



# 内充种式大豆排种器仿真和试验研究

李晓红<sup>1</sup>, 张汉山<sup>1</sup>, 屈哲<sup>2</sup>, 余永昌<sup>2</sup>

(1. 商丘工学院 机械工程学院, 河南 商丘 476000; 2. 河南农业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 为了实现大豆单粒精密排种, 从而节约种子用量, 使用 EDEM 软件设计内充种式大豆排种器, 针对 5 个黄淮海地区普遍种植的大豆品种, 对内充种式大豆排种器的性能进行仿真试验, 分析排种器工作转速对排种器的单粒率的影响, 并进行台架试验验证。结果显示: 仿真试验中排种器工作转速在  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时单粒率为  $90.81\% \sim 95.42\%$ 。台架验证试验中排种器工作转速对单粒率有明显影响, 排种器转速在  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 5 个品种大豆种子的单粒率为  $89.88\% \sim 94.13\%$ , 重播率为  $4.75\% \sim 9.61\%$ , 漏播率为  $0.12\% \sim 2.04\%$ , 试验值均符合排种器的工作性能行业标准。仿真结果与台架试验结果最大误差仅为  $4.39\%$ , 该仿真设计可以为排种器关键零部件的优化提供理论依据。

**关键词:** 大豆; 排种器; EDEM; 单粒; 内充种式; 台架试验

## Design and Experiment of Inside-filled Seed Metering Device for Soybean

LI Xiao-hong<sup>1</sup>, ZHANG Han-shan<sup>1</sup>, QU Zhe<sup>2</sup>, YU Yong-chang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to realize the purpose of saving seeds in the single-seed precision metering of soybean seeding, this research used EDEM software to take the simulation test on the inside-filled soybean seed-metering device for five soybean varieties commonly grown in the Huanghuaihai region of China. We analyzed the effect of seed-metering device working speed on the single-seed rate with simulation test and performed bench test. The result showed that the single-seed rate was  $90.81\% \sim 95.42\%$ , and the working speed of the seed metering had a significant effect on the single-seed rate. The working speed of the metering device was  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , all five types soybeans performed the single-seed rate, the single-seed rate, resowing rate and omission rate were respectively  $89.88\% \sim 94.13\%$ ,  $4.75\% \sim 9.61\%$  and  $0.12\% \sim 2.04\%$ . The test values were in line with the industry standards for the working performance of the seed metering device. The maximum error between the simulation results and the bench test results was only  $4.39\%$ , and the simulation design can provide a theoretical basis for the optimization of the key components of the seed metering device.

**Keywords:** Soybean; Seed metering device; EDEM; Single seed; Inside-filled; Bench test

大豆中营养成分种类全面且含量丰富, 其蛋白质含量是鸡蛋的 2.5 倍, 富含的不饱和脂肪酸易被人体消化吸收, 是一种理想的营养品<sup>[1-2]</sup>。世界粮农组织数据显示, 2018 年我国大豆收获面积达到  $236\text{ hm}^2$ , 总产量达到 1 419 万 t, 已成为我国重要的农作物之一<sup>[3]</sup>。随着中美贸易战的加剧, 粮食安全问题显得尤为重要, 提高农作物产量已成为重要的解决办法<sup>[4-5]</sup>。除了选育优良的品种外, 高效优质的机械化生产也是提高粮食产量的一条重要途径。播种是农业生产过程中的重要环节之一, 播种质量在一定程度上决定粮食产量<sup>[6]</sup>。排种器是播种机的核心, 同时也是直接影响播种质量的关键部件, 单粒精密排种不仅可以节省大豆种子还可以降低后期剔除的劳动强度<sup>[7]</sup>。因此, 研究一款性能较好的单粒精密排种器对于大豆粮食安全尤为重要。

目前关于排种器的研究主要分为两类。一类

是排种器的优化, 赵佳乐等<sup>[8]</sup>以漏播率作为测试指标优化排种器播种吸盘转速和气流运动速度的最佳组合参数; 刘艳芬等<sup>[9]</sup>对水平圆盘排种器的型孔参数和排种盘转速进行优化设计, 得到排种器的最佳性能的参数组合。赵瑞营等<sup>[10]</sup>采用离散单元法建立不同大小的玉米模型, 对窝眼轮式排种器进行了仿真模拟试验, 确定了排种综合指数为  $98.9\%$  的最佳组合, 此时排种轮转速为  $25\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 窝眼轮圆角半径为  $1\text{ mm}$ 。另一类关于排种器的研究集中于对排种器增加电控单元, 安雪等<sup>[11]</sup>利用单片机对窝眼轮式排种器进行控制, 结果显示重播指数不超过  $1.24\%$ , 株距变异系数不超过  $3.22\%$ 。

