

基于 EDEM 的大豆窝眼轮式排种盘型孔参数优化与验证

顿国强,陈海涛,查韶辉

(东北农业大学 工程学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:对品种的适应性是大豆育种专用排种器技术研究的关键,主要取决于大豆种子与排种盘型孔间的关系,因此,如何精准构建排种盘型孔参数关于大豆种子物理参数的数学模型具有非常重要的意义。本研究基于东农 52 大豆种子的物理参数,理论分析并确定其各种型孔充填状态的型孔均径比范围(1.43 ~ 1.87)及对应状态概率。建立了大豆小区育种插装式排种器的 EDEM 仿真模型,并以型孔均径比及充种倒角为试验因素,漏播率及重播率为试验指标,进行了二因素五水平二次回归通用旋转组合设计试验,建立了试验指标的数学模型,以优化型孔的最佳结构参数。结果表明:对漏播率,型孔均径比极显著($P < 0.01$),充种倒角显著($0.01 < P < 0.05$);对重播率,型孔均径比极显著($P < 0.01$),充种倒角有一定影响($0.05 < P < 0.1$)。在试验范围内,随型孔均径比的增大,漏播率减小及重播率增大,随充种倒角的增大,漏播率先减小后增大,重播率无变化。型孔最佳参数为型孔均径比 1.64,充种倒角 1.54 mm,此时,漏播率 4.95%,重播率 6.49%。验证试验结果表明:优化型孔的排种盘具有相对最佳的作业性能。该研究为其它作物排种器型孔的设计研究提供了参考。

关键词:农业机械;种子;计算机仿真;大豆;型孔;参数优化;验证
中图分类号:S223.2 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2016.05.0830

Parameter Optimization and Validation of Soybean Cell Wheel Seeding Plate Type-hole Based on EDEM

DUN Guo-qiang, CHEN Hai-tao, ZHA Shao-hui
(Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: At present, varieties adaptability is the key problem of soybean breeding special seed metering device technology research, the main problem is that seeding plate how to adapt difference of measurement and shape of different soybean species. It is very important to construct precision model between unknown parameters such as type-hole diameter and filling chamfer and known parameters such as seed hundred-grain weight and average diameter. Based on Dongnong 52 physical parameters and theory analysis, acquired each filling state's soybean seed's type-hole average diameter ratio range is 1.43 – 1.87. EDEM simulation model of soybean breeding plug type metering device in district was established, the type hole average diameter ratio and filling chamfer was selected as factors, seed missing rate and seed re-filling rate was selected as indexes, two factors and five levels second order regression current rotation design experiment was done, test index's mathematical model has been built, variance analysis of test results indicate that, for seed missing rate, average diameter ratio is very significant $P < 0.01$, filling chamfer is significant $0.01 < P < 0.05$, for seed re-filling rate, type hole average diameter ratio is very significant $P < 0.01$, filling chamfer has a certain influence, but is not significant $0.05 < P < 0.1$. Seed missing rate decreased and seed re-filling rate increased with type-hole average diameter ratio's increasing, seed missing rate decreased and then increased with filling chamfer's increasing. The optimal structure parameters of seeding plate's type-hole was that type hole average diameter ratio was 1.64 and filling chamfer was 1.54 mm, seed missing rate was 4.95% and seed re-filling rate was 6.49%, the metering device had the best working performance. In order to verify optimal type-hole parameters, seed metering device performance contrast test has been done, the results indicated that the seed metering device with optimal parameter had the best working performance. Meanwhile, the research provides a practical new method for design for seeding plate hole of other crops.

Keywords: Agricultural machinery; Seed; Computer simulation; Soybean; Type-hole; Parameter optimization; Validation

目前,对品种的适应性是大豆育种专用排种器技术研究的关键问题之一,其主要解决的是排种盘型孔如何适应不同品种大豆间的尺寸及形状差异^[1-4]。在科学研究及生产实践中,大豆种子仅给出百粒重、净度、发芽率等参数,而未知种子形状及尺寸^[5-8]。在未确定大豆种子的形状及尺寸与排种盘型孔结构间关系的条件下,不合理的型孔结构将导致排种器漏播率和重播率的升高,影响排种器的

收稿日期:2015-12-18
基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(GARS-04);公益性行业(农业)科研专项经费项目(20130311);东北农业大学研究生科技创新基金(yjszx14020)。
第一作者简介:顿国强(1986-),男,博士,主要从事设施农业机械装备研究。E-mail:dunguoqiang110@126.com。
通信作者:陈海涛(1962-),男,教授,博士,博导,主要从事农业机械装备及生物质材料技术研究。E-mail:htchen@neau.edu.cn。

作业性能。因此,精确构建未知参数(型孔的直径、充种倒角等)与已知参数(大豆种子均径、大豆单粒质量、品种百粒重等)间的函数模型具有非常重要的意义。顿国强等^[9]已采用组合预测方法构建了大豆种子单粒质量与种子均径间的组合预测模型。张庆峰等^[10]利用可靠性理论确定了丸粒化玉米种子的型孔结构模型;曹秀英等^[11]采用理论分析及仿真试验的方法对离心式油菜精量排种器型孔结构进行了设计研究;相关专家^[12-15]采用离散元仿真的方法对排种器进行了设计研究。但未见关于大豆窝眼轮排种盘型孔的设计研究,因此,利用一种新的方法,优化型孔的最佳结构,构建大豆种子均径与排种盘型孔尺寸间的关系模型,可为育种专用窝眼轮排种盘型孔的设计提供了重要的理论设计依据。

本文首先对试验材料东农 52 大豆种子物理参数进行统计分析,依此,对大豆种子不同充填状态进行理论分析,以确定型孔均径比的理论范围及状态概率,其次,利用 EDEM 模拟了大豆育种专用插装式排种器的作业过程,结合响应面法确定型孔结构参数的回归模型,分析型孔结构参数对排种器作

