



## 摆盘式大豆育种排种器的设计及试验

顿国强<sup>1</sup>, 杨永振<sup>1</sup>, 丁禹程<sup>1</sup>, 叶金<sup>1</sup>, 于春玲<sup>1</sup>, 杜佳兴<sup>3</sup>, 高志勇<sup>2</sup>, 时昕昱<sup>1</sup>

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学 工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3. 黑龙江省农业科学院 佳木斯分院, 黑龙江 佳木斯 154007)

**摘要:**为提高摆盘式大豆小区育种排种器的作业效率,通过理论分析的方法,对排种盘直径、型孔直径以及排种盘摆动频率进行理论分析,得到最佳的参数范围。将曲柄摇杆机构的急回特性用于排种器的设计中,利用 EDEM 仿真试验的方法,验证排种器的排种性能,根据理论研究得到的参数,制造样机并进行台架试验。结果表明:样机台架试验的合格率的平均值为 83.04%,重播指数的平均值为 2.26%,漏播指数的平均值为 14.7%,符合《中耕作物精密播种机产品质量分等》要求。排种器的设计中利用曲柄摇杆机构的急回特性,使摆动速度快时进行排种,摆动速度慢时进行充种,既保证了排种工作的稳定性又提高了排种器的作业效率。

**关键词:**大豆;EDEM;急回特性;排种器;台架试验

## Design and Test of the Swing Seed Plate Feed for Soybean Breeding

DUN Guo-qiang<sup>1</sup>, YANG Yong-zhen<sup>1</sup>, DING Yu-cheng<sup>1</sup>, YE Jin<sup>1</sup>, YU Chun-ling<sup>1</sup>, DU Jia-xing<sup>3</sup>, GAO Zhi-yong<sup>2</sup>, SHI Xin-yu<sup>1</sup>

(1. College of Mechtronic Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154007, China)

**Abstract:** In order to improve the operation efficiency of the swing seed plate feed for field plot experiment, the theoretical analysis method is used to analyze the diameter of the seed tray. It obtained the diameter of the hole, the swing frequency of the seeding disc, and the optimal parameter range. The quick return characteristics of the crank rocker mechanism were used in the design of the seed metering device. The EDEM simulation test method was used to verify the seeding performance of the seed metering device. The parameters were obtained by theoretical research, manufacturing prototypes and bench tests. The results showed that the average yield of the prototype bench test was 83.04%, the average value of the replay index was 2.26%, and the average value of the missed broadcast index was 14.7%. The results met the requirements of 'Quality classification of medium tillage crop precision seeder'. In the design of the seed metering device, the quick return characteristic of the crank rocker mechanism was adopted, so that the seeding speed was fast when the seeding was performed. When the swinging speed was slow, the seeding was performed, thereby the stability of the seeding work was ensured and the operation effectiveness of the seed metering device was improved.

**Keywords:** Soybean; EDEM; Quick-return characteristics; Seed metering device; Bench test

小区育种试验是播种时区域试验中最重要的环节,并且是国家审定新品种的依据,播种的质量直接关系到试验方案的实施<sup>[1-4]</sup>。小区育种试验中种子种类繁多,且播种时需要保证小区之间不混种<sup>[5-6]</sup>。国内外广泛应用的精量排种器主要分为两大类:一是机械式精密排种器,主要有窝眼轮式、水平圆盘式、倾斜圆盘式和指夹式等;二是气力式精量排种器,主要有气吹式、气吸式和气压式<sup>[7-9]</sup>。机械式排种器以其结构简单、制造成本低被广泛使用。气力式排种器制造成本较高,且国内技术尚不完善,难以满足小区育种研究的需求。

目前我国的小区育种试验,完全依赖人工播种的方式,效率低且成本高,因此研制一种能够快速换种的排种器尤为重要。陈海涛等<sup>[9]</sup>研制的排种

盘往复摆动式育种排种器,利用曲柄摇杆机构实现排种盘的往复摆动的方式设计排种器,同时排种盘圆周边缘不同位置设置不同尺寸的型孔,根据种子的尺寸选择适当的型孔大小,来满足不同品种种子的播种,并未对往复式排种器的原理以及排种性能进行深入的研究。但其采用侧充式的充种方式,充种效果并不理想,不便于清种,并且排种盘上的型孔适应范围有限,因此需要对排种器的型孔结构以及箱体清种结构进行进一步优化。

