doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.02.006

双轨道弹射式水稻精量直播排种器设计与试验

李汉青[1,2]　颜丙新[1,3]　武广伟[1,3]　凌　琳[1]　赵春江[1,2]　孟志军[1,3]

（1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心，北京 100097；2.东北农业大学电气与信息学院，哈尔滨 150030；
3.智能农业动力装备全国重点实验室，北京 100097）

摘要：针对现有排种器存在投种不顺及大播量成穴性较差等问题，本文设计了一种双轨道弹射式水稻精量直播排种器。基于理论分析设计了关键部件，利用 DEM－MBD 耦合仿真技术得到了弹簧力参数及因素取值范围，明确了转速超过 35 r/min 后排种器的性能显著下降。以合格率、漏播率及重播率为性能评价指标开展台架正交试验，研究转速、调节深度及稻种球度对排种器工作性能的影响，建立排种性能评价指标的回归预测模型。试验结果表明：排种轮转速为 23.06 r/min、型孔深度为 8.99 mm、稻种球度为 52.7% 时，排种器合格率为 88.58%、漏播率为 4.43%、重播率为 6.99%，排种器工作性能最佳。为验证排种器工作性能及优化后参数的准确性，开展了田间试验，试验结果与优化后结果保持一致，回归方程预测结果误差小于 2%，验证了试验可行性及参数准确性，在最优参数下排种器穴径合格率为 100%、平均穴径为 3.62 cm、穴径变异系数为 18.45%、平均穴距为 22.98 cm、穴距变异系数为 8.43%、平均穴粒数为 11.08、穴粒数变异系数为 17.56%。所设计的排种器具有较好的播种性能、较高的穴径合格率及较低的变异系数，表明该排种器具有良好的成穴性能。

关键词：水稻；精量排种器；双轨道；弹射式

中图分类号：S233　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)02-0060-13　　**OSID**：

Design and Experiment of Double-track Ejection Rice Precision Direct Seeding Metering Device

LI Hanqing[1,2]　YAN Bingxin[1,3]　WU Guangwei[1,3]　LING Lin[1]　ZHAO Chunjiang[1,2]　MENG Zhijun[1,3]

(1. *Intelligent Equipment Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*
2. *School of Electrical and Information*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
3. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Focusing on addressing the issues commonly found in existing seed metering devices, such as uneven seeding and inadequate hole forming when dealing with large sowing rates, a double-track ejection type rice precision direct seeding metering device was developed. Drawing from theoretical analysis, the key components were designed. Using the DEM－MBD coupling simulation technology, a range of spring force parameters and factors were obtained and the accuracy of the adjusting mechanism to meet the requirements of seeding was determined. It was evident that the performance of the seeder was decreased significantly after the rotation speed exceeded 35 r/min. To investigate the effects of rotation speed, adjustment depth, and sphericity on the performance of the device, a bench orthogonal test was conducted. A regression prediction model of the device performance evaluation index was established. The test results showed that when the rotation speed of the seeding wheel was 23.06 r/min, the depth of the hole was 8.99 mm, and the sphericity of the rice seed was 52.7%, the qualified rate was 88.58%, the missed sowing rate was 4.43%, and the reseeding rate was 6.99%. To verify the working performance of the device and the accuracy of the optimized parameters, a field experiment was conducted. The results showed that the verification test results were consistent with the optimized results, and the error between them and the predicted results of the regression equation was less than 2%, thus

收稿日期：2023－08－07　修回日期：2023－11－17

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFD2000604)

作者简介：李汉青(1993—)，男，博士生，主要从事智能农机装备研究，E-mail：lhq199308@163.com

通信作者：孟志军(1975—)，男，研究员，博士生导师，主要从事智能农机装备研究，E-mail：mengzj@nercita.org.cn

confirming the feasibility of the experiment and the accuracy of the parameters. Under the optimum parameters, the qualified rate of hole diameter was 100%, the average hole diameter was 3.62 cm, the coefficient of variation of hole diameter was 18.45%, the average hole distance was 22.98 cm, and the coefficient of variation of hole distance was 8.43%, average number of holes was 11.08, and the coefficient of variation was 17.56%. The designed seed metering device had good seeding performance, high qualified rate of hole diameter and low coefficient of variation, indicating that the seed metering device had good hole forming performance.

Key words: rice; precision seed metering device; double track; ejection

0　引言

水稻是我国三大粮食作物之一，也是世界上重要的主粮作物，全球约有 50% 的人口以水稻为主食[1-3]。相比其他农作物，水稻种植机械化水平较低，约为 50%[4]。水稻直播技术具有提高生产效率、降低成本、促进可持续发展、提高产量等优势，为目前水稻种植的主要发展方向[5-7]。

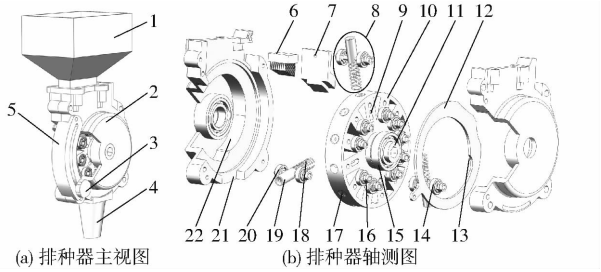
排种器是实现机械化精量直播技术的关键部件[8-10]，国外水稻直播排种器主要采用槽轮式，大多采用与小麦通用型排种器[11-15]。而国内学者对水稻直播排种器进行了深入研究，主要包括机械式和气力式两种类型。气力式排种器对种子的适应性较高，但存在结构复杂、气密性的要求较高、不便于推广等诸多问题[16]。相比气力式排种器，机械式排种器具有结构简单、便于推广等优点，是目前水稻直播排种器的主要发展方向之一[17-18]。

罗锡文等[19]对孔轮式水稻直播排种器进行了研究，并确定了瓢形型孔排种轮的排种性能最佳，该排种器具有较好的应用效果，但播量调节范围相对有限，调节过程较为复杂。张明华等[20]在孔轮式排种器的基础上，提出了组合型孔轮式排种器，并扩大了型孔尺寸，提高了排种轮适用范围。罗锡文等[21]提出了一种弹性随动护种带，而王冲等[22-23]则设计了同步柔性胶带护种器。王俊等[24]研究了一种专用于水稻直播机的排种器，该排种器通过内外调节爪的轴向移动实现了播量调节，并且能够满足条播和穴播的转换，但该排种器制造成本较高，目前还未能得到应用。田立权等[25-26]研究了螺旋槽式和弹射式耳勺型水稻精量穴直播排种器，该排种器基本上能够满足水稻精量穴直播的需求，但该排种器播量调节无法连续，对不同类型的稻种适应性相对较低。朱德泉等[27]设计了一种滑片型孔轮式排种器，仿真试验结果显示该排种器能够满足各种尺寸等级水稻种子的精量播种要求，但在田间试验中，穴距变异系数较大。张顺等[28]设计了一种 U 型腔道式水稻精量穴播排种器，该排种器播种合格率超过 90%，但穴径合格率较低，且穴距变异系数较大。

由于不同地区的土壤、气候、品种、农艺和种植习惯的差异，对播种量的要求不同[29-30]。目前，国内的水稻直播面积逐年上升，现有排种器存在的问题亟待解决。本文提出一种双轨道弹射式水稻精量直播排种器，利用型孔深度渐变方式进行充种，采用强制投种、双轨道固定投种、动态播量调节方式。对排种器进行仿真试验、台架试验和田间试验，以期为水稻直播排种器整机设计和性能提升提供参考。

1　排种器结构与工作原理

排种器主要由壳体、排种轮、排种轴、清种毛刷、导种管、强制投种机构、播量调节机构等组成，如图 1 所示。排种轮通过支撑轴承连接于壳体，壳体上安装有调节轨道；播量调节机构上的内轨道曲线由不同半径的圆弧曲段组成，播量调节机构通过调节手柄固定于调节轨道；壳体上固定轨道曲线与播量为零状态下的内轨道曲线重合，壳体上固定轨道和播量调节机构上的内轨道形成了双轨道；强制投种机构上安装有推销轴与弹簧。强制投种机构一侧轴承沿壳体上的固定轨道滑动，另一侧轴承沿播量调节机构上滑动轨道移动。固定轨道起固定投种作用，滑动轨道主要作用为播量调节。两轨道相互配合使强制投种机构沿滑槽在型孔中上下移动，使调节深



