doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.006

扰动促充机械式绿豆精量排种器设计与试验

李玉环[1,2]　魏亚男[1,2]　杨　丽[1,2]　张东兴[1,2]　崔　涛[1,2]　张凯良[1,2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 我国绿豆种植机械化水平较低,多采用撒播或条播,良种浪费严重,针对该问题并结合种植地块小且分散,每穴 2~3 粒的农艺播种要求,设计了一种采用凹型携种孔兜种、导种槽促进充种、毛刷清种护种的扰动促充机械式绿豆精量排种器。分析了扰动促充力学关系,确定了导种槽、携种孔和清种毛刷参数的设计方法。采用离散元软件 EDEM 仿真优化方法,以携种孔的结构尺寸参数为试验因素进行了三因素三水平的正交仿真试验,确定了较优的携种孔参数组合为:携种孔长度 10.5 mm、宽度 6.5 mm、深度 5 mm,对较优参数组合进行了验证试验,试验结果表明排种器的最优充种指数为 96.05%,合格充种指数为 1.64%,漏充指数为 1.57%,与仿真优化结果一致。为考察排种器对速度的适应性,进行了速度单因素试验,试验结果表明作业速度小于等于 8 km/h 时,合格指数大于 90%,漏播指数小于 5%,重播指数小于 2%。为验证排种器对不同品种绿豆的适应性,进行了品种适应性试验,试验结果表明所选绿豆品种的合格指数大于 95%,漏播指数小于 5%,重播指数小于 3%,均满足设计要求。

关键词: 绿豆; 精量播种机; 排种器; 扰动促充; 毛刷
中图分类号: S223.2+3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)S1-0043-11

Design and Experiment of Mung Bean Precision Seed-metering Device with Disturbance for Promoting Seed Filling

LI Yuhuan[1,2]　WEI Ya'nan[1,2]　YANG Li[1,2]　ZHANG Dongxing[1,2]　CUI Tao[1,2]　ZHANG Kailiang[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Mung bean is the main edible bean in China, which has high economic and edible value. However, the current level of mechanized planting of mung bean in China is still low, and sowing or seeding is used. The waste of improved varieties is serious, and the yield and planting efficiency are low, which seriously restricts the development of mung bean industry. In view of the characteristics of scattered mung bean planting and small plot planting in China, and the agronomic requirements of 2~3 seeds per hole, a mung bean precision seed-metering device with disturbance for promoting seed filling was designed. The seed metering device used concave holes to carry seeds, the seed guide groove to promote seed filling, and the brush to clear seeds and protect seeds. The mechanical relationship of disturbance filling promotion was analyzed, and the design method of parameters of seed guide groove, seed carrying hole and brush was determined. The discrete element software EDEM simulation optimization method was used to establish the discrete particle model of mung bean seeds and the experiment was employed through the method of orthogonal test of three factors and three levels with the structural dimension parameters of the seed carrying holes as experimental factors. Three test parameters, i.e. length of the seed hole, width of the seed hole and the depth of seed hole were chosen as the influence factors of test experiment. The best work parameters were as below: the length was 10.5 mm, the width was 6.5 mm and the depth was 5 mm. The results showed that the optimal seed charging rate was 96.05%, the qualified seed charging rate was 1.64% and the missed charging rate was 1.57%, which were consistent with the simulation optimization results. Then, a speed single factor test was carried out. The results showed that when the working speed was within 8 km/h, the qualified index was higher than 90%, the missing index

收稿日期: 2020-07-30　修回日期: 2020-09-01
基金项目: 国家食用豆产业技术体系建设项目(CARS-08)
作者简介: 李玉环(1991—),男,博士生,主要从事农业装备设计与理论研究,E-mail: 18612897966@163.com
通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail: yangli@cau.edu.cn

were not more than 5%, and the multiple index were not more than 2%. At last, the adaptation tests were carried out. The results showed that qualified index was more than 95%, the missing index was not more than 5%, and the multiple index was not more than 3%, which could completely meet the requirement of the technical specifications of quality evaluation for mung beans metering device in China. The research provided a reference for further improving quality and optimizing the parameter for mung bean metering device.

Key words: mung beans; precision seeder; metering device; disturbance for promoting seed filling; brush

0 引言

目前我国绿豆机械化种植水平较低,多采用撒播或条播,良种浪费严重,劳动强度大,产量低,严重制约了我国绿豆产业的发展。

精量排种器作为精量播种机械的核心部件,是保证播种粒距均匀性的重要手段[1-5]。国外地块面积大,机械化程度高,多采用大型气力式播种机进行单粒精量播种作业[6-9],我国绿豆种植分散,地块小,国外的绿豆播种机在我国不适用。国内学者对绿豆单粒精量排种器进行了研究,贾洪雷等[10]设计了一种自吸式精量排种器,该排种器在坡地作业条件下具有较强的抗干扰能力,并且不需要风机提供负压,能耗较小,能够满足丘陵坡地小地块的绿豆精密播种。李玉环等[11]设计的一器双行气吸式高速精量排种器,解决了豆类窄行密植种植模式下高速精量播种的问题,上述研究均实现了绿豆单粒精量播种,为绿豆精量播种提供了有益的探索。为保证产量并节约良种,农艺专家要求绿豆适宜的播种方式为每穴 2~3 粒,为保苗保产,现多采用勺轮式或窝眼式排种器改装播种绿豆,但存在播种精度低,一穴多粒,良种浪费严重,且种子易损伤现象。

鉴于此,本文设计一种具有凹型携种孔兜种,导槽促进充种,毛刷清种护种的扰动促充机械式绿豆精量排种器,旨在实现每穴 2~3 粒绿豆的低损伤精量播种作业。

1 排种器结构和工作原理

1.1 排种器结构

扰动促充机械式绿豆精量排种器整体结构如图 1 所示。主要由壳体、扰动种盘、清种毛刷、护种毛刷、挡种毛刷、法兰盘和传动机构等组成。其中扰动排种盘作为排种器的核心部件,如图 2 所示,周向均匀布置“Y 型”导种槽和携种孔,“Y 型”导种槽起到扰动种群促进充种的作用,携种孔起到稳定携种的作用。扰动种盘通过法兰盘与传动轴固定连接,与清种毛刷、护种毛刷和挡种毛刷垂直接触。清种毛刷位于充种区上部,清除导种槽内多余的种子并起到促进种层上侧充种;护种毛刷通过圆弧形紧固件固定在排种器上部,与扰动种盘配合作用实现种子稳定运移;挡种毛刷布置在卸种口处,保证种子顺畅投种,同时具有防止充种区种子漏入卸种口造成重漏播。