本文运用理论分析和离散元仿真的方法,根据大豆东农 52 的种子属性设定排种器参数,对上述排种器进行优化设计,设计了一种新型摆盘式排种器,采用内充式排种盘设计,并且将曲柄摇杆机构的急回特性运用到排种器的设计当中,提高了排种

收稿日期:2019-03-28

基金项目:中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项(41113278);科技部国家科技支撑计划(2014BAD11B01-A02);中央高校基本科研业务费专项(2572017BB10);东北林业大学大学生省级创新训练计划(20190225066)。

第一作者简介:顿国强(1986-),男,博士,讲师,硕导,主要从事农业及林业机械装备研究。E-mail: dunguoqiang1986@163.com。

器的充种能力和充种效率,旨在提高摆盘式大豆小区育种排种器的作业效率,满足试验需求。

1 排种器的结构和工作原理

1.1 主要结构

摆盘式排种器主要由箱体、清种板、曲柄、连杆、排种盘、可拆换型孔和箱体盖等组成,其整体结构如图1所示。其中曲柄、连杆和排种盘组成的摆盘装置是排种器核心工作部件,其间的设计配合直接影响排种器的作业质量。排种盘通过轴承与箱体转动配合在一起,上部铰接连杆,连杆与曲柄铰接,至此构成曲柄摇杆机构;可拆换型孔与排种盘下部凹槽插装配合在一起;箱体下部与清种板铰接,可满足清种板通过铰点转动;箱体盖与箱体固装,同时曲柄与箱体上的轴承圆周配合装配在一起。

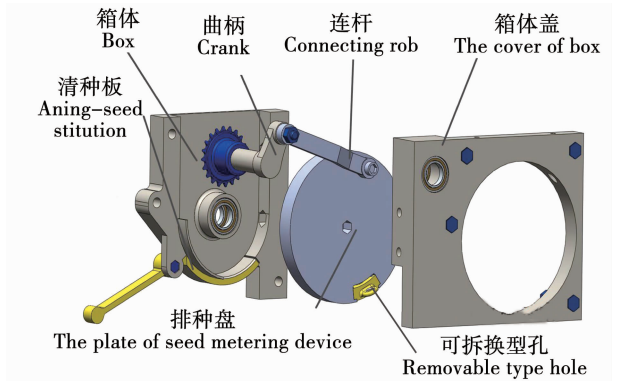


图1 结构示意图  
Fig.1 Structural representation

1.2 工作原理

排种过程主要分为充种、清种和排种3个过程,如图2所示。充种过程中,排种盘的等效摇杆自D摆到C,曲柄自B转到A,转过的角度为 $\alpha_1$ ,需要的时间 $t_1 = \alpha_1/\omega$ ;排种过程中,排种盘的等效摇杆自C摆到D,曲柄自A转到B,转过的角度为 $\alpha_2$ ,需要的

时间 $t_2 = \alpha_2/\omega$ 。因为摆杆的摆动角度为 $\varphi$ ,所以充种时排种盘的摆动角速度 $\omega_1 = CD/t_1$ ,排种时排种盘的摆动角速度 $\omega_2 = CD/t_2$ 。因为 $\alpha_1 > \alpha_2$ ,所以 $t_2 < t_1$ ,可以推导出 $\omega_2 > \omega_1$ ,即排种时排种盘的角速度大于充种时排种盘的角速度。为了提高充种性能,适当增加充种行程使得 $\beta_1 > \beta_2$ ,排种盘排种时间短,充种时间长,提高了排种器的工作效率。