上述研究均可优化排种器的工作性能, 使播种质量显著提高。但上述研究中所使用的排种器均为外充种排种盘, 外充种排种盘在工作时对冲种装置要求较高, 护种装置若出现故障则会使种子提前

收稿日期: 2021-04-05

基金项目: 农业部公益性行业专项 (201303011-4)。

第一作者: 李晓红 (1985—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事农业装备智能控制技术研究。E-mail: 294697938@qq.com。

通讯作者: 余永昌 (1955—), 男, 学士, 教授, 主要从事农业装备与机器系统的研究。E-mail: hhyych@163.com。

落入种沟,从而造成播种质量的严重降低。排种器安装在播种机上工作时内部结构不便于被作业人员观察,所以护种装置的损伤不易被发现,这直接影响大豆的出苗质量,进而影响大豆的产量,而内充种式排种器可以有效降低种子损伤。所以,本研究设计一款内充种式排种器,旨在提高排种器工作质量、降低排种器在工作过程中由于种子损伤对播种质量造成的影响。

## 1 总体设计与工作原理

### 1.1 总体设计

内充种式垂直圆盘排种器主要由排种盘、轴、外壳、径向护种板、进种口等组成,排种器整体结构如图 1 所示。该排种器使用了复式型孔内侧充种的原理,有良好的充种性能,清种定量准确,投种均匀,能适应常速和高速作业。

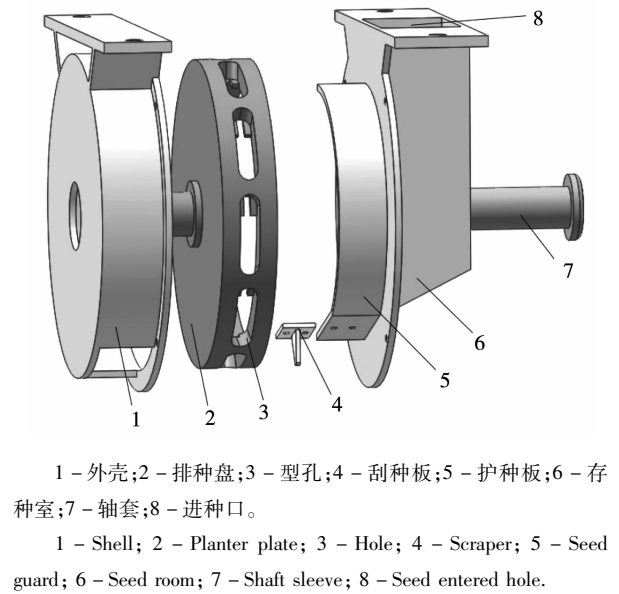


图 1 排种器整体结构图

Fig. 1 The overall structure of the seed metering device

### 1.2 工作原理

内充种式排种盘安装在排种器内腔,通过改变齿轮传动比将地轮的行进速度(转速)和动力传递给排种轴,再通过排种轴转速控制调节排种盘,排种盘每转 1 圈即完成 1 个排种周期,工作过程如图 2 所示。排种器的主要工作过程分为充种、清种、护种和排种 4 部分。种子从排种器的进种口倒入,依靠自重进入排种器的内腔。随着排种盘的转动,排种器内腔中的种子在离心力、重力和种子群互作的共同作用下,使靠近型孔的种子进入型孔外孔中,并逐渐进入到型孔的内孔中。型孔内孔中的种子在排种盘的转动作用下进入清种区,型孔内多余的种子在重力的作用下从型孔内掉落;此时型孔内保留的种子在护种板的保护下进入投种区,在重力和