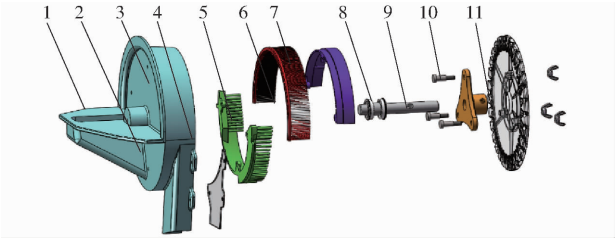

图 1 扰动促充式精量排种器结构示意图

Fig. 1 Sketch of mung bean precision seed-metering device with disturbance for promoting seed filling structure

1. 壳体 2. 挡种板 3. 清种毛刷 4. 挡种毛刷 5. 护种毛刷 6. 护种毛刷紧固件 7. 传动轴 8. 紧固螺栓 9. 法兰盘 10. 扰动种盘 11. 蝶形螺母

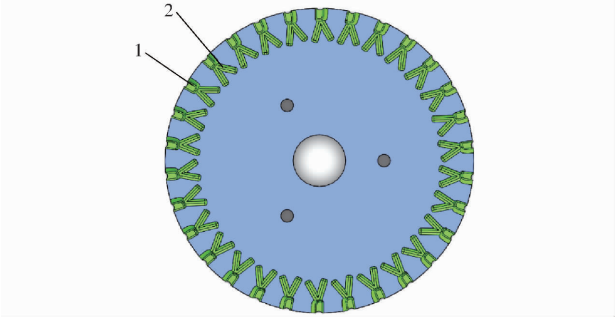

图 2 扰动种盘结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of seed-metering plate

1. 携种孔 2. 导种槽

1.2 工作原理

排种器作业过程分为充种、清种、携种和投种 4 个阶段,如图 3 所示。工作时,动力通过排种轴带动排种盘转动,导种槽能够扰动充种区的种子,使种子流动性增加,在重力和种间作用力下,种子沿导种槽充入携种孔,完成充种。携种孔携带多粒种子进入清种区,在清种毛刷和自身重力的作用下,未稳定进入携种孔的种子被清除,掉回充种区,留有 2~3 粒种子进入携种区,完成清种。进入携种区,护种毛刷与携种孔紧密接触将种子挤压固定在携种孔中,

携种孔中的种子随排种盘稳定运移至投种区，完成稳定携种。进入投种区，种子与护种毛刷不再接触，在重力和离心力共同作用下沿卸种口完成投种。整个作业过程中，由毛刷与扰动种盘配合作用，种子未与排种器产生刚性接触，避免了排种过程中种子损伤情况的发生。

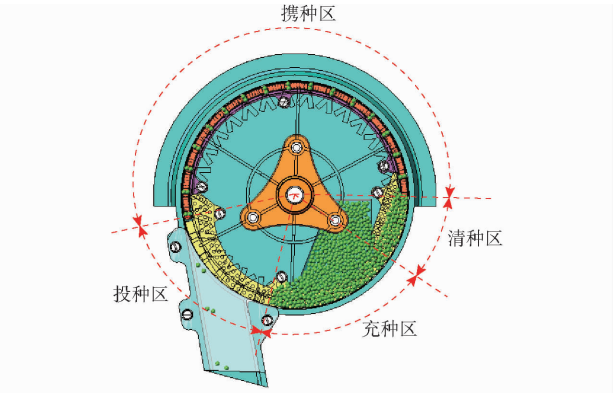

图 3　种盘划分示意图

Fig. 3　Schematic of disc division

2　扰动促充原理分析

2.1　导种槽扰动促充原理分析

充种过程中种群形成流动状态，能够减少种群的内摩擦力，降低因种子架空导致充种失败概率，提高充种性能[12-14]。因此，在种盘周向均匀布置“Y”型导种槽，对导种槽内的种子进行受力分析，如图 4 所示，忽略排种盘壁面对种子的摩擦力，则种子受到的合力 F_1 和 F_2 分别为

$$\boldsymbol{F}_1 = \boldsymbol{F}_{f1} + \boldsymbol{F}_{N1} + \boldsymbol{G} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{F}_2 = \boldsymbol{F}_{f2} + \boldsymbol{F}_{N2} + \boldsymbol{G} \tag{2}$$

由牛顿第二定律可知

$$F_1 = ma_1 \tag{3}$$

$$F_2 = ma_2 \tag{4}$$

式中　F_{f1}——种群对左侧导种槽种子的阻力，N

F_{f2}——种群对右侧导种槽种子的阻力，N

F_{N1}——左侧导种槽对种子的推力，N

F_{N2}——右侧导种槽对种子的推力，N

G——种子重力，N

m——种子质量，kg

a_1——左侧导种槽的种子加速度，m/s^2

a_2——右侧导种槽的种子加速度，m/s^2

由式(1)~(4)可知，随着种盘逆时针转动，左侧导种槽中的种子在种群阻力 F_{f1}、导种槽推力 F_{N1}、种子重力 G 形成的合力 F_1 作用下沿导种槽以加速度 a_1 向远离携种孔方向运动，增加了种群的流动性；右侧导种槽中的种子在种群阻力 F_{f2}、导种槽推力 F_{N2}、种子重力 G 形成的合力 F_2 作用下沿导种槽以加速度 a_2 向靠近携种孔方向运动，促进种子进入携种孔。在合力 F_1、F_2 的作用下种子沿“Y”型导种槽从左向右运动，形成局部涡流，增加了种子流动性，且能够促进充种，提高充种性能。