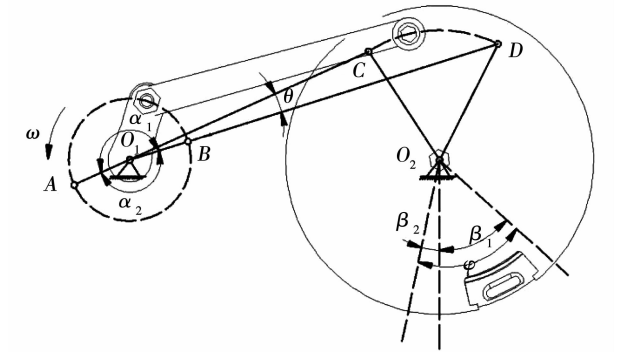


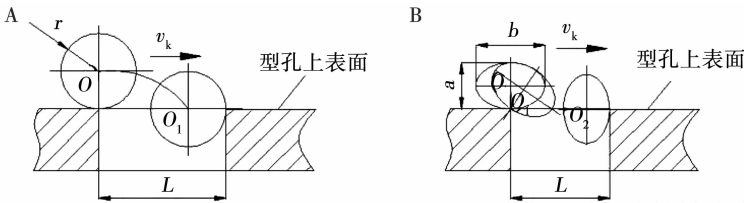
图2 工作原理图  
Fig.2 Schematic diagram

当播完1个小区时,拨动清种板,箱体中的种子会在重力作用下排出,将清种板回正,换入下一个品种的种子,切换对应的可拆换型孔,进行下一次播种工作。

2 排种器参数的确定

2.1 排种器型孔尺寸的设计

根据郭辽契金研究的谷物通过筛孔时的极限相对速度概念,可知种子是否落入型孔与种子在排种盘表面的运动状态有关<sup>[10-14]</sup>。假设大豆种子为正球体理想种子模型,当种子在型孔上方运动过程中,其重心O降至低于型孔上表面时,才能保证进入型孔(图3a)。



A:正球体理想种子模型;B:以短轴为旋转轴滚动的椭圆柱模型; $r$ :正球体理想种子的半径,mm; $v_k$ :种子与排种盘的相对运动速度, $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $L$ :型孔的直径,mm; $a$ :椭圆柱种子的短轴长,mm; $b$ :椭圆柱种子的长轴长,mm。  
A:Ideal seed model of the positive sphere; B:Ellipsoid model with short axis rolling;  $r$ :The radius of the ideal seed of a positive sphere, mm;  $v_k$ :The speed of relative movement between seeds and seed platters,  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $L$ :Diameter of the hole, mm;  $a$ :Short axis length of ellipsoidal seeds, mm;  $b$ :Long axis length of ellipsoidal seed, mm.

图3 排种盘充种模型  
Fig.3 The model of filling plate

当半径为  $r$  的谷物通过长度为  $L$  的型孔时,其质量中心经过下述距离:

水平方向:  $L - r = v_k t$  (1)

竖直方向:  $r = \frac{1}{2} g t^2$  (2)

两式消去时间  $t$ , 可得:

$$v_k = (L - r) \sqrt{\frac{g}{2r}} \tag{3}$$

式中,  $g$ :重力加速度作用于种子的重心,始终竖直向下,  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

根据式(3)可知,若想成功的充种,种子与型孔的相对运动速度必须小于  $v_k$ ,近似成排种盘速度。

实际的大豆种子形状为不规则的椭球体,大豆种子以一定的相对速度进入型孔,当种子质心与型孔边缘重合时,受重力影响会产生一个旋转力矩,种子出现倾斜现象,当种子倾斜的角度大于摩擦角时会落入型孔,同时做旋转运动。而最有利于种子囊入型孔的状态则是种子以短轴为旋转轴进入型孔(图 3b)。

郭辽契金公式:  $L_{\min} = 2r + \Delta$  (4)

完成充种的最小型孔直径和极限相对速度为:

$$L_{\min} = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} + \Delta \tag{5}$$

$$v_k \leq \left( \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} + \Delta \right) \sqrt{\frac{g}{a}} \tag{6}$$

式中,  $L_{\min}$ :最小型孔直径, mm;  $v_k$ :极限相对速度,  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta$ :种子与型孔的间隙, mm。

根据刘艳芬等<sup>[15]</sup>种子与型孔的间隙  $\Delta$ ,取大豆均径的 40% ~ 80%。以东农 52 为例,经测量的东农 52 的均径 6.69 mm(长 7.00 mm,宽 6.82 mm,厚 6.24 mm),可以求出  $\Delta$  取值为 2.68 ~ 5.35 mm。

