混合气流场会影响种子下落运动的轨迹<sup>[21,32]</sup>。因此设计



(a) 总体结构 (b) 爆炸图

图 8 导种管折叠装置结构示意图

Fig. 8 Structure diagrams of seed guide tube folding device

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

导种管以保证种子下落过程中轨迹的相对稳定性,并通过导种管驱动装置实现导种管自动展开与折叠。

导种管直径应保证种子顺利下落,同时满足导种管折叠装置布局需求。参照进种口设计依据,管径应至少大于 1.4 倍种子最大长度,综合考虑导种管折叠装置布局,最终确定导种管直径为 20 mm,如图 9 所示。

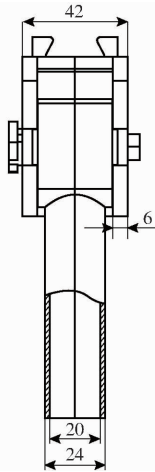


图 9 导种管布局及尺寸(正视图)

Fig. 9 Layout and dimensions of seed guide tube folding device (front view)

为确定导种管长度,采用 ANSYS 有限元模拟仿真方法分析六旋翼条播无人机下方气流场。基于可压缩雷诺平均 N-S 方程,结合 SST  $k-\omega$  湍流模型和滑移网格技术,建立六旋翼无人机在飞行高度 1、1.5 m(无人机脚架离地高度),飞行速度 3 m/s 时下洗气流的三维 CFD(Computational fluid dynamic)模型,分析六旋翼无人机下洗气流的分布规律。

由图 10 可知,六旋翼无人机在飞行过程中,混合气流沿飞行速度方向向后偏移。在飞行高度 1 m 时,六旋翼无人机机身中心正下方混合流在  $y = -0.75$  m 左右出现偏移;在飞行高度 1.5 m 时,六旋翼无人机机身中心正下方混合流在  $y = -1.00$  m

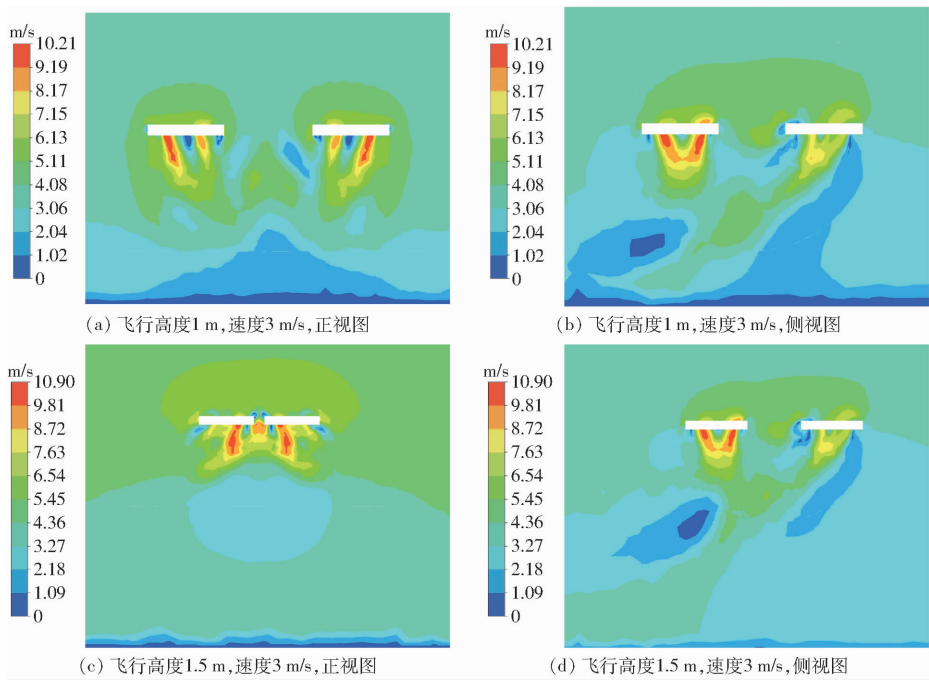


图 10 六旋翼无人机旋翼气流场分布

Fig. 10 Rotor airflow field distributions of six rotor UAV

左右出现偏移。成条飞播装置安装于六旋翼无人机中心正下方且排种单体长度(不包括导种管)为 0.5 m 左右,因此导种管延伸长度必须避开混合流影响区,才能保证种子下落不受混合流干扰,此时导种管长度应不小于 0.5 m。综合考虑导种管折叠过程中的阻力对驱动电机的影响,确定导种管长度为 0.5 m。