(a) 排种器主视图　　(b) 排种器轴测图

图 1　排种器结构及工作原理图

Fig. 1　Diagram of structure and working principle of seed metering device

1. 种箱　2. 壳体　3. 调节旋钮　4. 导种管　5. 调节轨道　6. 毛刷　7. 毛刷挡板　8. 强制投种机构　9. 滑槽　10. 排种轮　11. 排种轴　12. 播量调节机构　13. 滑动轨道　14. 滚动轴承Ⅰ　15. 支撑轴承　16. 固定螺栓　17. 引种窝眼　18. 弹簧　19. 推销轴　20. 滚动轴承Ⅱ　21. 投种口　22. 固定轨道

度发生改变,以此容纳不同数量的稻种,促使完成不同播量的调节[31]。

排种器工作之前,先将播量调节机构转动至理论播量所处的位置,排种轴与外部动力连接,在外部动力的驱动作用下带动排种轮做圆周运动,稻种从种箱下落至充填区后,在自身重力、种群压力及排种器旋转带动作用下进入型孔,落入型孔中姿态不规则的种子将被清种毛刷所清除,型孔中种子随排种轮转动。排种轮经过护种区转至于投种区时,在固定轨道的作用下导致轨道半径发生突变,被压缩的弹簧立刻反弹,使强制投种机构立刻动作,将型孔中的种子瞬间弹射至种沟中,完成整个排种过程,排种器主要结构参数如表 1 所示[32]。

表 1 排种器主要结构参数

Tab. 1 Main structural parameters of seed metering device

参数	数值/型式
型孔形状	圆形
型孔数量	12
型孔直径/mm	12
排种轮直径/mm	140
排种轮厚度/mm	25
调节角/(°)	90
充种角/(°)	75
投种角/(°)	30
型孔深度/mm	45
推销轴长度/mm	25
调节深度/mm	9

2 关键部件设计

2.1 强制投种机构

为解决型孔式排种器投种不顺导致播种不均匀等问题,本文设计了一种强制投种机构,主要由推销轴和弹簧组成,结构如图 2 所示。为提高排种器充种性能,在推销轴顶端设计引种窝眼,引种窝眼深度设计需满足

$$\tan\alpha = \frac{L_2}{L_1} \tag{1}$$

式中 α——引种窝眼锥角,(°)

L_2——型孔半径,mm

L_1——引种窝眼深度,mm

参照文献[33],常用稻种厚度为 1.86 ~ 2.32 mm,本文设计取稻种厚度为 1.86 mm,即 L_1 为 1.86 mm。将有关参数代入式(1),可得引种窝眼锥角为 17°。为降低伤种率,弹簧刚度不宜过大,可通过仿真研究进行确定。选用 FAG625 系列滚动轴承,轴承外径为 16 mm。

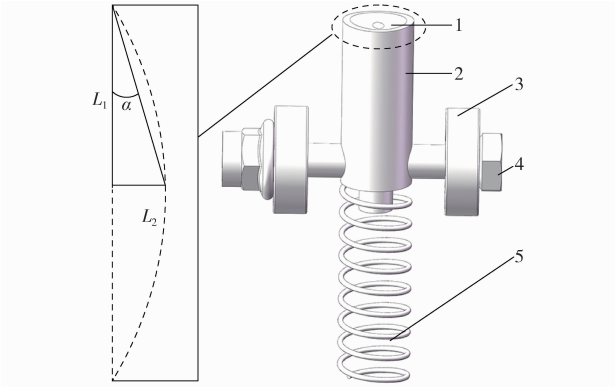


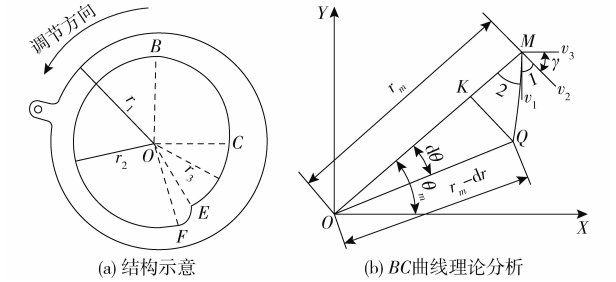
图 2 强制投种机构

Fig. 2 Forced seeding device

1. 窝眼 2. 推销轴 3. 轴承 4. 螺栓 5. 弹簧

2.2 播量调节机构

播量调节机构如图 3 所示,主要由外圆弧和内圆弧构成,内圆弧由曲线 BF、BC、CE 和 EF 组成,外圆弧上的点半径均相等。根据排种轮结构参数,设计调节机构外圆弧半径 r_1 为 68 mm。内圆弧主要起调节作用的为 BC 段,BC 曲线上点的半径随角度发生变化,点 B 至点 C 半径的减小使强制投种机构沿滑槽向排种轮中心运动,致使型孔调节深度发生改变。在 BC 段上任取两点 M 和 Q,建立如图 3b 所示的坐标系。



(a) 结构示意 (b) BC曲线理论分析

图 3 播量调节机构

Fig. 3 Seeding rate adjusting mechanism

如图 3b 所示,v_1、v_2、v_3 分别表示点 M 的切向速度、合速度及法向速度。其中∠1 与∠2、∠1 与 γ 互为余角,因而∠2 与 γ 相等,则 γ 正切函数可表示为

$$\tan\gamma = \frac{l_{KQ}}{l_{OM}-l_{OK}} = \lim_{\substack{dr\to 0\\ d\theta\to 0}} \frac{(r_m - dr)\sin d\theta}{r_m - (r_m - dr)\cos d\theta} \tag{2}$$

式中 l_{KQ}、l_{OM}、l_{OK}——线段 KQ、OM、OK 长度,mm

$d\theta$——转动角,(°)

r_m——起始矢径,mm

$r_m - dr$——转过 $d\theta$ 后的矢径,mm

当调节机构转动角极小时,当 dr 和 $d\theta$ 趋近于零时,则有 $\sin d\theta/d\theta$ 趋近于 1,整理式(2)可得

$$\tan\gamma = \frac{r_m d\theta}{dr} \tag{3}$$

假设在固定角度范围内完成对最大播量的调节,调节机构每转过相同角度时播量的变化也相等。

根据滑切角定义，可得曲线上任意一点滑切角均相等，即滑切角正切为常数[34-35]。基于积分与导数的性质，整理式(3)可得

$$r_m = e^{\frac{\theta_m + Zk}{Z}} \tag{4}$$

式中　θ_m——点 M 的极角，(°)

Z、k——积分常数

当轴承在曲线 BF 上滑动时，型孔调节深度为零，根据调节机构的工作原理及机构之间的配合关系，则有

$$r_2 = L_3 + r_4 \tag{5}$$

式中　r_2——曲线 BF 半径，mm

L_3——滑槽定位尺寸，取 48 mm

r_4——滚动轴承半径，mm

滚动轴承外径为 16 mm，则 r_4 为 8 mm，代入式(5)可得r_2为 56 mm。为满足最大播量调节深度 9 mm，将曲线 CE 的半径设定为 47 mm。曲线 EF 为连接曲线，主要作用是保证排种器平稳过渡到投种区。由于调节机构逆时针转动完成播量从小到大的调节，所以曲线上点的半径越大，则型孔调节深度越小，播量越少，即当曲线上点的极角为 0°时，半径为 47 mm，极角为 90°时半径为 56 mm。将参数代入式(4)，可得曲线 BC 的方程为

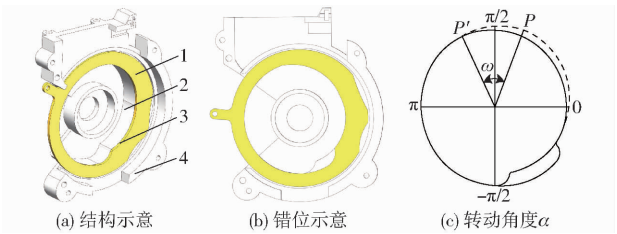
$$r' = e^{\frac{\theta' + 34.5}{8.96}} \tag{6}$$