为简化计算,取种子宽、厚相等(长 7.00 mm,宽 6.52 mm,厚 6.52 mm),可求出最小型孔直径:  $L_{\min} = 4.78 + \Delta$ ,取值为 7.46 ~ 10.13 mm;相对运动速度:  $v_k \leq (4.78 + \Delta) \times 38.77$ ,即  $v_k \leq 392.74 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 排种器的摆动频率

根据大豆小区育种的特点,播种机的作业速度为  $0.3 \sim 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,理论株距为 80 ~ 120 mm,取播种速度  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,可求得排种盘在无急回特性时的摆动频率取值约为 3 ~ 5 Hz。

2.3 排种盘直径的设计

当角速度取定值,排种盘的直径越大,其线速度越大,取排种盘的摆动角度为  $60^\circ$ ,当摆盘往复一

次时,等于整周转动排种盘的 1/3,根据几何关系可求得排种盘半径、线速度和频率之间的关系:

$$T = \frac{1}{f} \tag{7}$$

$$v = \frac{2\pi r}{3T} \tag{8}$$

式(7)、(8)联立可得:

$$v = \frac{2\pi r f}{3} \tag{9}$$

式中  $v$ :线速度,  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $r$ :排种盘半径, mm;  $T$ :摆动周期, s;  $f$ :摆动频率, Hz。

根据式(9)求得:

$$r = \frac{3v}{2\pi f} \tag{10}$$

结合上述分析,将速度与频率相应取值代入式(10)可以求得排种盘半径取值范围:37.52 ~ 62.53 mm,直径取值范围:75.04 ~ 125.06 mm<sup>[16-17]</sup>。

3 离散元仿真

利用 EDEM 软件对摆盘式小区育种排种器进行虚拟仿真,根据上述理论分析得到的排种盘参数范围,分别取型孔直径为 8 mm,排种盘直径为 100 mm,利用 Solidworks 建立排种器的三维模型,去除其复杂结构,并导入到 EDEM 中,设置对应的材料和排种盘摆动所对应的频率,并且保证排种器上的型孔与种子的相对线速度  $v_k \leq 392.74 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.1 材料属性参数设置

利用球面堆积法建立大豆模型,以东农 52 为例,设定大豆种子粒径 6.69 mm(长 7.00 mm,宽 6.82 mm,厚 6.24 mm),颗粒类型为正态分布(图 4)。选取无滑动接触的 Hertz-Mindin (no slip) 模型作为颗粒与颗粒之间、颗粒与几何体之间的接触模型<sup>[18-23]</sup>,参数设置如表 1 所示。

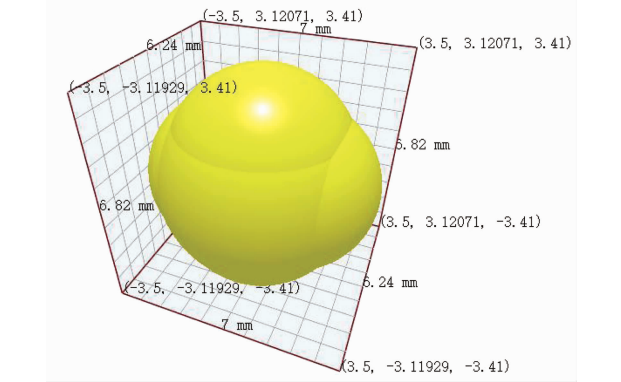


图 4 大豆种子模型  
Fig. 4 The model of soybean seed

表 1 材料力学参数

Table 1 Material mechanics parameter		
材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
大豆种子 Soybean seed	泊松比 Poisson's ratio	0.23
	剪切模量 Shear modulus/MPa	63.00
	密度 Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	1290.00
钢壁面 Steel wall	泊松比 Poisson's ratio	0.30
	剪切模量 Shear modulus/MPa	70000.00
	密度 Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	7800.00
颗粒-颗粒 Partical-partical	碰撞恢复系数 Coefficient of restitution	0.30
	最大静摩擦系数 Coefficient of static friction	0.39
	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.17
大豆-钢 Seed-steel	碰撞恢复系数 Coefficient of restitution	0.52
	最大静摩擦系数 Coefficient of static friction	0.15
	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.09