业性能的影响,并优化型孔其最佳参数,最后,对优化型孔参数进行了试验验证。

1 大豆物理参数测定

选取东农 52 大豆种子为试验材料,随机选取完整种子 100 粒,实测百粒重 21.2 g,含水率 12.4%,如图 1a 所示。利用德国麦思德 MASTERPROOF-158 型电子游标卡尺(量程 160 mm,精度 0.01 mm)及 JM-D200 型分析天平(量程 20 g,精度 0.001 g)测量种子粒形尺寸(粒长 a、粒宽 b、粒厚 c)及对应种子粒质量 m,计算每粒种子的均径 d,如图 1b 所示,100 粒大豆种子均径服从均值 6.69 mm、标准差 0.233 mm 的正态分布,对大豆种子尺寸参数进行统计,如表 1 所示。按不等边椭球体计算大豆种子的体积,则由式(1)计算大豆种子的平均密度为 1.230 g·cm⁻³。

$$\rho_{大豆} = m_{大豆} / (\frac{4}{3} \pi \frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{c}{2}) \tag{1}$$

式中: $\rho_{大豆}$ 为大豆种子密度,g·cm⁻³; $m_{大豆}$ 为大豆种子质量,g。

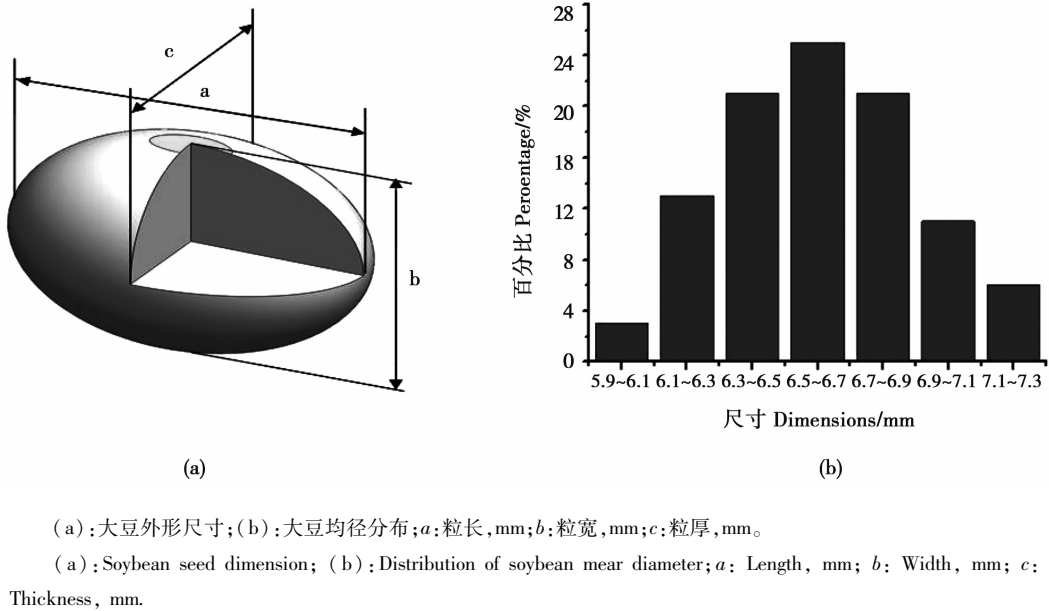


图 1 大豆外形尺寸参数测定

Fig. 1 Soybean dimension parameters measure

表 1 大豆物理参数统计

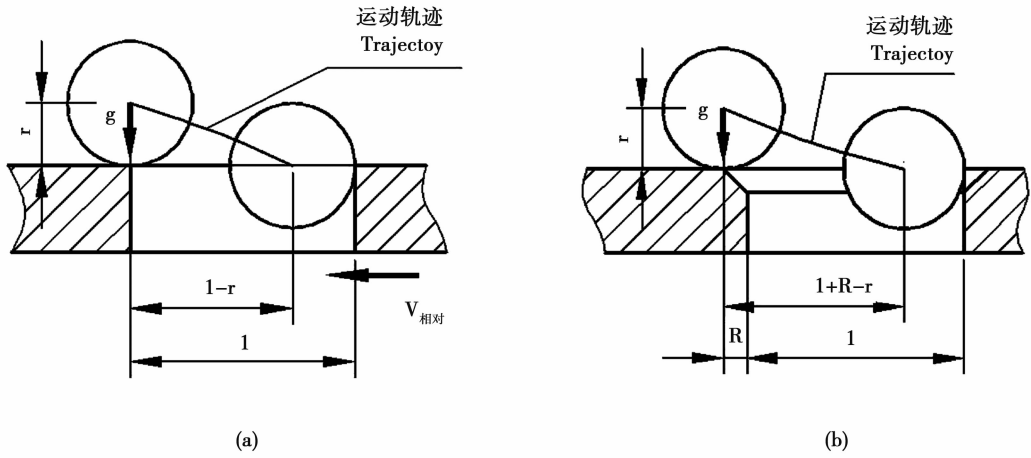
Table 1 Statistics of soybean physical parameters

参数	长	宽	厚	均径	粒质量
Parameter	Length/mm	Width/mm	Thickness/mm	Average diameter/mm	Seed mass/g
最大值 Max.	7.71	7.43	6.81	7.24	0.254
最小值 Min.	6.20	5.93	5.44	5.91	0.139
均值 Average	7.00	6.83	6.24	6.69	0.202

