

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.03.023

外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器设计与试验

罗海峰^{1,2} 刘光辉¹ 吴明亮^{1,2} 张和¹ 王成伟¹ 蒋啸虎^{1,2}

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 长沙 410128)

摘要: 针对水稻芽种播种过程中种群堆积、稻种含水率较高不易被吸附等问题,设计了一种外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器。以南方普遍推广的“Y两优1号”型杂交稻为研究对象,根据其机械物理特性,对外凸扰种仿形型孔结构与几何参数进行了设计;对芽种充种和投种过程进行了动力学和运动学分析,得到了工作转速和工作负压范围;基于CFD-DEM流固耦合理论,将吸附力作为试验指标进行了吸附性能仿真试验,确定吸附力最大的吸孔直径为1.4 mm,同时将水稻芽种平均速度作为评价指标进行了扰种性能仿真试验,当工作转速为10~50 r/min、工作负压为1.2 kPa、吸孔直径为1.4 mm时,具有外凸扰种仿形型孔排种盘扰动能力较强,能有效减少种群堆积现象;以该种吸孔为基础,选取工作转速和工作负压为试验因素,以合格指数 X_1 、重播指数 X_2 和漏播指数 X_3 为评价指标,开展了两因素全因子台架试验。试验结果表明:当工作转速为25 r/min、工作负压为1.24 kPa时,排种器合格指数为92.64%,重播指数为2.57%,漏播指数为4.79%;试制气吸式水稻芽种精量直播机并进行田间播种试验,测得各行合格指数平均值为92.86%,重播指数平均值为2.72%,漏播指数平均值为4.42%,穴距合格率平均值为90.57%,各行排量一致性变异系数为3.12%,总排量稳定性变异系数为1.89%,各项评价指标均满足水稻芽种精量直播种植要求,为水稻芽种播种提供了理论基础。

关键词: 水稻芽种; 气吸式排种器; CFD-DEM; 外凸扰种仿形型孔

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)03-0227-13

OSID:



Design and Experiment of Precision Seed Metering Device for Rice Bud Seed with Protruding Disturbing Species

LUO Haifeng^{1,2} LIU Guanghui¹ WU Mingliang^{1,2} ZHANG He¹ WANG Chengwei¹ JIANG Xiaohu^{1,2}

(1. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Modern Agricultural Equipment, Changsha 410128, China)

Abstract: Aiming at the problems such as population accumulation and high water content of rice seed which are not easy to be adsorbed during seeding process, a kind of air-suction rice seed precision discharge device with convex and disturbed seed copying hole was designed. According to the mechanical and physical characteristics of Yliangyou No. 1 hybrid rice, which is widely used in South China, the structure and geometric parameters of the profile-shaped hole were designed rationally. The dynamic and kinematic analysis of filling and seeding process was carried out, and the range of working speed and working negative pressure was obtained. Based on the fluid-structure coupling theory of CFD-DEM, the adsorption force was taken as the test index, and the adsorption performance simulation tests of seven diameters were carried out. The suction hole diameter with the largest adsorption force was determined to be 1.4 mm. At the same time, the average velocity of rice bud seed was taken as the evaluation index, and the simulation test of disturbed seed performance was carried out. Under the conditions of working speed 10~50 r/min, working negative pressure 1.2 kPa and suction hole diameter 1.4 mm, the disturbance ability of the seed plate with convex species copying hole was strong, which could effectively reduce the population accumulation phenomenon. Based on this suction hole, the working speed and

收稿日期: 2024-08-14 修回日期: 2024-11-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300305)、湖南省教育厅科研项目(22B0188)和水稻节水栽培技术与装备研发项目(湘财农指[2024]39号)

作者简介: 罗海峰(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械性能试验与设计研究,E-mail: luohairfeng@hunau.edu.cn

通信作者: 蒋啸虎(1993—),男,讲师,博士,主要从事智能农业机械装备与技术研究,E-mail: 18844198030@163.com

working negative pressure were selected as test factors, and the qualification index X_1 , replay index X_2 and missing sowing index X_3 were evaluated. The two-factor full factor bench tests were carried out. The test results showed that when the working speed was 25 r/min and the working negative pressure was 1.24 kPa, the qualified index of the seed feeder was 92.64%, the replay index was 2.57%, and the missing sowing index was 4.79%. The results showed that the average qualified index of each line was 92.86%, the average reseeding index was 2.72%, the average missing sowing index was 4.42%, the average qualified rate of hole distance was 90.57%, and the coefficient of consistency of discharge of each line was 3.12%. The coefficient of variation of total displacement stability was 1.89%, and all the evaluation indexes met the planting requirements of rice bud seed precision direct seeding, which provided a certain theoretical basis for rice bud seed seeding.

Key words: rice sprout seeds; air suction seed metering device; CFD - DEM; convex and disturbing species of profiled holes

0 引言

水稻是我国重要的粮食作物,常年种植面积为 $3.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[1]。水稻机械化种植主要分为机械直播和机械移栽。与机械移栽相比,机械直播省略了水稻育秧过程,减少前期成本投入且不影响产量^[2]。

机械直播按排种器工作原理可分为机械式和气力式;相对于机械式,气力式排种器对种子形状适应性较好,种子破损率低,排种质量更可靠^[3]。意大利 Matermacc 公司生产的 MS8200 型气吸式精密播种机装了一个刚性简易工具条来实现行距快速调整,适用于大豆、谷物等多种作物精密播种需求,播种质量高。德国 Amazone 公司生产的 ED 型精量播种机,播种行数 4~12 行可调,作业幅宽 6 m,适应玉米、大豆等作物播种需求,作业效率和播种精度都较高。法国 Kverneland 公司生产的 OPTIMAR 型精量播种机对玉米、向日葵、大豆等作物具有良好的适应性,设计了一套种子智能对齐系统,提高了播种均匀性,播种精度良好。张国忠等^[4]为提高水稻气力式精量穴播排种器排种精度,设计了一种 2 个形状相同但安装位置不同的搅种齿组成的导向型搅种装置;臧英等^[5]对气力式排种器的吸种原理进行研究,设计了一种导流槽加辅助吸种装置吸种盘结构,通过理论分析确定吸种盘参数,满足杂交稻单粒播种要求;邢赫等^[6-7]设计了一种多流道气吸室结构,通过调节气流道数量来适应不同播量需求,并进行了田间试验;翟建波等^[8]基于气吹播种原理设计了一种气力式杂交稻精量穴直播排种器,利用凸轮推杆与梳种条解决了芽种流动性差的问题;张开兴等^[9]针对现有气吸式圆盘型精量播种机播种不同尺寸种子需要更换排种盘的不足,设计了一种变粒径双圆盘气吸式精量排种器,播种质量较好。

以上研究在一定程度上提高了气力式精量排种器在水稻直播中的应用,但其作业对象大多数是未处理的稻种,对水稻破胸芽种排种器研究较少。本

文从气吸式排种器充种过程出发,以杂交稻“Y 两优 1 号”芽种为研究对象,对外凸扰种仿形型孔排种盘结构及参数进行设计,采用两因素全因子试验方法,分析排种盘工作转速、工作负压对排种器吸种性能的影响,采用 CFD - DEM 耦合仿真方法^[10-13]分析不同直径吸孔对芽种吸附力的影响,以优化吸孔关键参数;并进行室内台架试验,多目标优化工作参数,开展田间验证试验,为实现水稻芽种精量播种提供依据。

1 排种器设计

1.1 排种器结构与工作原理

外凸扰种型孔气吸式水稻精量排种器主要由左壳体、橡胶垫圈、排种轴、外凸扰种型孔排种盘、进种调节块、种盘定位环、清种毛刷、轴承和透明右壳体等组成,其结构如图 1 所示。型孔内陷于扰种块,呈圆周分布于排种盘上,如图 2 所示。