式中　r'——曲线 BC 上点的矢径，mm

θ'——曲线 BC 上点的极角，(°)

2.3　双轨道机构

双轨道主要由壳体上的固定轨道和调节机构上的内轨道所组成，如图 4 所示。将播量为零状态下调节机构的内圆弧曲线作为固定轨道曲线，即两轨道重合时播量为零，如图 4a 所示。播量调节机构逆时针转动完成播量从小到大调节，结合调节机构角度设计，当调节机构转动角度 α 时(其中 α 为弧度制)，双轨道在 $(12\alpha - 5\pi)/12$ 处出现错位现象(图 4b)。此时，强制投种机构上的滚动轴承在 $(12\alpha - 5\pi)/12$ 至 $-\pi/2$ 之间沿固定轨道滑动(图 4c)，其余角度均沿调节机构内轨道滑动。



(a) 结构示意　(b) 错位示意　(c) 转动角度α

图 4　双轨道机构

Fig. 4　Double track mechanism

1. 播量调节机构　2. 固定轨道　3. 滑动轨道　4. 壳体

3　基于 DEM－MBD 仿真试验

3.1　仿真模型构建与参数设置

3.1.1　多体动力学模型建立与参数设置

利用离散元仿真软件 EDEM 进行模拟[36-37]，多体动力学软件 RecurDyn 用于实现排种器旋转和变轨道运动[38]。为提高仿真效率，简化和省略不必要的连接部件，将装配好的排种器模型导入 RecurDyn 中，如图 5 所示。

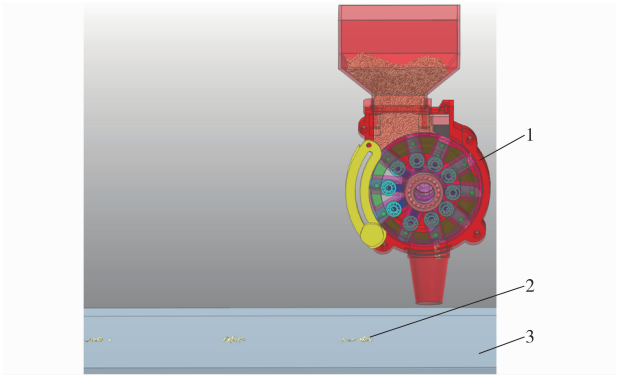


图 5　排种器的 MBD 模型

Fig. 5　MBD model of seed metering device

1. 排种器　2. 稻种　3. 模拟地面

采用打印技术制造排种器，因此将其材料设置为 ABS，并使用 Density 模块将材料密度设为 1.25×10^3 kg/m^3[39]。在 RecurDyn 中，根据改变弹簧线径和有效圈数来使弹簧力达到目标设定值，通过函数驱动或改变播量调节机构内轨道上的曲线 CE 长度来实现变轨道运动。根据排种器工作过程，在 RecurDyn 中添加相应的旋转副、移动副和固定副，接触形式主要为面与面接触。在排种轮上，将驱动函数设置为 IF(time－0.5:0,0,a)，即在 0.5 s 之前排种轮的转速为零，在 0.5 s 之后排种轮转速为 a(r/min)。模拟地面的驱动函数设置为 IF(time－0.5:0,0,b)，即在 0.5 s 之前机具静止不动，在 0.5 s 之后机具以速度 b(mm/s)运动。由于排种器的配置机具为插秧机，而插秧机的田间行驶速度一般约为 0.8 m/s，因此本研究设置机具速度 b 为 800 mm/s进行仿真[31,40]。

3.1.2　离散元模型建立与参数设置

利用 RecurDyn 中的 External SPI 功能接口模块，将模型中与颗粒接触的零部件以 wall 文件形式导出，然后通过 EDEM 中 Geometries 模块下的 Import Geometry from RecurDyn 功能将 wall 文件导入 EDEM 中。为研究不同转速下种子尺寸对排种器排种性能的影响，引用球度指标表示水稻种子与球体之间的差异程度。选取 3 个在不同种植区常用

的水稻品种:黄华占、湘早籼 45 号和龙稻 6 号。每个品种随机挑选 100 粒种子,并测量了它们的三轴尺寸,然后取平均值,3 种水稻种子基本参数如表 2 所示。

表 2 水稻种子基本参数

Tab. 2 Basic parameters of rice seeds

品种	长轴长度/mm	短轴长度/mm	厚度/mm	球度/%
黄华占	9.79 ± 0.32	2.16 ± 0.12	1.91 ± 0.10	35.0
湘早籼 45 号	7.92 ± 0.20	2.83 ± 0.14	2.17 ± 0.08	46.1
龙稻 6 号	7.18 ± 0.30	3.39 ± 0.11	2.22 ± 0.06	52.7

基于所选水稻品种的外形参数,建立水稻种子的三维模型,并将其导入 EDEM 中。通过使用颗粒快速填充功能,得到种子多球面聚合颗粒模型,如图 6 所示。

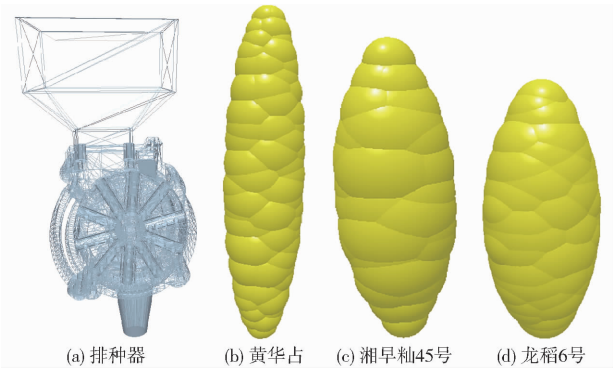


图 6 离散元模型

Fig. 6 Discrete element models

颗粒-颗粒、颗粒-排种器之间的接触模型均采用 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型。排种器与种子接触的部件有壳体、强制投种机构和毛刷,其中壳体与强制投种机构均采用 ABS 注塑件,清种毛刷材料为塑料。根据相关研究成果,颗粒与部件接触参数设置如表 3 所示[41-42]。根据充种区的具体情况,设置 EDEM 颗粒工厂以速率 10 000 粒/s 生成种子颗粒,总共生成 5 000 粒,生成种子颗粒的总时间为 0.5 s。为了确保充种区内有足够数量的种子进行仿真,设置排种轮和模拟地面在 0.5 s 后开始运转。

表 3 离散元仿真参数

Tab. 3 DEM simulation parameters

参数	材料		
	稻种	ABS	毛刷
泊松比	0.3	0.34	0.4
剪切模量/Pa	1.82×10^8	3×10^9	1×10^8
密度/(kg·m^{-3})	1 239	1 250	1 150
恢复系数(与稻种颗粒)	0.30	0.32	0.45
静摩擦因数(与稻种颗粒)	0.56	0.46	0.61
滚动摩擦因数(与稻种颗粒)	0.01	0.01	0.02

为保证仿真连续性,设置固定时间步长为 1×10^{-6} s,约为 Rayleith 时间步长的 25%。为提高仿真效率,设置总仿真时间为 11 s,其中前 0.5 s 为稻种生成时间。

3.2 评价指标

依据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》的规定,选取合格率 y_1、漏播率 y_2、重播率 y_3、穴径合格率 y_4、平均穴径 y_5、穴径变异系数 y_6、平均穴距 y_7、穴距变异系数 y_8、平均穴粒数 y_9、穴粒数变异系数 y_{10} 作为试验指标[31]。其中,穴径为一穴内两粒相距最远稻种的直线距离,以小于等于 5 cm 的穴径为合格[17,43-44]。评价指标计算公式为

$$\begin{cases} y_1 = \dfrac{n_1}{N}\times100\% \\ y_2 = \dfrac{n_2}{N}\times100\% \\ y_3 = \dfrac{n_3}{N}\times100\% \\ y_4 = \dfrac{n_4}{N}\times100\% \\ y_5 = \dfrac{\sum L_B}{N} \\ y_6 = \sqrt{\dfrac{\sum (L_B - y_5)^2}{(N-1)y_5^2}}\times100\% \\ y_7 = \dfrac{\sum L_s}{N} \\ y_8 = \sqrt{\dfrac{\sum (L_s - y_7)^2}{(N-1)y_7^2}}\times100\% \\ y_9 = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} N_i}{N} \\ y_{10} = \dfrac{S_d}{y_9}\times100\% \end{cases} \tag{7}$$