3 试验

3.1 排种性能台架试验

为测定排种性能、优化作业参数和验证作业效果,分别开展台架试验、场地试验和田间试验。

3.1.1 试验指标

参照文献[30]中指定的方法和指标,以总排量变异系数  $C_{VT}$ 、各行排量一致性变异系数  $C_{VR}$  和破损率  $K$  作为试验指标,进行排种性能试验,各试验指标计算式为

$$C_{VT} = \frac{\sqrt{\frac{1}{x-1} \sum (x_i - x)^2}}{x} \times 100\% \quad (10)$$

其中

$$x = \frac{\sum_{i=1}^5 x_i}{5} \quad (11)$$

$$C_{VR} = \frac{\sqrt{\frac{1}{j-1} \sum (y_j - y)^2}}{y} \times 100\% \quad (12)$$

其中

$$y = \frac{\sum_{j=1}^6 y_j}{6} \quad (13)$$

$$K = \frac{m_i}{m_1} \times 100\% \quad (14)$$

式中  $x$ ——单位时间总排量均值, g/min  
 $x_i$ ——第  $i$  次单位时间总排量, g/min  
 $y$ ——平均行排量, g/min  
 $y_j$ ——第  $j$  行排量, g/min  
 $m_i$ ——第  $i$  次试验中破损种粒质量, g  
 $m_1$ ——单次试验总排量, g

3.1.2 试验方法

如图 11 所示,将无人机固定在台架上,使用网袋收集各排种器单位时间(1 min)排出的种子并称量。



图 11 排种性能台架试验

Fig. 11 Bench test of seed metering performance

1. 无人机平台 2. 网袋 3. 台架 4. 条播装置

使用华油杂 62 和黄华占进行排种性能试验。设置 3 个符合实际作业播量的参数(排种轮转速 40 r/min,对应遥控器通道开度 85%,排种轮开度 83%、70%、53%)进行水稻试验,1 个参数(排种轮转速 25 r/min,对应遥控器通道开度 40%,排种轮开

度 16%) 进行油菜试验。分别对应工作速度 4 m/s 时水稻播量 60、45、22.5 kg/hm<sup>2</sup>, 油菜播量 6.75 kg/hm<sup>2</sup>。分别记录 3 轮各行 1 min 内排量、各轮总排量及各轮破损种子数, 并进行分析。

### 3.1.3 试验数据及分析

文献[30]中条播排种器性能规定水稻条播指标: 各行排量一致性变异系数小于等于 5%, 总排量

变异系数小于等于 2.6%, 破损率小于等于 0.5%; 文献[31]对油菜条播性能规定指标: 各行排量一致性变异系数小于等于 7%, 总排量变异系数小于等于 45%。由表 3 可知, 在各排量情况下, 水稻和油菜总排量变异系数、各行一致性变异系数和破损率指标均能满足要求, 故条播装置排种器设计满足实际应用要求。

表 3 排种轮各型槽有效长度下排种性能试验  
Tab.3 Metering performance test under effective length of groove of seed metering wheel

| 排种轮型槽<br>有效工作长<br>度占比/% | 各行排种量/g |        |        |        |        |        | 单位时间                   | $C_{VR}/\%$ | $C_{VT}/\%$ | 破损    | 种子  |
|-------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------|-------------|-------------|-------|-----|
|                         |         |        |        |        |        |        | 总排量/                   |             |             | 种子    | 破损  |
|                         | 1       | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | (g·min <sup>-1</sup> ) |             |             | 质量/g  | 率/% |
| 83                      | 431.37  | 429.50 | 431.52 | 429.05 | 430.32 | 430.25 | 2 582.01               | 0.21        | 0.04        | 0.069 | 0.3 |
|                         | 431.24  | 428.56 | 430.45 | 429.11 | 430.65 | 429.10 | 2 579.11               |             |             |       |     |
|                         | 430.66  | 431.53 | 429.30 | 430.12 | 430.83 | 429.10 | 2 581.54               |             |             |       |     |
| 70                      | 323.00  | 322.65 | 324.91 | 323.30 | 324.23 | 323.66 | 1 941.75               | 0.21        | 0.02        | 0.046 | 0.2 |
|                         | 323.49  | 324.45 | 322.64 | 323.90 | 323.44 | 323.56 | 1 941.48               |             |             |       |     |
|                         | 322.70  | 324.92 | 323.50 | 324.46 | 323.20 | 323.78 | 1 942.56               |             |             |       |     |
| 53                      | 176.34  | 174.60 | 175.49 | 173.89 | 176.66 | 174.58 | 1 051.56               | 0.53        | 0.07        | 0.046 | 0.2 |
|                         | 175.31  | 174.66 | 173.20 | 176.54 | 174.30 | 175.80 | 1 049.81               |             |             |       |     |
|                         | 173.89  | 175.54 | 176.10 | 175.34 | 174.56 | 174.56 | 1 049.99               |             |             |       |     |
| 16                      | 51.09   | 52.06  | 49.21  | 50.68  | 51.19  | 50.08  | 304.31                 | 1.53        | 0.25        | 0.047 | 0.1 |
|                         | 50.43   | 49.81  | 51.23  | 50.09  | 51.11  | 52.03  | 304.70                 |             |             |       |     |
|                         | 49.87   | 51.41  | 50.98  | 50.72  | 52.12  | 51.23  | 306.33                 |             |             |       |     |