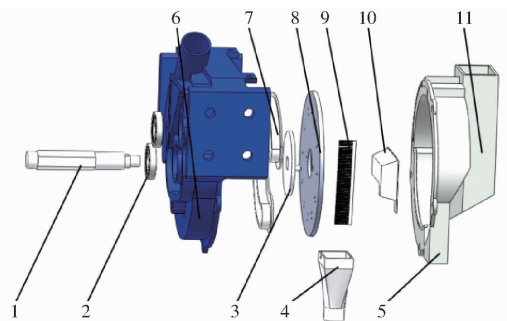


图 1 气吸式水稻芽种精量排种器结构图
Fig. 1 Structure diagram of air-absorbing rice bud seed precision seed discharger

1. 排种轴 2. 轴承 3. 种盘定位环 4. 排种槽 5. 透明右壳体
6. 左壳体 7. 橡胶垫圈 8. 外凸扰种型孔排种盘 9. 清种毛刷
10. 进种调节块 11. 进种通道

外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器与种箱连接,通过透明壳体上的进种通道贯通,安装于水稻直播机上。左壳体上进风口通过气流软管与负压风机相连接,负压风机工作时在气压室内产生

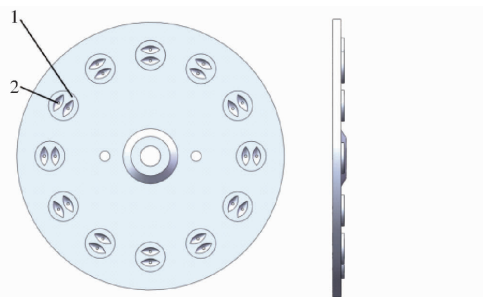


图2 外凸扰种仿形型孔排种盘结构示意图

Fig.2 Schematic of structure of seed discharging disk with convex seed disturbing imitation shape holes

1. 外凸扰种装置 2. 仿形型孔

负压。工作时,位于种箱中的水稻芽种受到重力作用进入充种区。在排种轴圆周运动带动下,整个排种盘分为3个区域:充种区、携种区和投种区,如图3所示。排种盘随排种轴转动而转动,位于排种盘上的外凸扰种仿形型孔装置对充种区的种群进行扰动,破坏种群稳定堆积状态,此时芽种会由于气室内外压力差,被吸附于外凸扰种仿形型孔中,完成充种。进入携种区,稳定吸附于排种盘芽种能够随排种盘转动进入投种区。经过投种区时,局部没有负压,压力差消失,芽种将不再受负压吸力,靠自身重力和离心力作用下落,进入投种口,实现投种。随后排种盘旋转经过清种区,清种毛刷清除型孔中未投下芽种,即为排种过程。

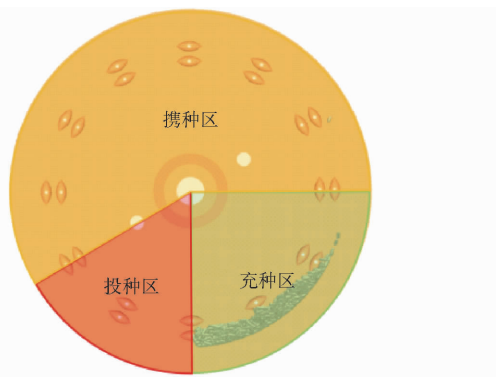


图3 排种盘分区示意图

Fig.3 Schematic of seed tray partitioning

1.2 排种盘结构与参数设计

1.2.1 排种盘直径与吸孔结构参数设计

排种盘是排种器核心部件,排种盘直径直接影响排种器整体结构及气室压强等参数的确定^[14]。根据排种盘转速与充种时间关系可知

$$\begin{cases} t = \frac{l}{v} \\ l = \alpha \left(\frac{d}{2} - r_b \right) \\ v = \frac{\pi n}{30} \left(\frac{d}{2} - r_b \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 t ——充种时间, s l ——充种区弧长, m

v ——型孔线速度, m/s

α ——充种角, rad

d ——排种盘直径, m

n ——排种盘转速, r/min

r_b ——吸孔中心与排种盘边沿的径向距离, m

由式(1)可得

$$t = \frac{30\alpha}{\pi n} \quad (2)$$

式(2)表明,排种盘转速 n 和充种角 α 会直接影响充种时间 t ,而排种盘直径并不影响吸孔在充种区的停留时间^[15-17]。由于芽种粒径较小且形态不规则,同时考虑到排种器与配套播种机作业速度配合关系及种箱容积,设计排种盘直径为 170 mm,厚度 5 mm,材料为树脂。

吸孔数是确定排种盘转速重要因素。吸孔数量 N 计算式为

$$N = \frac{2\pi V}{vl_z} \left(\frac{d}{2} - r_b \right) \quad (3)$$

式中 V ——直播机工作速度, m/s

l_z ——株距, m

已知排种盘直径为 170 mm,吸孔数量 N 为

$$N = \frac{60V}{nl_z} \quad (4)$$

由式(4)可知,吸孔数量与排种盘转速成反比,与直播机工作速度成正比。考虑到水稻芽种外形尺寸较小,吸种孔直径亦随之减小,通过对芽种个体外形尺寸统计分析得知其吸孔直径为 0.8 ~ 2 mm,因此本文设计不同直径的排种盘吸孔:0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 mm。根据水稻大田种植农艺要求,株距为 100 ~ 220 mm,行距为 250 mm,机具前进速度为 1.5 ~ 3.5 km/h,由式(4)可得外凸扰种仿形型孔排种盘吸孔数 N 为 9 ~ 16,取 12,相邻两吸孔中心角为 30°,根据水稻芽种直播农艺要求,每穴种数 1 ~ 3 粒,设计为双排吸孔。