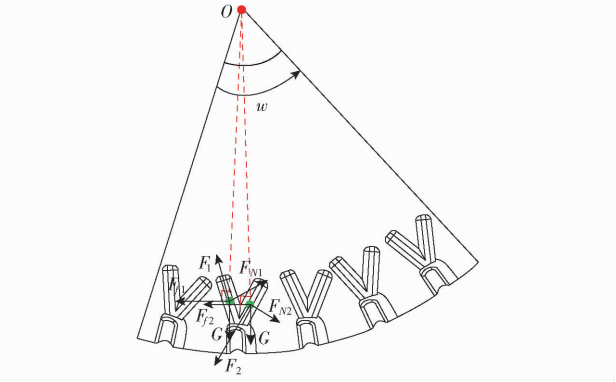

图 4　种子在导种槽的受力分析

Fig. 4　Force analysis of seeds in the seed guide groove

2.2　毛刷清种促充稳携原理分析

随排种盘转动，种群上层种子数量减少，种间作用力变小，且携种孔与水平面夹角逐渐减小，未充种的携种孔难以再充种，且充入携种孔的种子容易脱离型孔造成漏播。对携种孔中的种子进行受力分析，如图 5 所示，X 方向为携种孔方向，Y 轴方向为垂直于携种孔方向，种子受力包括：重力 G，种间作用力沿 X 轴的分力 F_{C1}，种间作用力沿 Y 轴的分力 F_{C2}，壳体对种子的支持力 F_{NK} 和摩擦力 F_{fK}，携种孔壁面对种子的支持力 F_{NP} 和摩擦力 F_{fP}，则有

$$\begin{cases} F = F_{C1} + G\sin\varphi - F_{NK} - F_{fP} \\ F_{fP} = \mu_P F_{NP} \\ F_{NP} = F_{fK} + F_{C2} + G\cos\varphi \\ F_{fK} = \mu_K F_{NK} \end{cases} \tag{5}$$

式中　F——沿 X 轴方向的合力，N

φ——重力方向与 Y 轴夹角

μ_K——排种器壳体与种子之间的摩擦因数

μ_P——排种盘与种子之间的摩擦因数

整理得

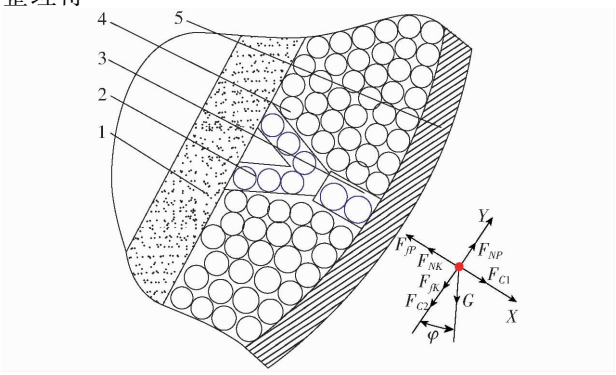

图 5　种子在携种孔的受力分析

Fig. 5　Force analysis of seeds in the seed hole

1. 清种毛刷　2. 导种槽　3. 携种孔　4. 绿豆种子　5. 壳体

$$F = F_{C1} + G\sin\varphi - F_{NK} - \mu_P(\mu_K F_{NK} + F_{C2} + G\cos\varphi) \tag{6}$$

由式(6)可知,当种子稳定充入型孔内不产生运动时,F 为 0,沿 X 轴方向的种间作用力 F_{C1} 越大,越有利于种子在携种孔内的稳定性;当种子将要充入型孔时,F 大于 0,与种间作用力 F_{C1} 成正比,沿 X 轴方向的种间作用力 F_{C1} 越大,合力 F 越大,越有利于充种。因此,为获得沿 X 轴方向较大的种间作用力,在种层上侧倾斜布置毛刷,对种子产生挤压力,以增大沿 X 轴方向的种间作用力 F_{C1}。当携种孔中未充满种子时,能够辅助充种,并能够保证种子在携种孔中的稳定性,当携种孔中已充满种子时,毛刷随排种盘转动,能够将导种槽中的种子清除,起到清种的作用。

3 关键参数设计

3.1 导种槽确定

导种槽引导种子进入携种孔,起到扰动种群促进充种的作用,如图 6 所示,导种槽深度 h_d、长度 l_d、宽度 b_d、倾角 α、两槽之间的夹角 β 是确定导种槽的关键参数,直接影响导种槽的扰动促充效果。

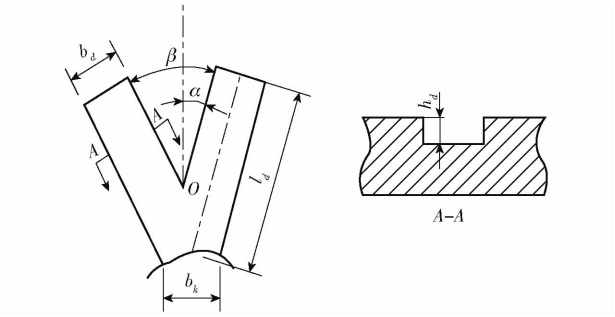

图 6 导种槽机构示意图

Fig. 6 Structure diagram of the seed guide groove

3.1.1 导种槽深度

导种槽过浅,对种子的扶持作用小、扰种效果差,无法充分扰动种群,导种效果较差;导种槽过深,对种子的扰动和推动能力过强,种群运动过于剧烈,不利于充种,且种子不易脱离导种槽,给清种造成困难[9]。因此,导种槽深度 h_d 应小于 0.5 倍的种子最小厚度,即 $h_d < 0.5D_{\min}$。选取具有代表性的“白绿 9 号”为试验绿豆品种,经实测 $D_{\min} = 3.3$ mm,则 $h_d < 1.65$ mm。选择导种槽深度 1、1.5、2 mm 为试验水平,在作业速度为 5 km/h 的条件下采用 EDEM 软件进行仿真试验,试验结果表明导种槽深度 1.5 mm 充种合格指数为 90.77%,优于导种槽深度 1 mm 和 2 mm,因此确定导种槽深度 $h_d = 1.5$ mm。

3.1.2 导种槽长度

导种槽长度影响充种区的扰动效果,长度越长,扰种范围越大,充种区种子的流动性越好。为获得良好的扰种充种效果,导种槽长度方向需同时容纳两个长度最大的种子,可得导种槽长度 l_d 为

$$l_d > 2L_{\max} \tag{7}$$

经实测白绿 9 号绿豆种子的最大长度 $L_{\max}$ 为 5.94 mm,得 $l_d > 11.88$ mm,同时考虑种盘直径和导种槽数量的限制,选取导种槽长度为 14 mm。

3.1.3 导种槽宽度

为保证导种槽的扰动能够达到促进充种的效果,种子需顺畅充入槽内,因此导种槽宽度要大于种子充入槽内弦长,由于绿豆种子为类球形,将种子近似为球形进行分析计算,如图 7 所示,由图中几何关系可得

$$\begin{cases} b_d > l_{AC} \\ l_{AC} = 2l_{AB} = 2\sqrt{l_{OA}^2 - l_{OB}^2} \\ l_{OA} = \dfrac{1}{2}d \\ l_{OB} = l_{OD} - l_{BD} = \dfrac{1}{2}d - h_d \end{cases} \tag{8}$$

