

# 大豆育种排种盘型孔参数仿真优化与试验

顿国强<sup>1</sup>, 于春玲<sup>1</sup>, 杨永振<sup>1</sup>, 叶金<sup>1</sup>, 杜佳兴<sup>2</sup>, 张敬涛<sup>2</sup>

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

**摘要:**为满足小区育种技术对品种适应性的要求,从黑龙江地区大豆种子的物理参数统计出发,分析大豆种子充种过程,确定排种盘型孔直径、型孔深度、型孔倒角长度与大豆种子均径的比值关系。为了得到排种盘型孔的最佳尺寸参数,利用EDEM软件,仿真不同型孔尺寸的排种盘的排种情况,以排种盘的型孔直径比、型孔深度比、型孔倒角比为试验因素,以单粒率、多粒率、空粒率为试验指标,设计三元二次回归正交旋转组合试验,建立试验指标与试验因素间的数学模型。试验结果表明:对单粒率,型孔直径比影响为极显著( $P<0.01$ ),型孔深度比和型孔倒角比影响为显著( $P<0.05$ );对多粒率,型孔直径比和型孔深度比影响为极显著( $P<0.01$ );对空粒率,型孔直径比和型孔深度比影响为极显著( $P<0.01$ ),型孔倒角比对多粒率、空粒率均无影响( $P>0.05$ )。当型孔倒角比为0.14时,型孔直径比在1.73~1.91范围内,型孔深度比在0.76~1.25范围内时,可获得合格指数大于90%,重播指数小于5%,漏播指数小于5%。在最优参数组合下,制作行星齿轮式转位型孔排种盘,与非优化参数下制作的排种盘进行对比验证试验,试验结果表明:行星齿轮式转位型孔排种盘试验结果与仿真结果基本吻合,验证了仿真试验的准确性,同时与对照组相比,其具有最佳的作业性能,满足了品种适应性的要求。该研究可为小区育种排种器的优化设计提供理论参考。

**关键词:**农业机械;优化;试验;大豆小区育种;窝眼轮型孔;EDEM仿真

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.008

中图分类号:S223.2 文献标志码:A 文章编号:1002-6819(2019)-19-0062-12

顿国强,于春玲,杨永振,叶金,杜佳兴,张敬涛.大豆育种排种盘型孔参数仿真优化与试验[J].农业工程学报,2019,(19):62—73. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.008 <http://www.tcsae.org>

Dun Guoqiang, Yu Chunling, Yang Yongzhen, Ye Jin, Du Jiaxing, Zhang Jingtao. Parameter simulation optimization and experiment of seed plate type hole for soybean breeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 62—73. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.008 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

育种技术的发展,对品种的改良,粮食的增产具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。然而,我国的大部分育种试验都由人工播种完成<sup>[4-5]</sup>,这种方式存在劳动强度大、效率低、成本高等缺点,更因劳动工人的个人差异及人为因素,严重影响小区育种试验的质量和准确性,阻碍了小区育种工作的顺利进行<sup>[6-7]</sup>。而育种机械的使用,在减少试验时间,提高作业效率的同时,大幅度提高了试验结果的质量和准确性<sup>[8]</sup>。小区育种试验中所用到的大豆品种多且数量较少,大豆的尺寸也存在较大差异<sup>[9-11]</sup>,因此设计一种可适应不同品种大豆的排种器具有非常重要的意义。顿国强等<sup>[12-13]</sup>通过对大豆种子均径的模型预测,分析了排种盘型孔直径

与种子均径的关系。刘艳芬等<sup>[14]</sup>通过分析排种器型孔参数,设计出一种带倒角的周边式倾斜长方形型孔的水平圆盘排种器,可适应不同品种的玉米种子;丛锦玲等<sup>[15]</sup>利用高速摄像观察分析了充种区的种子形态及运动轨迹,通过构建充种区种子的力学模型,设计了一种油菜小麦可兼用的排种器;宋井玲等<sup>[16-17]</sup>采用固定凸轮活销机构,设计了一种型孔深度可变式的排种器;孙裕晶等<sup>[18-19]</sup>采用均匀设计和高速摄像方法,研究了排种器设计参数与大豆充种性能的关系;史嵩等<sup>[20-21]</sup>对不同型孔结构的排种器进行仿真试验,同时分析了排种盘在充种过程中可能存在的所有阻力来源,提高了种子的充种性能。综合国内外的研究,均未构建排种器型孔直径、型孔深度及型孔倒角长度与不同品种大豆几何参数间的函数模型。因此分析优化得出型孔参数与大豆参数之间的关系,设计一种可适应不同尺寸大豆的排种盘具有重要的意义。

本文从黑龙江地区大豆种子的物理参数展开分析,并对大豆种子充种过程进行理论分析,以大豆高填充窝眼轮精量排种器<sup>[22]</sup>为研究对象,建立排种器三维模型并进行离散元仿真试验,结合响应面法优化型孔的最佳参数,基于优化后的型孔参数设计制作行星齿轮式转位型孔排种盘,进行对比验证试验,验证优化的参数,并解决

收稿日期:2019-03-02 修订日期:2019-04-22

基金项目:科技部国家科技支撑计划项目(2014BAD11B01-A02);中央高校基本科研业务费专项(2572017BB10);中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金暨双(41113278);东北林业大学大学生省级创新训练计划项目资助(201810225304)

作者简介:顿国强,博士,讲师,从事农业及林业机械装备研究,Email: dnguoqiang1986@163.com。

排种器的品种适应性的问题。

1 大豆种子物理参数

选取黑龙江地区常见的6种大豆(垦豆40、垦丰17、青仁黑豆、黑豆、黑河44、北疆91)为试验材料,均随机选取100粒进行测量。

利用三丰500-152-30型数显游标卡尺(量程200 mm,精度0.01 mm)测量大豆的三轴尺寸(粒长*a*、粒宽*b*、粒厚*c*)。由式(1)计算大豆种子的均径*d*,按照不等边椭圆球体式(2)计算大豆的体积*V*。

利用FZ-1001型电子分析天平(量程100 g,精度

0.001 g)测量大豆种子质量*m*,以及百粒重。由公式(3)计算大豆的平均密度*ρ*。

$$d = \frac{1}{3} (a + b + c)$$

(1)

$$V = \frac{1}{6} \pi abc$$

(2)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(3)

式中*d*为种子均径,mm;*a*为种子粒长,mm;*b*为种子粒宽,mm;*c*为种子粒厚,mm;*v*为种子单粒体积,mm<sup>3</sup>。测量结果如表1所示。

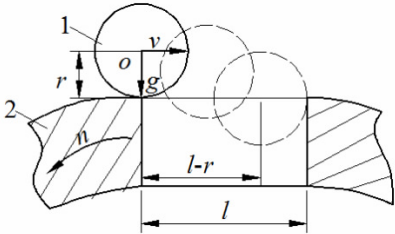
表1 大豆种子尺寸测量结果  
Table 1 Measured size of soybean seed

指标 Index	数值 Value	大豆品种 Soybean varieties					
		垦豆40	垦丰17	青仁黑豆	黑豆	黑河44	北疆91
		Ken bean 40	Ken feng 17	Green kernel black bean	Black bean	Heihe 44	Northern xinjiang 91
长度 Length/mm	均值	6.29	6.87	7.59	8.32	6.69	7.11
	标准差	0.29	0.39	0.67	0.56	0.43	0.48
宽度 Width/mm	均值	6.35	6.73	6.69	7.75	6.10	7.21
	标准差	0.28	0.26	0.37	0.40	0.30	0.38
厚度 Thickness/mm	均值	5.73	6.38	5.67	6.52	5.13	6.34
	标准差	0.33	0.30	0.54	0.50	0.29	0.52
均径 Average diameter/mm	均值	6.13	6.66	6.65	7.52	5.98	6.88
	标准差	0.28	0.28	0.46	0.43	0.30	0.43
算术平均径 Arithmetic mean diameter/mm	均值	3.07	3.33	3.33	3.76	2.99	3.44
	标准差	0.14	0.14	0.23	0.22	0.15	0.23
单粒质量 Single seed quality/g	均值	0.14	0.19	0.19	0.26	0.14	0.21
	标准差	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0.04
百粒质量 Hundred seed weight/g		14.35	19.27	18.82	26.49	20.87	20.17
单粒体积 Single seed size/cm <sup>3</sup>		0.12	0.16	0.15	0.22	0.11	0.18
密度 Density/g·mm <sup>-3</sup>		1.19	1.24	1.24	1.20	1.15	1.29