1.2.2 外凸扰种仿形型孔结构设计

水稻单粒取种是实现水稻精量播种的关键因素,但水稻芽种相较于玉米、大豆,其粒径较小、形状不规则、表面粗糙,极易产生颗粒堆积现象,三轴尺寸如图4所示。

由表1得出频率分布如图5所示,水稻芽种长度、宽度和厚度基本符合正态分布,以此作为外凸扰种型孔尺寸设计依据。

为实现水稻芽种单粒取种,在设计外凸扰种仿形型孔凹槽时,参考水稻芽种弓形面尺寸,随机挑选水稻芽种,利用二值化方法对水稻芽种外形进行处

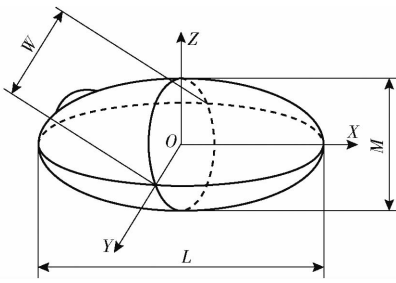


图4 芽种三轴尺寸图

Fig. 4 Triaxial dimensional drawings of bud seed

表1 芽种三轴尺寸

参数	长度 L	宽度 W	厚度 M
最大值	12.3	4.6	2.4
最小值	7.7	3.0	2.2
平均值	10.0	3.8	2.3

理,在提取多条外形轮廓后,拟合如图6所示的抛物线,图中 l_{mn} 为某一点切线,即可得到拟合方程抛物线方程。 h 为仿形型孔深度。

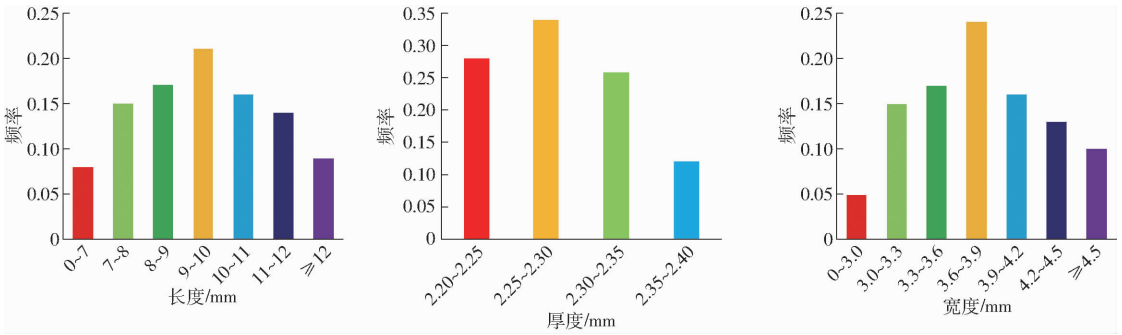


图5 芽种尺寸频率分布直方图

Fig. 5 Histogram of frequency distribution of bud seed sizes

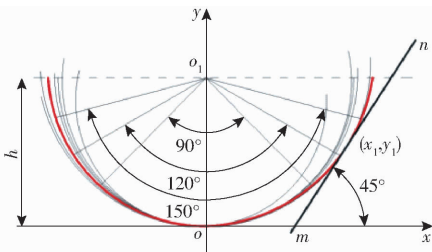


图6 水稻芽种弓形面轮廓曲线

Fig. 6 Contour curve of rice bud seed bowed surface

抛物线曲线顶点过原点,即

$$\begin{cases} x_1^2 = 2qy_1 \\ y_1 = kx_1 + b \end{cases} \quad (5)$$

式中 x_1 ——渐开线横坐标,mm
 y_1 ——渐开线纵坐标,mm
 q ——抛物线焦点到准线距离,mm
 b ——截距,mm

k ——斜率

由 $k = \tan 45^\circ$ 求解得抛物线方程为

$$x_1^2 = 2.083y_1 \quad (6)$$

根据水稻芽种机械物理特性和充种、携种过程中受到的吸附作用,其在型孔中可能呈3种姿态分布:平躺、竖立和斜置^[18],如图7所示。

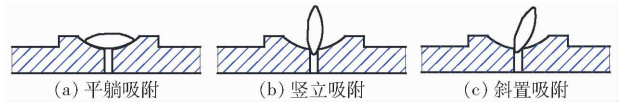


图7 芽种吸附姿态示意图

Fig. 7 Schematic diagram of bud seed adsorption attitude

根据表1芽种三轴尺寸和吸附姿态概率试验结果,随机统计连续50粒芽种吸附姿态,如图8所示。分析得到芽种被吸附进型孔姿态概率:平躺姿态概率为47.24%、竖立姿态概率为16.35%、斜置姿态

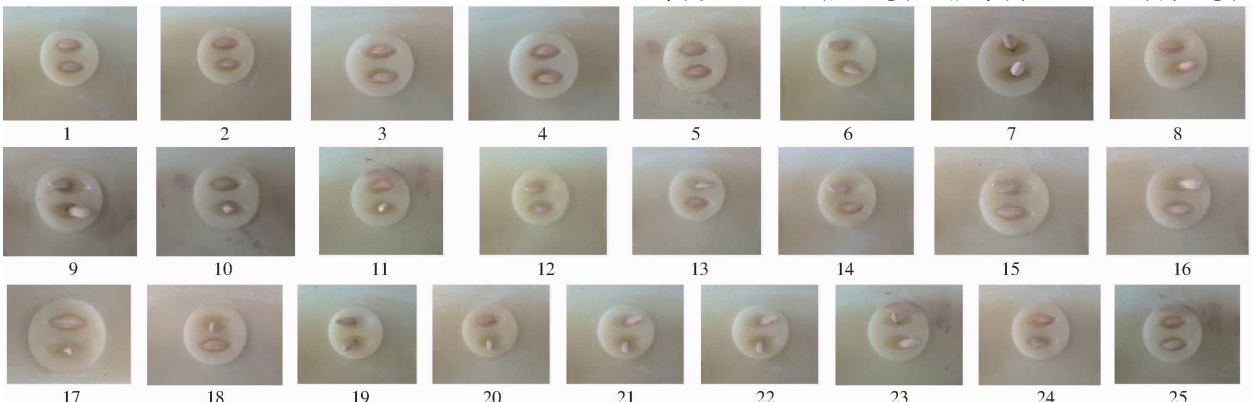


图8 芽种被吸附姿态图

Fig. 8 Bud seed adsorption attitude

概率为 36.41%, 即平躺与斜置姿态概率和为 83.65%。

应使水稻芽种不堵塞型孔, 且有助于充种、投种, 同时保证单个仿形型孔充种单粒。参照经验公式^[19]

$$\begin{cases} L_1 = L_{\max} + k_L \\ B = k_B W_{\max} \\ h = k_h W_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中 L_1 ——仿形型孔长度, mm
 L_{\max} ——芽种最长长度, mm
 k_L ——长度增量, mm
 B ——型孔宽度, mm
 k_B ——宽度调节系数
 k_h ——深度调节系数
 W_{\max} ——芽种最长宽度, mm

根据表 1 和式(7)确定 L_1 为 12 mm, B 为 5 mm, h 为 3 mm。根据设计以及加工要求, 仿形型孔完全内陷于外凸扰种装置, 即外凸扰种装置结构设计大于仿形型孔结构, 因此直径设计为 19 mm; 为了保证排种器结构紧凑性以及降低外凸扰种仿形型孔排种盘旋转时对装置密封性的影响, 设计外凸扰种装置高为 2 mm, 如图 9 所示。

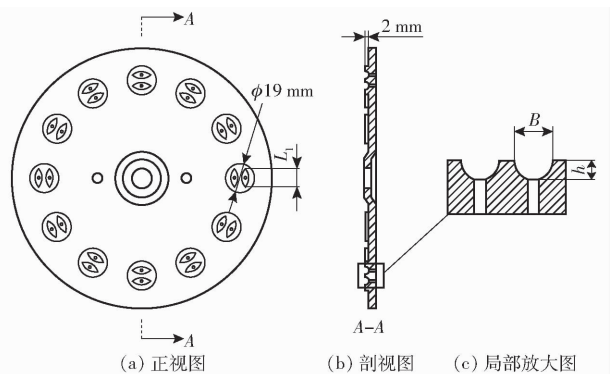


图 9 外凸扰种仿形型孔结构示意图

Fig. 9 Schematics of contour hole structure of convex disturbed species

1.3 排种过程分析

1.3.1 扰种充种过程分析

在排种器工作过程中, 排种盘转动使得仿形扰种型孔扰动芽种种群运动, 芽种与扰种型孔发生碰撞后在充种区内流动, 流动过程中被型孔捕捉吸附, 假设芽种为材质均匀的刚体, 建立芽种充种过程动力学模型, 如图 10 所示。芽种在充种区内具有一定速度, 在扰种型孔扰动下芽种到达型孔捕捉区后速度达到 V_c , 然后芽种被型孔负压捕捉吸附在型孔上, 捕捉吸附过程芽种纵向位移与横向位移为 l_y 、 l_x , 之后随排种盘一起运动。根据动能定理, 充种过程中吸附力做功使芽种速度与型孔速度达到一致。

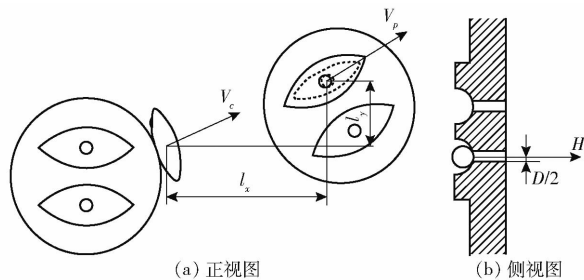


图 10 芽种在充种过程中动力学分析

Fig. 10 Dynamic analysis of bud filling process

根据动能定理得

$$\begin{cases} H\sqrt{l_x^2 + l_y^2} = \frac{1}{2}mV_p^2 - \frac{1}{2}mV_c^2 \\ V_p = \omega r \\ P = H \frac{\pi}{4} D^2 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)得

$$H = \frac{2m(\omega r)^2 - 2mV_c^2}{\pi D^2 \sqrt{l_x^2 + l_y^2}} \quad (9)$$

式中 V_p ——芽种被完全吸附时速度, m/s
 V_c ——芽种受到扰种作用时初速度, m/s
 m ——芽种质量, kg
 ω ——孔中心处角速度, rad/s
 r ——吸孔转动半径, mm
 D ——吸孔直径, mm
 P ——型孔吸附压强, kPa
 H ——型孔对芽种的吸附力, N