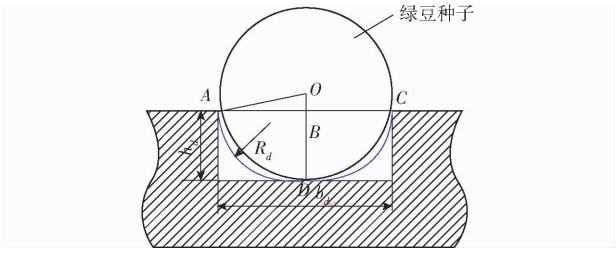

图 7 导种槽宽度示意图

Fig. 7 Structure diagram of the seed guide groove width

由式(8)可得

$$b_d > 2\sqrt{\frac{1}{4}d^2 - \left(\frac{1}{2}d - h_d\right)^2} \tag{9}$$

式中 d——种子几何平均直径,mm

经实测获得“白绿 9 号”种子的最大几何平均直径 $d_{\max} = 4.99$ mm,取导种槽深度为 1.5 mm,则导种槽宽度大于 4.58 mm,结合种盘结构参数,取导种槽宽度 b_d 为 4.6 mm。导种槽与携种孔连接处即导种槽下端开口要保证种子充入型孔的顺畅性,避免出现卡种现象,导种槽与携种孔连接处槽宽 b_k 应大于导种槽宽度,为保证导种的顺畅性,取 b_k 为 5.5 mm。为增大导种槽与种子的接触面积,并使导种槽与种子充分接触保证种子扰动过程中的顺畅性及扰种效果,导种槽底面侧边设置半径为 2.2 mm 的圆角。

3.1.4 导种槽倾角与两槽夹角

“Y”型导种槽倾角 α(定义为“Y”型导种槽交点 O 与排种盘旋转中心的连线和排种盘转动方向右侧槽的夹角)、两槽夹角 β 是确定导种槽形状的

关键，如图 6 所示，“Y”型导种槽左侧槽引导种子向右上运动，右侧槽引导种子向携种孔方向运动，以形成局部涡流增大扰种性能和导种性能。因此，左侧槽需向排种盘转动方向反方向倾斜，右侧槽向排种盘转动方向倾斜，且两槽夹角需大于倾角，结合试验最终确定导种槽倾角 α 为 15°，两槽夹角 β 为 45°。

3.2　携种孔

携种孔在设计时需满足每穴播种 2 ~ 3 粒绿豆种子的农艺要求，同时兼顾可靠充种、稳定携种、顺畅投种。如图 8 所示，携种孔形状采用长条孔，双粒可沿法向并排充入，后侧面与底面垂直且呈勺状，有利于兜种，前侧面与底面夹角为钝角，向排种盘旋转方向倾斜，既有利于充种又有利于投种。

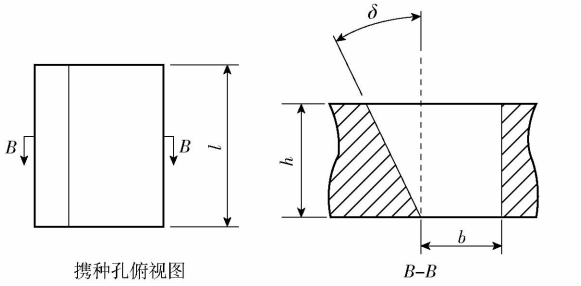

图 8　携种孔形状示意图

Fig. 8　Schematic diagram of seed hole shape

携种孔长度、宽度和深度是影响充种性能的关键参数，携种孔尺寸过小，会导致空穴或只能充入 1 粒种子造成严重的漏播，携种孔尺寸过大，会导致充入 3 粒以上种子造成严重的重播现象，因此需根据种子的外形尺寸与排列状态对携种孔尺寸进行分析，寻求其长度、宽度和深度的较优组合。通过试验观察发现携种孔内种子的分布状态多为 2 粒平躺（图 9a）、1 粒竖直 1 粒平躺（图 9b）、2 粒竖直（图 9c）、1 粒平躺 2 粒竖直（图 9d、9e）、3 粒平躺（图 9f）。同时以每穴 2 粒最优、每穴 3 粒合格为播种目标，确定携种孔尺寸范围，可得

$$\begin{cases} 2W < l < 3D \\ L < b < 2D \\ W < h < 1.5D \end{cases} \tag{10}$$

式中　W——绿豆种子宽度，mm

L——绿豆种子长度，mm

D——绿豆种子厚度，mm

l——携种孔长度，mm

b——携种孔宽度，mm

h——携种孔深度，mm

根据实测“白绿 9 号”绿豆种子外形尺寸参数，取种子长度 L 为 5.18 mm，宽度 W 为 4.10 mm，厚度 D 为 3.99 mm，最终确定携种孔长度、宽度及深度的范围分别为 8.2 mm < l < 11.97 mm，5.18 mm < b < 7.98 mm，4.10 mm < h < 5.99 mm。

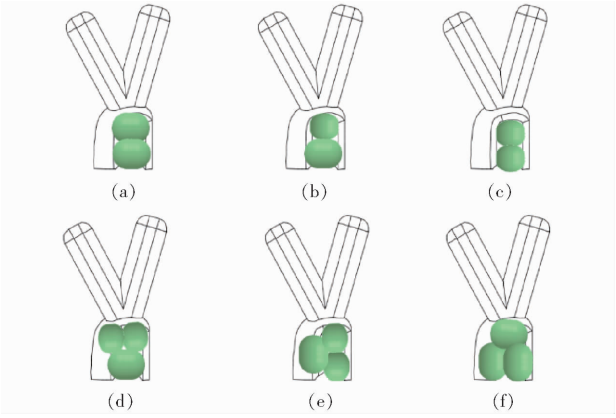

图 9　绿豆种子充种状态

Fig. 9　Seed filling status of mung bean seeds

为利于充种和投种，携种孔沿种盘转动方向设置携种孔倾角 δ，要保证充种阶段种子可沿倾角斜面向携种孔顺畅滑动，在投种阶段种子可从携种孔沿倾角斜面向外顺畅滑出，则需携种孔倾角 δ 大于种子与排种盘的摩擦角，排种盘材料选透明光敏树脂，经实测其静摩擦角为 16.51°。考虑充种和投种的顺畅性，兼顾倾角过大容易造成重播严重的问题，最终结合试验确定携种孔倾角 δ 为 20°。