2 排种盘型孔参数的确定

2.1 型孔直径比

充种过程中,排种盘和种子一直处于运动状态,而种子能否充入型孔取决于种子与型孔表面的相对运动情况,只有种子与排种盘有相对移动,才有种子充入型孔<sup>[23-24]</sup>。为便于理论分析,忽略种子间相互作用及空气阻力的影响,以单粒种子为研究对象,排种盘逆时针转动,种子与排种盘的相对运动情况如图1所示。



1为种子;2为排种盘;*r*为种子半径,mm;*o*为种子质心;*g*为重力加速度,m·s<sup>-2</sup>;*n*为排种盘转速,r·min<sup>-1</sup>;*v*为种子与型孔的相对速度,m·s<sup>-1</sup>;*l*为型孔直径,mm。  
Note: 1 is seed; 2 is seed plate; *r* is the radius of seed; *o* is the seed centroid; *g* is the acceleration of gravity, m·s<sup>-2</sup>; *n* is the speed of seed plate, r·min<sup>-1</sup>; *v* is the relative velocity of seed and seed plate, m·s<sup>-1</sup>; *l* is the type hole diameter, mm.

图1 种子与排种盘相对运动情况

Fig.1 Relative movement of seed and seed plate

种子的重心经过下述距离:

在水平方向上:

$$l - r = vt$$

(4)

在垂直方向上:

$$r = \frac{1}{2} gt^2$$

(5)

消除时间*t*,得种子充入型孔的极限相对速度:

$$v = (l - r) \sqrt{\frac{g}{2r}}$$

(6)

式中*l*为型孔直径,mm;*r*为种子半径,mm;*v*为种子与型孔的相对速度,m/s;*g*为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;*t*为种子充入型孔的时间,s。

由于大豆种子为不等边椭圆球体,因此种子以充入型孔的水平和翻转90°两种方式,分析型孔直径与种子均径的关系。

2.1.1 种子水平充入型孔

由表1可知大豆种子三轴尺寸各不相同,因此种子在充入型孔前,即处于型孔边缘时,在排种盘截面方向会有6(3×2)种不同的姿态。种子以水平方式充入型孔的运动情况如图2所示。

大豆种子水平运动时,种子重心经过以下距离:

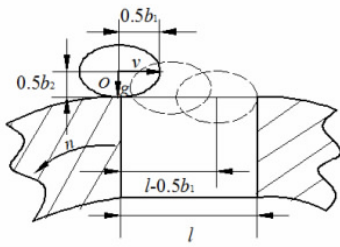
$$l - 0.5b_1 = vt$$

(7)

$$0.5b_2 = \frac{1}{2} gt^2$$

(8)

式中*b*<sub>1</sub>为大豆种子截面宽度,mm;*b*<sub>2</sub>为大豆种子截面高度,mm。



注:  $b_1$  为大豆种子截面宽度, mm;  $b_2$  为大豆种子截面高度, mm。  
Note:  $b_1$  is the section width of soybean seed, mm;  $b_2$  is the sections height of soybean seed, mm.

图2 种子水平充入型孔

Fig. 2 Seed horizontally feeding type hole

结合公式(7)、公式(8)可推导出排种盘型孔直径  $l$  与种子均径  $d$  的比值:

$$k_1 = \frac{l}{d} = \frac{0.5b_1 + v}{d} \sqrt{\frac{b_2}{g}} \quad (9)$$

式中  $k_1$  为种子水平充入型孔时型孔直径与种子均径的比值, 后文简化为型孔直径比。

查阅相关文献[25]可知, 种子以不同姿态充入型孔的概率与种子在排种盘边缘的截面面积以及质心高度成反比, 令  $q$  为姿态值,  $q_i$  为简化后的姿态系数,  $p_i$  为姿态概率, 计算公式如下:

$$s = \frac{\pi b_1 b_2}{4} \quad (10)$$

$$q = \frac{1}{s b_2^2} = \frac{4}{\pi b_1 b_2^2} \quad (11)$$

$$q_i = \frac{1}{b_1 b_2^2} \quad (12)$$

$$p_i = \frac{q_i}{q_t} \quad (13)$$

式中  $s$  为大豆种子截面面积,  $\text{mm}^2$ ;  $q$  为姿态值;  $q_i$  为第  $i$  种状态时种子的姿态系数,  $p_i$  为第  $i$  种状态时种子的姿态概率;  $q_t$  为6种姿态值的总和。

大豆种子以6种不同的姿态水平充入型孔的具体状态图如图3所示, 依据截面对应关系依次将大豆种子的三轴尺寸带入公式(12)得到各状态的姿态值, 并计算姿态值总和  $q_t$ :

$$\begin{cases} q_a = 1/ab^2, q_b = 1/ac^2, q_c = 1/ba^2 \\ q_d = 1/bc^2, q_e = 1/ca^2, q_f = 1/cb^2 \end{cases} \quad (14)$$

$$q_t = q_a + q_b + q_c + q_d + q_e + q_f \quad (15)$$

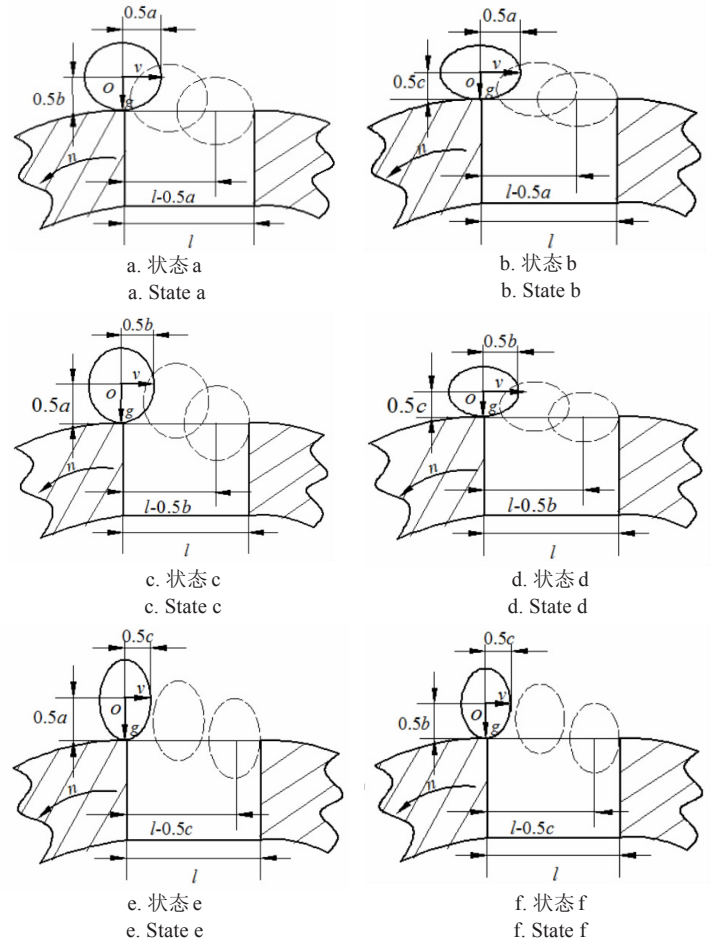
按照公式(13)可计算出相应的6种姿态的概率为:

$$\begin{cases} p_a = q_a/q_t, p_b = q_b/q_t, p_c = q_c/q_t \\ p_d = q_d/q_t, p_e = q_e/q_t, p_f = q_f/q_t \end{cases} \quad (16)$$

由表1可知大豆的具体尺寸参数, 并根据图3中6种状态, 按照截面对应关系依次将大豆种子的三轴尺寸及均径  $d$ , 带入公式(9)可计算出6种状态下的型孔直径比  $k_1$ , 带入公式(16)计算出6种姿态的概率, 因水平充入型孔过程中, 大豆种子的一种姿态对应一种充种状态, 所以此时姿态概率等于状态概率。具体型孔直径比与相应的概率如表2所示, 种子水平充入型孔时, 型孔直径比的取值范围为1.68~2.00。