由式(9)可知, 在其他条件不变前提下, 吸附压强 H 和芽种受到扰种作用时初速度 V_c 成反比, 因此增大芽种在吸附前速度, 可降低吸附压强, 而扰种型孔设计就是对芽种种群起到强制扰动作用, 增大芽种速度, 有利于型孔吸附, 减小压强, 降低功耗。

充种过程中, 理想情况为处于排种盘表面芽种受到工作负压作用, 被吸附于外凸扰种结构上的吸种孔中并随之转动, 对芽种吸种过程进行受力分析, 芽种受力如图 11 所示。

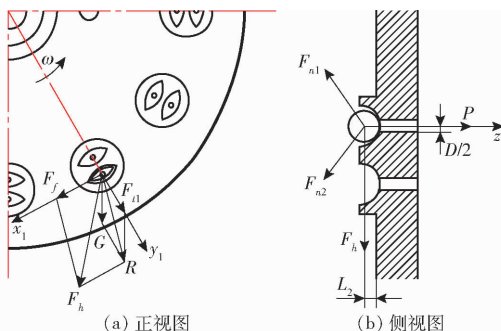


图 11 芽种在充种过程中受力分析

Fig. 11 Force analysis of bud seeds during seed-filling process

芽种被工作负压吸附在型孔中,下一刻进入携种区,此时被吸附的种子满足

$$\begin{cases} \frac{PD}{2} = F_h L_2 \\ H_{\max} = \frac{P}{S} \\ S = \frac{\pi D^2}{4} \end{cases} \quad (10)$$

式中 F_h ——种子受作用力合力, N
 L_2 ——芽种与排种盘之间的距离, mm
 H_{\max} ——最大真空度, kPa
 S ——吸孔面积, m^2

综合式(10)可得气吸室所需最大真空度为

$$H_{\max} = \frac{8F_h L_2}{\pi D^3} \quad (11)$$

合力 F_h 可以通过力的矢量合成、使用余弦定理求解

$$F_h = \sqrt{F_f^2 + R^2 + 2F_f R \cos\theta_2} \quad (12)$$

其中 $R = \sqrt{G^2 + F_{l1}^2 + 2GF_{l1} \cos\theta_1}$

式中 F_f ——芽种所受摩擦力, N
 F_{l1} ——芽种受到的离心力, N
 R ——芽种所受离心力与重力的合力, N
 G ——水稻芽种自身重力, N
 θ_1 ——芽种离心力与所受重力夹角, ($^\circ$)
 θ_2 ——芽种所受离心力与重力合力 R 与摩擦力合力之间夹角, ($^\circ$)

结合式(11)、(12)得

$$H_{\max} = \frac{8L_2}{\pi D^3} \cdot$$

$$\sqrt{F_f^2 + G^2 + F_{l1}^2 + 2GF_{l1} \cos\theta_1 + 2F_f \cos\theta_2 \sqrt{G^2 + F_{l1}^2 + 2GF_{l1} \cos\theta_1}} \quad (13)$$

式(13)中所求为理想条件下真空度,在实际作业时,排种器受到芽种自然条件(吸种区芽种分布情况,芽种之间的碰撞等)和外界环境(振动、冲击等)的影响,因此需要对其进行校正,引入吸种可靠性系数 K_1 和工作稳定可靠性系数 K_2 ,在最大极限条件时 $\cos\theta_1 = \cos\theta_2 = 1$,简化后得

$$H_{\max} = \frac{8K_1 K_2 mg L_2}{\pi D^3} \left(1 + \lambda + \frac{\omega^2 r}{g} \right) \quad (14)$$

其中 $\lambda = (6 \sim 10) \tan\alpha$

式中 g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

λ ——水稻芽种摩擦阻力综合系数

α ——水稻芽种自然休止角

K_1 ——吸种可靠性系数,取 $1.8 \sim 2.0$

K_2 ——稳定可靠性系数,取 $1.6 \sim 2.0$

由式(14)可知,气室临界真空度与吸孔直径、种子参数、排种盘转速、吸孔处转动半径等密切相关,影响真空度的因素有许多,计算过程要严格按照标准;通过公式得到临界值,在工作状态下高于临界值。负压与漏播率呈负相关,负压越大,漏播率越小;但过大时,吸孔上出现多余种子,使重播率上升;当过小时,压力不足,漏播现象显著。经计算,水稻穴直播时真空度应不大于 1.61 kPa 。经前期预备试验得,吸孔能吸附上 1 粒芽种最小真空度为 0.79 kPa ,即真空度取 $0.8 \sim 1.6 \text{ kPa}$ 。

1.3.2 投种过程分析

水稻芽种在排种器中的运动过程包括充种、携种和投种。投种过程是指种子在不受到吸附力、脱离排种器后进行的、具有一定初速度的自由落体运动^[20],此时芽种受到重力和空气阻力作用,其运动轨迹如图 12 所示,沿排种盘吸孔分布圆切线方向排出^[21]。

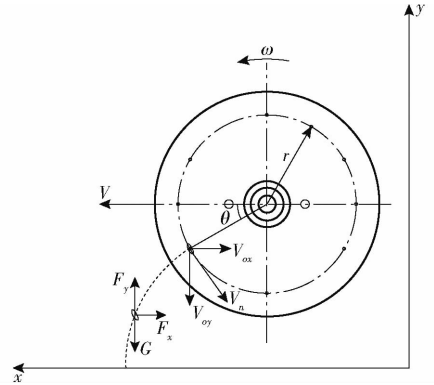


图 12 种子脱离吸孔后的动力学分析
 Fig. 12 Kinetic analysis of seed after release from suction hole

图中 θ ——脱离吸孔的芽种与排种盘中心水平线的夹角, ($^\circ$)

V_n ——水稻芽种相对速度, m/s

V_{ox} ——水稻芽种水平分速度, m/s

V_{oy} ——水稻芽种竖直分速度, m/s

F_x ——水稻芽种所受 x 方向空气阻力, N

F_y ——水稻芽种所受 y 方向空气阻力, N

如图 12 所示,将从排种器排出的种子视为质点 M ,此时它只受到重力与空气阻力,其运动微分方程为

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -F_x \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = G - F_y \end{cases} \quad (15)$$

根据空气动力学特性可知: $F_x = k_x V_{ox}^2$, $F_y = k_y V_{oy}^2$,则代入式(15)得

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k_x}{m}V_{ox}^2 \\ \frac{d^2y}{dt^2} = g - \frac{k_y}{m}V_{oy}^2 \end{cases} \quad (16)$$

式中 k_x —— x 方向空气阻力系数
 k_y —— y 方向空气阻力系数

令 $\frac{k_x}{m} = k_{px}, \frac{k_y}{m} = k_{py}$, 则式 (16) 简化可得到芽种

离开型孔后运动微分方程

$$\begin{cases} a_x = -k_{px}V_{ox}^2 \\ a_y = g - k_{py}V_{oy}^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中 a_x ——水稻芽种在 x 方向加速度, m/s^2
 a_y ——水稻芽种在 y 方向加速度, m/s^2
 k_{px}, k_{py} ——水稻芽种漂浮系数

将芽种未脱离吸孔时速度确定为初速度, 则根据速度合成定理得

$$\begin{cases} V_n = \omega r \\ V_{ox} = V_n \sin\theta \\ V_{oy} = V_n \cos\theta \end{cases} \quad (18)$$

对式 (17) 进行积分, 将式 (18) 代入, 求得任意时刻芽种下落速度为

$$\begin{cases} V_x = \frac{m}{2k_x t} \left[\sqrt{\frac{4k_x t}{m} (V + \omega r \sin\theta) + 1} - 1 \right] \\ V_y = \frac{m}{2k_y t} \left(\sqrt{\frac{4k_y t}{m} \omega r \cos\theta + 1} - 1 \right) \end{cases} \quad (19)$$