3.3　清种毛刷设计

清种毛刷可将导种槽中未进入携种孔的种子清除，避免重播，同时对种群上层种子产生挤压力促进充种，避免漏播。清种毛刷的安装位置是决定清种毛刷作业效果的重要参数，为确定其安装位置，以排种盘中心为原点 O，以水平方向为 x 轴，竖直方向为 y 轴建立直角坐标系，如图 10 所示。图中点 A 为清种毛刷起始点，点 B 为清种毛刷末端点，确定点 A、B 的坐标值即可得到毛刷安装位置，为保证清种和促进种群上层充种的效果，清种毛刷起始点 A 位

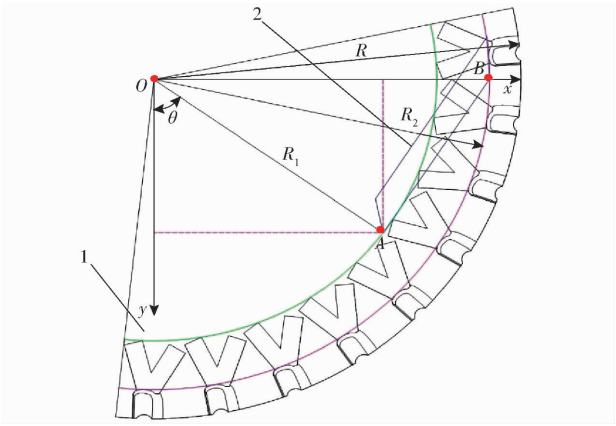

图 10　清种毛刷安装位置确定示意图

Fig. 10　Schematic of brush in stallation position

1. 种盘　2. 清种毛刷

于导种槽内侧边缘半径为 R_1 的圆上，清种毛刷末端点 B 位于携种孔内侧边缘半径为 R_2 的圆上，设 A 点坐标为(x_1，y_1)，B 点坐标为(R_2，0)，则由几何关系可得

$$\begin{cases} x_1 = R_1 \sin\theta \\ y_1 = R_1 \cos\theta \\ R_2 = R - l \end{cases} \tag{11}$$

式中 R——种盘半径，mm

θ——种群上侧与竖直方向的夹角，(°)

通过试验发现当 $\theta \geqslant 54°$ 时种群厚度较小，不易于充种，因此取 $\theta = 54°$，由种盘结构参数确定排种盘半径 $R = 102.5$ mm，导种槽内侧边缘半径 $R_1 = 82$ mm，将 θ、R、R_1 代入得 A 点坐标为(66.34 mm，48.20 mm)，B 点坐标为(102.5 ~ l，0)。可知清种毛刷安装位置与携种孔长度 l 有关，可通过后续试验最终确定。

4 排种盘携种孔参数优化仿真试验

排种盘携种孔尺寸参数作为实现精量排种的关键，携种孔尺寸过大容易造成严重重播，尺寸过小则容易造成严重漏播。为进一步确定携种孔尺寸，采用 EDEM 软件建立仿真模型[15]，分析型孔尺寸变化对充种性能的影响，以优化排种器型孔的结构参数。

4.1 仿真参数与指标

4.1.1 全局变量参数设置

绿豆种子表面光滑，无黏附力，选择 Hertz - mindlin(no - slip)模型为仿真接触模型[16-18]，为保证仿真与台架试验结果的一致性，根据排种器实物各结构选用的材料，种盘材料选取透明光敏树脂，壳体材料选择铸铝材料，对各个材料和绿豆颗粒属性进行了测量，并进行了绿豆种子与种盘、壳体、毛刷的相互作用属性的参数标定[19]，毛刷材料为猪鬃材料，参考文献[20 - 22]对毛刷进行设置，具体属性参数设置如表 1 所示。

表 1 全局变量参数设置

Tab. 1 Global variable parameter setting

项目	参数	数值
绿豆属性	泊松比	0.2
	剪切模量/Pa	5.25×10^7
	密度/(kg·m^{-3})	1 390
种盘材料属性	泊松比	0.41
	剪切模量/Pa	9.57×10^8
	密度/(kg·m^{-3})	1 100
壳体材料属性	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	2.70×10^{10}
	密度/(kg·m^{-3})	2 700
毛刷材料属性	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.10×10^8
	密度/(kg·m^{-3})	1 150
绿豆-绿豆	恢复系数	0.330
	静摩擦因数	0.434
	动摩擦因数	0.038
绿豆-种盘	恢复系数	0.296
	静摩擦因数	0.295
	动摩擦因数	0.033
绿豆-壳体	恢复系数	0.652
	静摩擦因数	0.308
	动摩擦因数	0.059
绿豆-毛刷	恢复系数	0.369
	静摩擦因数	0.371
	动摩擦因数	0.023

4.1.2 绿豆颗粒模型建立

绿豆种子球形度较高但非圆形，若将种子简化为圆形颗粒，其与种子外形尺寸有一定差距，会导致在仿真过程中颗粒模型与种子运动状态不一致，无法准确反映排种器作业性能，所以在建立绿豆种子模型时采用非圆形颗粒模型并采用球面填充方式拟合种子模型[23-25]。以“白绿 9 号”绿豆种子为试验对象，颗粒长度、宽度、厚度为 5.18、4.10、3.99 mm，采用 6 个球面构建颗粒模型，设置每个球面的半径以及球心坐标，颗粒模型如图 11 所示。

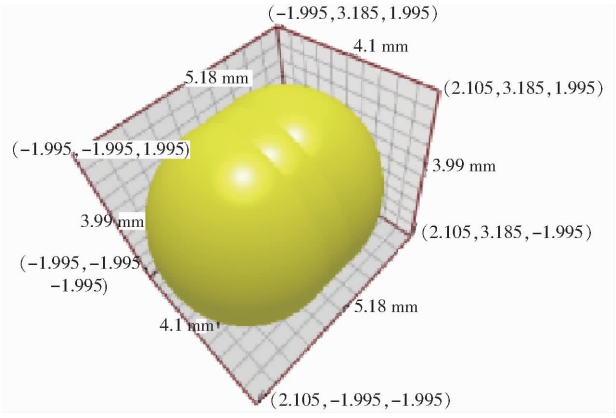

图 11 绿豆种子仿真模型

Fig. 11 Simulation models of mung beans

4.1.3 排种器模型建立

利用 SolidWorks 三维绘图软件进行精量排种器的建模，并将对排种器工作性能无影响的结构简化，如图 12 所示，简化后的排种器主要由壳体、种盘、护种毛刷、清种毛刷和挡种毛刷构成。按表 1 设置 3 个部分的变量参数，在排种器进种口上部建立颗粒工厂，设定颗粒生成总数量为 4 000 个。机具作业速度为 5 km/h，理论株距 14 cm，周向均布 30 个型孔，计算排种盘转速为 20 r/min。仿真过程中，设定仿真步长为 4.95×10^{-6} s，数据记录间隔为 0.01 s，