离心力的作用下完成排种<sup>[12]</sup>。在排种过程中排种器转速过快时,刮种板会强制将种子排出。

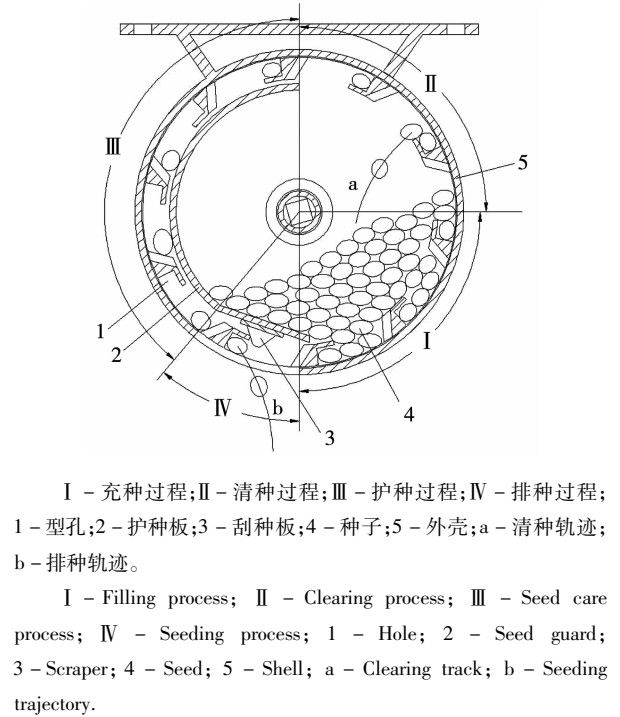


图 2 排种器工作过程图

Fig. 2 The working process diagram of seed metering device

### 1.3 排种盘设计

1.3.1 结构设计 排种盘是内充种式排种器核心部件,排种盘结构尺寸的合理设计和参数确定是提高播种质量的必要条件。型孔每次取种个数与型孔参数和种子大小有直接关系,其主要参数为型孔宽度(W)、有效长度(S)和深度(H)。通过倾斜圆盘式排种器充种试验可知,优选排种轮的型孔尺寸可提高种子的单粒率,并且由此确定排种盘和型孔总长(Q)、型孔长(M)、宽(P)和深度(H)。

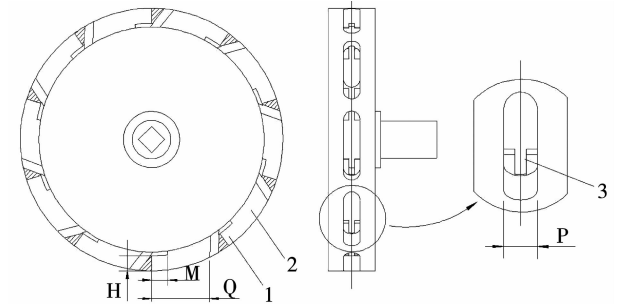


图 3 排种盘结构图

Fig. 3 The structure diagram of planter plate

1.3.2 型孔参数确定 为使排种盘有较好的排种性能,达到单粒精密排种的效果,确定排种盘型孔参数时选取黄淮海地区常用大豆品种商豆 1201、皖豆 35、中黄 13、邯豆 13 和菏豆 32 的物理参数为参考,确定排种盘的型孔参数,以实现该地区大豆的精密播种。随机选取 5 个品种大豆种子各 100 粒,实测百粒重分别为 24.61,19.01,22.53,29.71 和 26.60 g。使用数显电子游标卡尺(精度 0.01 mm)测量种子的长(L)、宽(W)、厚(T)。假定种子的形状为三维椭球,种子和 3 个坐标轴的截距即为其长、宽、厚,计算大豆的几何平均直径(D)和球形度(Φ), $D = (LWT)^{1/3}$ , $\Phi = (LWT)^{1/3}/L^{[13]}$ 。大豆均径的变异系数能够反映大豆直径的离散程度,计算公式为  $C(\%) = \frac{S}{M} \times 100$ ,式中,C 为几何平均直径变

异系数;S 为几何平均直径标准差;M 为几何平均直径。

供试 5 个大豆品种的种子形态如表 1 所示,5 个品种的长度(L)均值为 7.62~8.94 mm,其中长度最大的品种为中黄 13;宽度(W)均值为 7.18~7.43 mm,宽度最大值的品种为商豆 1201;厚度(T)均值为 5.87~6.29 mm,厚度最大值的品种为邯豆 13。几何平均直径范围是 6.85~7.34 mm,球形度范围为 0.82~0.90。考虑到排种器在工作过程中种子的滑动和摩擦,在尺寸设计过程中选择 5% 的尺寸余量,因此,选取型孔长度(M)为 11 mm,型孔宽度(P)为 9 mm,型孔深度(H)为 7.5 mm。该排种器的排种盘内半径(r)为 120 mm、外半径(R)为 140 mm。

表 1 不同品种大豆种子形态分析  
Table 1 The analysis of seed size of different soybean varieties

大豆品种 Soybean variety	长度 Length/mm	宽度 Width/mm	厚度 Thickness/mm	几何平均直径 Geometric mean diameter/mm	球形度 Sphericity/%	均径变异系数 Variable coefficient of mean diameter/%
商豆 1201 Shangdou 1201	8.55 ± 0.45	7.43 ± 0.28	6.29 ± 0.31	7.36 ± 0.29	0.86 ± 0.03	3.94
皖豆 35 Wandou 35	7.62 ± 0.35	7.18 ± 0.30	5.87 ± 0.30	6.85 ± 0.32	0.90 ± 0.00	4.67
中黄 13 Zhonghuang 13	8.94 ± 0.43	7.31 ± 0.27	5.99 ± 0.33	7.31 ± 0.26	0.82 ± 0.03	3.56
邯豆 13 Handou 13	8.46 ± 0.28	7.31 ± 0.23	6.27 ± 0.33	7.29 ± 0.22	0.86 ± 0.03	3.01
菏豆 32 Hedou 32	8.74 ± 0.40	7.37 ± 0.28	6.15 ± 0.28	7.34 ± 0.32	0.84 ± 0.01	4.36