在芽种脱离吸孔后下落过程中不考虑空气阻力的影响, 则得出种子脱离吸孔后运动方程为

$$\begin{cases} V_x = V - \omega r \sin\theta \\ V_y = \omega r \cos\theta + g t \end{cases} \quad (20)$$

根据式 (20) 的分析结果, 对于排种器在实际工作中的零速投种, 则有 $V_x = 0$, 即 $V = \omega r \sin\theta$, 说明机器前进作业速度与排种盘直径、转速有关, 根据设计要求机器前进速度为 1.5 ~ 3.5 km/h, 排种盘直径为 0.17 m, 因此确定排种盘转速为 10 ~ 50 r/min。

对式 (20) 积分, 得到不考虑空气阻力时芽种 x 、 y 方向位移分别为

$$\begin{cases} S_x = r \cos\theta + \frac{1}{g} (V - \omega r \sin\theta) \cdot \\ \quad \left\{ -\omega r \cos\theta + \sqrt{\omega^2 r^2 \cos^2\theta + 2g[h + r(1 - \sin\theta)]} \right\} \\ S_y = h + r - r \sin\theta + \frac{\omega r \cos\theta}{g} \cdot \\ \quad \left\{ -\omega r \cos\theta + \sqrt{\omega^2 r^2 \cos^2\theta + 2g[h + r(1 - \sin\theta)]} \right\} + \\ \quad \frac{1}{2g} \left\{ -\omega r \cos\theta + \sqrt{\omega^2 r^2 \cos^2\theta + 2g[h + r(1 - \sin\theta)]} \right\}^2 \end{cases} \quad (21)$$

式中 h ——排种盘底端吸孔中心到地面的距离, m

由式 (21) 可知, 芽种在 x 、 y 方向上位移分别与排种盘角速度 ω 、脱离吸孔的芽种与排种盘中心水平线的夹角 θ 、排种盘吸孔处转动半径 r 、直播机前进速度 V 、排种盘底端吸孔中心到地面的距离 h 等有关。

2 仿真试验

在气吸式排种器播种作业中, 存在复杂耦合现象, 包括气流与稻种间精细相互作用、稻种间的相互碰撞以及稻种与排种器机械部件的接触碰撞; 为了深入探究这些复杂行为及其背后的物理机制, 基于 CFD-DEM 耦合方法^[22-24], 通过 ANSYS Fluent 和 EDEM 耦合仿真, 对气吸式排种器中不同规格吸孔对芽种的吸附力以及外凸扰种仿形型孔对芽种的扰动性能进行探究。

2.1 吸附性能仿真试验

2.1.1 吸附性能仿真参数确定

为提高试验效率, 采用树脂材料对排种盘进行 3D 打印, 其余机械部件材料统一为不锈钢。参照文献^[25-26]确定各物料间接触参数, 如表 2 所示。

表 2 仿真模型参数

Tab. 2 Simulation model parameters			
参数	水稻芽种	树脂	不锈钢
泊松比	0.25	0.4	0.3
密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.06	1.05	7.85
剪切模量/MPa	1.08×10^8	326.6	7.90×10^{10}
碰撞恢复系数(与芽种)	0.42	0.36	0.52
静摩擦因数(与芽种)	0.52	0.58	0.50
滚动摩擦因数(与芽种)	0.02	0.01	0.01

2.1.2 吸附性能仿真建模

为了提高仿真试验效率, 适当简化排种器模型, 采用 Solidworks 三维软件对排种器进行实体建模, 以 .stp 格式导入 EDEM 中, 并在 EDEM 中新建水稻芽种模型充填入排种器, 如图 13a 所示。

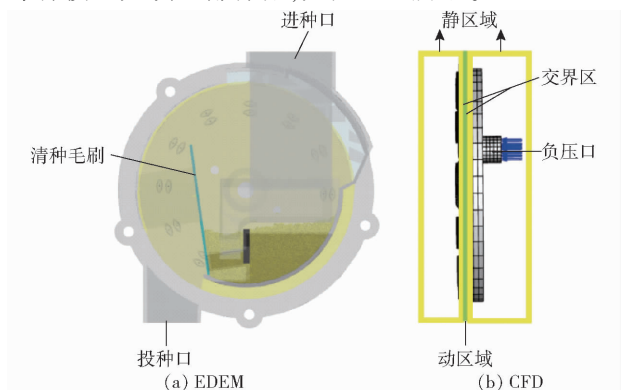


图 13 仿真模型

Fig. 13 Simulation models

流体网络模型采用 Solidworks 三维软件进行几何建模,随后导入网格划分软件 Fluent Meshing,进行网格划分^[27-28]。将划分的网格导入 ANSYS Fluent 中进行动静区域划分,其中吸种孔的流场按排种器运动方向设置为动区域,充种区和负压气室设置为静区域,如图 13b 所示。

随后设置初始化条件,流体求解模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[29],采用 Wen & Yu 曳力模型,选取 SIMPLE 算法求解,在每个扰种仿形型孔处设置一个监测点,以此获得压力场和曳力数据,运用有限元法计算得到压力梯度,通过压力梯度与气体密度乘积得到压力梯度力。连接各交界面,设置滑移网格运动参数:计算时间步长设置为 0.001 s,步数为 3 000,总仿真时间为 3 s;每个时间步最大迭代次数为 20。初始化流场,得到初始参数的 .mesh 文件,为后续 EDEM 耦合接口的调用文件,仿真数据保存间隔为 0.01 s。

2.1.3 吸附性能仿真试验设计

根据前期预试验结果,选择排种器工作转速 20 r/min,工作负压 1.2 kPa。结合前文吸孔尺寸参数,确定吸孔直径为 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 mm。

2.1.4 吸种性能评价指标

外凸扰种仿形型孔中的芽种在负压吸附力的作用下随排种盘转动,运动至投种区,即吸附力是体现外凸扰种仿形型孔吸种性能的重要指标,其主要包括压力梯度力和曳力^[30];压力梯度力决定了流体整体流动趋势,曳力则作用于物体与流体之间,而吸附力在微观尺度上对流体的行为产生影响。在复杂的流体系统中,这些力共同作用,决定了流体流动特性、物体运动以及界面现象等。

在 EDEM 与 Fluent 的耦合接口中包含压力梯度力(图 14a)和曳力(图 14b)的计算模型以及统计结果,即本文在后处理过程中,首先选取吸孔附近被吸附芽种,然后将经过携种区顶点芽种所受吸附力作为吸孔吸附性能的评价指标。

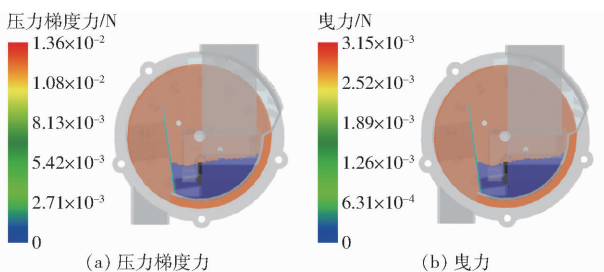


图 14 压力梯度力和曳力的仿真分布结果

Fig. 14 Simulation distribution results of pressure gradient force and drag force

2.1.5 仿真试验模型可行性验证

为验证排种装置吸附稻种颗粒耦合仿真模型与实际工作效果的差异性,对排种装置进行验证试验,取如图 15 所示的 5 个点,进行 5 次重复试验,取不同位置吸孔风速为试验对比参数,并对试验结果进行统计分析,如表 3 所示。