式中 N——理论排种穴数

n_1——合格排种穴数

n_2——漏播排种穴数

n_3——重播排种穴数

n_4——穴径合格数

L_B——穴径,cm

L_s——穴距,cm

N_i——第 i 穴排种穴粒数

S_d——穴粒数标准偏差

3.3 强制投种机构仿真试验

通过仿真试验探究弹簧力对成穴性能的影响,

并确定弹簧力，为弹簧选型提供基础。在仿真试验中，通过改变弹簧线径和圈数等参数，使弹簧力达到目标设置值。根据相关研究成果，当种子受到外界压力大于 20 N 时，种子发芽率会显著变化。因此，将弹簧力设为 3、7、11、15、19 N。根据预试验，将转速和稻种球度固定为 40 r/min 和 52.7%，播量调节机构置于最大处。选取穴径合格率 y_4、平均穴径 y_5、穴径变异系数 y_6 作为试验指标。试验结果如表 4 所示。

表 4　强制投种机构仿真试验结果

Tab.4　Simulation test results of forced seeding device

弹簧力/N	穴径合格率 y_4/%	平均穴径 y_5/cm	穴径变异系数 y_6/%
3	82.45	4.81	15.54
7	91.64	4.55	13.57
11	98.63	4.03	11.89
15	100	3.87	10.12
19	100	3.77	12.93

由表 4 可知，随着弹簧力的增大，弹簧力与穴径合格率 y_4 呈正相关关系，与平均穴径 y_5 呈负相关关系。弹簧力在 3～15 N 时，穴径变异系数 y_6 呈下降趋势，主要因为弹簧力增大后，投种瞬间给种子竖直加速度增大，种子成穴性能越好。当弹簧力为 15 N 时，排种器的成穴性能最好，此时穴径合格率为 100%，平均穴径为 3.87 cm，穴径变异系数为 10.12%。弹簧力超过 15 N 后，穴径变异系数迅速上升。弹簧力为 19 N 时，平均穴径虽然最优，但穴径变异系数迅速增大，主要因为弹簧力过大造成对排种轮的瞬时冲击力增加，在投种瞬间种子的分散程度增大。与平均穴径相比，穴径变异系数与穴距变异系数对成穴性能的重要性更为显著。因此，后续试验将弹簧力设置为 15 N，弹簧选型以最大弹簧力为基础进行。

3.4　播量调节机构仿真试验

将调节深度分别设置为 3、6、9 mm，转速设置为 30 r/min，探究调节机构在 3 种不同球度下的准确性。平均穴粒数可观测不同调节深度下的播种量，穴粒数变异系数可说明调节机构的精确性。因此，选取平均穴粒数 y_9、穴粒数变异系数 y_{10} 作为本次试验的评价指标，试验结果如表 5 所示。

表 5　播量调节机构仿真试验结果

Tab.5　Simulation test results of seeding rate adjusting mechanism

因素		指标	
稻种球度/%	调节深度/mm	平均穴粒数 y_9	穴粒数变异系数 y_{10}/%
35.0	3	3.61	32.09
35.0	6	6.88	20.19
35.0	9	9.53	17.82
46.1	3	4.18	28.46
46.1	6	7.04	19.87
46.1	9	10.48	15.28
52.7	3	4.99	24.35
52.7	6	7.89	18.64
52.7	9	11.12	14.92

由表 5 可知，当调节深度分别为 3、6、9 min 时，平均穴粒数均值分别为 4.26、7.27 和 10.38，穴粒数变异系数均值分别为 28.30%、19.57% 和 16.01%。当稻种球度一定时，平均穴粒数随深度增加而增加，穴粒数变异系数随深度增加而减小。主要因为调节深度越大，播量调节曲段在充种区越长，有一定的预充种曲段，种子进入型孔中的数量越稳定，穴粒数变异系数越小。当调节深度一定时，平均穴粒数随稻种球度的增大而增大，穴粒数变异系数随深度增加而减小。主要因为稻种球度越大，其长轴尺寸缩小，稻种外形越接近于球形，种子更容易进入型孔，稻种进入型孔的姿态越稳定。从试验结果可知，该调节机构能实现 2～13 粒，且球度为 35.0%～52.7% 稻种范围内的播量调节，符合播种要求。依据播量调节机构的仿真结果，不同条件下穴粒数评价指标结果如表 6 所示。

表 6　排种器穴粒数结果

Tab.6　Results of evaluation index of number of seed metering device per hole

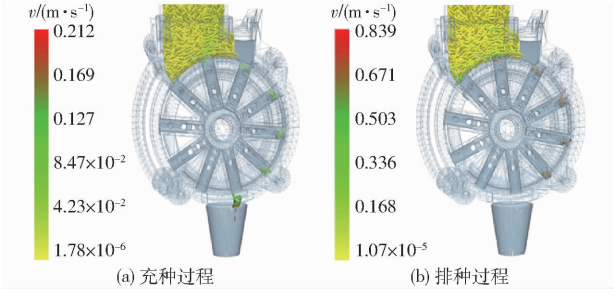
调节深度/mm	稻种球度 35.0%			稻种球度 46.1%			稻种球度 52.7%		
	合格	漏播	重播	合格	漏播	重播	合格	漏播	重播
3	2～4	<2	>4	3～5	<3	>5	4～6	<4	>6
6	5～7	<5	>7	6～8	<6	>8	7～9	<7	>9
9	8～10	<8	>10	10～12	<10	>12	11～13	<11	>13

3.5　排种性能仿真试验

3.5.1　试验设计

根据排种器设计参数，该装置极限转速为 48 r/min。因此，在排种器性能仿真试验中，将排种器转速设置为 15、25、35、45 r/min，对 3 个品种的稻种进行仿真试验。将排种器充种与排种过程以网格

形式(Mesh 为 0.2)进行显示,如图 7 所示。排种性能主要由合格率 y_1、漏播率 y_2、重播率 y_3 3 个指标决定。对于不同球度的稻种,在相同播量调节位置处所容纳的稻种数量略有不同。根据播量调节机构准确性试验结果,将调节深度置于最大处进行试验。以排种轮转速和种子球度作为试验因素,进行 12 组仿真试验,统计每组总仿真时间内的数据。