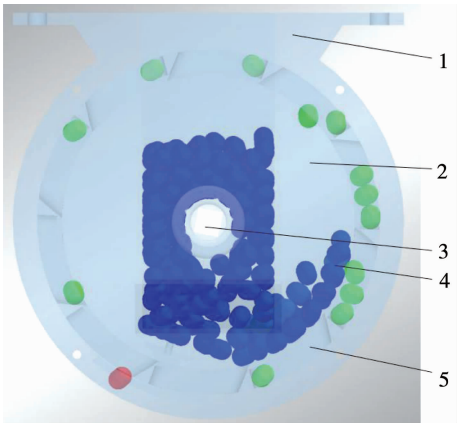
2 仿真模型的建立

2.1 排种器模型的建立

如图 4 所示,将排种器通过 SOLIDWORKS 三维建模后去除复杂结构的三维模型,并导入到 EDEM 2.6 中。

2.2 大豆种子模型的建立

将大豆物理特性参数测试结果中每个大豆品种的种子长度、宽度和厚度均值分别作为种子的三维建模参数,首先利用 SOLIDWORKS 软件根据实际大豆种子的三轴尺寸建立三维模型,再导入 EDEM 2.6 软件中。该研究主要针对 5 种不同品种的大豆种子进行仿真研究,采用多个球面填充至与种子模型外轮廓较为吻合(图 5)。



1 - 外壳;2 - 排种盘;3 - 排种轴;4 - 种子颗粒;5 - 型孔。  
1 - Shell; 2 - Planter plate; 3 - Seeding shaft; 4 - Seed particles; 5 - Die hole.

图 4 排种器仿真模型  
Fig. 4 The simulation model of seed metering device

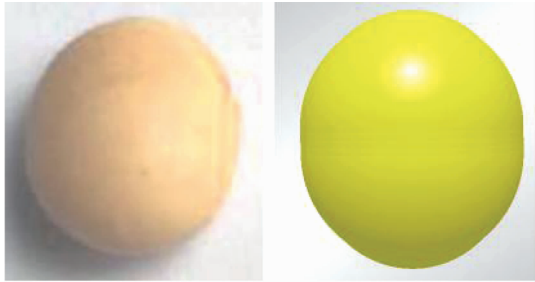


图 5 大豆种子实物与三维模型  
Fig. 5 The physical and three-dimensional model of soybean seed

2.3 仿真参数设置

在离散元仿真软件 EDEM 2.6 仿真计算时,设

表 2 仿真参数选取与设置

Table 2 The selection and setting of simulation parameters

材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
大豆种子 Soybean	泊松比	0.23
	剪切模量/Pa	$6.3 \times 10^7$
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1290.00
壳体 Shell	泊松比	0.50
	剪切模量/Pa	$3.5 \times 10^7$
	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1180.00
大豆-大豆 Soybean-Soybean	碰撞恢复系数	0.30
	静摩擦系数	0.39
	滚动摩擦系数	0.17
大豆-壳体 Soybean-Shell	碰撞恢复系数	0.47
	静摩擦系数	0.49
	滚动摩擦系数	0.15

3 仿真试验

3.1 试验设计

排种器的最佳性能为每个型孔内 1 粒大豆种子,排种器转速在一定程度上影响排种器的型孔充种<sup>[16-17]</sup>。因此,试验选取内充种式排种器的工作转速为影响因素,在软件 EDEM 2.6 中进行仿真试验。依据赵佳乐等<sup>[8]</sup>研究,结合大豆播种过程中的常见播种株距范围,设置排种器工作转速为 20、30 和 40  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,选取单粒率为评价指标。

3.2 结果与分析

在 EDEM 仿真试验过程中,出现了单粒、双粒和空穴 3 种现象,而单粒播种为合格情况,单粒率分析结果如图 6 所示,排种器工作转速在 30  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  时内充种式大豆排种器的单粒率高于工作转速为 20 和 40  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,此时 5 个品种大豆种子的单粒率为 90.81% ~ 95.42%。不同品种大豆种子在相同转速下单粒率有所差异。当转速为 20  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,皖豆 35 的单粒率显著小于其他 4 个品种,转速为 30 和 40  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  时不同品种的单粒率差异较小,