### 3.2 作业参数优化场地试验

在进行实际大田试验前, 需确定无人机飞行作业参数与种子成条性之间的关系, 以便得到较好的播种效果。已知无人机作业参数为飞行高度  $H_1$  和飞行速度  $v$ , 设计双因素试验确定条播无人机飞行作业参数。

#### 3.2.1 试验方案

农用无人机作业速度一般在 2~7 m/s 之间, 飞行高度在 1~5 m 之间。为保证作业效率和播种成条性, 初步确定试验参数为: 作业高度  $H_1$  (无人机脚架距地面高度) 为 1、1.5、2 m; 飞行速度  $v$  为 2、3、4、5 m/s; 无人机作业时排种器排量采用式(8) 计算结果进行匹配。

试验场地为华中农业大学农机驾驶场地, 场地空旷且无障碍物。试验当天有 2~3 级西北风, 空气相对湿度 36%。以东西走向场地为无人机航向, 飞行距离 20 m。在无人机航线中心位置设置两长形泥盒, 泥盒总宽度 3 m, 可覆盖无人机 2 m 最大播幅。无人机依照各参数依次飞过泥盒, 测量泥盒中各行种子条带的宽度, 如图 12 所示。

#### 3.2.2 试验指标

为评价种子落地后的成条效果, 定义成条指数  $C_L$ , 计算公式为

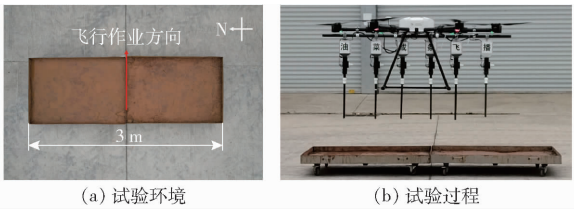


图 12 无人机条播场地试验示意图

Fig.12 Schematic of UAV drilling site test

$$C_L = \left(1 - \frac{\bar{w}}{w_o}\right) \times 100\% \tag{15}$$

式中  $\bar{w}$ ——采样距离 1 m 内的种子条带宽度平均值, 即各条带包络矩形的宽度均值, cm  
 $w_o$ ——作物种植行距, 即相邻投种管的轴线间距, cm

成条指数反映种子落地后分布的线性效果, 其值越小, 种子成条效果越好。

#### 3.2.3 试验结果分析

分别对水稻和油菜进行双因素泥盒试验。如图 13 所示, 分别测量泥盒中各行种子条带最宽处宽度(红框所示), 得到各作业参数下种子平均条带宽度如表 4 所示(试验时, 飞行高度 1 m, 导种管末端距离泥面 40 cm 左右, 飞行速度 3 m/s)。