### 2.1.2 种子翻转90°充入型孔

大豆种子翻转90°充入型孔的运动情况如图4所示。



注:  $a$  为种子粒长, mm;  $b$  为种子粒宽, mm;  $c$  为种子粒厚, mm; 状态a表示种子以  $a$  为截面宽度  $b$  为截面高度, 水平充入型孔; 状态b表示种子以  $a$  为截面宽度  $c$  为截面高度, 水平充入型孔; 状态c表示种子以  $b$  为截面宽度  $a$  为截面高度, 水平充入型孔; 状态d表示种子以  $b$  为截面宽度  $c$  为截面高度, 水平充入型孔; 状态e表示种子以  $c$  为截面宽度  $a$  为截面高度, 水平充入型孔; 状态f表示种子以  $c$  为截面宽度  $b$  为截面高度, 水平充入型孔。

Note:  $a$  is the length of seed, mm;  $b$  is the width of seed, mm;  $c$  is the thickness of seed, mm; State a indicates seeds are filled into the type hole horizontally with  $a$  as the section width and  $b$  as the section height; State b indicates seeds are filled into the type hole horizontally with  $a$  as the section width and  $c$  as the section height; State c indicates seeds are filled into the type hole horizontally with  $b$  as the section width and  $a$  as the section height; State d indicates seeds are filled into the type hole horizontally with  $b$  as the section width and  $c$  as the section height; State e indicates seeds are filled into the type hole horizontally with  $c$  as the section width and  $a$  as the section height; State f indicates seeds are filled into the type hole horizontally with  $c$  as the section width and  $b$  as the section height.

图3 种子水平充种形态分析

Fig. 3 State analysis of seed horizontally feeding type hole

种子重心经过以下距离:

$$l - 0.5b_2 = vt \quad (17)$$

$$0.5b_2 = \frac{1}{2}gt^2 \quad (18)$$

消去时间  $t$ , 得到型孔直径与均径的比值:

$$k_1' = \frac{l}{d} = \frac{v}{d} \sqrt{\frac{b_2}{g} + \frac{b_2}{2}} \quad (19)$$

式中  $k_1'$  种子翻转90°充入型孔时型孔直径与均径的比值。

由公式(19)可知, 当大豆种子翻转90°充入型孔时, 型孔直径比只与种子截面高度有关, 与截面宽度无关。因此在研究种子翻转90°充入型孔时只需考虑以粒长、粒宽、粒厚作为种子截面高度的3种情况, 如图5所示。

由图3可知, 当种子的以任意三轴尺寸作为截面高度时都对应2种姿态, 因此对应图3和图5并依据种子水平充入型孔时的状态概率推导出翻转90°后各状态的概率。



表2 种子水平运动型孔直径比及相应概率  
Table 2 Probability and type hole diameter ratio of seed horizontal movement

状态 State	指标 Index	品种 Varieties					
		垦豆 40 Ken bean 40	垦丰 17 Ken feng 17	青仁黑豆 Green kernel black bean	黑豆 Black bean	黑河 44 Heihe 44	北疆 91 Northern Xinjiang 91
a	型孔直径比	1.92	1.85	1.91	1.82	1.98	1.86
	状态概率	0.15	0.16	0.14	0.14	0.14	0.15
b	型孔直径比	1.85	1.82	1.80	1.72	1.86	1.77
	状态概率	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19
c	型孔直径比	1.92	1.86	1.93	1.83	2.00	1.85
	状态概率	0.15	0.15	0.12	0.13	0.13	0.15
d	型孔直径比	1.86	1.81	1.80	1.68	1.81	1.78
	状态概率	0.18	0.18	0.22	0.21	0.21	0.19
e	型孔直径比	1.87	1.83	1.85	1.75	1.91	1.79
	状态概率	0.17	0.16	0.14	0.15	0.15	0.17
f	型孔直径比	1.88	1.82	1.76	1.70	1.85	1.80
	状态概率	0.17	0.17	0.16	0.18	0.18	0.16

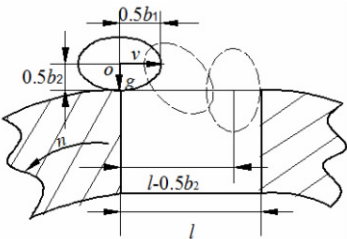


图 4 种子翻转 90° 充入型孔

Fig.4 Seed turn 90° feeding type hole

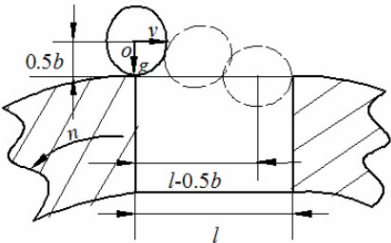
$$\begin{cases} p_1 = (q_1 + q_6) / q_0 \\ p_2 = (q_2 + q_4) / q_1 \\ p_3 = (q_3 + q_5) / q_1 \end{cases} \quad (20)$$

按照公式(19)与(20)并结合表 1 可计算出 3 种状态

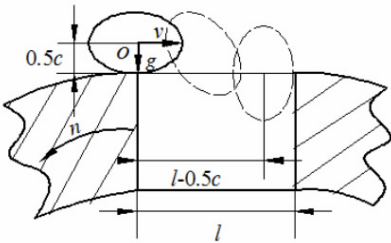
的型孔直径比  $k_1'$  及其对应的概率如表 3 所示,当种子翻转 90° 充入型孔时,型孔直径比范围为 1.60~2.10。综合种子水平充入时的范围 1.68~2.00,最终确定型孔直径与大豆种子均径的取值范围为 1.60~2.10。

2.2 型孔深度比

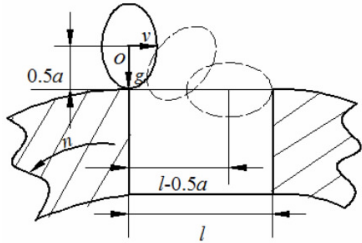
在播种过程中大豆种子会经过 3 个区域,充种区、清种区和排种区,如图 6 所示。对于型孔深度,在充种区,应保证种子顺利充入型孔,且稳定在型孔中;在清种区,应保证型孔中保留单粒种子而多余种子与型孔分离;在排种区,应保证型孔顺利排出种子,甚至可利用其他部件强制其排出。



a. 状态 1  
a. State 1



b. 状态 2  
b. State 2



c. 状态 3  
c. State 3

注:状态 1 表示种子以  $b$  为截面高度,翻转 90° 充入型孔;状态 2 表示种子以  $c$  为截面高度,翻转 90° 充入型孔;状态 3 表示种子以  $a$  为截面高度,翻转 90° 充入型孔。  
Note: State 1 indicates that the seed is turned 90° into the type hole with  $b$  as the cross section height; State 2 indicates that the seed is type hole turned 90° into the type hole with  $c$  as the cross section height; State 3 indicates that the seed is turned 90° into the type hole with  $a$  as the cross section height.