3.2 模型运动参数的设置

根据式(10)可求得排种盘取 100 mm,频率 3 ~ 5 Hz 时,型孔相对于种子的线速度的取值范围为: 314 ~ 523.3 mm·s<sup>-1</sup>。根据上述理论推导  $v_k \leq 392.74 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,所以排种盘型孔与种子的相对速度最小值时,满足充种条件,若排种盘型孔与种子相对速度取最大值时,不满足充种条件。将曲柄摇杆机构的急回特性用于排种器的设计中,使其充种时排种盘型孔与种子的相对速度取 314 mm·s<sup>-1</sup>,便于种子进入型孔,排种时排种盘型孔与种子的相对运动速度为 523.3 mm·s<sup>-1</sup>,加快种子排出的速度,从而提高了排种器的工作效率。将排种器模型导入 EDEM 中,逐一设置排种盘充种与排种行程时的转速,充种时为 3 Hz,排种时为 5 Hz,同时为增加充

种行程,令  $\beta_1 = 45^\circ, \beta_2 = 15^\circ$ 。在仿真过程中,设置固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 18%<sup>[24]</sup>,仿真时长为 10 s,数据保存时间为每 0.05 s 迭代保存 1 次。网格尺寸设置为最小颗粒半径的 2.5 倍,仿真过程截图如图 5 所示。

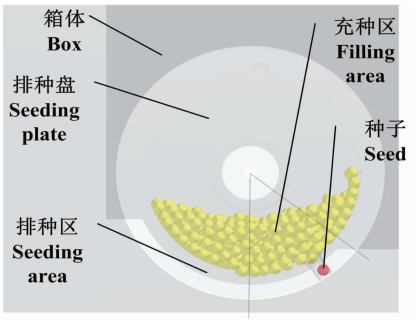


图 5 仿真过程

Fig. 5 The process of simulation

3.3 仿真结果

重复 10 次仿真试验,对仿真时间内充种、排种状态进行统计,得到合格指数均值为 84.35%、重播指数均值为 0,漏播指数为 15.65% (表 2)。

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results			
序号 Number	合格指数 Qualified index/%	重播指数 Over-seeding index/%	漏播指数 Miss-seeding index/%
1	86.50	0	13.50
2	82.50	0	17.50
3	85.00	0	15.00
4	87.50	0	12.50
5	86.00	0	14.00
6	84.00	0	16.00
7	85.00	0	15.00
8	81.00	0	19.00
9	84.00	0	16.00
10	82.00	0	18.00
平均值 Mean	84.35	0	15.65

4 样机试制与台架试验

4.1 曲柄摇杆机构的设计与样机试制

根据上述分析,排种盘充种频率 3 Hz,排种频率 5 Hz,排种盘半径 50 mm (摇杆长度),根据行程速比系数  $\frac{5}{3} = K = \frac{180^\circ + \theta}{180^\circ - \theta}$ ,得极位夹角  $\theta = 45^\circ$ ,摇杆摆角  $60^\circ$ ,由图解法设计该四杆机构,如图 6 所示。