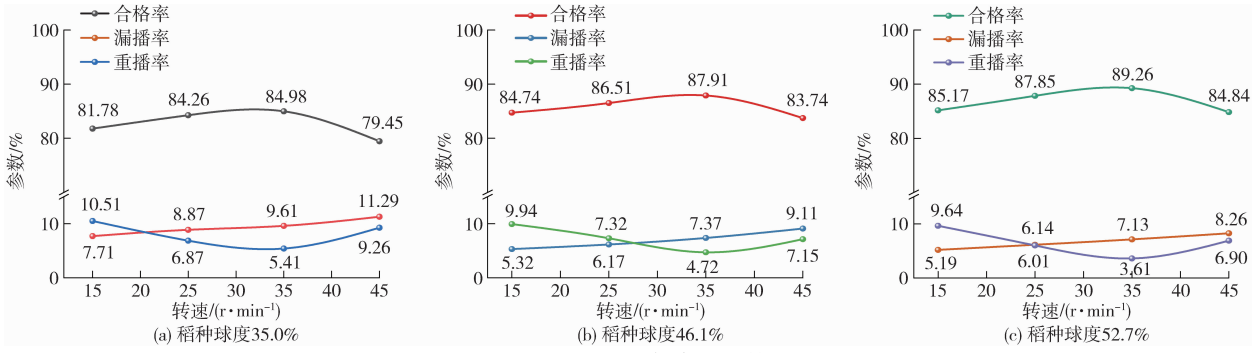
(a) 充种过程 (b) 排种过程

图 7 排种器运动过程仿真

Fig. 7 Simulation of meter movement process

3.5.2 结果与分析

仿真试验结果如图 8 所示,当排种器转速为 15 ~ 45 r/min 时,球度为 52.7% 稻种播种合格最高,可达到 89.26%,其次为 46.1% 和 35.0% 球度的稻种。当稻种球度一定时,合格率随转速的增大呈先上升后下降趋势,重播率随转速的增大呈先减小后增大趋势,漏播率随转速的增大呈上升趋势;当转速超过 35 r/min 时,排种合格率迅速下降,重播率迅速上升。当转速为 35 r/min 时,球度为 52.7% 稻种合格率、漏播率、重播率分别为 89.26%、7.37% 和 4.72%,排种性能最优;球度为 46.1% 稻种合格率、漏播率、重播率分别为 87.91%、6.32% 和 6.17%;球度为 35.0% 稻种合格率、漏播率、重播率分别为 84.98%、9.61% 和 5.41%。当转速为 45 r/min 时,球度为 35.0% 稻种合格率为 79.45%,低于 80%,不符合水稻精量直播要求。



(a) 稻种球度35.0% (b) 稻种球度46.1% (c) 稻种球度52.7%

图 8 排种器性能仿真试验结果

Fig. 8 Simulation test results of meter performance

由图 8 可知,随稻种球度增大,合格率呈上升趋势,漏播率呈下降趋势,主要因为球度越高的种子越易进入型孔;当转速超过 35 r/min 后,合格率迅速下降,重播率迅速上升,主要因为转速过高排种器振动作用加强,增加了种子流动性;漏播率与转速成正比,主要因为转速过高致使充种时间不够充分,稻种未及时完成充种。

4 排种器性能试验

4.1 台架试验

4.1.1 试验装置

试验地点为国家农业智能装备工程技术研究中心的农机装备实验室。播种试验台如图 9 所示,该试验台为自主搭建,主要由台架、传送带、排种器、控制器、高速摄影装置等组成。将排种器固定在台架上,驱动电机Ⅰ与排种器连接,驱动电机Ⅱ带动传送带转动。计算机Ⅰ通过控制器控制驱动电机Ⅰ和驱动电机Ⅱ,实现排种器和传送带转速精准控制,利用传送带速度模拟机具地面速度,计算机Ⅱ用来记录高速摄影装置数据。其中,通过高速摄影装置对每组试验过程进行录像,后期利用高速摄影的高帧率和快速曝光特点,统计每组试验中每穴稻种粒数。

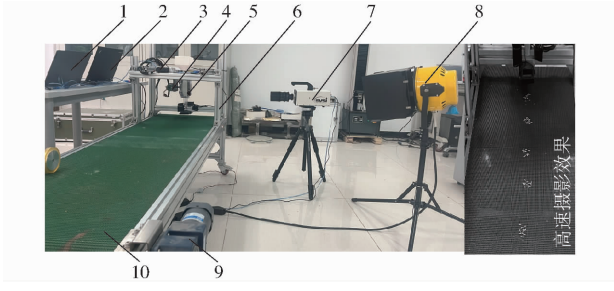


图 9 台架试验装置

Fig. 9 Bench test device

1. 计算机Ⅰ 2. 计算机Ⅱ 3. 控制器 4. 驱动电机Ⅰ 5. 排种器 6. 台架 7. 高速摄影装置 8. 补光灯 9. 驱动电机Ⅱ 10. 传送带

4.1.2 试验设计

通过前文仿真,得出转速超过 35 r/min 后,排种器排种性能下降。为进一步探究排种器在不同转速和深度下,对不同球度稻种的适应性,以排种器转速、调节深度、稻种球度为试验因素,以合格率 y_1、漏播率 y_2 以及重播率 y_3 为性能评价指标开展台架

试验。试验因素编码如表 7 所示。

表 7　试验因素编码

Tab. 7　Test factors and coding

编码	因素		
	排种器转速/($r \cdot min^{-1}$)	调节深度/mm	稻种球度/%
-1	15	3	35.0
0	25	6	46.1
1	35	9	52.7

4.1.3　试验结果与分析

根据响应面设计方法及因素水平取值，共开展 17 组试验，其中用 3 种不同球度的稻种代替因素水平取值，试验结果如表 8 所示，表中 X_1、X_2、X_3 为编码值。

运用 Design-Expert 8.0.6.1 软件对表 8 中的试验数据进行回归分析，分别得到合格率 y_1、漏播率 y_2 以及重播率 y_3 与排种器转速 X_1、调节深度 X_2、稻种球度 X_3 之间的回归方程为

$$\begin{cases} y_1 = 86.89 - 1.63X_1 - 0.27X_2 + 1.59X_3 - \\ \quad 0.31X_1X_2 - 0.34X_1X_3 + 0.06X_2X_3 - \\ \quad 1.82X_1^2 + 0.19X_2^2 - 0.24X_3^2 \\ y_2 = 4.46 + 1.95X_1 + 0.26X_2 - 1.72X_3 + \\ \quad 0.40X_1X_2 + 0.59X_1X_3 - 0.10X_2X_3 + \\ \quad 1.92X_1^2 + 0.76X_2^2 + 1.27X_3^2 \\ y_3 = 8.65 - 0.32X_1 + 0.01X_2 + 0.14X_3 - \\ \quad 0.10X_1X_2 - 0.25X_1X_3 + 0.04X_2X_3 - \\ \quad 0.10X_1^2 - 0.95X_2^2 - 1.04X_3^2 \end{cases} \quad (8)$$

表 8　试验方案及结果

Tab. 8　Test scheme and results

试验号	因素			合格率	漏播率	重播率
	X_1	X_2	X_3	y_1/%	y_2/%	y_3/%
1	-1	0	-1	84.63	7.93	7.44
2	-1	-1	0	87.23	4.79	7.98
3	-1	1	0	87.49	4.42	8.09
4	-1	0	1	88.29	3.64	8.07
5	0	1	1	88.21	4.80	6.99
6	0	0	0	87.40	4.07	8.53
7	0	0	0	87.48	3.86	8.66
8	0	0	0	86.82	4.47	8.71
9	0	0	0	87.45	4.13	8.42
10	0	0	0	87.22	4.01	8.77
11	0	-1	1	88.82	4.45	6.73
12	0	-1	-1	85.54	8.01	6.45
13	0	1	-1	84.78	8.74	6.48
14	1	0	-1	82.04	10.53	7.43
15	1	0	1	84.36	8.52	7.12
16	1	1	0	83.43	9.58	6.99
17	1	-1	0	84.41	8.35	7.24

对回归方程进行方差分析，如表 9 所示。由表 9 可知，排种器合格率 y_1、漏播率 y_2 以及重播率 y_3 回归方程皆极显著，回归方程失拟项皆不显著，表明在一定参数范围内，回归模型与实际情况拟合度较高。排种器合格率 y_1、漏播率 y_2 以及重播率 y_3 决定系数 R^2 分别为 0.98、0.98 和 0.97，说明回归方程预测值与实际值之间具有较高相关性。因此，可用合格率 y_1、漏播率 y_2 和重播率 y_3 的回归模型对排种器排种性能进行分析与预测。