图 5 种子翻转 90° 充种形态分析  
Fig.5 State analysis of seed turn 90° feeding type hole

表 3 种子翻转运动型孔直径比及相应概率  
Table 3 Probability and type hole diameter ratio of seed turn movement

状态 State	指标 Index	品种 Varieties					
		垦豆 40 Ken bean 40	垦丰 17 Ken feng 17	青仁黑豆 Green kernel black bean	黑豆 Black bean	黑河 44 Heihe 44	北疆 91 Northern Xinjiang 91
1	型孔直径比	1.93	1.84	1.84	1.79	1.93	1.86
	状态概率	0.31	0.33	0.32	0.31	0.32	0.31
2	型孔直径比	1.81	1.78	1.66	1.6	1.73	1.72
	状态概率	0.37	0.35	0.41	0.41	0.41	0.37
3	型孔直径比	1.92	1.87	1.99	1.87	2.1	1.85
	状态概率	0.32	0.32	0.27	0.28	0.27	0.32

综合理论要求和实践基础,查阅相关研究<sup>[16-17]</sup>得出排种盘型孔深度与大豆种子均径的关系如下:

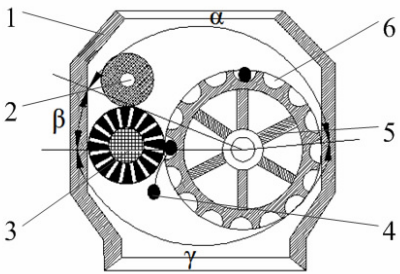
$$0.75d \leq k_2 \leq 1.25d \quad (21)$$

式中  $k_2$  为排种盘型孔深度与大豆种子均径的比值,后文

简化为型孔深度比。

2.3 型孔倒角比

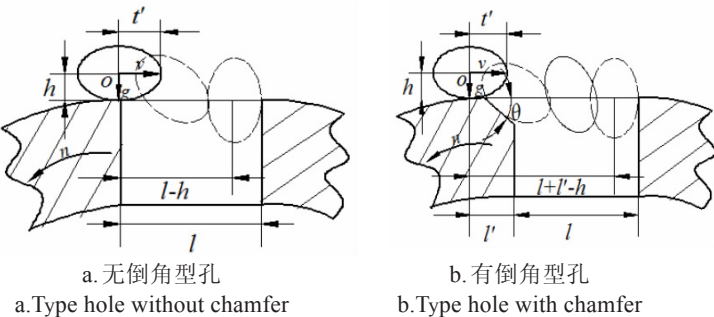
如图 7 所示种子在排种盘边缘,重心在  $o$  点,与排种盘距离为  $h$ ,分别研究了有倒角和无倒角的情况。



1. 种箱 2. 扰动滚筒 3. 种刷 4. 大豆 5. 窝眼 6. 排种轮  
1. Seed box 2. Disturbance roller 3. Seed brush 4. Soybean 5. Socket 6. Seed wheel  
注:  $\alpha$  表示充种区;  $\beta$  表示清种区;  $\gamma$  表示排种区。  
Note:  $\alpha$  is the area of filling seed;  $\beta$  is the area of clearing seed;  $\gamma$  is the area of metering seed.

图6 高填充窝眼式精量排种盘剖面图

Fig.6 Profile map of high-filling socket roller precision seed plate



注:  $h$  为种子质心高于排种盘的高度, mm;  $l'$  为种子质心与种端距离, mm;  $o$  为种子质心;  $\theta$  为型孔倒角, ( $^\circ$ );  $l'$  为倒角长度, mm。  
Note:  $h$  is the height of seed centroid higher than seed plate, mm;  $l'$  is the distance between seed centroid and its seed end, mm;  $o$  is the seed centroid;  $\theta$  is chamfer angle, ( $^\circ$ );  $l'$  is chamfer length, mm.

图7 型孔的倒角情况分析  
Fig.7 Analysis of type hole chamfer

在单粒大豆种子充入型孔的过程中,起主要作用的是种子相对排种盘的相对速度  $v$ ,如果  $v$  过小,则排种频率过低,导致播种效率低下;  $v$  过大,则种子来不及充填型孔,会造成漏播。所以,为使排种器有良好的排种性能,需研究种子能够通过型孔的最大极限速度  $v_{\max}$ 。

无倒角情况种子运动方程式为:

$$\begin{cases} h = \frac{1}{2}gt^2 \\ vt = l - h \end{cases} \quad (22)$$

式中  $h$  为种子质心高于排种盘的高度, mm;  
变换后求得种子落入型孔的时间:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (23)$$

型孔长度最小值:

$$l_{\min} = \sqrt{h^2 + t'^2} + h \quad (24)$$

式中  $t'$  为种子质心与种端距离, mm。

根据相关研究<sup>[22]</sup>可知,种子充入型孔的基本条件是种子相对于排种盘的极限速度满足:

$$v_{\max} = \sqrt{(h^2 + t'^2) \frac{g}{2h}} \quad (25)$$

当排种盘型孔存在倒角  $\theta$  时,大豆种子的运动情况如下:

$$\begin{cases} h = \frac{1}{2}gt^2 \\ vt = l + l' - h \end{cases} \quad (26)$$

式中  $l'$  为倒角长度, mm。  
变换后求得大豆种子相对于排种盘的极限速度为:

$$v_{\max} = \left( \sqrt{(h^2 + t'^2)} + l' \right) \sqrt{\frac{g}{2h}} \quad (27)$$

型孔倒角长度与均径的比为:

$$k_3 = \frac{l'}{d} \quad (28)$$

式中  $k_3$  为排种盘型孔倒角长度与大豆种子均径的比值, 后文简化为型孔倒角比。

式(25)与式(27)对比可知,倒角能将相对速度值扩大  $\Delta v = l_1 \sqrt{\frac{g}{2h}}$  型孔能够更准确的充取单粒种子,并减少种子破碎。大豆种子相对于排种盘型孔的极限速度与倒角长度以及大豆的质心位置有关。倒角长度过大,种子下落过程中可能与倒角发生碰撞,影响种子落入型孔;倒角长度过小,则发挥不了该有的作用。查阅相关文献<sup>[16]</sup>确定型孔倒角比为 0~0.3。

3 排种盘型孔参数优化仿真试验

排种盘型孔参数是排种器排种的关键因素,型孔尺寸直接影响排种的精确性。型孔尺寸过大造成重播,尺寸过小则造成漏播。为进一步确定型孔尺寸,采用 EDEM 软件建立仿真模型,分析型孔各参数变化对充种性能的影响,优化排种器型孔的结构参数。

3.1 仿真参数设定

3.1.1 设置全局变量参数

大豆种子表面光滑,无黏附力,选择 Hertz-mindlin (no-slip)模型为仿真接触模型,该接触模型将颗粒间接触作用按照静弹性接触进行处理,能有效解决颗粒曲面接触问题<sup>[26-27]</sup>。其余参数如大豆颗粒属性、壁面属性、种刷轮属性及它们之间相互作用属性设置如表4所示。

表4 全局变量参数设置  
Table 4 Global variable parameter setting

项目 Item	属性 Property	值 Value
大豆颗粒 Soybean particles	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.04×10 <sup>6</sup>
	密度/kg·m <sup>-3</sup>	1230
塑料壁面 Plastic wall	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	1.04×10 <sup>7</sup>
	密度/kg·m <sup>-3</sup>	1290
种刷轮 Seed brush wheel	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.1×10 <sup>8</sup>
	密度/kg·m <sup>-3</sup>	1150
大豆—大豆 Soybean-soybean	恢复系数	0.6
	静摩擦系数	0.45
	动摩擦系数	0.05
大豆—壁面 Soybean-wall	恢复系数	0.6
	静摩擦系数	0.4
	动摩擦系数	0.01
大豆—种刷 Soybean-seed brush	恢复系数	0.45
	静摩擦系数	0.5
	动摩擦系数	0.01

3.1.2 大豆颗粒模型的建立

大豆颗粒采用椭球体模型,其能够真实准确地模拟出大豆种子在排种器中的运动情况<sup>[28]</sup>,选用垦丰17为试验品种,粒长6.87 mm,粒宽6.73 mm,粒厚6.38 mm,均径为6.66 mm。

3.1.3 排种器模型的建立

简化高填充窝眼轮精量排种器为排种盘、外壳、毛刷3部分,按表4设置3个部分的变量参数。在排种器种箱的上部建立颗粒工厂,设定颗粒生成总数量为300个,生成速率为每秒50 000个。由表1可知颗粒算术平均径服从正态分布,标准差为0.138。设置机具作业速度为0.6 m/s,理论株距5 cm,高填充窝眼轮精量排种盘直径130 mm,周向均布20个型孔,计算排种盘转速为36 r/min,种刷轮转速为50 r/min,仿真过程中,设定仿真步长为 $9.25\times10^{-6}$  s,数据记录间隔为0.01 s,仿真情况如图8所示。