置颗粒与颗粒、颗粒与几何体的接触模型为 Hertz-Mindlin (no slip) built-in。设置的排种器材料为塑料,与实际所用的排种器材料一致。将模型各部分重新命名,并设置排种器的材料属性。大豆种子和塑料的泊松比、剪切模量和密度均为定值<sup>[14-15]</sup>,参数选取如表 2 所示。

设置颗粒工厂为动态生成方式,生成颗粒总数为 300 粒,产生速率为 5 000 个 $\cdot \text{s}^{-1}$ ,颗粒大小服从正态分布方式,参照不同品种大豆种子的物理特性(表 1)分析设置颗粒半径的标准差,设置模拟时长 10 s,离散元仿真过程中设置固定步长为  $4.63 \times 10^{-6} \text{ s}$ ,输出时间步长为 0.01 s,网格大小为 3 R min。

这可能是由于皖豆 35 的三维尺寸较小,排种轴在低速转动时的向心力相对较小,对于尺寸较小的大豆种子完成清种工作的难度增加。

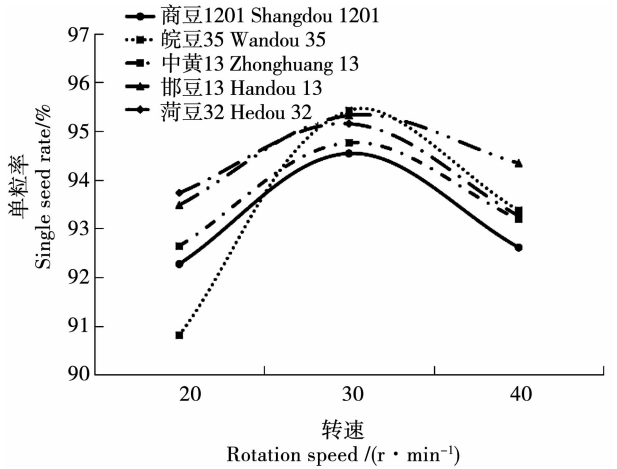


图 6 内充种式大豆排种器仿真过程中不同转速下单粒率分析

Fig. 6 The analysis of single seed rate in simulation test under different rotation speeds of inner-filled soybean seed metering device



## 4 台架验证试验

### 4.1 试验设计

为验证 EDEM 离散元仿真试验结果的可靠性及排种器工作性能,将排种器安装在河南农业大学机电工程学院大豆装备实验室的 STB-700 精密排种器性能工作试验台(中国农业大学研制),针对商豆 1201、皖豆 35、中黄 13、邯豆 13 和荷豆 32 大豆品种,以内充种式排种器的排种器工作转速为影响因素,将排种器工作转速分别设置为 20、30 和 40  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,选取单粒率、漏播指数和重播指数为评价指标进行台架性能试验(图 7)。使用 Excel 2019 对仿真试验结果进行统计分析。

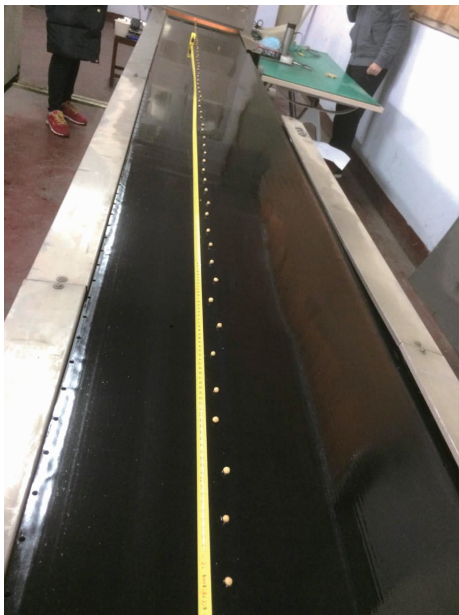


图 7 台架试验图  
Fig. 7 The bench test chart

### 4.2 结果与分析

排种器转速是影响种子填充性能的关键因素之一,较好的填充性能可以提高排种器的排种合格率,从而提高播种质量。对大豆种子在不同转速下的填充效果的分析结果如图 8A 所示,内充种排种过程中,相同的排种时间内,转速达到 30  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  之前 5 个品种大豆种子排种量随着排种转速的增大而增大,且单粒率也随之增大,转速为 30  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  时单粒率达到最高值、排种效果最好;转速继续增大后单粒率降低。随着排种器工作转速的增加,单粒率