2 型孔充种过程分析

格略希金院士对谷粒囊入筛孔过程进行了理

论分析^[15],如图2所示,分别对无倒角筛孔及倒角筛孔进行理论分析。



(a):无倒角筛孔;(b):倒角筛孔; g :重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; r :颗粒半径, m ; l :筛孔直径, m ; R :筛孔倒角, m ; $V_{\text{相对}}$:筛孔运动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。
(a):Non-chamfering sieve pore;(b):Chamfering sieve pore; g : Gravity acceleration, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; r : Particle radius, m ; l : Sieve pore diameter, m ; R : Sieve pore chamfer, m ; $V_{\text{相对}}$: Movement velocity of sieve pore, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图2 谷粒囊入筛孔过程
Fig.2 Grain feeding mesh hole processing

如图2a所示,谷粒为半径 r 的纯球体,以重力加速度自由下降,矩形筛孔直径 l ,筛孔以速度 $V_{\text{相对}}$ 反向运动,则在水平方向及垂直方向有:

$$\begin{cases} l-r = V_{\text{相对}} \cdot t \\ r = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \end{cases} \quad (2)$$

消除时间 t ,求得筛孔直径 l 与颗粒直径 $2r$ 的比值 β_1 为:

$$\beta_1 = \frac{l}{2r} = \frac{V_{\text{相对}}}{\sqrt{2g \cdot r}} + 0.5 \quad (3)$$

式中: β_1 为无倒角筛孔直径 l 与颗粒直径 $2r$ 的比值。

由式(3)可知,型孔比 β_1 随型孔相对速度 $V_{\text{相对}}$ 的增大及谷粒半径 r 的减小而增大。而当筛孔边缘出现倒角时,如图2b所示,可求得带倒角型孔的型孔直径 l 与颗粒直径 $2r$ 的比值 β_2 为:

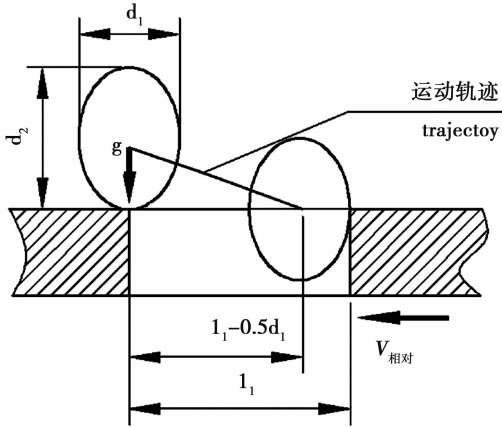
$$\beta_2 = \frac{V_{\text{相对}}}{\sqrt{2gr}} + 0.5 - \frac{R}{2r} \quad (4)$$

式中: β_2 为有倒角筛孔直径 l 与颗粒直径 $2r$ 的比值。

由图2及式(4)可知, $\beta_1 - \beta_2 = R/2r$,即当筛孔边缘存在倒角时,其具有相对较小的筛孔直径,换言之,当筛孔直径相同时,倒角提升了筛孔的充填性。

针对东北农业大学研制的插装式小区育种专用排种器,排种盘直径 130 mm,周向均布数 24 个圆柱型孔,理论最小株距为 5 cm,作业速度上限 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

计算排种盘型孔极限相对速度 $0.34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。



d_1 :种子截面宽度, m ; d_2 :种子截面高度, m ; l_1 :型孔直径, m ; $V_{\text{相对}}$:型孔运动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。
 d_1 :Seed section width, m ; d_2 :Seed section height, m ; l_1 :Type-hole diameter, m ; $V_{\text{相对}}$:Movement velocity of type-hole, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图3 大豆囊入型孔过程
Fig.3 Soybean feeding type-hole processing

如图3所示,大豆种子为不等边椭球体,其截面为椭圆,其充种过程有如下关系:

$$\begin{cases} l - 0.5d_1 = V_{\text{相对}} \cdot t \\ \frac{d_2}{2} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \end{cases} \quad (5)$$

消除时间 t ,求得型孔均径比为:

$$\varphi = \frac{\left(\frac{d_1}{2} + V_{\text{相对}}\sqrt{\frac{d_2}{g}}\right)}{d}$$

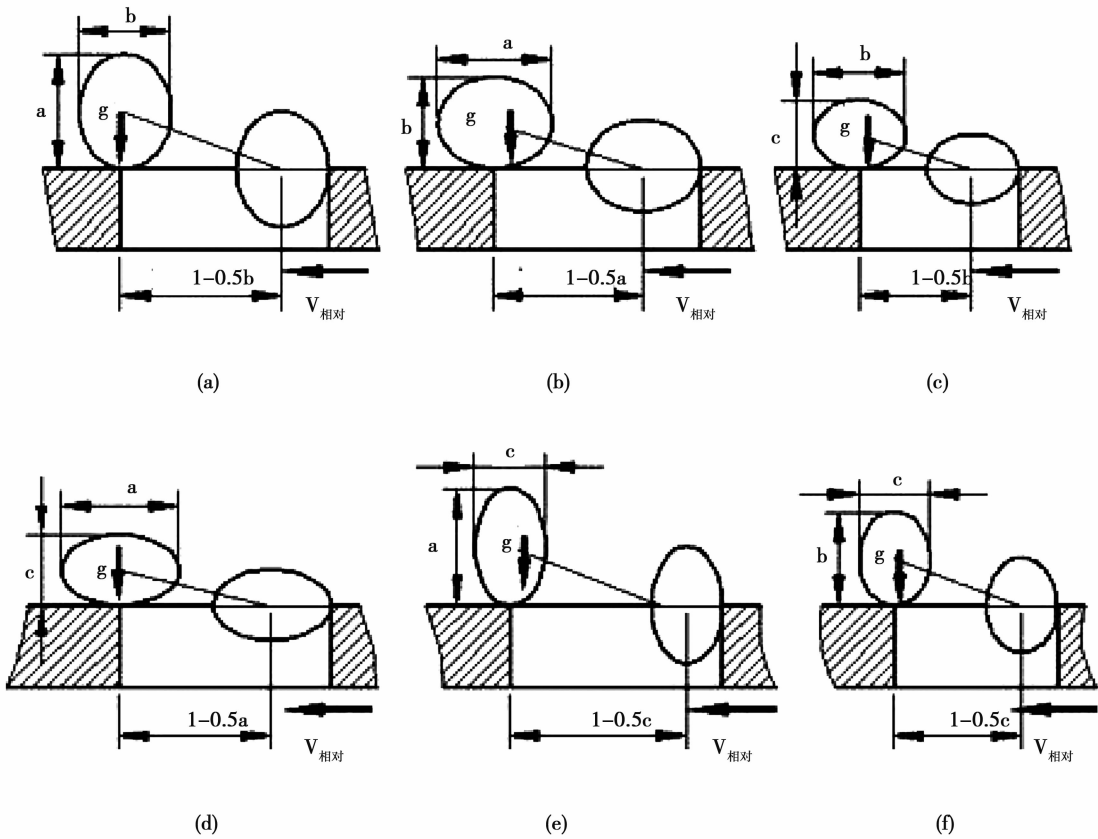
(6)