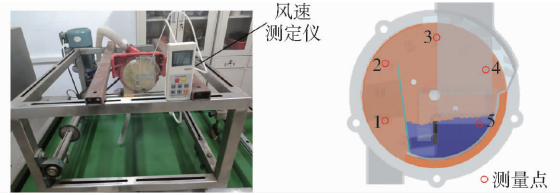


图 15 仿真模型验证试验图

Fig. 15 Simulation model validation test diagram

1. 测量点 1(落点)
2. 测量点 2
3. 测量点 3(顶点)
4. 测量点 4
5. 测量点 5

表 3 不同位置吸孔风速

Tab. 3 Suction air velocity at different locations

项目	测量点 1 (落点)	测量点 2	测量点 3 (顶点)	测量点 4	测量点 5
仿真值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	12.13	12.06	11.95	12.15	11.97
实际值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	11.74	11.65	11.56	11.71	11.57
误差/%	3.22	3.40	3.26	3.62	3.34

根据试验结果,仿真试验结果与实际工作吸孔风速误差为 3.22% ~ 3.62%,可知排种装置吸附稻种颗粒的气固耦合仿真模型可行性较强。

2.1.6 吸附性能仿真试验结果

随机选取 50 粒芽种所受吸附力,求其均值并作为该组仿真试验结果,如表 4 所示。

表 4 仿真试验结果

Tab. 4 Simulation test results

编号	吸孔直径/mm	压力梯度力/ N	曳力/N	吸附力/N
1	0.8	4.3256×10^{-3}	1.1256×10^{-3}	4.7892×10^{-3}
2	1.0	4.3568×10^{-3}	1.1237×10^{-3}	4.6852×10^{-3}
3	1.2	5.6822×10^{-3}	1.2391×10^{-3}	5.9861×10^{-3}
4	1.4	6.1251×10^{-3}	1.3246×10^{-3}	6.6548×10^{-3}
5	1.6	5.6386×10^{-3}	1.2456×10^{-3}	5.8941×10^{-3}
6	1.8	4.3256×10^{-3}	1.2142×10^{-3}	4.6823×10^{-3}
7	2.0	3.6532×10^{-3}	1.1236×10^{-3}	4.1638×10^{-3}

由表 4 可知,当工作转速为 20 r/min、工作负压为 1.2 kPa 时,吸孔尺寸对吸附性能有较大的影响,吸附性能最优吸孔直径为 1.4 mm。

2.2 扰种性能仿真试验

2.2.1 扰种性能仿真试验设计

为了减少水稻芽种种群堆积现象,需提高型孔扰动性能。仿真参数与仿真模型参照吸附性能仿真试验设计,现对有无外凸扰种仿形型孔的排种盘在

工作转速为 10、30、50 r/min,工作负压为 1.2 kPa、吸孔直径为 1.4 mm 时进行扰种性能仿真试验,试验因素与水平如表 5 所示。

表 5 仿真试验因素与水平

Tab. 5 Simulation test factors and levels

水平	因素	
	工作转速/(r·min ⁻¹)	外凸扰种型孔
1	10	有/无
2	30	
3	50	

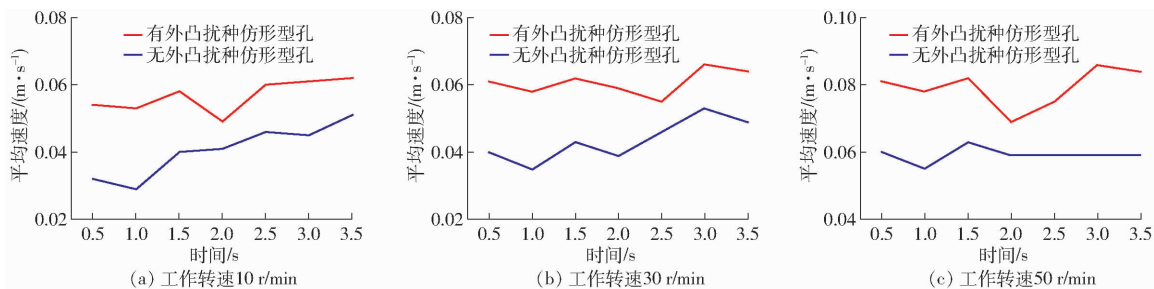


图 16 不同工作转速下芽种平均速度变化曲线

Fig. 16 Average speed of bud seed at different working speeds

随着工作转速增大而增大,具有外凸仿形扰种型孔排种盘平均速度明显大于无外凸扰种仿形型孔排种盘,外凸扰种仿形型孔的扰动性能与种群堆积呈负相关,即外凸扰种仿形型孔对水稻芽种扰动效果明显,能有效减少种群堆积现象。

3 台架试验

3.1 材料与方法

根据上述仿真试验结果,为提高外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器工作性能及稳定性,以直径为 1.4 mm 的吸孔为基础,3D 打印排种盘,选用试验稻种为“Y 两优 1 号”型杂交稻,催芽处理后,平均千粒质量为 32.25 g,平均含水率为 27.76%。在湖南农业大学农机实训中心播种实验室进行台架试验,试验装置如图 17 所示,选取工作转速和工作负压为试验因素,进行两因素全因子试验,工作转速为 10 ~ 50 r/min,每隔 10 r/min 设置为一个水平,工作负压为 0.8 ~ 1.6 kPa,每隔 0.2 kPa 设置为一个水平。

试验前,在排种器进种口放入种子,随后开启电机、风机和输送带,并调节工作转速和工作负压等试验因素,由 Seeder Test 软件采集试验数据,观察每穴粒数。

3.2 试验指标

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》^[32]选择排种合格指数 X_1 、重播指数 X_2 、漏播指数 X_3 。

2.2.2 扰种性能仿真试验评价指标

种群平均速度反映种群扰动强度^[31],平均速度越大,排种盘对水稻芽种扰动强度越大;因此选取种群平均速度为扰种性能仿真试验评价指标。

2.2.3 扰种性能仿真试验结果

耦合仿真试验结束后,通过 EDEM 后处理模块提取有无外凸扰种仿形型孔排种盘在各工作转速下所得到的水稻芽种平均速度,工作时间 0.5 ~ 3.5 s 各时刻水稻芽种平均速度如图 16 所示。

由图 16 可得,排种盘对水稻芽种扰动平均速度

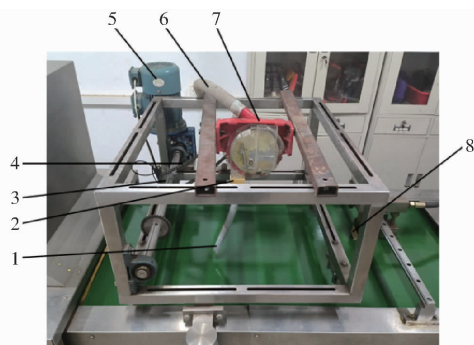


图 17 台架试验装置

Fig. 17 Bench test set

1. 投种管 2. 投种槽 3. 驱动链轮 4. 驱动链条 5. 电机 6. 负压管道 7. 排种器 8. 机油毛刷

播指数 X_3 为试验评价指标,每组试验重复 5 次,取平均值为试验结果,每组试验统计排种器稳定工作状态连续排出的 250 穴,计算每次试验合格指数 X_1 、重播指数 X_2 、漏播指数 X_3 。

各指标计算式为

$$\begin{cases} X_1 = \frac{n_1}{250} \times 100\% \\ X_2 = \frac{n_2}{250} \times 100\% \\ X_3 = \frac{n_3}{250} \times 100\% \end{cases} \quad (22)$$

式中 n_1 ——1 ~ 3 粒种子穴数

n_2 ——4 粒及以上种子穴数

n_3 ——无种子穴数

3.3 台架试验结果与分析

根据全因子试验方案,共开展25组试验,试验结果如表6所示。由表6可知,合格指数均不低于83.19%,表明排种器在试验过程中工作性能稳定,种群活跃度高,吸种性能较好。