表 9　回归方程方差分析

Tab. 9　Variance analysis of regression equations

方差来源	合格率				漏播率				重播率			
	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	60.14	9	113.99	<0.000 1 **	91.21	9	161.70	<0.000 1 **	10.13	9	42.22	<0.000 1 **
X_1	20.67	1	352.62	<0.000 1 **	29.50	1	470.61	<0.000 1 **	0.78	1	29.37	0.001 0 **
X_2	0.56	1	9.53	0.017 6 *	0.50	1	8.05	0.025 1 *	0.00	1	0.05	0.826 3
X_3	20.13	1	343.42	<0.000 1 **	23.81	1	379.82	<0.000 1 **	0.15	1	5.78	0.047 2 *
X_1X_2	0.38	1	6.56	0.037 5 *	0.64	1	10.21	0.015 2 *	0.03	1	1.22	0.306 6
X_1X_3	0.47	1	7.93	0.025 9 *	1.44	1	22.96	0.002 **	0.27	1	10.05	0.015 7 *
X_2X_3	0.01	1	0.22	0.650 7	0.04	1	0.64	0.449 0	0.01	1	0.28	0.613 4
X_1^2	13.96	1	238.13	<0.001 **	15.46	1	246.62	<0.000 1 **	0.04	1	1.43	0.270 2
X_2^2	0.15	1	2.51	0.157 5	2.44	1	38.91	0.000 4 **	3.78	1	141.92	<0.000 1 **
X_3^2	0.20	1	3.36	0.109 4	5.79	1	92.38	<0.000 1 **	3.85	1	144.51	<0.000 1 **
残差	0.41	7			0.44	7			0.19	7		
失拟	0.11	3	0.50	0.70	0.23	3	1.53	0.33	0.11	3	1.76	0.29
误差	0.30	4			0.20	4			0.08	4		
总和	60.55	16			91.65	16			10.31	16		

注：** 表示在 0.01 水平差异极显著；* 表示在 0.05 水平差异显著。

剔除非显著影响因素，回归方程为

$$\begin{cases} y_1 = 86.85 - 1.63X_1 - 0.26X_2 + 1.61X_3 - \\ \quad 0.31X_1X_2 - 0.34X_1X_3 - 1.82X_1^2 \\ y_2 = 4.46 + 1.95X_1 + 0.24X_2 - 1.72X_3 + \\ \quad 0.40X_1X_2 + 0.59X_1X_3 + 1.92X_1^2 + \\ \quad 0.76X_2^2 + 1.27X_3^2 \\ y_3 = 8.61 - 0.32X_1 + 0.14X_3 - 0.25X_1X_3 - \\ \quad 0.95X_2^2 - 1.05X_3^2 \end{cases} \tag{9}$$

由表 9 可知，因素对合格率的影响由大到小为排种器转速、稻种球度、调节深度。交互作用对评价指标的影响如图 10 所示。对于合格率而言，当调节深度和稻种球度一定时，合格率随转速的增大呈先增大后减小的趋势；转速一定时，随稻种球度的增大合格率呈上升趋势。对于漏播率而言，当调节深度和稻种球度一定时，漏播率随转速的增大呈先减小后增大的趋势；当转速一定时，漏播率随调节深度和稻种球度的增大呈先减小后增大的趋势。对于重播率而言，当转速一定时，重播率随稻种球度的增大呈先增大后减小的趋势。图 10 所示的排种性能指标随着排种轮转速、调节深度以及稻种球度变化而发生改变的趋势，与仿真结果基本一致。

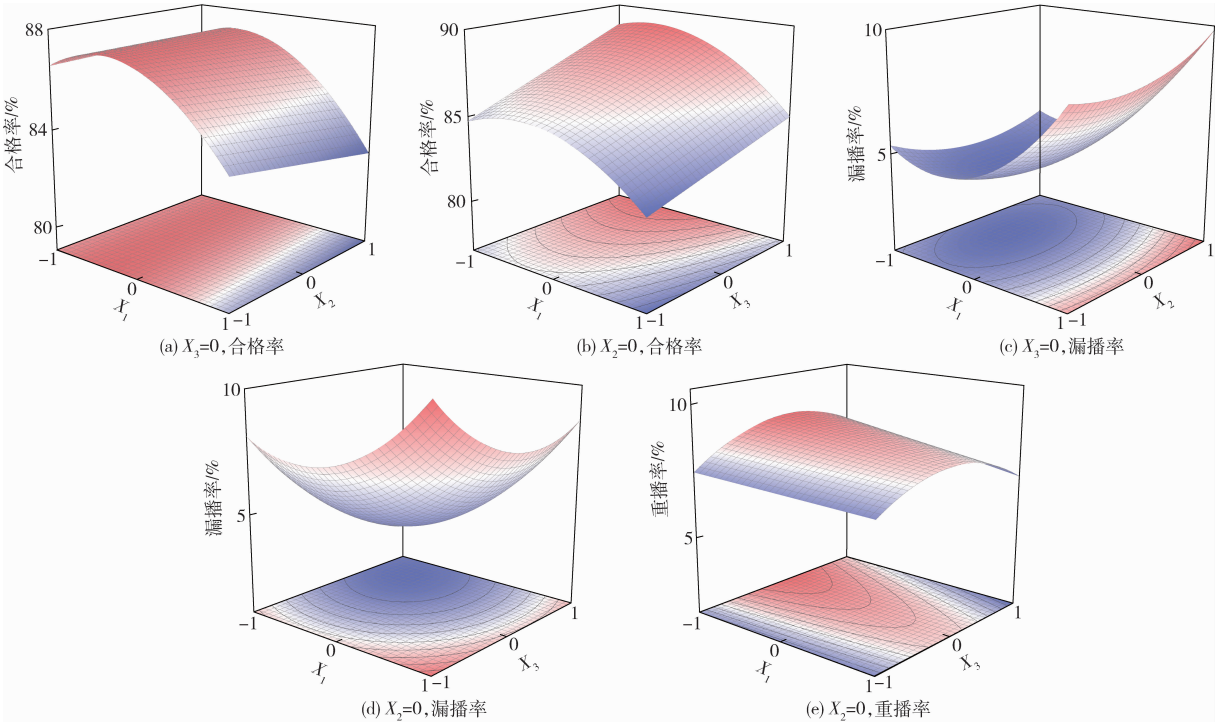


图 10 试验因素交互作用对评价指标影响的响应曲面

Fig. 10 Influence of interaction of experiment factors on response surface of evaluation index

为寻求各因素的最优组合，结合因素边界条件建立数学模型，并对评价指标回归模型进行多目标化求解，优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{10}$$

通过 Design-Expert 8.0.6.1 软件进行求解，得到最优参数：排种轮转速为 23.06 r/min、型孔深度为 8.99 mm、稻种球度为 52.7%，此时，排种器性能指标合格率、漏播率和重播率分别为 88.58%、4.43% 和 6.99%。

4.2 机械特性试验

根据国家标准，种子破碎率测量方法如下：称取不小于 100 g 的水稻种子倒入种箱，使排种器充分排出稻种，然后选出其中破碎种子并称其质量，称量精度不低于 0.1 g，计算破碎种子质量占样本总质量的百分比，重复 5 次，取算术平均值。由于该排种器田间作业的驱动方式为电驱，在探究排种器工作过程是否存在卡顿现象采用间接方法测量，具体方法：首先将种箱始终保持装满种子状态，排种器处于工作状态，然后使用串口记录仪记录电机工作过程中的转速，如排种器在某时刻存在卡顿或堵塞现象，则此时刻电机转速为零；每次测量时间为连续 2 h，重复 3 次，再进行数据分析。根据仿真结果，在进行机械特性探究时，将排种器转速设置为 35 r/min（电机减速比为 100），试验装置如图 11 所示。

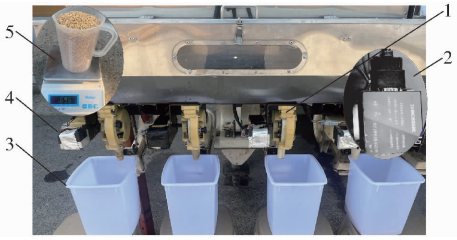


图 11　试验装置

Fig. 11　Test device

1. 排种器　2. 串口记录仪　3. 收纳装置　4. 驱动电机　5. 测量装置

通过称取试验后破碎种子质量，计算得破碎种子质量占样本总质量的 0.76%，即排种器破碎率为 0.76%，虽低于 0.8% 的国标要求，但破碎率仍较高，后期将从力学角度出发对排种器结构进行优化。排种器工作状态是否出现堵塞及卡顿现象，不能直接进行测量或者人为观察，通过间接方法进行判断，即通过驱动电机停顿来判别。通过串口记录仪记录电机实时工作转速，记录频率为 5 Hz，取 20 000 个数据进行分析，如图 12 所示。由图 12 可知，4 组电机在测试时间内转速基本保持在 3 450 ~ 3 550 r/min 范围内，转速无大范围波动或降至零时刻，表明排种器在测试期间无卡顿及堵塞现象。