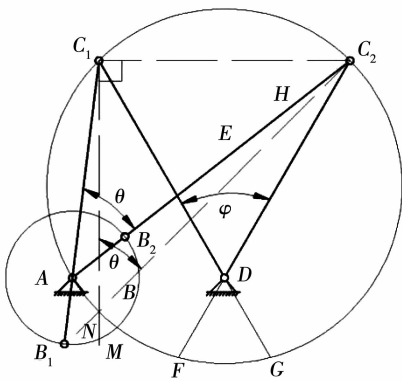


图 6 曲柄摇杆机构的设计  
Fig. 6 The design of crank and rocker mechanism

选固定点 D 的位置,作出摇杆两极限位置  $C_1D$  和  $C_2D$ ,其夹角为  $\varphi$ ,确定  $C_1$  和  $C_2$  两点;连接  $C_1C_2$ ,作  $\angle C_1C_2N = 90^\circ - \theta$ ,  $C_1M \perp C_1C_2$ ,得交点 P,则  $\angle C_1PC_2 = \theta$ ;作  $\triangle C_1C_2P$  的外接圆,在外接圆弧  $C_1F$  或  $C_2G$  上任取一点 A 为固定铰,曲柄固定铰链点 A 不能选在 FG 弧段上,否则机构不满足运动连续性要求;连接  $AC_1$ 、 $AC_2$ ,则  $AC_1$ 、 $AC_2$  分别为曲柄与连杆伸直共线和重叠共线位置,即  $AC_2 = AB + BC$ ,  $AC_1 = BC - AB$ ;由上式可以求得  $AB = (AC_2 - AC_1)/2$ ,  $BC = AC_2 - AB$ ;以 A 为圆心,以  $AC_1$  为半径画弧交  $AC_2$  于 E,再作  $C_2E$  线段的垂直中分线求得 H 点,以 A 为圆心,以  $HC_2$  为半径画圆,交  $AC_1$  延长线于  $B_1$ ,  $AC_2$  于  $B_2$ ,则  $B_1B_2$  即为活动铰接点的位置。通过测量法求得曲柄长度  $AB = 13.29\text{ mm}$ ,连杆长度  $BC = 57\text{ mm}$ ,摇杆长度  $CD = 50\text{ mm}$ ,机架长度  $AD = 30.29\text{ mm}$ 。根据已求得的尺寸参数加工样机。

4.2 台架试验

4.2.1 试验设计 为验证仿真试验的准确性,于 2019 年 3 月 24 日在东北农业大学进行台架验证试验,根据仿真试验中排种器的尺寸参数,利用 3D 打印技术加工 JPS-12 排种器样机,以东农 52 为试验材料,将加工的摆盘式排种器固定在安装架上,粘种油液压系统将粘种油从油箱压到种床带上,以便增加种子的附着性(图 7)。试验重复 10 次,每次测定种子不少于 500 粒。

4.2.2 测定项目与方法 试验通过落在种带上的种子粒距来考察排种器的排种性能。 $D_b$  为理论粒距, $D_s$  为实测粒距,当  $0.5D_b < D_s \leq 1.5D_b$  时,为合格; $D_s \leq 0.5D_b$  时,为重播; $D_s > 1.5D_b$  时,为漏播。

根据大豆播种要求,以排种合格指数  $A(\%)$ 、重播指数  $D(\%)$ 、漏播指数  $M(\%)$  作为试验指标。试验根据 GB/T 6973-2005《单粒(精密)播种机试验方

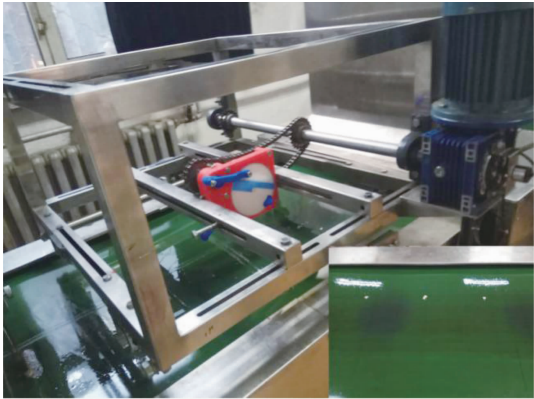


图 7 台架试验  
Fig. 7 Bench test

法》<sup>[25]</sup> 的要求进行。 $A$ 、 $D$ 、 $M$  的计算公式如下:

$$A(\%) = \frac{n_1}{N} \times 100 \tag{11}$$

$$D(\%) = \frac{n_2}{N} \times 100 \tag{12}$$

$$M(\%) = \frac{n_0}{N} \times 100 \tag{13}$$

式中, $N$ :试验测定的种子数目; $n_1$ :试验测定区间内的合格种子数目; $n_2$ :试验测定区间内的重播种子数目; $n_0$ :试验测定区间内的漏播种子数目。

4.2.3 结果与分析 由表 3 可知,排种器播种的合格指数平均值 83.04%,重播指数平均值 2.26%,漏播指数平均值 14.70%,该验证结果符合 JB/T 51017-1999《中耕作物精密播种机产品质量分等》<sup>[26]</sup> 合格品的要求。

表 3 台架试验结果  
Table 3 The results of bench test

序号 Number	合格指数 Qualified index/%	重播指数 Over-seeding index/%	漏播指数 Miss-seeding index/%
1	82.40	2.40	15.20
2	79.60	2.00	18.40
3	84.20	1.40	14.40
4	81.80	1.80	16.40
5	83.40	2.20	14.40
6	85.40	1.40	13.20
7	85.20	2.20	12.60
8	86.00	2.80	11.20
9	80.20	3.40	16.40
10	82.20	3.00	14.80
平均值 Mean	83.04	2.26	14.70