先上升后下降,这可能是由于排种器工作转速增加时,排种轴的快速转动引起排种器整体结构的震动增加,从而影响充种过程的稳定性。

如图 8B 所示,20 ~ 30  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  下的重播指数显著小于 40  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。随着排种器转速的增加,型孔内的种子受到圆盘的离心力和惯性力作用,当转速为 20 ~ 30  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,种子受到重力向下的分力大于离心力,型孔内种子单粒的概率不会发生较大变化,故重播率变化较小;当转速大于 30  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,随着转速的增加,离心力逐渐增大,清种装置的工作效率受到影响,还没有完全清除多余的种子时已转动至下一个型孔,因此,排种器的双粒充种现象随着排种轴工作转速的增大而增加。

如图 8C 所示,转速在 30  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  时漏播率最低,显著小于 40 和 20  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,漏播指数在 3 个转速下均有显著差异。排种器内种子充足时,随着工作转速的增加,进入型孔内的种子量先增加后降低。在转速为 30  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  之前,随着转速的增大震动变大,进入型孔的种子量增加;转速过高时使种子群进入型孔内的时间过短,导致型孔内的种子量降低,引起空穴的概率升高,所以其漏播指数会随着排种盘转速的增加而先升高后降低。

对比排种器在不同工作转速下对不同品种大豆的排种效果,单粒指数最低(89.88%)、重播指数最大(9.61%)的情况均出现在转速为 40  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  时播种的商豆 1202,漏播指数最大(2.04%)的情况出现在转速为 20  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  时播种的皖豆 35。本研究中大豆种子播种过程中株距为 7 ~ 14 cm,根据中华人民共和国机械行业标准《NY/T 503-2015 单粒(精密)播种机作业质量》<sup>[18]</sup> 要求,种子粒距  $X \leq 20\text{ cm}$  时,重播指数  $\leq 30\%$ ,漏播指数  $\leq 15\%$ 。本研究的内充种式大豆排种器的排种性能符合单粒精密播种的行业标准。

将不同大豆品种和转速的 EDEM 仿真试验结果与同样设置下的台架试验结果进行对比,仿真试验结果与台架试验结果误差较小,最大误差仅为 4.39% (图 9)。产生误差的原因可能是由于在仿真过程中不存在试验台的震动,而实际的台架试验中由于排种轴转动过程中会产生震动,从而影响排种器的工作稳定性。