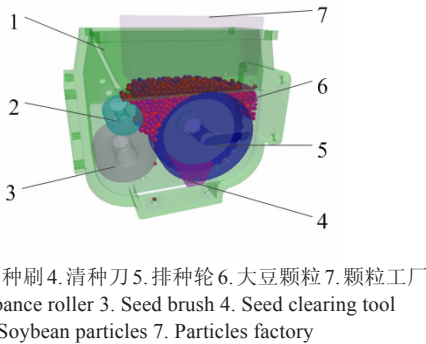


图8 排种器仿真情况  
Fig.8 Simulation of seed metering device

3.2 参数优化试验

3.2.1 试验因素与试验指标

型孔直径比 $x_1$ 、型孔深度比 $x_2$ 、倒角长度比 $x_3$ 是影响窝

眼轮式排种器充种过程的重要参数,因此选用其作为参数优化试验的3个因素,根据大豆种子的播种要求<sup>[25]</sup>,选用单粒率 $y_1$ (%)、多粒率 $y_2$ (%)、空粒率 $y_3$ (%)作为试验指标。

$$y_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\%$$
 (29)

$$y_2 = \frac{n_2}{N} \times 100\%$$
 (30)

$$y_3 = \frac{n_3}{N} \times 100\%$$
 (31)

式中 $N$ 为试验测定的种子个数; $n_1$ 为试验时单独填充的种子个数; $n_2$ 为试验时重复填充的种子个数; $n_3$ 为试验时无种子填充的窝眼个数。

3.2.2 试验方法

查阅相关文献[29]采用三元二次回归正交旋转组合设计<sup>[30]</sup>试验方法,创建因素对指标影响的回归模型,并对影响试验指标的试验因素进行优化,试验因素及水平编码见表5。

表5 试验因素水平  
Table 5 Experimental factors and level

水平 Levels	型孔直径比 Type hole diameter ratio $x_1$	型孔深度比 Type hole depth ratio $x_2$	型孔倒角比 Type hole chamfer ratio $x_3$
1.682	2.10	1.25	0.30
1	2.00	1.15	0.24
0	1.85	1.00	0.15
-1	1.70	0.85	0.06
-1.682	1.60	0.75	0

3.2.3 试验结果与分析

EDEM 仿真结果以及试验方案如表6所示,利用design-expert8.0.6软件对试验结果进行回归分析,分析试验指标在各个试验因素影响下的变化规律。

表6 试验方案及试验结果  
Table 6 Experimental design and result

编号 No.	试验因素 Experimental factors			评价指标 Evaluation indexes		
	型孔直径比 Type hole diameter ratio $x_1$	型孔深度比 Type hole depth ratio $x_2$	型孔倒角比 Type hole chamfer ratio $x_3$	单粒率 Single-seed rate $y_1$ /%	空粒率 Empty-seed rate $y_2$ /%	多粒率 Multi-seed rate $y_3$ /%
1	-1(1.70)	-1(0.85)	-1(0.06)	88.23	8.65	3.22
2	1(2.00)	-1	-1	86.64	2.38	10.98
3	-1	1(1.15)	-1	90.81	5.86	3.43
4	1	1	-1	83.28	2.77	13.95
5	-1	-1	1(0.24)	88.75	8.82	2.43
6	1	-1	1	85.02	2.37	12.61
7	-1	1	1	90.02	6.76	3.22
8	1	1	1	81.63	3.16	15.21
9	-1.6828	0	0	88.94	9.44	1.62
10	1.6828	0	0	82.63	1.82	15.55
11	0	-1.6828	0	90.75	6.82	2.43
12	0	1.6828	0	87.82	4.36	7.82
13	0	0	-1.6828	88.79	5.81	5.40
14	0	0	1.6828	86.04	6.15	7.81
15	0	0	0	90.77	3.81	5.42
16	0	0	0	92.38	2.39	5.23
17	0	0	0	92.62	4.21	3.17
18	0	0	0	93.42	2.76	3.82
19	0	0	0	92.03	3.42	4.55
20	0	0	0	91.60	3.19	5.21
21	0	0	0	92.02	3.63	4.35
22	0	0	0	91.76	2.44	5.80
23	0	0	0	91.59	3.21	5.20

模型的方差分析如表 7 所示。单粒率、多粒率、空粒率的回归模型显著性检验结果均为极显著,失拟项检验结果均为不显著,表明回归模型在试验范围拟合程度较好,且模型的结构系数  $R^2$  均大于 0.94,可以解释响应值超过 94.00% 的变化。对于单粒率模型,  $x_1$ 、 $x_1^2$ 、 $x_2^2$ 、 $x_3^2$ 、 $x_1x_2$  对方程影响为极显著 ( $P<0.01$ ),  $x_2$ 、 $x_3$  对方程影响为显著 ( $P<0.05$ ), 其余项对方程无影响 ( $P>0.05$ )。

表 7 回归方程方差分析  
Table 7 Variance analysis of regressions equation

方差来源 Variation source	单粒率 Single-seed rate $y_1/\%$					多粒率 Multi-seed rate $y_2/\%$					空粒率 Empty-seed rate $y_3/\%$				
	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F value	P value	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F value	P value	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F value	P value
$x_1$	75.75	1	75.75	114.18	< 0.0001	301.28	1	301.28	251.46	< 0.0001	74.89	1	74.89	201.85	< 0.0001
$x_2$	4.74	1	4.74	7.14	0.0174	18.01	1	18.01	15.03	0.0015	4.27	1	4.27	11.51	0.004
$x_3$	4.81	1	4.81	7.26	0.0167	2.49	1	2.49	2.08	0.1696	0.38	1	0.38	1.02	0.3287
$x_1^2$	83.57	1	83.57	125.96	< 0.0001	41.47	1	41.47	34.61	< 0.0001	7.3	1	7.30	19.67	0.0005
$x_2^2$	17.72	1	17.72	26.7	0.0001	2.27	1	2.27	1.9	0.1887	7.3	1	7.3	19.67	0.0005
$x_3^2$	47.43	1	47.43	71.49	< 0.0001	13.11	1	13.11	10.95	0.0048	10.66	1	10.66	28.74	< 0.0001
$x_1x_2$ 交互作用	14.04	1	14.04	21.17	0.0003	2.65	1	2.65	2.21	0.158	4.50	1	4.50	12.13	0.0033
模型 Model	246.28	7	35.18	53.03	< 0.0001	380.77	7	54.40	45.40	< 0.0001	108.96	7	15.57	41.95	< 0.0001
残差 Residual	9.95	15	0.66			17.97	15	1.20			5.57	15	0.37		
失拟 Lack of fit	5.68	7	0.81	1.52	0.2850	12.39	7	1.77	2.54	0.1078	2.57	7	0.37	0.98	0.5038
误差 Pure error	4.28	8	0.53			5.58	8	0.70			3.00	8	0.37		
总和 Total	256.23	22				398.74	22				114.53	22			

注:  $P<0.01$  表示极显著;  $0.01<P<0.05$  表示显著;  $P>0.05$  表示不显著。  
Note:  $P<0.01$  means highly significant;  $0.01<P<0.05$  means significant;  $P>0.05$  means nosignificant.