仿真情况如图 12 所示。

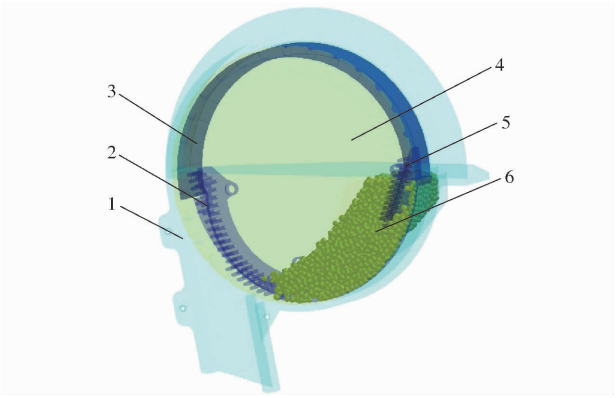

图 12　仿真简化模型示意图

Fig. 12　Simplified model diagram of simulation

1. 壳体　2. 挡种毛刷　3. 护种毛刷　4. 种盘　5. 清种毛刷　6. 绿豆种子

4.2　参数优化试验

4.2.1　试验因素和试验指标

携种孔长度、宽度和深度作为排种器可靠充种、稳定携种的关键，其结构参数直接决定排种效果，因此选取携种孔长度、宽度和深度 3 个结构参数为试验因素。为获得可实现 2 粒精量充种的最佳携种孔尺寸，定义携种孔 2 粒为最优充种，3 粒为合格充种，1 粒及空穴为漏充，3 粒以上为重播，由于携种孔参数是以 2 粒为最优设计的，出现 3 粒以上的情况极少，因此这里不予考虑重播，最优充种指数、合格充种指数、漏充指数的计算公式为

$$Z=\frac{n_1}{N}\times 100\% \tag{12}$$

$$P=\frac{n_2}{N}\times 100\% \tag{13}$$

$$M=\frac{n_3}{N}\times 100\% \tag{14}$$

式中　Z——最优充种指数，%

P——合格充种指数，%

M——漏充指数，%

n_1——携种孔 2 粒种子孔数

n_2——携种孔 3 粒种子孔数

n_3——携种孔 1 粒以下种子孔数

N——所记录的携种孔总数

4.2.2　试验方案和结果

为了寻求最优的参数组合，对所选 3 个参数进行三因素三水平的正交试验，即选用正交表 $L_9(3^3)$ 进行试验设计与分析。各因素通过理论分析确定了具体的取值范围，在取值范围的基础上，遵循精量播种要求来安排因素水平，其因素与水平如表 2 所示。试验结果如表 3 所示。A、B、C 为因素水平值。

表 2　试验因素与水平

Tab. 2　Experimental factors and levels　mm

水平	长度 l	宽度 b	深度 h
1	8.5	5.5	4.5
2	9.5	6.5	5.0
3	10.5	7.5	5.5

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test design scheme and results

序号	P	B	C	最优充种指数/%	合格充种指数/%	漏充指数/%
1	1	1	1	91.54	0.00	8.46
2	1	2	2	96.92	0.00	3.08
3	1	3	3	91.08	6.15	2.77
4	2	1	2	95.38	0.00	4.62
5	2	2	3	93.08	4.62	2.30
6	2	3	1	92.31	1.54	6.15
7	3	1	3	93.23	2.15	4.62
8	3	2	1	93.85	0.00	6.15
9	3	3	2	90.38	7.69	1.92

4.2.3　试验结果与分析

(1)极差分析

为获得最佳的参数组合，对试验结果进行了极差分析，结果如表 4 所示。携种孔长度、宽度和深度各水平对排种性能指标的影响规律如图 13 所示，各考察因子的极差越大，说明该因子对试验指标的影响越大。

表 4　各指标极差分析

Tab. 4　Analysis of range of each indicator　%

性能指标		因素		
		A	B	C
最优充种指数	k_1	93.18	93.38	92.56
	k_2	93.59	94.62	94.23
	k_3	92.49	91.26	92.46
	R_j	1.10	3.36	1.77
合格充种指数	k_1	2.06	0.72	0.51
	k_2	2.05	1.54	2.56
	k_3	3.28	5.14	4.32
	R_j	1.23	4.42	3.81
漏充指数	k_1	4.77	5.90	6.70
	k_2	4.34	3.85	3.21
	k_3	4.23	3.59	3.23
	R_j	0.54	2.31	3.49