式中: φ 为型孔直径 l_1 与大豆籽粒均径 d 的比值,简称型孔均径比; d_1 为种子截面宽度,mm; d_2 为种子截面高度,mm; d 为种子均径,mm。

如图 4 所示,大豆种子会以 6 种不同的运动姿态充入型孔,且各充填状态的比率与种子截面面积及质心高度成反比,如图 3 所示,大豆种子截面面积为:

$$M_{\text{大豆}} = \pi \frac{d_1 \cdot d_2}{2}$$

(7)



(a) ~ (f): 状态 1 ~ 状态 6。
(a)-(f): Condition 1 to 6.

图 4 大豆充种形态分析
Fig. 4 Soybean feeding type-hole state analysis
表 2 充种状态参数
Table 2 Parameters of filling static

项目 Item	状态 1 Condition 1	状态 2 Condition 2	状态 3 Condition 3	状态 4 Condition 4	状态 5 Condition 5	状态 6 Condition 6
型孔均径比 Type-hole average diameter ratio	1.87	1.86	1.81	1.79	1.42	1.43
状态概率 Probability	0.148	0.152	0.186	0.170	0.182	0.162

大豆 6 种充填状态如图 4。
Six type-hole filling state of soybean as shown in Fig. 4.

3 基于 EDEM 仿真的排种盘型孔结构参数优化

3.1 仿真参数设定

3.1.1 全局变量参数设置 大豆颗粒与大豆颗粒,大豆颗粒与壁面及大豆颗粒与种刷轮之间均采用 Hertz-mindlin (no-slip) 模型,参考相关文献^[16-21],确定模型参数设置见表 3。

3.1.2 大豆颗粒离散模型的建立 排种盘型孔形状结构和尺寸对大豆排种器的作业有重要的影响。为保证对排种器作业过程的真实模拟,需对大豆种子尺寸进行相关测定,而后对颗粒进行建模,参照表 1 数据,大豆种子平均长度 7.00 mm,平均宽度 6.83 mm,高 6.26 mm,计算大豆种子均径为 6.69 mm,为便于建模提高计算机运行速度,大豆籽粒采用长球面椭球体建模,长轴 7.00 mm,短轴 6.50 mm,采用球颗粒聚合方法建立大豆种子的离散模型,种子颗粒由 2 个直径 6.30 mm 距离 0.70 mm 及一个直径 6.50 mm 的球体组成,并利用 EDEM 软件计算大豆种子模型质量属性参数,大豆颗粒相关参数设置见表 4。

表 3 全局变量参数设置			
Table 3 Pre-treatment parameters 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	1.04×10^6	
	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1230	
	泊松比	0.30	
塑料壁面 Plastic wall	剪切模量/Pa	1.04×10^7	
	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1290	
	泊松比	0.40	
种刷轮 Seed brush wheel	剪切模量/Pa	1.1×10^2	
	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1150	
	恢复系数	0.60	
大豆-壁面 Soybean-wall	静摩擦系数	0.40	
	动摩擦系数	0.01	
	恢复系数	0.60	
	静摩擦系数	0.45	
大豆-大豆 Soybean-soybean	动摩擦系数	0.05	
	恢复系数	0.45	
	静摩擦系数	0.50	
大豆-种刷 Soybean-brush	动摩擦系数	0.01	

表 4 大豆颗粒参数设置	
Fig. 4 Soybean particle parameters setting	
属性 Property	值 Value
长 Length/mm	7
宽 Width/mm	6.5
质量 Mass/g	0.191
体积 Volume/ mm^3	155.37

3.1.3 排种器仿真模型的建立 以东北农业大学研制的大豆小区育种插装式排种器为原模型,利用 SolidWorks 进行 1:1 比例建模,并对不必要的结构进行简化,排种器简化模型主要由壳体、种刷轮及排种盘 3 部分组成。将模型转换成 .igs 文件以导入 EDEM 中,并在 EDEM 中,排种器的种箱的上部建立颗粒工厂,设定大豆颗粒总数 250 个,生成速率 $2\,500\text{个} \cdot \text{s}^{-1}$,且颗粒直径大小服从正态分布,计算种子半径标准差 0.115 9 mm。由于插装式大豆小区育种用排种器对作业速度要求不高,以机具作业速度 $1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,理论株距 5 cm,实际排种盘周向均布 24 个型孔为依据,计算排种盘转速 $50\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,种刷轮转速 $100\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,仿真过程中,设定固定时间步长为 $1.267 \times 10^{-5}\text{ s}$,仿真时间与排种器完成全部排种作业为准。最终的排种器仿真模型如图 5b 所示。