5 讨论

本试验主要针对摆盘式大豆育种排种器进行改进,相比于原有摆盘式排种器,该排种器采用内充式的排种盘,提高了排种性能,且型孔可以更换,能够根据播种需要更换任意大小的型孔,同时排种器的箱体下部设置清种板,能够将已播品种的种子从种箱中清除,防止小区之间的混种。该排种器比原有排种器适应性更广,排种性能更好,且能自动清种。

根据理论分析,由于排种盘转动的角速度为定值时,排种盘直径越大型孔的线速度越大,所以排种盘型孔越小,越有利于充种,考虑到机架大小取仿真时的排种盘直径为 100 mm,型孔直径为 8 mm,设置排种盘型孔的摆角为 60°,且设置排种盘充种时的摆动频率为 3 Hz,排种时的摆动频率为 5 Hz,使其与曲柄摇杆机构的急回特性相符合。

6 结论

利用曲柄摇杆的急回特性,设计了一种摆盘式排种器,阐述了其工作原理,通过理论分析确定了排种器的型孔直径为 8 mm,排种盘直径为 100 mm,并对试验模型进行离散元仿真。仿真试验中合格指数均值 84.35%,重播指数均值为 0,漏播指数均值为 15.65%。

按照理论分析的数据加工样机并进行台架试验,结果表明以曲柄 AB = 13.29 mm、连杆 BC = 57 mm、摇杆(排种盘半径)CD = 50 mm、机架 AD = 30.29 mm、型孔直径为 8 mm。台架试验的合格指数平均值 83.04%,重播指数平均值 2.26%,漏播指数平均值 14.70%,达到 JB/T 51017-1999《中耕作物精密播种机产品质量分等》<sup>[26]</sup>合格品的标准。说明本研究设计的新型摆盘式排种器在运用曲柄摇杆急回特性提高排种效率提高稳定性的同时,排种合格指数较高,几乎没有重播,漏播率较低,排种性能指标满足小区育种试验播种要求。

参考文献

[1] 王琛,刘扬,段俊兆,等. 育种试验小区播种机排种器性能及应用分析[J]. 农业机械, 2012(28): 124-126. (Wang C, Liu Y, Duan J Z, et al. Performance and application analysis of seed-er arrangement in breeding test plot[J]. Farm Machinery, 2012 (28): 124-126. )

[2] 刘曙光,尚书旗,杨然兵,等. 小区播种机的发展分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(3): 237-241. (Liu S G, Shang S Q, Yang R B, et al. Analysis of plot seeder development[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33 ( 3 ):

237-241. )

[3] 宋江腾,张淑敏. 小区播种机的研究现状及发展方向[J]. 农机化研究, 2004(4): 14-16. ( Song J T, Zhang S M. Current situation and development orientation of plot seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(4): 14-16. )

[4] 杨薇,王飞,赫志飞,等. 小区育种机械发展现状及展望[J]. 农业工程, 2014, 4(6): 7-9, 56. ( Yang W, Wang F, He Z F, et al. Development present situation and prospect of plot breeding machinery [ J ]. Agricultural Engineering, 2014, 4 ( 6 ): 7-9, 56. )

[5] 周家鹏,王延耀. 小区播种机净种系统的研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 109-113. ( Zhou J P, Wang Y Y. Plot seed-er seed-clearing system research [ J ]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(10): 109-113. )

[6] 常建国,刘兴博,叶彤,等. 农业小区田间育种试验机械的现状 & 发展[J]. 农机化研究, 2011, 33(2): 238-241. ( Chang J G, Liu X B, Ye T, et al. Agricultural plot field trial breeding status and development of machinery [ J ]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(2): 238-241. )

[7] 李国林,宋炜,毛俐,等. 国内外几种主要排种器的特点[J]. 农业科技与装备, 2011(8): 70-71. ( Li G L, Song W, Mao L, et al. Feature of some main seed-metering devices at home and a-broad[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2011(8):70-71 )

[8] 刘文忠,赵满全,王文明,等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 133-138. ( Liu W Z, Zhao M Q, Wang W M, et al. Theoretical analysis and ex-periments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural En-gineering, 2010, 26(9): 133-138.