由表 4 可知, 飞播种子落地后成条性能与飞行作业参数密切相关, 且相同作业参数下水稻成条性



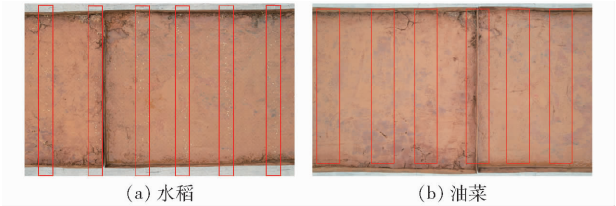


图 13 泥盒试验效果

Fig. 13 Test effects in mud box

表 4 条播无人机作业参数双因素试验结果

Tab. 4 Two factor test results of drilling UAV operation parameters

| 作业速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 作业高度 1.0 m |      |        |      | 作业高度 1.5 m |      |        |      | 作业高度 2.0 m |      |        |      |
|-------------------------------------------|------------|------|--------|------|------------|------|--------|------|------------|------|--------|------|
|                                           | 平均带宽/cm    |      | 成条指数/% |      | 平均带宽/cm    |      | 成条指数/% |      | 平均带宽/cm    |      | 成条指数/% |      |
|                                           | 油菜         | 水稻   | 油菜     | 水稻   | 油菜         | 水稻   | 油菜     | 水稻   | 油菜         | 水稻   | 油菜     | 水稻   |
| 2                                         | 11.3       | 7.2  | 62.2   | 76.1 | 14.3       | 16.0 | 52.2   | 46.7 | 23.3       | 23.2 | 22.2   | 22.8 |
| 3                                         | 7.2        | 5.3  | 76.1   | 82.2 | 12.3       | 12.3 | 58.9   | 58.9 | 19.7       | 19.3 | 34.4   | 35.6 |
| 4                                         | 6.7        | 3.8  | 77.8   | 87.2 | 12.0       | 14.7 | 60.0   | 51.1 | 21.2       | 23.5 | 29.4   | 21.7 |
| 5                                         | 13.7       | 14.7 | 54.4   | 51.1 | 12.3       | 22.5 | 58.9   | 25.0 | 20.0       | 19.6 | 33.3   | 34.7 |

致种子的横向移动,种子落地时与地面碰撞后的反弹效应导致的横向移动。试验中采用的泥面,可忽略反弹效应,因此试验结果中成条效果随飞行作业速度增加而先增加后降低的原因应该是由无人机下方气流场引起的。根据 2.4 节气流场仿真及相关研究<sup>[21,23,32-33]</sup>可知,无人机平台下方有一个非常复杂的混合气流场。作业前飞时,无人机机头具有一定的前倾角,旋翼产生向下同时略向后倾的高速气流,该气流裹挟周边空气并与前方相对来流混合后向后向下移动。随着飞行速度的增大,旋翼转速及旋翼气流和前方来流强度都会增加,但是混合流对种子下落过程中的速度及位置的扰动是一个极其复杂的非稳态过程。定量的研究需要借助 EDEM 和 Fluent 耦合仿真方法进行大量仿真,由于既是动网格又是非结构化网格,且计算区域庞大,模拟计算量及耗时巨大,需要后续进一步深入相关研究并合理解释试验结果。

3.3 田间验证试验

场地泥盒试验结果显示,条播无人机在飞行高度 1 m、飞行速度 4 m/s 时油菜和水稻达到较好的作业效果,因此采用此作业参数进行实际田间试验验证。作业时排种器调节参数按照播量要求和作业速度,参照表 5 进行设定。

2021 年 10 月 11 日,在湖北省黄冈市团风县开展油菜条播田间试验,前茬作物为水稻,试验前旋耕、开沟。飞播油菜品种为中油杂 92,作业飞行高度 1 m,飞行速度 4 m/s,播量  $6.75\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。播后 30 d 后出苗效果如图 14 所示。

2022 年 5 月 11 日,在湖北省孝感市开展水稻条播田间试验,试验前打浆平整,无明水。水稻品种

比油菜更好。成条性与作业飞行高度负相关,无人机作业飞行高度越低,种子成条性越好;成条性还随着无人机飞行作业速度的增加而先增加后降低,并在飞行作业速度 4 m/s 左右达到较好的成条效果。