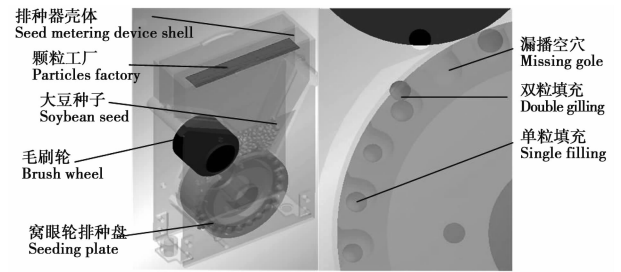


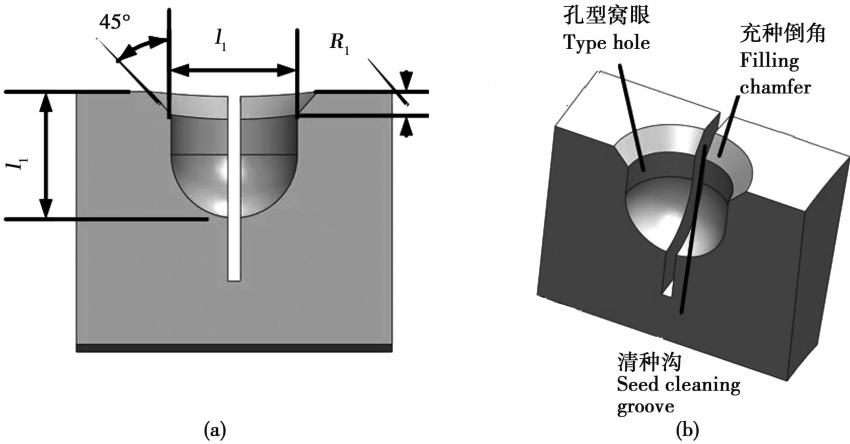
图 5 排种器 EDEM 仿真模型
Fig. 5 Seed metering device EDEM simulation model

3.2 参数优化虚拟试验

3.2.1 虚拟试验因素与指标 影响窝眼轮排种盘作业性能的主要结构参数有型孔相对大豆种子均径的倍数、型孔边充种倒角的大小、排种盘直径及周向均布型孔数量。东北农业大学自主研发的大豆小区育种插装式排种器的排种盘直径 130 mm,周向均布 24 个型孔已定,因此,研究仅考虑窝眼轮排种盘型孔参数的影响。选定型孔相对大豆种子均径比及型孔充种倒角的大小为试验因素进行响应的试验。相关研究^[22-23]指出:窝眼轮排种盘型孔相对种子均径的倍数为 1.5 ~ 1.7 时,排种盘作业效果最佳,结合前文型孔充种过程分析,设定因素均径比 1.4 ~ 1.9;因素充种倒角范围 0.5 ~ 2.5 mm;通过改变排种盘建模参数来改变型孔参数,如图 6 所示,窝眼型孔包括型孔、充种倒角及清种沟 3 部分组

成,型孔的直径与深度相等为 l_1 mm,充种倒角的角度 45° ,倒角值为 R_1 mm,则对应的型孔均径比 $\varphi = l_1/d$, d 为大豆种子的平均直径。结合 EDEM 软件对排种器作业过程进行仿真模拟,选择重播率及

漏播率为试验指标,通过录制排种器每个试验处理模拟作业过程的动画,记录仿真过程空穴数、重播数以计算各试验处理的重播率及漏播率,评价排种盘型孔参数变化对作业性能的影响。



(a):型孔剖面图;(b):型孔轴测图; R_1 :为排种盘型孔窝眼充填倒角,mm。
(a):Profile of type-hole; (b):Axonometric of type-hole; R_1 : Seeding plate type-hole filling chamfer,mm.

图6 排种盘型孔结构参数

Fig.6 Seeding plate whole structure parameters

3.2.2 试验方法 虚拟试验采用二因素五水平二次回归通用旋转组合设计试验方法^[24],以均径比 x_1 及充种倒角 x_2 为试验因素,漏播率 y_1 及重播率 y_2 为试验指标,寻求因素对指标的影响,构造因素对指标的回归模型,优化型孔最佳的结构。试验因素及水平编码见表5。

3.2.3 试验方案及结果 虚拟试验方案及结果见表6。

3.2.4 数据分析及参数优化

对表6数据中进行二元二次回归拟合并进行方差分析,剔除回归方程中系数影响不显著项,得到漏播率及重播率的回归方程分别为:

$$y_1 = 38.028 - 14.315x_1 - 11.949x_2 + 3.722x_2^2 \quad (7)$$

$$y_2 = 8.488 - 17.683x_1 - 8.317x_2 + 12.218x_1^2 + 2.946x_2^2 \quad (8)$$

如表7所示,对试验指标回归模型进行方差分析及回归系数显著性检验。

表5 试验因素与水平编码

试验因素 Test factors		
编码 Code	型孔均径比 Type hole average diameter ratio x_1	充种倒角 Filling chamfer x_2 /mm
1.414	1.9	2.5
1	1.83	2.21
0	1.65	1.5
-1	1.47	0.79
-1.414	1.4	0.5

表6 试验方案及试验结果

Table 6 Experimental scheme and result

序号 Order	型孔均径比 Type-hole average diameter ratio x_1	充种倒角 Filling chamfer x_2 /mm	漏播率 Seed missing rate y_1 /%	重播率 Seed re-filling rate y_2 /%
1	-1	-1	9.13	4.18
2	1	-1	4.70	11.54
3	-1	1	7.95	4.84
4	1	1	3.70	12.64
5	-1.414	0	9.58	1.66
6	1.414	0	1.13	13.99

续表 6

序号 Order	型孔均径比 Type-hole average diameter ratio x_1	充种倒角 Filling chamfer x_2/mm	漏播率 Seed missing rate $y_1/\%$	重播率 Seed re-filling rate $y_2/\%$
7	0	-1.414	9.78	9.58
8	0	1.414	8.18	10.43
9	0	0	5.06	6.28
10	0	0	4.29	6.54
11	0	0	4.69	6.73
12	0	0	4.89	6.94
13	0	0	5.10	7.14