(2)方差分析

方差分析结果如表 5 所示，由方差分析结果可知携种孔长度、宽度、深度对排种最优充种指数、合格充种指数和漏充指数均具有极显著影响。

由方差分析和极差分析可知，3 个因素对最优充种指数的影响由大到小为 B、C、A，对合格充种指

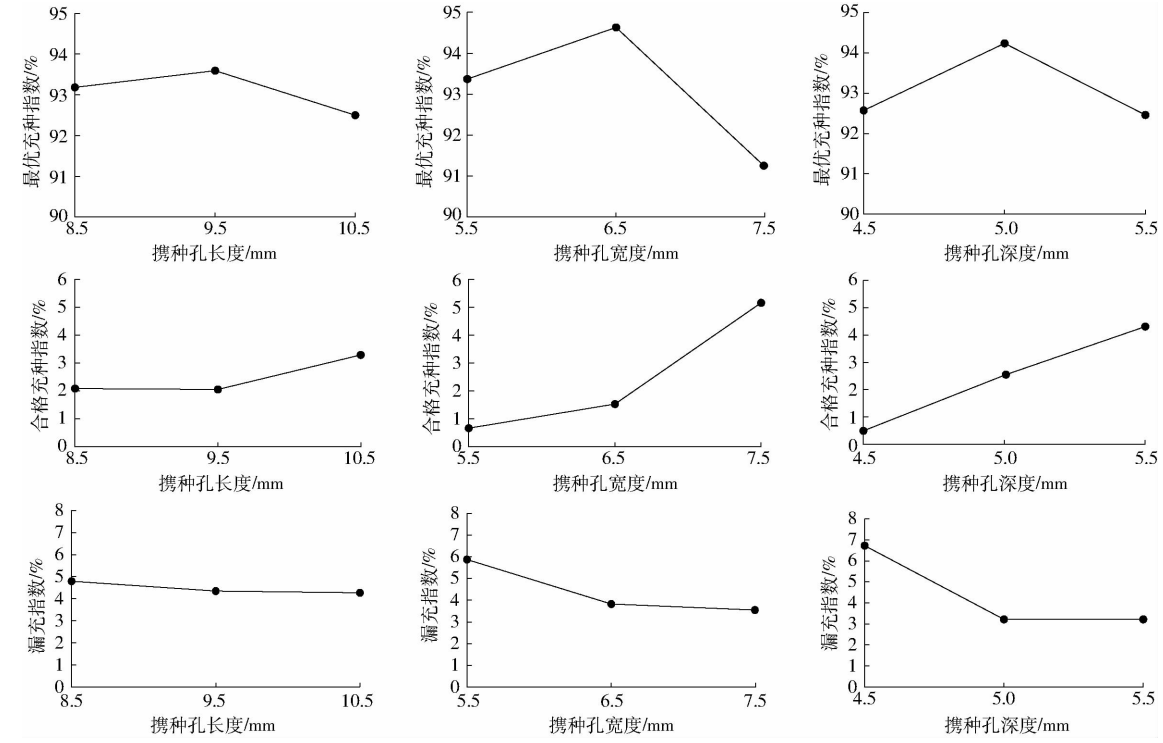

图 13 各因素对排种性能的影响

Fig. 13 Effect of each index on rowing performance

表 5 方差分析

Tab. 5 Variance analysis result

评价指标	误差来源	平方和	自由度	均方	F	P
最优充种指数	A	30.638	2	15.319	20.715	0.003
	B	55.520	2	27.760	37.538	<0.001
	C	43.227	2	21.613	29.226	<0.001
	误差	14.790	20	0.740		
合格充种指数	A	39.202	2	19.601	19.061	<0.001
	B	68.215	2	34.108	33.167	<0.001
	C	120.401	2	60.200	58.540	<0.001
	误差	20.567	20	1.028		
漏充指数	A	1.470	2	0.735	16.005	<0.001
	B	28.837	2	14.419	313.963	<0.001
	C	81.159	2	40.580	883.613	<0.001
	误差	0.918	20	0.046		

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。

数的影响由大到小为 C、B、A，当携种孔长度、宽度和深度增大时，充种空间增加，充入 3 粒及 3 粒以上种子的指数增大，因此导致最优充种指数降低，合格充种指数增加，综合各个因素对最优充种指数和合格充种指数的影响，确定较优组合为 $B_2C_2A_2$。

3 个因素对漏充指数的影响由大到小为 C、B、A，即携种孔深度对漏充指数的影响最大，其次是携种孔宽度，携种孔长度对漏播指数的影响最小。携种孔长度、宽度和深度较小时，种子难以充入携种孔，容易产生漏充情况，导致漏充指数升高。通过各个因素水平的漏充指数确定较优组合为 $C_2B_3A_3$。

综合因素对指标影响的主次关系，考虑各试验因素对排种器性能指标的影响及其优化组合，按照最优充种指数较高、兼顾漏播指数较低的原则[26]，最终确定较优组合为 $A_3B_2C_2$，即携种孔长度为 10.5 mm、宽度为 6.5 mm、深度为 5.0 mm。在该条件下仿真试验结果为最优充种指数 96.49%，合格充种指数 1.57%，漏充指数 1.94%，未出现重播现象，满足设计要求。

5 验证与适应性试验

为验证仿真试验的可行性及携种孔参数优化的正确性，在仿真得到的携种孔较优组合条件下进行试验验证。同时为考察排种器对速度、株距和品种的适应性，开展速度和品种适应性试验。

5.1 试验材料与装置

验证试验、速度适应性试验选取“白绿 9 号”绿豆种子为试验材料，品种适应性试验选取外形尺寸差异较大的“中绿 5 号”、“大鹦哥绿 935”、“宛绿 2 号”、“同 1188326”为试验材料。排种检测装置采用 JPS－12 型计算机视觉精密排种器性能检测试验台（黑龙江省农业机械工程科学研究院），如图 14 所示，将扰动促充式精量排种器通过螺栓固定试验台上。

5.2 试验指标

根据 GB/T 6973—2005《单粒（精密）播种机试

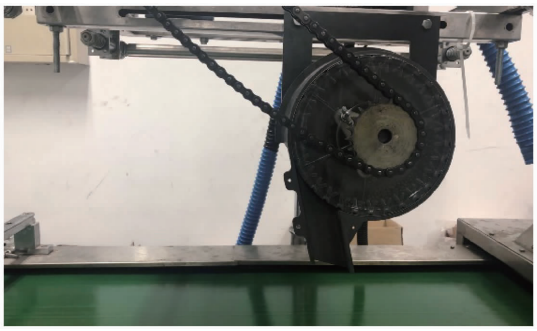

图 14　排种器性能检测试验装置

Fig. 14　Test of seeding performance experiments

验方法》以及绿豆生产技术农艺要求，每组试验采集 251 穴种子进行统计，每组重复 3 次，取平均值作为试验结果记录分析，以合格指数、漏播指数、重播指数为排种器性能评价指标，其中每穴 2 ~ 3 粒种子为合格，1 粒以及空穴为漏播，3 粒以上为重播。

5.3　验证试验

在仿真结果确定的较优组合下（携种孔长度为 10.5 mm、宽度为 6.5 mm、深度为 5.0 mm）进行验证试验，株距为 14 cm，作业速度为 5 km/h，试验结果为：合格指数 97.69%，漏播指数 1.57%，重播指数 0.74%，满足精量播种要求。采用高速摄像对携种孔充种指数进行统计，最优充种指数为 96.05%，合格充种指数为 1.64%，漏充指数为 1.57%，与仿真优化结果对比可知，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。