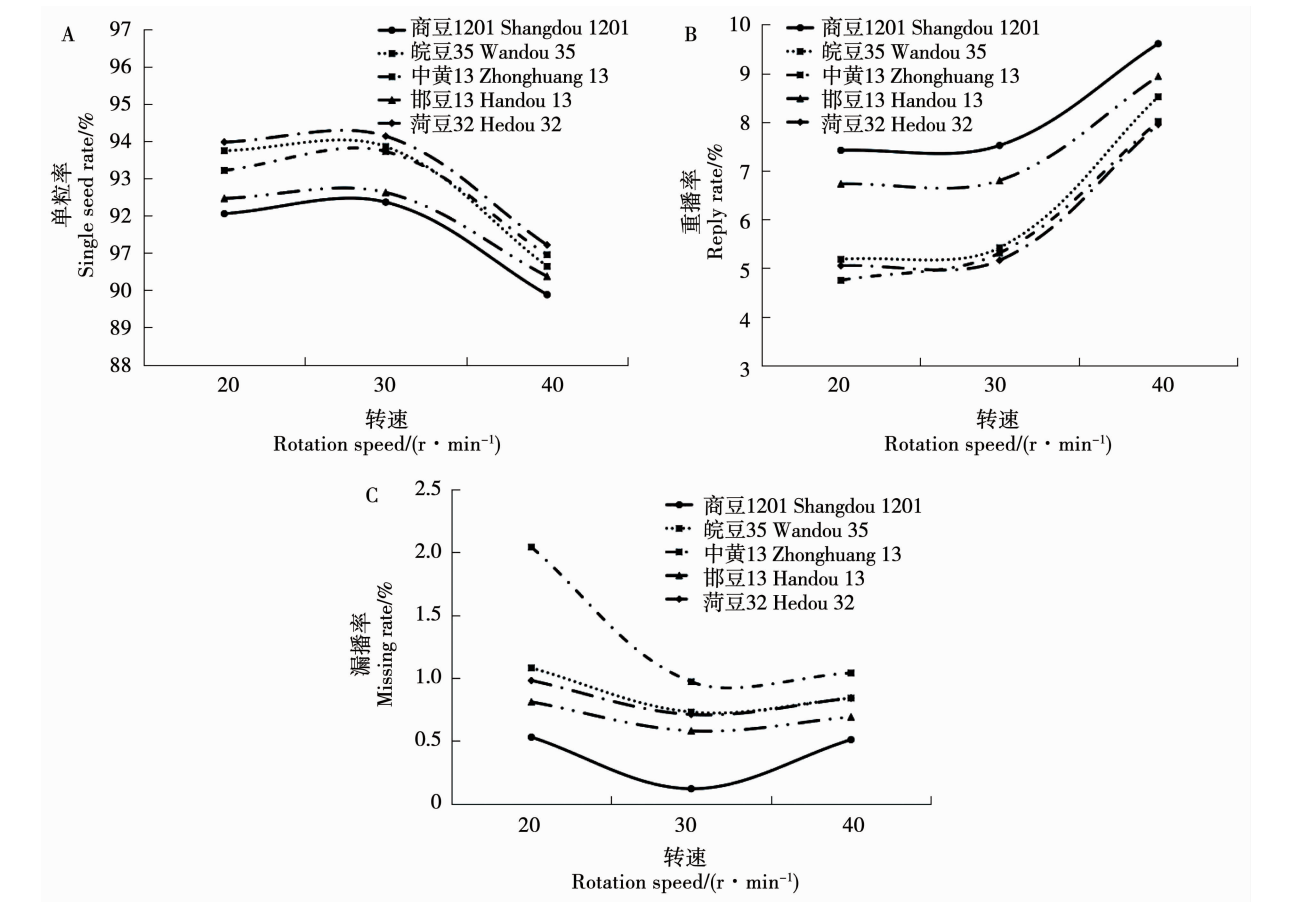


图8 不同转速下排种器性能变化分析

Fig. 8 The performance analysis of seed metering device under different rotating speeds

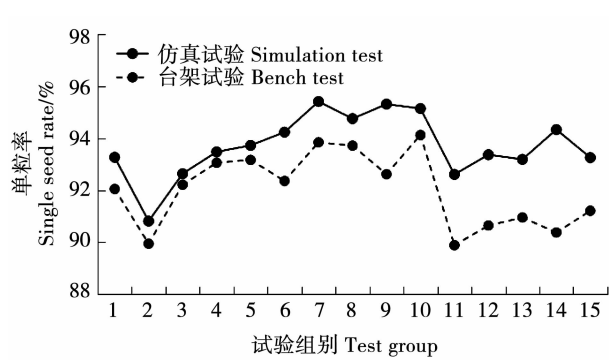


图9 仿真与台架试验结果对比图

Fig. 9 The comparison of simulation and bench test results

5 讨论

在 EDEM 仿真试验和台架验证试验过程中,出现了单粒、双粒和空穴 3 种现象,该排种器设计的初衷是实现大豆的单粒精密播种,但是在大豆种子的三维尺寸较小时,型孔内可能出现双粒种子的现象,这是由于在充种时两粒较小的大豆种子可以同时存在于型孔的种窝内,由于裸露在型孔种窝外的部分较小,其重心均位于型孔种窝内部,在清种过程中离心力不足以使多余的种子滑落,从而造成了

双粒充种现象;而空穴现象则可能是由于大豆种子尺寸较大,设计排种器型孔内的种窝尺寸时是结合大豆种子尺寸的正态分布中间较为集中区域,使得绝大多数种子可以在种窝内形成单粒充种现象,在实际应用中双粒充种率和空穴率在一定范围内是被允许的。

当型孔空间不足时,种子难以进入排种盘造成漏播,型孔空间过盈时会造成重播。因此排种盘在设计过程中不仅要保证型孔空间的尺寸,还要保证适当的隔板倾斜角度。倾斜角度过大,进入型孔内的种子过多,在清种过程中需要的时间会加长,易造成型孔进入护种过程时型孔内种子两粒以上;倾斜角度过小,排种盘型孔刚转过隔板时种子群进入型孔的时间太短,降低了排种盘型孔内的种子数量,进入型孔的种子较少或无种子,易造成漏播。因此,在设计该部分时考虑到了大豆种子的尺寸和空间排布。

6 结论

研究以内充种式大豆排种器为研究对象,测量了 5 种黄淮海地区常用大豆品种的形态参数,建立了大豆充种式排种器的仿真模型。EDEM 软件的仿

真分析结果显示,随着转速的增加,排种器的单粒率呈现先增大后降低的趋势;排种器的工作转速在 $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,排种器的单粒率较大。台架试验中排种器工作转速对排种性能有较大影响,最小单粒率为 $89.88\%$ ,最大重播率为 $9.61\%$ ,最大漏播率为 $2.04\%$ ,均符合排种器的工作性能行业标准。台架试验结果与仿真试验结果间的最大误差仅为 $4.39\%$ 。

参考文献

[1] 王金生,闫晓艳,吴俊江,等. 大豆营养高效利用型品种筛选[J]. 大豆科学, 2020, 39(5): 696-702. (Wang J S, Yan X Y, Wu J J, et al. Screening of soybean varieties with high nutritional efficiency[J]. Soybean Science, 2020, 39(5): 696-702.)