表 7 试验指标简化模型的方差分析
Table 7 Variance analysis of test indexes simplified model

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of square	自由度 DF	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significance
漏播率模型 Seed missing rate model	80.498	3	77.97	< 0.0001	***
x_1	53.115	1	154.34	< 0.0001	***
x_2	2.465	1	7.16	0.0254	**
x_2^2	24.918	1	72.41	< 0.0001	***
残差 Residual	3.097	9			
失拟值	2.662	5	4.89	0.0745	*
纯误差 Pure error	0.435	4			
总变异 Total variation	83.595	12			
重播率模型 Seed re-filling rate model	149.540	4	152.50	< 0.0001	***
x_1	132.810	1	541.76	< 0.0001	***
x_2	1.095	1	4.47	0.0675	*
x_1^2	1.090	1	4.45	0.0680	*
x_2^2	15.345	1	62.59	< 0.0001	***
残差	1.961	8			
失拟值 Residual	1.506	4	3.31	0.1367	
纯误差 Pure error	0.455	4			
总变异 Total variation	151.501	12			

***: $P < 0.01$, 极显著影响; **: $0.01 < P < 0.05$, 显著影响; *: $0.05 < P < 0.1$, 有一定影响, 但不显著; $P > 0.1$ 为无影响。下同。
***: $P < 0.01$, significant effect; **: $0.01 < P < 0.05$, significant effect; *: $0.05 < P < 0.1$, a certain effect, but not significant; $P > 0.1$ is no effect. The same below.

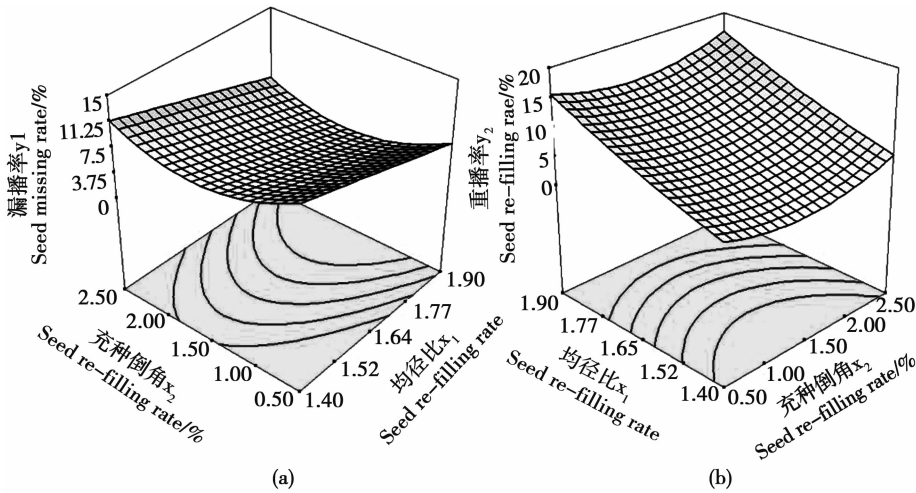
由表 7 可知,漏播率模型显著性检验 $F = 77.969$,回归模型的 $P < 0.0001$,表明回归模型为极显著;失拟项 $F = 4.894$,失拟性检验 $P > 0.05$,说明预测值与实际值在试验范围内拟合的很好,且模型的决定系数 $R^2 = 0.9629$,说明回归模型可解释其响应值 96.29% 的变化,能够反映漏播率 y_1 与 x_1 、 x_2 之间的关系,可利用此模型对漏播率进行分析及预测。由漏播率回归模型可知,一次项 x_1 为极显著 ($P < 0.01$), x_2 为显著 ($0.01 < P < 0.05$),二次项 x_2^2 为

极显著 ($P < 0.01$),说明因素与漏播率间存在二次非线性关系,且不存在交互作用。重播率模型显著性检验 $F = 152.5$,回归模型的 $P < 0.0001$,表明回归模型为极显著;失拟项 $F = 3.307$,失拟性检验 $P > 0.05$,说明预测值与实际值在试验范围内拟合的很好,且模型的决定系数 $R^2 = 0.9871$,这说明回归模型可解释其响应值 98.71% 的变化,能够反映重播率 y_2 与 x_1 、 x_2 之间的关系,可利用此模型对重播率进行分析及预测。由重播率回归模型可知,一次项

x_1 为极显著 ($P < 0.01$), x_2 为有一定影响, 但不显著 ($0.05 < P < 0.1$), 二次项 x_1^2 为有一定影响 ($0.05 < P < 0.1$), x_2^2 为极显著 ($P < 0.01$), 说明因素与重播率间存在二次非线性关系, 且不存在交互作用。

因素对指标漏播率的响应曲面如图 7a 所示, 漏播率 y_1 随均径比 x_1 的增大而降低, 随充种倒角 x_2 的增大而先减小后增大, 这主要由于当均径比增大时, 型孔体积增大, 囊种性能增加, 所以漏播率降

低, 当充种倒角增大时, 有利于种子进入型孔, 漏播率降低, 但当充种倒角过大时, 加上清种轮的作用, 种子易于滑出型孔, 造成漏播率的增大。因素对指标重播率的响应曲面如图 7b 所示, 由图可知: 重播率 y_2 随均径比 x_1 的增大而增大, 随充种倒角 x_2 的增大先减小后增大, 但变幅不大; 这主要由于当均径比增大时, 型孔因体积增大, 容纳多粒种子的能力增强, 所以重播率升高。



(a):漏播率;(b):重播率。
(a):Seed missing rate; (b):Seed re-filling rate.