5.4　速度适应性试验

为验证排种器在不同作业速度下的作业效果，在株距为 14 cm 的条件下，前进速度选取 3、4、5、6、7、8 km/h 6 个梯度进行速度适应性试验。试验结果如表 6 所示，试验结果表明速度在 8 km/h 内时，合格指数大于 90%，漏播指数小于 5%，重播指数小于 2%，均满足设计要求。

表 6　速度适应性试验结果

Tab. 6　Results of speeding adaptability test　%

前进速度/（km·h^{-1}）	评价指标		
	合格指数	漏播指数	重播指数
3	98.03	0.56	1.41
4	97.85	0.76	1.39
5	97.69	1.57	0.74
6	96.91	2.48	0.61
7	95.75	3.91	0.34
8	94.89	4.89	0.22

5.5　品种适应性试验

为考察排种器对绿豆种子的适应性，在株距 14 cm、作业速度 6 km/h 的条件下，选取“中绿 5 号”、“大鹦哥绿 935”、“白绿 9 号”、“宛绿 2 号”、“同 1188326”5 种绿豆种子进行品种适应性试验，试验结果如表 7 所示。试验结果表明所选绿豆品种的合格指数大于 95%，漏播指数小于 5%，重播指数小于 3%，排种器对绿豆种子具有良好的适应性。

表 7　品种适应性试验结果

Tab. 7　Results of variety adaptability test　%

品种	评价指标		
	合格指数	漏播指数	重播指数
中绿 5 号	96.26	3.42	0.32
大鹦哥绿 935	96.62	3.12	0.26
白绿 9 号	96.91	2.48	0.61
宛绿 2 号	96.27	2.05	1.68
同 1188326	96.13	1.01	2.86

6　结论

（1）提出了一种采用凹型携种孔兜种、导种槽扰动促充、毛刷清种护种的扰动促充式绿豆精量排种方法，设计了扰动促充式绿豆精量排种器，可实现绿豆每穴 2 ~ 3 粒种子的精量穴播。

（2）分析了扰动促充力学关系，确定了导种槽、携种孔和清种毛刷参数的设计方法，为该型排种器的进一步改进研究提供了理论基础。

（3）采用离散元软件 EDEM 仿真优化方法，优化了携种孔的结构尺寸参数，优化仿真试验确定了较优的携种孔参数组合为：携种孔长度 10.5 mm、宽度 6.5 mm、深度 5.0 mm，验证试验结果为最优充种指数 96.05%，合格充种指数 1.64%，漏充指数 1.57%，与仿真优化结果基本一致。

（4）进行了速度适应性试验，试验结果表明：作业速度小于等于 8 km/h 时，合格指数大于 90%，漏播指数小于 5%，重播指数小于 2%，均满足设计要求。进行了品种适应性试验，试验结果表明所选绿豆品种的合格指数大于 95%，漏播指数小于 5%，重播指数小于 3%，排种器对具有代表性的 5 种绿豆种子“中绿 5 号”、“大鹦哥绿 935”、“白绿 9 号”、“宛绿 2 号”、“同 1188326”均具有良好的适应性。

参　考　文　献

[1]　YANG Li, YAN Bingxin, CUI Tao, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2016, 9(1): 9 - 26.

[2]　曹文，丁俊华，李再臣. 机械式精密排种器的研究与设计[J]. 农机化研究，2009，31(7)：142 - 145.
CAO Wen, DING Junhua, LI Zaichen. Research and design of mechanical precision metering [J]. Journal of Agricultural

Mechanization Research, 2009, 31(7):142 - 145. (in Chinese)

[3] 丁力,杨丽,刘守荣,等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(22):1 - 11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1 - 11. (in Chinese)

[4] 颜丙新,张东兴,崔涛,等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2017,33(23):15 - 23.
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15 - 23. (in Chinese)

[5] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[6] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38 - 48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)

[7] 李玉环,杨丽,韩英,等. 勺夹式蚕豆精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(增刊):108 - 116.
LI Yuhuan, YANG Li, HAN Ying, et al. Design and experiment of spoon-clamping type metering device for faba beans[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):108 - 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s015&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.015. (in Chinese)

[8] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(9):26 - 35.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9):26 - 35. (in Chinese)

[9] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):75 - 86,139.
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):75 - 86,139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)

[10] 贾洪雷,张胜伟,陈天佑,等. 丘陵坡地自吸式绿豆精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(3):51 - 60.
JIA Honglei, ZHANG Shengwei, CHEN Tianyou, et al. Design and experiment of self-suction mung bean precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):51 - 60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200306&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.006. (in Chinese)

[11] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):61 - 73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61 - 73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190706&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.006. (in Chinese)

[12] 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 Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pheumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 133 - 138. (in Chinese)

[13] 杨丽,史嵩,崔涛,等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):48 - 53.
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 48 - 53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2012s10&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.010. (in Chinese)

[14] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(5):10 - 18.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5):10 - 18. (in Chinese)

[15] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010:87 - 88.

[16] 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.

[17] 赖庆辉,高筱钧,张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5): 27 - 37.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder

seed-metering device for Panax notginseng[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 27 - 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160505&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.005. (in Chinese)

[18] 高筱钧,徐杨,杨丽,等.基于 DEM CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(增刊):92 - 100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of venturi feeding tube based on DEM CFD coupling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 92 - 100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s013&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.013. (in Chinese)

[19] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22):36 - 42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 - 42. (in Chinese)

[20] 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 Linrong, WU Jianmin, SUN Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 40 - 48. (in Chinese)

[21] 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 CSAE, 2015, 31(21): 43 - 50. (in Chinese)

[22] 顿国强,于春玲,杨永振,等. 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,2019,35(19):62 - 73.
DUN Guoqiang, YU Chunling, YANG Yongzhen, et al. Parameter simulation optimization and experiment of seed plate type hole for soybean breeding[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 62 - 73. (in Chinese)

[23] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等.基于 EDEM CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(11):43 - 51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43 - 51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171106&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006. (in Chinese)

[24] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等.基于 DEM CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(5):50 - 60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50 - 60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171106&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006. (in Chinese)

[25] 丁力,杨丽,武德浩,等.基于 DEM CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(11):48 - 57.
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM CFD coupling method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 48 - 57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181106&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.006. (in Chinese)

[26] 耿端阳,李玉环,孟鹏祥,等.玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5): 38 - 45.
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 38 - 45. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160506&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.006. (in Chinese)