对于多粒率模型,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_1^2$ 、 $x_3^2$  对方程影响为极显著 ( $P<0.01$ ), 其余项对方程无影响 ( $P>0.05$ )。对于空粒率模型,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_1^2$ 、 $x_2^2$ 、 $x_3^2$ 、 $x_1x_2$  对方程影响为极显著 ( $P<0.01$ ), 其余项对方程无影响 ( $P>0.05$ )。

剔除回归方程中系数影响不显著因素。各因素与单粒率、多粒率、空粒率的回归方程为:

$$\begin{cases} y_1 = -385.49 + 420.87x_1 + 201.64x_2 + 58.76x_3 \\ \quad -101.93x_1^2 - 47.82x_2^2 - 218.11x_3^2 - 59.44x_1x_2 \\ y_2 = 186.5 - 233.93x_1 + 7.73x_2 - 29.51x_3 + \\ \quad 71.69x_1^2 + 114.36x_3^2 \\ y_3 = 233.97 - 160.71x_1 - 127.4x_2 - 29.16x_3 + \\ \quad 30.12x_1^2 + 30.69x_2^2 + 103.42x_3^2 + 33.65x_1x_2 \end{cases}$$

3.2.4 试验因素对试验指标的影响

因素对指标影响的响应曲面图,能够清晰直观地表示因素与指标的关系,如图 9—11 所示。单粒率  $y_1$  随型孔直径比  $x_1$  的增大先增大后减小,随型孔深度比  $x_2$  的增大先增大后减小,随型孔倒角比  $x_3$  的增大先增大后减小;多粒率  $y_2$  随型孔直径比  $x_1$  的增大而增大,随型孔深度比  $x_2$  的增大而增大;空粒率  $y_3$  随型孔直径比  $x_1$  的增大而减小,随型孔深度比  $x_2$  的增大而减小。可知,随型孔直径、型孔深度、型孔倒角的增大,型孔体积增大利于充填,当型孔尺寸过大时,会造成种子重复充填,多粒率变大,空粒率变小。

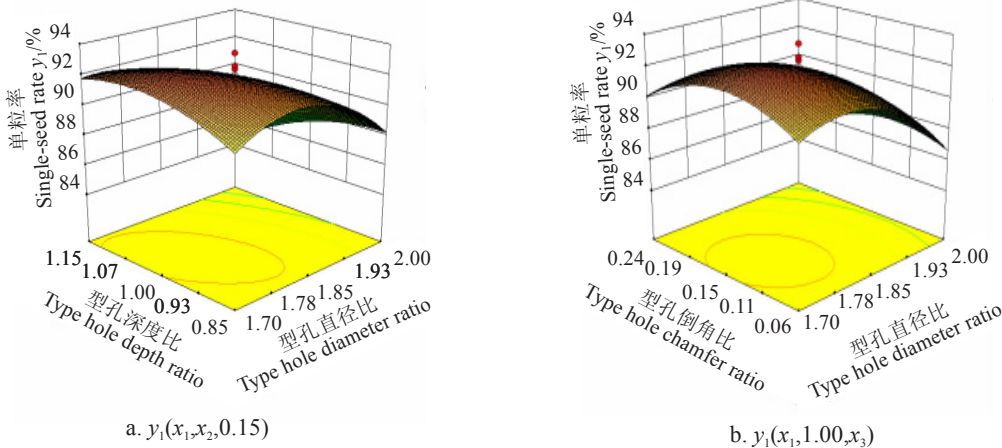


图 9 试验因素对单粒率的影响  
Fig.9 Influence of experimental factors on single-seed rate



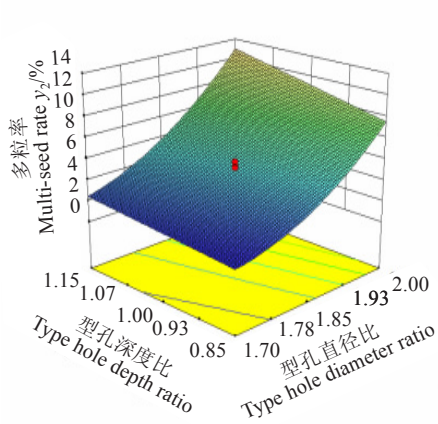
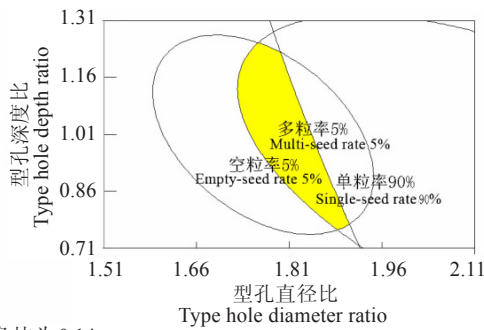


图 10 试验因素对多粒率的影响

Fig.10 Influence of experimental factors on multi-seed rate

3.2.5 参数优化

为确定排种盘型孔参数与大豆几何参数间的比例关系，对参数进行优化分析，设定试验指标单粒率大于 90%，多粒率小于 5%，空粒率小于 5%，因素型孔倒角比对试验指标影响较小设定为 0.14，进行参数优化，最佳参数范围如图 12 所示。



注：型孔倒角比为 0.14。  
Note: Type hole chamfer ratio is 0.14

图 12 参数优化分析图

Fig.12 Figure of parameters optimize and analysis

当型孔倒角比为 0.14 时，型孔直径比与型孔深度比都处于最佳组合区域如图 12 中阴影区域，即型孔直径比在 1.73~1.91，型孔深度比在 0.76~1.25 时，可获得单粒率大于 90%，多粒率小于 5%，空粒率小于 5%。

4 行星齿轮式转位型孔排种盘的设计

为适应小区育种中品种的多样性，依据排种盘型孔的参数分析，设计育种专用的与高填充窝眼轮精量排种器配合的行星齿轮式转位型孔排种盘<sup>[31]</sup>。

4.1 基本结构

行星齿轮式转位型孔排种盘结构如图 13 所示，主要由安装盘、行星排种轮及太阳轮组成。安装盘周向均布的 8 个沉孔内通过螺栓装配行星排种轮，行星排种轮周向均布尺寸（直径、深度、倒角长度）依次增大的 6 个型孔，沉孔与安装盘外圆柱面相切处开设透孔，型孔与透孔位于同一平面，安装盘中部装配的太阳轮与行星排种轮相啮合，并由螺钉与定位孔的连接固定。

4.2 设计原理

行星排种轮周向均布尺寸（直径、深度、倒角长度）依次增大的 6 个型孔，设计时要求其尺寸范围可满足所有尺寸的大豆对排种盘型孔尺寸的要求，当已知某一播种大豆

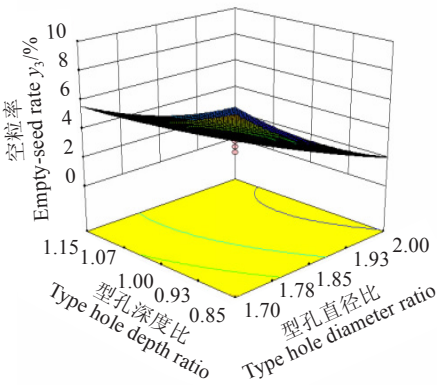
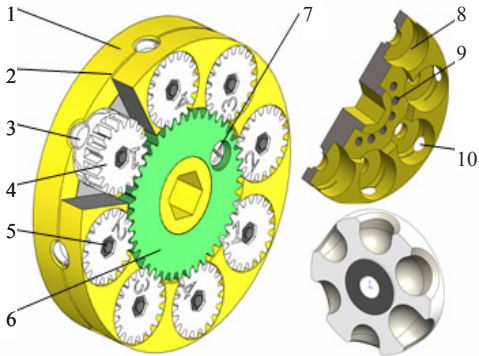


图 11 试验因素对空粒率的影响

Fig.11 Influence of experimental factors on empty-seed rate

品种时，可依据图 12 参数优化分析图进行型孔参数相应的运算，从 6 个型孔中选出适合其排种的型孔尺寸，通过转动太阳轮进而带动行星排种轮，使之发生转动，使相应尺寸的型孔通过透孔裸露在排种盘表面，进行排种作业。



1. 安装盘 2. 清种沟 3. 型孔 4. 行星排种轮 5. 螺栓 6. 太阳轮 7. 螺钉 8. 沉孔 9. 定位孔 10. 透孔  
1.Assemble plate 2.Clearing groove 3.Type hole 4.Planetary seed wheel 5.Bolt 6.Sun gear 7.Screw 8.Counterbore 9.Location hole 10.Through hole

图 13 行星齿轮式转位型孔排种盘

Fig.13 Planetary gear type transposition type hole seed plate

4.3 结构参数

选用高填充窝眼轮精量排种器，排种盘直径为 130 mm，根据优化参数计算行星排种轮周向 6 个型孔尺寸。由表 1 可知大豆均径范围为 5.98~7.52 mm，在图 12 阴影区域任取一优化点（1.74,1.00），型孔倒角比选为 0.14，并根据大豆均径范围计算优化后的参数范围，将范围等距为 6 个依次增大的型孔尺寸，行星排种轮型孔尺寸如表 8 所示。