[2] 瓮巧云,黄新军,许翰林,等. 玉米/大豆间作模式对青贮玉米产量、品质及土壤营养、根际微生物的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(2): 462-470. (Weng Q Y, Huang X J, Xu H L, et al. Effects of corn/soybean intercropping model on yield, quality, soil nutrition and rhizosphere microorganisms of silage corn[J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2021, 35(2): 462-470.)

[3] 兰佳伟,王福林,宋莹莹. 种植模式对大豆农艺性状和产量的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(4): 564-570. (Lan J W, Wang F L, Song Y Y. Effects of planting patterns on agronomic traits and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2020, 39(4): 564-570.)

[4] 张晓伟,曹海峰,公衍峰,等. 2BM-4型大豆免耕精密播种机的研究设计[J]. 农机使用与维修, 2020(11): 15-17. (Zhang X W, Cao H F, Gong Y F, et al. Research on 2BM-4 soybean no-tillage precision planter[J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2020(11): 15-17.)

[5] 姚芹,张帅,王广通,等. 氨基化二氧化硅颗粒应用于大豆油DNA提取研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(12): 122-125. (Yao Q, Zhang S, Wang G T, et al. Application of amino-functionalized silica particles in DNA extraction of soybean oil[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(12): 122-125.)

[6] Parente E J, Marques J P C, Rios I C, et al. Production of biolubricants from soybean oil: Studies for an integrated process with the current biodiesel industry[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 165: 456-466.

[7] 毕世英,刘伟达,郭丽君. 大豆双行排种器的设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 120-126. (Bi S Y, Liu W D, Guo L J. Optimization design and test of soybean double row seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 120-126.)

[8] 赵佳乐,贾洪雷,姜鑫铭,等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 78-83. (Zhao J L, Jia H L, Jiang X M, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 78-83.)

[9] 刘艳芬,林静,李宝筏,等. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔

设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 37-46. (Liu Y F, Lin J, Li B F, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 37-46.)

[10] 赵瑞营,戴飞,赵武云,等. 基于离散单元法的高填充率窝眼轮式精密排种器排种仿真试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(1): 132-138. (Zhao R Y, Dai F, Zhao W Y, et al. Simulation test for nest-eye wheel precision metering device with high fill rate based on the discrete element method[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(1): 132-138.)

[11] 安雪,余泳昌,付广超,等. 电控窝眼轮式大豆排种器的设计与试验[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(6): 828-833. (An X, Yu Y C, Fu G C, et al. Design and tests of electronic socket-roller soybean seeding device[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(6): 828-833.)

[12] 陈海涛,王洪飞,王业成,等. 三叶式自动清换种大豆育种气吸排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报: 1-11[2020-12-19]. (Chen H T, Wang H F, Wang Y C, et al. Design and experiment of three-leaf type air-suction seed meter with automatic clear and replace see [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery: 1-11[2020-12-19].)

[13] 刘明国,曹磊. 花生基本物理特性试验研究[J]. 农业科技与装备, 2011(6): 70-73. (Liu M G, Cao L. Research on biological characteristics of peanut[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2011(6): 70-73.)

[14] 顿国强,杨永振,郭艳玲,等. 不同品种大豆种子充填特性的EDEM仿真分析[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(1): 93-98. (Dun G Q, Yang Y Z, Guo Y L, et al. Analysis of EDEM simulation of different soybean seed filling characteristics[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(1): 93-98.)

[15] 张涛,刘飞,赵满全,等. 大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 86-92. (Zhang T, Liu F, Zhao M Q, et al. Measurement of physical parameters of contact between soybean seed and seed metering device and discrete element simulation calibration[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 86-92.)

[16] 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 J, Cui T, Zhang D X, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43-47.)

[17] 谢伟,刘研. 窝眼轮式油菜排种器性能试验研究[J]. 当代农机, 2018(10): 67-69. (Xie W, Liu Y. Experimental study on the performance of the wheel-type rapeseed seeding device[J]. Contemporary Farm Machinery, 2018(10): 67-69.)

[18] 中华人民共和国农业行业标准: NY/T 503-2015 单粒(精密)播种机作业质量[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2015. (The People's Republic of China agricultural industry standard: NY/T 503-2015 Single-seed (precision) planter operating quality [S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2015.)