4.3　田间试验

4.3.1　试验材料

为验证优化后参数的可靠性，选取优化后稻种球度，即选取龙稻 6 号为试验材料进行田间试验；为考察回归方程预测精度及排种器播种性能，选取台架试验所用 3 种球度外的稻种，即选用农垦 58 水稻种子进行田间试验。其中，农垦 58 种子长轴均值为 6.98 mm，短轴均值为 3.29 mm，厚度均值为 2.35 mm，千粒质量为 24.84 g，播种含水率为 23.63%，稻种球度为 54.14%。试验前先进行稻种清选，对水稻种子进行预处理，使水稻种子达到直播标准。

4.3.2　试验方法与指标

在进行准确性验证试验时，只需结合优化后参数及排种器结构参数来设置试验条件即可。当考察回归方程预测精度及排种器播种性能，需设置与优化后参数不同的试验条件。插秧机田间工作速度一般为 0.5 ~ 1.2 m/s，本次试验将车速控制 4 km/h。以全部评价指标作为试验指标。

4.3.3　试验装置

在国家精准农业研究示范基地试验场地（北京市昌平区小汤山镇）进行田间试验，试验装置如图 13 所示。配套动力为星月神高速乘坐式插秧机，每次试验连续统计机组匀速行驶 30 m 取样长度内

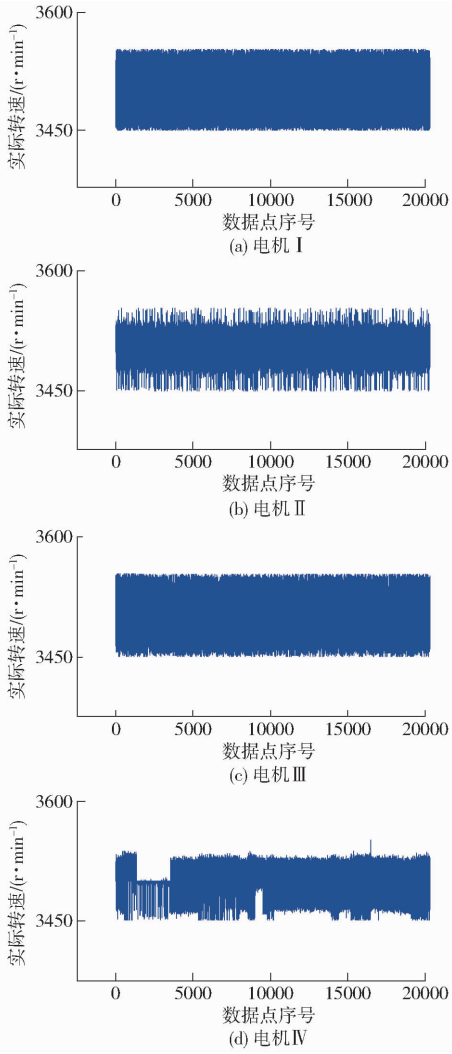


图 12　转速测试结果

Fig. 12　Speed test result



图 13　试验装置及播种效果

Fig. 13　Test device and seeding effect

各行每穴粒数、穴距及穴径。试验数据均依据 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试验方法》进行统计处理。

4.3.4　结果与分析

准确性试验结果如图 14 所示。由图 14 可知，排种器合格率、漏播率和重播率分别为 87.52%、5.76%、6.72%，试验结果与优化后的结果基本保持一致，验证了优化后参数的准确性。试验结果显示：穴径合格率 100%、平均穴径 3.71 cm、穴径变异系

数 18.76%、穴距变异系数 9.12%、平均穴粒数 11.02、穴粒数变异系数 18.56%，进一步验证了仿真试验的可行性。试验结果存在少许偏差主要归因于田间试验的机器抖动，而仿真及台架试验条件较为理想。

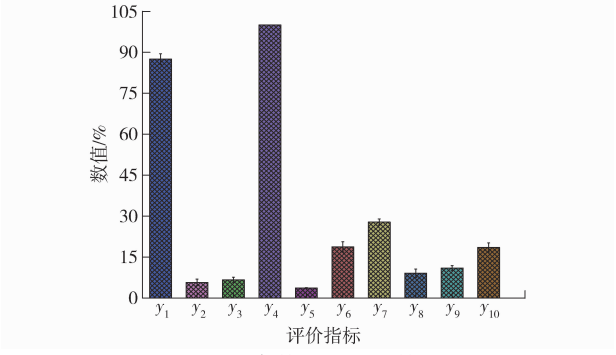


图 14 参数验证试验结果

Fig. 14 Parameter verification test results

预测精度及排种性能试验结果如图 15 所示。由图 15 可知，排种器在最优参数下：播种合格率为 88.31%，漏播率为 4.70%，重播率为 6.99%，试验结果与回归方程预测结果的误差小于 2%，验证了回归方程的正确性，可为后续开展试验奠定了基础。田间试验结果与台架试验预测结果存在一定的偏差主要原因为：田间试验的数据获取更为准确，高速摄影存在 2 粒稻种重合的概率，导致田间试验结果略高于台架。排种器田间试验显示：穴径合格率为 100%、平均穴径为 3.62 cm、穴径变异系数为 18.45%、平均穴距 22.98 cm、穴距变异系数 8.43%、平均穴粒数 11.08、穴粒数变异系数 17.56%。各项评价指标与仿真及台架试验结果趋势一致，且均满足水稻精量直播要求。

5 结论

(1)设计了一种双轨道弹射式水稻精量排种器，基于理论分析设计了强制投种机构、播量调节机构及双轨道等关键部件；利用 DEM－MBD 耦合仿真技术得到了弹簧力参数，确定了播量调节机构在不同条件下的精度均符合播种要求，能实现 2～13 粒不同稻种球度范围内的播量调节，通过性能仿真试验确定了最佳转速范围。

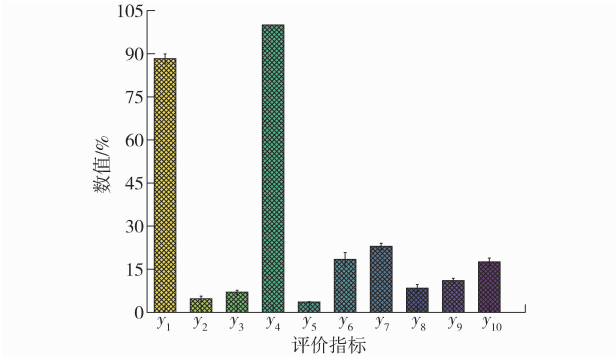


图 15 精度及排种性能试验结果

Fig. 15 Test results of precision and seeding performance

(2)基于仿真试验结果设计了响应面试验，并开展台架试验，研究转速、调节深度及稻种球度对排种器工作性能的影响。试验结果表明，当排种轮转速为 23.06 r/min、型孔深度为 8.99 mm、稻种球度为 52.7% 时，排种器的合格率为 88.58%、漏播率为 4.43%、重播率为 6.99%，排种器工作性能最佳。台架试验结果与仿真结果基本保持一致，排种性能随转速、调节深度及稻种球度的变化规律一致。

(3)田间试验结果表明：参数验证试验结果与优化后的结果保持一致，验证了仿真试验的可行性；精度及排种性能试验与回归方程预测结果的误差小于 2%，验证了回归方程的正确性；在最优参数下穴径合格率为 100%、平均穴径为 3.62 cm、穴径变异系数为 18.45%、平均穴距为 22.98 cm、穴距变异系数为 8.43%、平均穴粒数为 11.08、穴粒数变异系数为 17.56%，各项评价指标均满足水稻精量直播要求。

参 考 文 献

[1] 张国忠，臧英，罗锡文，等. 粳稻穴播排种器直线型搅种装置设计及排种精度试验[J]. 农业工程学报，2014，30(17)：1－9.
ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Line-churning tooth design and metering accuracy experiment of rice pneumatic precision hill-drop seed metering device on pregnant Japonica rice seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 1－9. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 臧英，邢赫，王在满，等. 水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2015，46(5)：33－38.
ZANG Ying, XING He, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of shield device on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 33－38. (in Chinese)

[4] 张明华. 水稻精量穴直播机的优化设计与试验[D]. 广州：华南农业大学，2017.
ZHANG Minghua. Optimal design and experimental research of precision rice hill-drop drilling machine[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[5] XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Mechanism modeling and experimental analysis of seed throwing with rice

pneumatic seed metering device with adjustable seeding rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105697.