表6 试验结果
Tab.6 Test result

因素		评价指标		
工作转速 N_1 / ($r \cdot \min^{-1}$)	工作负压 N_2 /kPa	合格指数 X_1 /%	重播指数 X_2 /%	漏播指数 X_3 /%
10	0.8	87.99	3.45	8.56
	1.0	91.29	2.37	6.34
	1.2	92.23	2.55	5.22
	1.4	93.07	2.78	4.15
	1.6	89.43	4.35	6.22
20	0.8	90.09	2.68	7.23
	1.0	92.24	2.45	5.31
	1.2	94.09	2.39	3.52
	1.4	91.52	3.69	4.79
	1.6	90.36	4.38	5.26
30	0.8	84.53	5.12	10.35
	1.0	87.7	4.89	7.35
	1.2	90.09	4.78	5.13
	1.4	88.90	5.32	5.78
	1.6	89.49	6.14	4.37
40	0.8	83.52	5.12	11.36
	1.0	86.34	5.32	8.34
	1.2	87.20	5.45	7.35
	1.4	87.37	6.21	6.42
	1.6	88.03	6.66	5.31
50	0.8	83.19	5.24	11.57
	1.0	84.52	6.13	9.35
	1.2	86.09	6.45	7.46
	1.4	87.16	7.17	5.67
	1.6	87.34	7.35	5.31

利用 Design-Expert 13 软件对试验结果进行多元线性回归拟合及方差分析,如表7所示。

由表7可得,合格指数 X_1 的回归模型极显著

($P < 0.01$)。工作转速 N_1 、工作负压 N_2 、工作负压的二次方项 N_2^2 的 P 值均小于 0.01,说明以上各项对合格指数影响极显著;其余项对合格指数影响不显著。剔除不显著因素后回归模型为

$$X_1 = 71.91951 - 0.2254N_1 + 35.9174N_2 - 14.9N_2^2 \quad (23)$$

通过表中 F 检验,得到影响合格指数因素的主要顺序为:工作转速、工作负压。

由表7可得,重播指数 X_2 的回归模型极显著 ($P < 0.01$)。工作转速 N_1 、工作负压 N_2 的 P 值均小于 0.01,说明以上两项对重播指数影响极显著,工作负压的二次方项 N_2^2 的 P 值小于 0.05,说明该项对重播指数的影响显著;其余项对重播指数影响不显著。剔除不显著因素后回归模型为

$$X_2 = 6.103 + 0.071149N_1 - 8.7395N_2 + 4.075N_2^2 \quad (24)$$

通过表中 F 检验,得到影响重播指数因素的主要顺序为:工作转速、工作负压。

由表7可得,漏播指数 X_3 的回归模型极显著 ($P < 0.01$)。工作转速 N_1 、工作负压 N_2 、 N_1N_2 、工作负压的二次方项 N_2^2 的 P 值均小于 0.01,说明以上各项对漏播指数影响极显著;其余项对漏播指数影响不显著。剔除不显著因素后回归模型为

$$X_3 = 21.97749 + 0.154283N_1 - 27.17786N_2 - 0.1411N_1N_2 + 10.79286N_2^2 \quad (25)$$

通过表中 F 检验,得到影响漏播指数因素的主要顺序为:工作负压、工作转速。

通过 Design-Expert 13 对试验数据进行分析处理,可得到工作转速 N_1 、工作负压 N_2 对合格指数、重播指数、漏播指数的影响,响应曲面如图18所示。

表7 回归方程方差分析

Tab.7 Variance analysis of regression equation

方差来源	合格指数 X_1				重播指数 X_2				漏播指数 X_3			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	176.87	5	20.53	<0.0001**	52.95	5	31.06	<0.0001**	101.30	5	29.86	<0.0001**
N_1	119.38	1	69.30	<0.0001**	43.90	1	128.74	<0.0001**	18.50	1	27.26	<0.0001**
N_2	26.69	1	15.49	0.0009**	6.88	1	20.18	0.0002**	60.68	1	89.43	<0.0001**
N_1N_2	5.19	1	3.02	0.0987	0.2948	1	0.8647	0.3641	7.96	1	11.74	0.0028**
N_1^2	0.8426	1	0.4891	0.4928	0.0196	1	0.0574	0.8133	1.12	1	1.65	0.2145
N_2^2	24.76	1	14.37	0.0012**	1.86	1	5.45	0.0306*	13.05	1	19.23	0.0003**
残差	32.73	19			6.48	19			12.89	19		
总和	209.60	24			59.43	24			114.19	24		

注:*表示显著($0.01 \leq P < 0.05$);**表示极显著($P < 0.01$)。

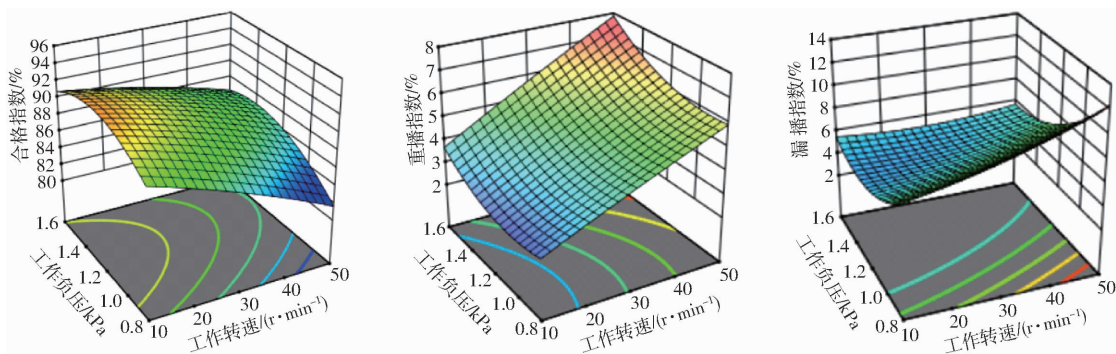


图18 试验因素对指标影响的响应曲面

Fig. 18 Response surface of influence of test factors on index

由图18可知,当工作负压一定时,随着工作转速增大,合格指数先增大后减小,重播指数先减小后增大,漏播指数先减小后增大;工作转速一定时,随着工作负压的增大,合格指数先增大后减小,重播指数一直增大,漏播指数一直减小。综合考虑各项评价指标以及实际应用中的需求,当工作转速为10~40 r/min、工作负压为1.0~1.6 kPa时,排种器合格指数均保持在86.34%以上,满足精量穴直播播种要求。

3.4 参数优化与试验验证

为了获得排种器的最佳工作参数,综合实际排种器的工作状态及工作参数对试验指标的影响进行优化求解。目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max X_1 \\ \min X_2 \\ \min X_3 \\ \text{s. t. } \begin{cases} 10 \text{ r/min} \leq N_1 \leq 50 \text{ r/min} \\ 0.8 \text{ kPa} \leq N_2 \leq 1.6 \text{ kPa} \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

优化结果表明,当工作负压为1.24 kPa、工作转速为25 r/min时,合格指数为92.64%,重播指数和漏播指数分别为2.57%、4.79%。

为了验证优化结果的准确性,将工作负压、工作转速分别设置为1.24 kPa和25 r/min。在相同条件下进行台架验证试验,此时合格指数为92.21%、重播指数为3.12%、漏播指数为4.67%,满足排种器精量工作要求,且与优化结果较为符合。

4 田间试验

4.1 试验条件

为了进一步验证外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器的田间作业性能,2024年7月22日在湖南省衡阳市西渡镇梅花村基地进行水稻播种试验。

试验材料为台架试验所用的“Y两优1号”杂交稻,水稻直播机由湖南农业大学研制(图19),机

具宽幅为2.3 m,可播种6行,行距0.25 m,牵引动力为久保田M704-KQ(G4)轮式拖拉机;试验田块长70 m,宽22 m,前茬为水稻,如图20所示。以台架试验最优参数组合进行试验。试验数据统计参照GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,连续统计田块中段各行播在地表的250穴稻种的穴粒数、穴距,重复3次试验取平均值。



图19 水稻直播样机

Fig. 19 Rice direct seeding prototype diagram



图20 田间试验效果

Fig. 20 Field test effect diagram

4.2 试验结果

田间试验结果如表8所示。由表8可知,各行排种性能为合格指数平均值92.86%、重播指数平均值2.71%、漏播指数平均值4.42%。相较室内台架试验结果,合格指数下降0.5个百分点,重播指数上升0.5个百分点,漏播指数基本不变,其原因可能为:相较于室内单一工况条件,田间工作环境复杂,随机性和不确定性因素更多,导致合格指数下降,重播指数上升。