排种器排出的种子在导种管中自由下落后继续向下投种,最终的落地成条效果取决于 2 个效应的综合:气流场对投种下落过程中种子的扰动效应导

表 5 条播装置播量调节参数

Tab. 5 Adjustment parameters of drill volume

| 作业<br>作物 | 速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 播量/<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | 遥控器通                           | 排种轮<br>型槽有<br>效工作<br>长度占<br>比/% | 外露调              | 单行排种                                               |
|----------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|
|          |                                         |                                           | 道开度<br>(对应排<br>种电机转<br>速控制量)/% |                                 | 节螺杆<br>长度/<br>cm | 器单位时<br>间排量/<br>( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$ ) |
| 水稻       | 3                                       | 22.5                                      | 85                             | 16                              | 2.0              | 121                                                |
|          | 4                                       | 22.5                                      | 85                             | 23                              | 2.2              | 163                                                |
|          | 3                                       | 45.0                                      | 85                             | 70                              | 3.6              | 244                                                |
|          | 4                                       | 60.0                                      | 85                             | 83                              | 4.0              | 433                                                |
|          | 3                                       | 75.0                                      | 95                             | 83                              | 4.0              | 407                                                |
|          | 4                                       | 90.0                                      | 95                             | 83                              | 4.0              | 649                                                |
| 油菜       | 3                                       | 6.0                                       | 40                             | 16                              | 2.0              | 33                                                 |
|          | 4                                       | 7.5                                       | 40                             | 16                              | 2.0              | 55                                                 |



图 14 油菜条播作业过程及田间出苗效果

Fig. 14 Process of oil rape drilling and effect of emergence in field

为甬优 1540(提前浸种但未破胸露白,晾干后用适量厌食剂拌种、保持无黏连状态),作业飞行高度 1 m,飞行速度 4 m/s,播量  $30\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。播后 30 d 后出苗效果如图 15 所示。

4 结论

(1)对排种器充种过程进行理论分析,针对充



图 15 水稻条播作业过程及田间出苗效果

Fig.15 Process of rice drilling and effect of emergence in field

种过程中产生阻力的主要原因,设计挡种板和减阻斜面,以减小排种过程阻力。通过进一步设计计算,确定排种轮结构参数:排种轮直径 67 mm、型槽截面形状为直角梯形、型槽数量 18。

(2)为保证种子下落轨迹稳定,分析了六旋翼无人机作业时机身下方气流场分布,根据流场分布

规律确定导种管长度为 50 cm,并设计导种管折叠装置实现导种管的自动展开与折叠。

(3)进行排种性能试验,得到在符合 3 组水稻及 1 组油菜播量参数条件下,各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数和种子籽粒破损率,均满足 NY/T 3881—2021《遥控飞行播种机 质量评价技术规范》指标要求。

(4)进行场地泥盒试验,确定条播无人机在飞行高度(脚架距地面高度)1 m、飞行速度 4 m/s 时,成条效果较好(水稻平均带宽 3.8 cm,油菜平均带宽 6.7 cm)。将场地试验得到的无人机作业参数应用于油菜和水稻飞播田间试验中,试验结果符合作物实际栽培要求。

## 参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] 廖庆喜, 刘明峰, 张照, 等. 油菜基质块苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 49–56. LIAO Qingxi, LIU Mingfeng, ZHANG Zhao, et al. Multi objective optimization design of double five bar planting mechanism of rape substrate block seedling transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 49–56. (in Chinese)
- [3] 罗锡文, 谢方平, 区颖刚, 等. 水稻生产不同栽植方式的比较试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 136–139. LUO Xiwen, XIE Fangping, OU Yinggang, et al. Comparative test of different planting methods for rice production[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 136–139. (in Chinese)
- [4] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44–53. YU Xiaoxu, ZHAO Yun, CHEN Baocheng, et al. Development status and prospect of transplanting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44–53. (in Chinese)
- [5] PARISH R L. Current developments of seeders and transplanter in vegetables[J]. Hort Technology, 2005, 15(2): 346–351.
- [6] 胡乔磊, 廖庆喜, 王洋. 油菜机械移栽载苗基质块力学与生物学特性分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 58–65. HU Qiaolei, LIAO Qingxi, WANG Yang. Analysis of the mechanical and biological characteristics of the matrix block for mechanical transplanting of rape seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 58–65. (in Chinese)
- [7] KUMAR G V, RAHEMAN H. Development of a walk-behind type hand tractor powered vegetable transplanter for paper pot seedlings[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 189–197.
- [8] 李兆东, 雷小龙, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 9–17. LI Zhaodong, LEI Xiaolong, CAO Xiuying, et al. Design and test of rape precision pneumatic collector and extractor[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 9–17. (in Chinese)
- [9] 王在满, 黄逸春, 罗锡文, 等. 播量无级调节水稻精量排种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 9–16. WANG Zaiman, HUANG Yichun, LUO Xiwen, et al. Design and test of rice precision metering device with stepless regulation of seeding rate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 9–16. (in Chinese)
- [10] 廖庆喜, 吴崇, 张青松, 等. 油菜精量联合直播机随速播种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 49–58, 159. LIAO Qingxi, WU Chong, ZHANG Qingsong, et al. Design and test of rape precision combined direct seeding control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 49–58, 159. (in Chinese)
- [11] 廖庆喜, 张宁, 张朋玲, 等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 48–51, 95. LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. A multi row centrifugal rapeseed seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48–51, 95. (in Chinese)
- [12] 李明, 刘晓辉, 廖宜涛, 等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 68–73. LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic drum type rape precision collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68–73. (in Chinese)
- [13] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1–16. LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of rape precision sowing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1–16. (in Chinese)
- [14] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 10–15. ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design and test of ditching device of rice precision hole seeder[J].

Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 10 – 15. (in Chinese)

[15] 张国忠,张沙沙,杨文平,等. 双腔侧充种式水稻精量穴播排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016,32(8):9 – 17.  
ZHANG Guozhong,ZHANG Shasha,YANG Wenping,et al. Design and test of double cavity side filling type precision hole seeding device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 9 – 17. (in Chinese)

[16] 罗锡文,欧洲,蒋恩臣,等. 抛掷成穴式水稻精量直播排种器试验[J]. 农业机械学报, 2005,36(9):37 – 40.  
LUO Xiwen, OU Zhou,JIANG Enchen, et al. Experimental research on precision rice direct-seeder with hill sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 37 – 40. (in Chinese)

[17] 唐湘如,罗锡文,黎国喜,等. 精量穴直播早稻的产量形成特性[J]. 农业工程学报, 2009,25(7):84 – 87.  
TANG Xiangru,LUO Xiwen,LI Guoxi,et al. Yield formation characteristics of precision hole direct seeding early rice[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 84 – 87. (in Chinese)

[18] 罗锡文,李继宇,周志艳. 一种适于无人机撒播作业的机载装置及撒播方法: CN0104176254A[P].2014 – 12 – 03.

[19] 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.  
SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, JIANG Rui, et al. Design and parameter optimization of rice sowing device of pneumatic UAV [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 80 – 88. (in Chinese)

[20] 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 test of green manure seed sowing device based on UAV platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(11):76 – 85. (in Chinese)

[21] 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)

[22] 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 test of rape aerial seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36 (5): 78 – 87. (in Chinese)

[23] 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. Analysis and test of seed feeding process of air delivery rape aerial seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(17): 31 – 41. (in Chinese)

[24] 罗锡文,刘涛,蒋恩臣,等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2007,23(3):108 – 112.  
LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and test of rice precision hole direct seeding wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(3): 108 – 112. (in Chinese)

[25] 田立权,王金武,唐汉,等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2016,47(5):46 – 52.  
TIAN Liquan, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance test of spiral groove rice direct seeding device in hole [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5): 46 – 52. (in Chinese)

[26] 周海波,梁秋艳,魏天路,等. 双级振动精密排种器外槽轮式定量供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):57 – 61,83.  
ZHOU Haibo, LIANG Qiuyan, WEI Tianlu,et al. Design and test of external grooved quantitative seed feeding device of two-stage vibration precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 57 – 61,83. (in Chinese)

[27] 潘兴家,董子钰,李骅,等. 水稻螺旋槽式排种器的设计及优化[J]. 江苏农业科学, 2020,48(17):233 – 239.  
PAN Xingjia, DONG Ziyu, LI Hua, et al. Design and optimization of rice spiral trough seed metering device[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2020, 48(17): 233 – 239. (in Chinese)

[28] 郝兴旺. 水稻机械直播操作规程及技术要点[J]. 农机科技推广,2011(5):52 – 53.

[29] 巫国平,居会军. 机械旱直播水稻须把好“五关”[J]. 江苏农机化,2001(1):19.

[30] 遥控飞行播种机 质量评价技术规范: NY/T 3881—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.

[31] 油菜播种机作业质量:NY/T 2709—2015[S]. 北京: 中国标准出版社,2016.

[32] 张顺. 气送式油菜飞播排种系统设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.  
ZHANG Shun. Design and test of air-powered rape aerial seeding system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[33] LI Wencheng, LI Chenyang, HUANG Xiaomao. Operation quality control of rapeseed strip aerial seeding system viaunder-constrained seeding technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2020,206:107693.