[6] KUMAR V, LADHA J K. Direct seeding of rice: recent developments and future research needs[J]. Advances in Agronomy, 2011, 111: 297 - 413.

[7] KUMAR S, KUMAR S, KRISHNAN G S, et al. Molecular basis of genetic plasticity to varying environmental conditions on growing rice by dry/direct-sowing and exposure to drought stress: insights for DSR varietal development[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1013207.

[8] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 玉米姿控驱导式排种器导向投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 25 - 34.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of guiding seed throwing mechanism for maize posture control and driving metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 25 - 34. (in Chinese)

[9] 侯加林,马端旭,李慧,等. 气力离心组合式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 35 - 45.
HOU Jialin, MA Duanxu, LI Hui, et al. Design and experiment of pneumatic centrifugal combined precision seed metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 35 - 45. (in Chinese)

[10] 施彬彬,郑娟,王磊,等. 小粒径种子气力自适应排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 30 - 41.
SHI Binbin, ZHENG Juan, WANG Lei, et al. Design and experiment of pneumatic adaptive seeding system for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 30 - 41. (in Chinese)

[11] YOO S, CHOI Y, SUH S. Development of a precision seed metering device for direct seeding of rice[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2005, 30(5): 261 - 267.

[12] TIAN Liquan, XIONG Yongsen, DING Zhao, et al. Desing and performance test of direct seed metering device for rice hill[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2021, 64(2): 257 - 268.

[13] FU Wei, ZHANG Zhiyuan, ZANG Ying, et al. Development and experiment of rice hill-drop drilling machine for dry land based on proportional speed regulation[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4): 77 - 86.

[14] GAO X, XIE G, LI J, et al. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed-metering device for maize[J]. Biosystems Engineering, 2023, 227: 161 - 181.

[15] TANG Han, XU Changsu, WANG Ziming, et al. Optimized design, monitoring system development and experiment for a long-belt finger-clip precision corn seed metering device[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 814747.

[16] 张明华,王在满,罗锡文,等. 组合型孔排种器双充种室结构对充种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 8 - 15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Effect of double seed-filling chamber structure of combined type-hole metering device on filling properties[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 8 - 15. (in Chinese)

[17] 张顺,夏俊芳,周勇,等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器排种性能分析与田间试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 14 - 23.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Field experiment and seeding performance analysis of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 14 - 23. (in Chinese)

[18] 张顺,夏俊芳,周勇,等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 11 - 19.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 11 - 19. (in Chinese)

[19] 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 experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108 - 112. (in Chinese)

[20] 张明华,罗锡文,王在满,等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 29 - 36.
ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 29 - 36. (in Chinese)

[21] 罗锡文,王在满,蒋恩臣,等. 型孔轮式排种器弹性随动护种带装置设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 60 - 63.
LUO Xiwen, WANG Zaiman, JIANG Enchen, et al. Design of disassemble rubber guard device for cell wheel feed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 60 - 63. (in Chinese)

[22] 王冲,宋建农,王继承,等. 机械式排种器同步柔性皮带护种器的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 107 - 111.
WANG Chong, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Design of synchronization flexible belt protecting device for metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 107 - 111. (in Chinese)

[23] 王冲,宋建农,李永磊,等. 基于三维打印的型孔排种轮制造技术[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 108 - 111.
WANG Chong, SONG Jiannong, LI Yonglei, et al. Manufacture of type holes wheel based on three dimensional printing technology[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 108 - 111. (in Chinese)

[24] 王俊,陆秋君,竺锡雅,等. 水稻直播机专用播种器: CN1278595C[P]. 2006 - 10 - 11.

[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 experiment of helix grooved rice seeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 46 - 52. (in Chinese)

[26] 田立权,唐汉,王金武,等. 弹射式耳勺型水稻精量穴直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 65 - 72.

TIAN Liquan, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Design and experiment of rebound dipper hill-drop precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 65 - 72. (in Chinese)

[27] 朱德泉,李兰兰,文世昌,等. 滑片型孔轮式水稻精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 17 - 26.
ZHU Dequan, LI Lanlan, WEN Shichang, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of slide hole-wheel precision seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 17 - 26. (in Chinese)

[28] 张顺,李勇,王浩宇,等. U 型腔道式水稻精量穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 98 - 108.
ZHANG Shun, LI Yong, WANG Haoyu, et al. Design and experiment of U-shaped cavity type precision hill-drop seed-metering device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 98 - 108. (in Chinese)

[29] 刘俊,朱德泉,于从羊,等. 舀勺型孔轮式水稻精量排种器设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4): 739 - 752.
LIU Jun, ZHU Dequan, YU Congyang, et al. Design and experiment on scoop hole-wheel precision seed-metering device for rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(4): 739 - 752. (in Chinese)

[30] 戴亿政,罗锡文,张明华,等. 气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 1 - 8.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, ZHANG Minghua, et al. Design and experiments of the key components for centralized pneumatic rice dry direct seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 1 - 8. (in Chinese)

[31] LI Hanqing, YAN Bingxing, MENG Zhijun, et al. Study on influencing factors of hole-filling performance of rice precision direct seed-metering device with hole ejection[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 76 - 92.

[32] LI Hanqing, ZHAO Chunjiang, YAN Bingxing, et al. Design and verification of the variable capacity roller-wheel precision rice direct seed-metering device[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1798.

[33] 邢赫. 水稻播量可调气力式精量穴播机理与试验研究[D]. 广州:华南农业大学, 2019.
XING He. Mechanism and experimental study of pneumatic precision hilldrop technology with adjustable seeding rate of rice [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[34] 张喜瑞,王自强,李粤,等 滑切防缠式香蕉秸秆还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 26 - 34.
ZHANG Xirui, WANG Ziqiang, LI Yue, et al. Design and experiment of sliding-cutting and anti-twining returning device for banana straw[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3): 26 - 34. (in Chinese)

[35] 郭茜,张西良,徐云峰,等. 藤茎类秸秆专用切割刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 47 - 53.
GUO Qian, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Design and experiment of cutting blade for cane straw[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 47 - 53. (in Chinese)

[36] LAI Qinghui, SUN Kai, YU Qingxu, et al. Design and experiment of a six-row air-blowing centralized precision seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 111 - 122.

[37] WANG Baolong, NA Yi, PAN Yihong, et al. CFD simulation and experiments of pneumatic centralized cylinder metering device cavity and airflow distributor[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1775.

[38] 张智泓,赵亮亮,赖庆辉,等. 基于 DEM - MBD 耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 10 - 20.
ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 10 - 20. (in Chinese)

[39] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等.基于 DEM - MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J].农业机械学报,2022,53(3):91 - 104.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 91 - 104. (in Chinese)

[40] LI Hanqing, LING Lin, WEN Changkai, et al. Structural optimization method of rice precision direct seed-metering device based on multi-index orthogonal experimental[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14:1183624.

[41] 李兰兰. 滑片型孔轮式水稻精量穴播排种器设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学, 2019.
LI Lanlan. Design and experiment of slider-hole-wheel precision hill direct seed metering device for rice[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[42] 李兰兰,朱德泉,张顺,等.滑片型孔轮式水稻精量穴直播排种器设计与试验[J].浙江农业学报,2018,30(12):2153 - 2160.
LI Lanlan, ZHU Dequan, ZHANG Shun, et al. Design and experiment of slider-hole-wheel precision hill-direct-seeding metering device for rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(12): 2153 - 2160. (in Chinese)

[43] 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)

[44] 邢赫,臧英,曹晓曼,等. 水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 23 - 30.
XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23 - 30. (in Chinese)