表8 田间试验结果

Tab.8 Result of field experiment %

播种行号	合格指数	重播指数	漏播指数	穴距合格率
1	92.91	2.76	4.33	90.12
2	92.89	2.68	4.43	90.13
3	92.97	2.69	4.34	89.34
4	92.86	2.78	4.36	91.26
5	92.84	2.59	4.57	90.33
6	92.69	2.83	4.48	92.21
平均值	92.86	2.72	4.42	90.57

田间播种试验结果表明,各行合格指数 X_1 不小于 92.69%、重播指数 X_2 不大于 2.59%、漏播指数 X_3 不大于 4.33%、穴距合格率 X_4 不小于 89.34%、各行排量一致性变异系数为 3.12%、总排量稳定性变异系数为 1.89%,各项评价指标均满足水稻精量水穴直播的一般种植要求,且直播机各行排种均匀性较好。

5 结论

(1)设计了一种具有外凸扰种仿形型孔装置气吸式水稻芽种精量排种器,通过对外凸扰种仿形型孔装置和吸孔附近的芽种进行受力分析,确定了气吸式水稻芽种排种器关键结构参数。对充种区和投种区的水稻芽种进行了动力学分析,得到了工作转

速和工作负压水平。

(2)采用 EDEM 和 Fluent 对 7 种不同直径吸孔进行了吸附性能仿真试验,将芽种所受吸附力作为试验评价指标,确定了 7 种直径吸孔所受吸附力;其中直径为 1.4 mm 的吸孔所产生的吸附力最大,为 6.6548×10^{-3} N;对外凸扰种仿形型孔进行了扰种性能仿真试验,试验结果表明,在合理工作转速范围内,具有外凸扰种仿形型孔的排种盘扰动能力较强,能有效减少种群堆积现象。

(3)以直径为 1.4 mm 的吸孔作为基础结构,以工作转速和工作负压为试验因素,以合格指数、重播指数和漏播指数为评价指标,进行两因素全因子台架试验,根据两因素全因子试验结果确定较优工作转速为 10 ~ 40 r/min,工作负压为 1.0 ~ 1.6 kPa。多目标优化及试验验证结果表明,当工作转速为 25 r/min、工作负压为 1.24 kPa 时,排种器工作性能最佳,合格指数为 92.64%、重播指数为 2.57%、漏播指数为 4.79%,满足水稻芽种精量播种作业要求。

(4)以自主研发的水稻开沟起垄直播机为载体开展田间试验,结果表明,穴距合格率均值为 90.57%,各行排量一致性变异系数为 3.12%,总排量稳定性变异系数为 1.89%,满足水稻精量穴直播种植要求。

参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design of an active seed throwing and cleaning unit for pneumatic rice seed metering device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 62-69.
- [3] 李兆东,何顺,钟继宇,等. 油菜扰动气力盘式穴播排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 1-11.
LI Zhaodong, HE Shun, ZHONG Jiyu, et al. Parameter optimization and experiment of the disturbance pneumatic plate hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 1-11. (in Chinese)
- [4] 张国忠,臧英,罗锡文,等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 1-8.
ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of oriented seed churning device on pneumatic seed metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1-8. (in Chinese)
- [5] 臧英,何思禹,王在满,等. 气力式包衣杂交稻单粒排种器研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 10-18.
ZANG Ying, HE Siyu, WANG Zaiman, et al. Design of pneumatic single seed metering device for coated hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1): 10-18. (in Chinese)
- [6] 邢赫,臧英,王在满,等. 水稻气力式播量可调排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 20-28.
XING He, ZANG Ying, WANG Zaiman, et al. Design and parameter optimization of rice pneumatic seeding metering device with adjustable seeding rate[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 20-28. (in Chinese)
- [7] XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. General structure design and field experiment of pneumatic rice direct-seeder [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 31-42.
- [8] 翟建波,夏俊芳,周勇,等. 气力式杂交稻精量穴直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 75-82.
ZHAI Jianbo, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic precision hill-drop drilling seed metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 75-82. (in Chinese)
- [9] 张开兴,李金凤,宋正河,等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 52-63.
ZHANG Kaixing, LI Jinfeng, SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 52-63. (in Chinese)
- [10] LEI X, LIAO Y, ZHANG Q, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 98-109.
- [11] HAN D, ZHANG D, JING H, et al. DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 426-438.

- [12] TANG H, XU F, XU C, et al. The influence of a seed drop tube of the inside-filling air-blowing precision seed-metering device on seeding quality[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 204: 107555.
- [13] DU X, LIU C. Design and testing of the filling-plate of inner-filling positive pressure high-speed seed-metering device for maize[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 228: 1-17.
- [14] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 12-22.
- [15] 刘佳,崔涛,张东兴,等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(2): 43-47.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(2): 43-47. (in Chinese)
- [16] 李兆东,雷小龙,曹秀英,等. 油菜精量气压力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 experiment pneumatic-typed precision centralized metering device for rapeseed[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(7): 9-17. (in Chinese)
- [17] 高筱钧,徐杨,张东兴,等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 9-20.
GAO Xiaojun, XU Yang, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(23): 9-20. (in Chinese)
- [18] 雷小龙,廖彦涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 10-18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(20): 10-18. (in Chinese)
- [19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:中国农业科学院出版社, 2007.
- [20] 谢东波,张春岭,吴晓庆,等. 扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(2): 47-57.
XIE Dongbo, ZHANG Chunling, WU Xiaoqing, et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(2): 47-57. (in Chinese)
- [21] 张博文. 气吸圆盘式哈密瓜精量排种器设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
ZHANG Bowen. Design and experiment of air-absorbing disc type hami melon precision seed discharger[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [22] 高筱钧,徐杨,杨丽,等. 基于DEM-CFD耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(增刊): 92-100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of venturi feeding tube based on DEM-CFD coupling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(Supp.): 92-100. (in Chinese)
- [23] 王伟伟,宋岚洲,石文兵,等. 气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(3): 53-63.
WANG Weiwei, SONG Lanzhou, SHI Wenbing, et al. Design and experiment of air-suction double-row staggered precision seed metering device for maize dense planting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 53-63. (in Chinese)
- [24] 张春艳,康建明,张宁宁,等. 花生气吸滚筒式穴播器分种盘设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 28-37.
ZHANG Chunyan, KANG Jianming, ZHANG Ningning, et al. Design and experiment of seed separation tray of air-suction roller dibbler for peanut[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 28-37. (in Chinese)
- [25] 刘彩玲,王亚丽,宋建农,等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 294-300.
LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(15): 294-300. (in Chinese)
- [26] 鹿芳媛,马旭,谭穗妍,等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 93-99
LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 93-99. (in Chinese)
- [27] 苏微,赵庆辉,赖庆辉,等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(7): 144-155.
SU Wei, ZHAO Qinghui, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(7): 144-155. (in Chinese)
- [28] 俞亚新,王炎,周俊伟,等. 南瓜种子姿态约束定向组合式排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(6): 121-132, 158.
YU Yaxin, WANG Yan, ZHOU Junwei, et al. Design and test of combined pumpkin seed attitude-constrained directional seed metering device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(6): 121-132, 158. (in Chinese)
- [29] 臧英,黄子顺,秦伟,等. 气吸式杂交稻单粒排种器研制[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 181-191.
ZANG Ying, HUANG Zishun, QIN Wei, et al. Design of hybrid rice air-suction single-seed metering device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2024, 40(6): 181-191. (in Chinese)
- [30] 丁力,杨丽,武德浩,等. 基于DEM-CFD耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 48-57.
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD coupling method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 48-57. (in Chinese)
- [31] 丁力,杨丽,刘守荣,等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 1-11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(22): 1-11. (in Chinese)
- [32] 全国农业机械标准化技术委员会. 单粒(精密)播种机试验方法:GB/T 6973—2005[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会, 2005.