图 7 试验指标响应曲面图

Fig. 7 Response surface plot of test indexes

为优化排种盘型孔的最佳结构参数, 利用 design-expert 6.0.10 的参数优化模块, 设定指标重播率趋于最小, 漏播率趋于最小, 优化数值解: 均径比 1.64, 充种倒角 1.54 mm, 此时, 漏播率为 4.95%, 重播率为 6.49%, 即排种盘型孔直径为大豆籽粒均径的 1.64 倍时, 排种器具有最佳的作业性能。

4 排种器型孔参数试验验证

4.1 试验材料

大豆品种东农 52, 平均粒长 7.00 mm, 粒宽 6.83 mm, 粒厚 6.26 mm, 平均粒径 6.69 mm, 实测百粒重 21.2 g, 含水率 12.4%, 净度 99%。

4.2 试验装置仪器设备

如图 8 所示, 试验装置仪器设备包括东北农业大学研制的小区育种用插装式排种器, 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)。

4.3 试验方法

采用单因素对比试验方法^[25], 设计加工 3 种规格尺寸的排种盘, 排种盘直径 130 mm, 24 个型孔周向均布, 按均径比优化参数计算型孔直径为 10.97 mm,

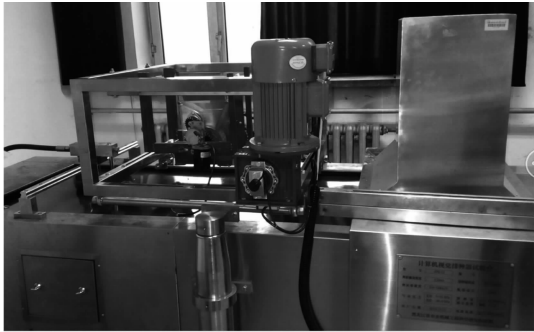


图 8 排种器验证试验

Fig. 8 Verification test of seed metering device

为便于加工取型孔直径 11 mm, 分别加工型孔直径分别为 10, 12 mm 的对照排种盘, 由于试验因素型孔充种倒角对两试验指标并非极显著影响, 且为次要因素, 因此, 取型孔充种倒角均为 1.5 mm, 设定作业速度为 3.6 km·h⁻¹, 理论株距 5 cm, 每个试验处理重复 3 次, 按照国标单粒 (精密) 播种机试验方法 GB/T6973-2005^[26] 实施试验, JPS-12 计算机视觉精密排种器性能检测试验台会在排种器稳定运行后记录排出 250 粒种子后对数据进行统计分析。以粒距合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标。

4.4 结果与分析

为探寻排种盘型孔直径变化对试验指标的影响,并验证型孔的最优结构参数,如表 8 所示,对各试验指标进行方差分析,同时,绘制因素对指标影响趋势如图 9 所示。

表 8 型孔直径对试验指标影响的方差分析
Table 8 ANOVA of type-hole diameter effect on test indexes

试验指标 Test indexes	合格指数 Acceptability rate / %	重播指数 Multiples rate / %	漏播指数 Miss rate / %
F 值 F value	12.95	56.61	171.96
P 值 P value	0.0067	0.0001	<0.0001

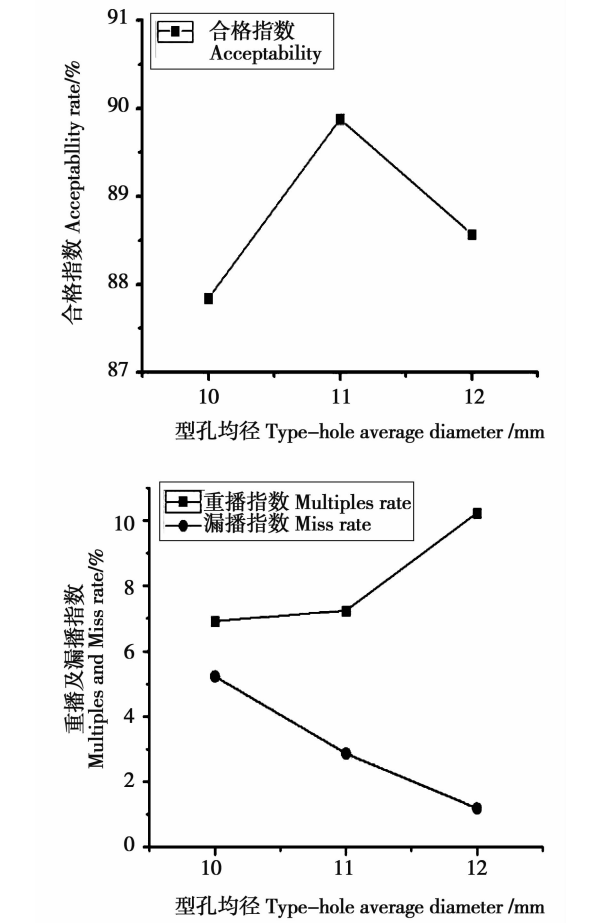


图 9 因素指标影响趋势图

Fig. 9 Effects of factors to test indexes
由表 8 可知,排种盘型孔直径变化对各试验指标均为极显著影响 ($P < 0.01$),对指标影响的显著次序为漏播指数 > 重播指数 > 合格指数。由图 8 可见,3 种型孔排种盘的合格指数在 87% ~ 90%,且最优参数型孔性能优于对照组,且随着型孔尺寸的增大,排种器的重播率增大,漏播率减小;这主要由于当窝眼轮型孔增大时,型孔囊种性能增强,因此,重播率增大漏播率减小,试验结果表明优化型孔参数具有最佳的作业性能。

5 结论与讨论

通过采用理论分析、EDEM 仿真、响应面法及试验验证相结合的方法,优化大豆窝眼轮式排种盘型孔的最佳结构,获得如下结论:

理论分析确定大豆东农 52 各种型孔充填状态的窝眼轮排种盘型孔均径比及对应状态概率,型孔均径比范围 1.43 ~ 1.87。

利用 EDEM 软件建立了大豆小区育种插装式排种器的离散元仿真模型,通过排种盘型孔参数优化仿真试验,确定了漏播率及重播率与试验因素的数学模型,结果表明:对漏播率,均径比极显著 ($P < 0.01$),充种倒角显著 ($P < 0.05$);对重播率,均径比极显著 ($P < 0.01$),充种倒角有一定影响 ($P < 0.1$)。且在试验范围内,随型孔比的增大,漏播率减小及重播率增大,随充种倒角的增大,漏播率先减小后增大,重播率无变化。优化型孔最佳参数:均径比 1.64,充种倒角 1.54 mm,此时,漏播率为 4.95%,重播率为 6.49%。验证试验结果表明:优化型孔的排种盘具有最佳的作业性能。

研究提出了一种大豆窝眼轮排种盘型孔参数优化方法,同时,研究为其它作物排种器型孔的设计研究提供了参考。

参考文献

[1] 李建东,杨薇,高波,等. 全自动化的小区精量播种机的研制 [J]. 农机化研究,2014,36(4):60-64. (Li J D, Yang W, Gao B, et al. Development of the automatic plot precise seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(4):60-64.)

[2] 刘曙光,尚书旗,杨然兵,等. 小区播种机充种装置工作性能试验 [J]. 中国农业大学学报,2011,16(3):156-163. (Liu S G, Shang S Q, Yang R B, et al. Test on performance of seed-filling device of plot seeder [J]. Journal of China Agricultural University,2011,16(3):156-163.)

[3] 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 J L, Yang Z D, Yang S D, et al. A novel inside-filling seed metering device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2013,35(6):90-93.)

[4] 赵宇,陈海涛,王业成,等. 垄上双行插装式排种器性能试验研究初报 [J]. 大豆科学,2013,32(1):98-101. (Zhao Y, Chen H T, Wang Y C, et al. Preliminary study on the performance of insert-metering sub-district seeder [J]. Soybean Science,2013,32(1):98-101.)

[5] Karayel D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104:121-125.

[6] 王汉羊,陈海涛,纪文义,等. 2BMFJ-3 型麦茬地免耕精密播种机排种器选型试验研究 [J]. 大豆科学,2013,32(2):257-261.

- (Wang H Y, Chen H T, Ji W Y, et al. Experimental research on seed-metering choice of 2BMFJ-3 type no-till precision planter in wheat stubble fields [J]. Soybean Science, 2013, 32(2): 257-261.)
- [7] 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 J L, Chen H T, Dun G Q. Design and field experiments of 2BXJ-4(A) plot-sowing precision seeder for soybean [J]. Soybean Science, 2014, 33(5): 742-747.)
- [8] 顿国强,陈海涛. 基于 VB 的 SolidWorks 排种盘建模二次开发[J]. 大豆科学, 2012, 31(4): 630-634, 639. (Dun G Q, Chen H T. SolidWorks API methods of modeling for seed plate based on VB [J]. Soybean Science, 2012, 31(4): 630-634, 639.)
- [9] 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 G Q, Chen H T, Yang J L, et al. Combined forecasting model of soybean seed average diameter based on the Shapley value [J]. Soybean Science, 2014, 33(6): 910-914.)
- [10] 张庆峰,耿端阳,李丹,等. 水平圆台式排种器型孔结构尺寸对囊种率影响的研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(11): 143-147. (Zhang Q F, Geng D Y, Li D, et al. Study on seed-cell filling of the cell structure's size of the horizontal cone frustum type precision meter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(11): 143-147.)
- [11] 曹秀英,廖庆喜,丛锦玲,等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 40-46. (Cao X Y, Liao Q X, Cong J L, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 40-46.)
- [12] 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 particles simulation technology on seed-metering device research [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(2): 110-114.)
- [13] 李政权,于建群,张尉林,等. 内充式排种器工作过程和性能的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 32-36. (Li Z Q, Yu J Q, Zhang W L, et al. Simulation analysis of working process and performance of inside-filling seed metering device by discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(11): 32-36.)
- [14] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114. (Liao Q X, Zhang P L, Liao Y T, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rapeseed metering device based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114.)
- [15] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1982: 283-291. (Zhang B P. Design theory of seeder [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1982: 283-291.)
- [16] 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.)
- [17] 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.)
- [18] 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.)
- [19] 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.)
- [20] 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.)
- [21] 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.
- [22] 刘宏新,徐晓萌,郭丽峰,等. 具有复合充填力的立式浅盆型排种器充种机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 9-16. (Liu H X, Xu X M, Guo L F, et al. Research on seed-filling mechanism of vertical shallow basin type seed-metering device with composite filling force [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 9-16.)
- [23] 王业成,邱立春,张文娇,等. 摩擦型立式圆盘精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 22-26. (Wang Y C, Qiu L C, Zhang W J, et al. Design and experiment of friction vertical plate precision seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(1): 22-26.)
- [24] 胡建芳,陈建中,王玉国,等. 优化高压电场处理提高高粱种子活力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 253-259. (Hu J F, Chen J Z, Wang Y G, et al. Optimization of condition for improving sorghum seed vigor by high voltage electric field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 253-259.)
- [25] 左彦军,马旭,齐龙,等. 窝眼窄缝式气吸滚筒排种装置的试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 141-144. (Zuo Y J, Ma X, Qi L, et al. Seeding experiments of suction cylinder-seeder with socket-slot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(11): 141-144.)
- [26] GB/T6973-2005, 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 中国: 中华人民共和国国家标准, 2015. (GB/T6973-2005, Testing methods of single seed drills (precision drills) [S]. China: National Standard of the People's Republic of China, 2015.)