[9] 陈海涛,顿国强,冯夷宁,等. 排种盘往复摆动式育种排种器: 201510167907.1[P]. 2016-11-23. ( Chen H T, Dun G Q, Feng Y N, er al. Breeding metering device of swing disc: 201510167907.1[P]. 2016-11-23. )

[10] 杨诚,尚书旗,杨然兵,等. 小区育种条播机落种部件的试验研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(12): 204-207, 215. ( Yang C, Shang S Q, Yang R B, et al. Test study on planting device of plot drill [ J ]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(12): 204-207, 215. )

[11] 杨丙辉,王伟,李天义,等. 新疆棉花小区精量播种机的设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(5): 65-70. ( Yang B H, Wang W, Li T Y, et al. Design of cotton plot precise seeder in Xinjiang [ J ]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41 ( 5 ): 65-70. )

[12] 杨薇,李建东,王飞,等. 玉米小区育种精量排种器的实验研究 & 分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(1): 163-171. ( Yang W, Li J D, Wang F, et al. The experimental research and analy-sis of the seed-meter device of the precision spaced planter for corn [ J ]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38 ( 1 ): 163-171. )

[13] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社: 1982. (Zhang B P. Principles of seeding machinery design[M]. Beijing: China Machine Press, 1982. )

[14] 姜峰,陈海涛,王业成. 小区育种插装式排种器的设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 9-12. ( Jiang F, Chen H T,

- Wang Y C. Design of insert-metering device for subdistrict breeding seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 9-12. )
- [15] 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. )
- [16] 牟忠秋, 衣淑娟, 李衣菲, 等. 气吸式玉米精量排种器性能试验研究[J]. 农机化研究, 2019(5): 142-147. (Mou Z Q, Yi S J, Li Y F, et al. Experimental study on the performance of air-suction corn precision seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019(5): 142-147. )
- [17] 刘宏新, 徐晓萌, 付露露, 等. 立式浅盆型复合种盘大豆排种器结构与参数优化[J]. 中国机械工程, 2016, 27(22): 3005-3011. (Liu H X, Xu X M, Fu L L, et al. Design and parameter optimization on vertical shallow-basin type composite seed-plate soybean seed-metering devices[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(22): 3005-3011. )
- [18] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34-41. (Cui T, Liu J, Yang L, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 34-41. )
- [19] 石林榕, 吴建民, 孙伟, 等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40-48. (Shi L R, Wu J M, Sun W, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(8): 40-48. )
- [20] 刘传云, 张强, 毛志怀. 大豆表观接触弹性模量的测定[J]. 粮食与饲料工业, 2007(10): 12-14. (Liu C Y, Zhang Q, Mao Z H. Determination of apparent contact elastic modulus of soybean kernels[J]. Cereal & Feed Industry, 2007(10): 12-14. )
- [21] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 62-69. (Shi S, Zhang D X, Yang L, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 62-69. )
- [22] 王瑞芳, 李占勇, 窦如彪, 等. 水平转筒内大豆颗粒随机运动与混合特性模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 93-99. (Wang R F, Li Z Y, Dou R B, et al. Simulation on random motion and mixing characteristic for soybean in rotary drum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 93-99. )
- [23] Yu Y W, Henrik S. Discrete element method simulation of properties of a 3D conical hopper with mono-sized spheres[J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22: 324-331.
- [24] 王福林, 尚家杰, 刘宏新, 等. EDEM 颗粒体仿真技术在排种机构研究上的应用[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(2): 110-114. (Wang F L, Shang J J, Liu H X, et al. Application of EDEM particle simulation technology on seed-metering device research[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(2): 110-114. )
- [25] 全国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 (National Technical Committee for Mechanical Standardization. Test method of single grain (precision) seeder: GB/T 6973-2005 [S]. Beijing: China national Standardization Administration Committee. )
- [26] 国家机械工业局. 中耕作物精密播种机产品质量分等: JB/T 51017-1999[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 1999. (State Bureau of Machinery Industry. Quality classification of medium tillage crop precision seeder: JB/T 51017-1999 [S]. Beijing: China national Standardization Administration Committee. )