表 8 行星排种轮型孔尺寸  
Table 8 Type hole size of planetary seed wheel

型孔	型孔直径	型孔深度	型孔倒角长度
Type hole	Type hole diameter/mm	Type hole depth/mm	Type hole chamfer/mm
1	10.41	5.98	0.84
2	10.94	6.29	0.88
3	11.48	6.60	0.92
4	12.01	6.90	0.96
5	12.55	7.21	1.00
6	13.08	7.52	1.04



5 验证试验

5.1 试验材料

为验证仿真试验的可行性及优化型孔的正确性,进行了台架试验,同时为验证行星齿轮式转位型孔排种盘的品种适应性,选取垦丰 17 和垦豆 40 大豆种子作为试验材料。

5.2 试验装置仪器设备

以高填充窝眼轮精量排种器为试验所用排种器,以传统盘为对照组,与行星齿轮式转位型孔排种盘进行对比试验试验,以 JPS-12 计算机视觉精密排种器性能检测试验台(黑龙江省农业机械科学研究院研制)为试验仪器。

5.3 试验方案

依据表 8 中型孔尺寸参数,并通过 3D 打印,加工制作行星齿轮式转位型孔排种盘。由表 1 可知垦丰 17 和垦豆 40 的均径分别为 6.66、6.13 mm,按照所选优化点计算型孔参数,计算结果分别与行星轮型孔 3、型孔 1 尺寸接近,因此选择其进行验证试验。同时,制作 2 个直径 130 mm,周向均布 8 个型孔的对照组排种盘。在图 12 中空白区域任选两点做为型孔比例参数,计算型孔尺寸如表 9 所示。

表 9 对照组排种轮型孔尺寸  
Table 9 Type hole size of contrast group seed wheel

编号 No.	型孔直径 Type hole diameter/mm	型孔深度 Type hole depth/mm	型孔倒角长度 Type hole chamfer/mm
1	13.32	8.00	0.93
2	9.22	4.93	0.86



1. 排种器 2. 安装架 3. 种床带 4. 控制电机  
1. Seed metering device 2. Mounting rack 3. Seed bed belt 4. Electric machinery

图 14 排种盘对比验证试验

Fig.14 Comparative validation test of seed metering device

设置作业速度为 0.4 m/s,株距为 5 cm,以合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标。依次进行 4 组试验,每组试验重复 3 次取平均值,每次试验测定 300 粒种子,按照国标 GB/T 6973-2005《单粒(精密)播种机试验方法》<sup>[32]</sup>实施试验,试验于 2019 年 2 月 10 日在东北农业大学工程学院实验台进行,如图 14 所示。

5.4 试验结果与分析

验证试验结果如表 10 所示,行星齿轮式转位型孔排种盘合格指数大于 90%,且重播指数与漏播指数较低。对比优化组与仿真结果可知,优化结果与仿真结果基本吻合,验证了仿真优化结果的准确性。对比优化组与对照组可知,行星齿轮式转位型孔排种盘合格指数高、排种性能好,满足小区育种技术对品种适应性的要求。

表 10 试验结果  
Table 10 Results of experiment

组别 Group	试验号 Test No.	合格指数 Qualified index/%	重播指数 Over-seeding index/%	漏播指数 Miss-seeding index/%
优化组 Optimization group	1	91.32	4.01	4.67
	2	92.24	4.20	3.56
对照组 Contrast group	3	87.55	5.02	7.43
	4	88.21	8.43	3.36

6 结论

1)本文通过对黑龙江地区常见的大豆品种充种过程的理论分析,得出型孔直径与大豆种子均径的比值范围为 1.6~2.1,型孔深度与均径的比值范围为 0.75~1.25,型孔倒角长度与均径的比值范围为 0~0.3。

2)利用 EDEM 软件建立了大豆小区育排种器的离散元仿真模型,并通过试验设计,建立排种性能指标(单粒率、多粒率、空粒率)与排种盘与大豆种子间的型孔直径比、型孔深度比、型孔倒角比间的回归模型,并利用响应曲面法对数据进行分析优化,得到最优参数组合为:型孔倒角比 0.14 时,型孔直径比在 1.73~1.91,型孔深度比在 0.76~1.25 时,此时,单粒率大于 90%,多粒率小于 5%,空粒率小于 5%。

3)按照最优参数设计行星齿轮式转位型孔排种盘的型孔尺寸,并制作两个型孔参数不在优化范围内的排种盘作为对照组进行对比验证试验,试验结果与仿真结果基本吻合,行星齿轮式转位型孔排种盘较对照组排种盘排种性能好,同时满足小区育种技术对排种盘适应性的要求。

[参考文献]

[1] Neil Y, Li Liujun, Nathan S, et al. Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 187(15): 91—101.

[2] 李毅念,易应武,杜世伟,等. 小区谷物联合收获机气吹式割台设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(6):79—87.  
Li Yinian, Yi Yingwu, Du Shiwei, et al. Design and experiment on air blowing header of plot combine harvester for grain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48 (6): 79—87. (in Chinese with English abstract)

[3] 连政国,王建刚,杨兆慧,等. 小区育种机械化在中国的发展[J]. 农业工程学报,2012,28(10):140—144.  
Lian Zhengguo, Wang Jiangang, Yang Zhaohui, et al. Development of plot-sowing mechanization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 140—144. (in Chinese with English abstract)

[4] 杨薇,李建东,方宪法,等. 玉米育种播种机械化国内外现状及发展趋势[J]. 农业工程,2018,8(6):9—15.  
Yang Wei, LI Jiandong, Fang Xianfa, et al. Domestic and foreign current situation and development trend of seeding mechanization in maize breeding[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(6): 9—15.

- (in Chinese with English abstract)
- [5] 程修沛,李洪文,王庆杰,等. 小麦小区播种机排种控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):30—38.  
Cheng Xiupei, Li Hongwen, Wang Qiangjie, et al. Design and experiment of wheat seeding control system in plot seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 30—38. (in Chinese with English abstract)
  - [6] 魏丽娟,戴飞,韩正晟,等. 小区小麦育种联合收获机试验研究[J]. 浙江农业学报,2016,28(6):1082—1088.  
Wei Lijuan, Dai Fei, Han Zhengsheng, et al. Experiment on plot wheat breeding combine harvester[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(6): 1082—1088. (in Chinese with English abstract)
  - [7] 杨然兵,张翔,李建东,等. 锥体帆布带式排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):6—13.  
Yang Yanbing, Zhang Xiang, Li Jiandong, et al. Parameter optimization and experiment on cone canvas belt type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(3): 6—13. (in Chinese with English abstract)
  - [8] 王家胜,王东伟,尚书旗,等. 4LZZ-1.0型小区稻麦联合收割机的研制及试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):19—25.  
Wang Jiasheng, Wang Dongwei, Shang Shuqi, et al. Development and experiment on 4LZZ-1.0 type plot grain combine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(18): 19—25. (in Chinese with English abstract)
  - [9] 谷金龙,陈海涛,顿国强. 2BXJ-4(A)型大豆小区育种精量播种机的设计与试验研究[J]. 大豆科学,2014,33(5):742—747.  
Gu Jinlong, Chen Haitao, Dun Guoqian. Design and field experiments of 2BXJ-4 (A) plot-sowing precision seeder for soybean[J]. Soybean Science, 2014, 33(5): 742—74. (in Chinese with English abstract)
  - [10] Lukas R, Helge A, Achim Walter, et al. Extracting leaf area index using viewing geometry effects-a new perspective on high-resolution unmanned aerial system photography[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 141(4): 161—175.
  - [11] 张东辉,史国敏,张辉,等. 一种大豆育种试验小区播种装置设计[J]. 农业工程,2017,7(1):89—90.  
Zhang Donghui, Shi Guomin, Zhang Hui, et al. Design on a kind of small field seeding device for soybean breeding experiment[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(1): 89-90. (in Chinese with English abstract)
  - [12] 顿国强,陈海涛,查韶辉. 基于EDEM的大豆窝眼轮式排种盘型孔参数优化与验证[J]. 大豆科学,2016,35(5):830—839.  
Dun Guoqiang, Chen Haitao, Zha Shaohui. Parameter optimization and validation of soybean cell wheel seeding plate type-hole based on EDEM[J]. Soybean Science, 2016, 35(5): 830—839. (in Chinese with English abstract)
  - [13] 顿国强,陈海涛,杨纪龙,等. 基于Shapley值的大豆种子均径组合预测模型[J]. 大豆科学,2014,33(6):910—914.  
Dun Guoqiang, Chen Haitao, Yang Jilong, et al. Combined forecast-
  - ing model of soybean seed average diameter based on the Shapley value[J]. Soybean Science, 2014, 33(6): 910—914. (in Chinese with English abstract)
  - [14] 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 Yanfen, Lin Jing, Li Baofa, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 37—46. (in Chinese with English abstract)
  - [15] 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报,2014,30(8):30—39.  
Cong Jinling, Liao Qingxi, Cao Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed & wheat seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 30—39. (in Chinese with English abstract)
  - [16] 宋井玲,杨自栋,杨善东,等. 一种新型内充种式精密排种器[J]. 农机化研究,2013,35(6):90—93.  
Song Jingling, Yang Zidong, Yang Shandong, et al. A novel inside-filling seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 90—93. (in Chinese with English abstract)
  - [17] 宋井玲,杨自栋,杨善东,等. 一种型孔深度可变的排种器[J]. 农机化研究,2010,32(12):103—105,120.  
Song Jingling, Yang Zidong, Yang Shandong, et al. A seed metering device of variable hole depth[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(12): 103—105,120. (in Chinese with English abstract)
  - [18] 孙裕晶,马成林,王海. 气力轮式精密排种器大豆充种过程试验研究[J]. 农机化研究,2006(10):147—150.  
Sun Yujing, Ma Chenglin, Wang Hai. Experimental research on soybean seeds filling process of air-blown vertical-rotor seed-metering device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(10): 147—150. (in Chinese with English abstract)
  - [19] 杨松华,孙裕晶,马成林,等. 气力轮式精密排种器参数优化[J]. 农业工程学报,2008(2):116—120.  
Yang Songhua, Sun Yujing, Ma Chenglin, et al. Optimization of parameters of air-blowing vertical-rotor type precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008(2): 116—120. (in Chinese with English abstract)
  - [20] 史嵩,周纪磊,刘虎,等. 驱动辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):61—70.  
Shi Song, Zhou Jilei, Liu Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61—70. (in Chinese with English abstract)
  - [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 Song, Zhang Dongxing, Yang Li, et al. Simulation and verifica-

- tion 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 (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 62—69. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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 Ruiying, Dai Fei, Zhao Wuyun 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. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘彩玲,王亚丽,都鑫,等. 摩擦复充种型孔带式水稻精量排种器充种性能分析与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 29—36.
- Liu Cailing, Wang Yali, Du Xin, et al. Filling performance analysis and verification of cell-belt rice precision seed-metering based on friction and repeated filling principle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 29—36. (in Chinese with English abstract)
- [24] 廖庆喜,高焕文,臧英. 玉米水平圆盘精密排种器型孔的研究[J]. 农业工程学报, 2003(2): 109—113.
- Liao Qingxi, Gao Huanwen, Zang Ying. Experimental study on the cell of the horizontal plate precision meter for corn seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003 (2): 109—113. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张波屏,播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982: 283—291.
- [26] Xu Tianyue, Yu Jianqun, Yu Yajun, et al. A modelling and verification approach for soybean seed particles using the discrete element method[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(12): 3274 - 3290.
- [27] 王金武,唐汉,王奇,等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 43—50.
- Wang Jinwu, Tang Han, Wang Qi, et al. Simulation test for nest-eye-wheel precision metering device with high fill rate based on the discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(21): 43—50. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郭丽峰. 立式圆盘大豆排种器型孔优化设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2014.
- Guo Lifeng. Optimization Design and Experiment Study on Hole of Vertical Disc Soybean Seed-Metering Device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [29] 周勇,胡梦杰,夏俊芳,等. 内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 59—67.
- Zhou Yong, Hu Mengjie, Xia Junfang, et al. Design and experiment of inside-filling adjustable precision seed-metering device with combined hole for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(18): 59—67 (in Chinese with English abstract)
- [30] 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京:中国农业出版社, 1998.
- [31] 顿国强. 行星齿轮式转位型孔排种盘: 中国专利, 201720562829. X[P]. 2017. 05. 19.
- [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:中国标准出版社, 2006.



## Parameter simulation optimization and experiment of seed plate type hole for soybean breeding

Dun Guoqiang<sup>1</sup>, Yu Chunling<sup>1</sup>, Yang Yongzhen<sup>1</sup>, Ye Jin<sup>1</sup>, Du Jiaxing<sup>2</sup>, Zhang Jingtao<sup>2</sup>

(1.College of Mechatronic Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2.Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi 154007, China)

**Abstract:** It is very important to develop breeding techniques for breed improvement and grain production increase. However, the most breeding experiment is completed by labor, and it has the disadvantages of high labor intensity, low efficiency and high cost, and because of the human factors and personal differences, the quantity and accuracy of plot breeding experiment is seriously affected, and hampered the smooth proceed of breeding. So the breeding seeding machine plays an important role in improve work efficiency and breeding quantity. There are many varieties of soybean in plot breeding experiment and they are always different in size and shape, as such, the variety adaptability for the plot breeding seed metering device become a key factor. So the mathematical model of type hole structure of socket-roller seed plate for soybean should be created. In our study, firstly, six species of soybean in Heilongjiang were selected as experiment materials and a statistical analysis of their physical parameters was conducted. Based on this, the ratio of diameter, depth and chamfer length of the type hole to the average diameter of soybean seed was determined by the theoretical analysis of seed's filling process. The discrete element simulation model of socket-roller seed plate was established and simulated the process of seed metering by EDEM. In order to get the optimal size parameter of type hole, the parameter optimization of type hole simulation experiment was conducted, and the ratio of diameter (DI Ratio), depth (DE Ratio) and chamfer length (CH Ratio) of the type hole to the average diameter of soybean seed was selected as experiment factors. The single-seed rate, multi seed rate and empty-seed rate was selected as experiment index, quadratic regression rotational combination experiment was done and the data was analyzed by Design-Expert 8.0.6 software, and we then obtained the regression model and analyzed the influence of factors on the index, the experiment results indicated that for single-seed rate, the influence of DI Ratio was very significant ( $P<0.01$ ), the DE Ratio and CH ratio was significant ( $P<0.05$ ), the single-seed rate first increased and then decreased with the increase of the DI Ratio, DE Ratio and CH Ratio, for multi-seeding rates, the influence of the DI Ratio and DE Ratio was very significant ( $P<0.01$ ), and CH Ratio had no effect on multi-seed rate ( $P>0.05$ ). The multi-seed rates increased with the increase of DI Ratio and DE Ratio. For the empty-seed rate, the influence of the DI Ratio and DE Ratio was very significant ( $P<0.01$ ), and CH Ratio had no effect on empty-seed rate ( $P>0.05$ ). The empty-seed rate decreased with the increase of DI Ratio and DE Ratio, the empty-seed rate and multi-seed rate were all decreased first and then increased with the increase of CH Ratio. The single-seed rate was more than 90%, multi-seed rate and empty-seed rate was less than 5% by the parameter optimization module of Design-Expert 8.0.6. When the CH Ratio was 0.14, the range of DI Ratio was 1.73 - 1.91, and the range of DE ratio was 0.76 - 1.25, the seed plate had the best performance. In accordance with the optimal parameters, varieties of Ken bean 40 and Ken Feng 17 were selected as experiment materials, planetary gear type transposition type hole seed plates were made by 3D Printing with the optimal type hole, and meanwhile the other two seed plates with different type hole without the optimal parameter were selected as contrast. The comparative experiment was done and the results showed that planetary gear type transposition type hole seed plate with the optimal type hole parameter had the best performance. The results were basically consistent with the simulation results, and the simulation optimization model had been verified. Meanwhile, the research provide a reference and method for the design and optimization of the type hole of seed plate.

**Keywords:** agricultural machinery; optimization; experiments; soybean plot breeding; socket-roller type hole; EDEM simulation.