doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.10.005

大豆高速播种机侧置导引式精量排种器设计与试验

黄玉祥[1,2]　李　鹏[1]　董建鑫[1]　陈旭辉[1]　张仕林[1]　刘　研[1]

(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;
2.陕西省农业装备工程研究中心,陕西杨凌 712100)

摘要:针对机械式排种器在高速作业条件下充种效果差,递种过程不稳定导致排种器合格指数低的问题,基于引导充种、缩短递种距离设计思想,设计了大豆高速播种机侧置导引式精量排种器,利用侧置型孔结构和导引板实现有序充种、稳定可靠递种。对充种、清种及递种过程进行了理论分析,建立了充填力模型,确定了影响排种器性能的关键参数为:充种倾角 α、开口角 β;确定了型孔的主要结构参数,并以合格指数、漏播指数为评价指标,采用二因素五水平中心旋转组合试验方法,对充种倾角 α、开口角 β 开展仿真试验。结果表明:切向充填力随位置角的增大先增加后下降,z 向充填力逐渐增大到最大值;充种倾角 α、开口角 β 对合格指数、漏播指数影响极显著,得到结构参数的最优组合为:充种倾角 α 为 11.50°、开口角 β 为 119.05°;台架试验结果表明,在作业速度 4 ~ 14 km/h 下,侧置导引式大豆排种器合格指数不低于 95.27%,漏播指数不大于 4.73%,破损指数低于 0.53%,满足高速精密播种要求。

关键词:大豆;机械式排种器;高速精量;导引充种

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2022)10-0044-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Side-mounted Guided High Speed Precision Seed Metering Device for Soybean

HUANG Yuxiang[1,2]　LI Peng[1]　DONG Jianxin[1]　CHEN Xuhui[1]　ZHANG Shilin[1]　LIU Yan[1]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of poor seed filling effect of mechanical seed metering device in high-speed operation and low qualification index of seed metering device caused by unstable seed delivery process, based on the design idea of guiding seed filling and shortening seed delivery distance, a side-guided soybean high-speed precision seed metering device was researched and designed, which realized orderly seed filling, stable and reliable seed delivery by using side-shaped hole structure and guide plate. The process of seed filling, seed cleaning and seed delivery was analyzed theoretically, and the filling force model was established. The key parameters affecting the performance of seed metering device were determined as follows: seed filling inclination angle α, opening angle β; the main structural parameters of the shaped hole were determined, and the qualified index and the missed sowing index were used as evaluation indexes. The simulation test of the seed filling inclination angle α and the opening angle β was carried out by using the combination test method of two factors and five levels of center rotation. The results showed that the tangential filling force reached the maximum value and then decreased with the increase of position angle, while the z filling force was gradually increased to the maximum value. Seed-filling angle α and opening angle β had significant effects on qualified index and missed sowing index. The optimal combination of structural parameters obtained by optimization was that the seed-filling angle α was 11.50° and the opening angle β was 119.05°. The bench test results showed that at operating speed of 4 ~ 14 km/h, the qualified index of the side-guided soybean seed metering device was no less than 95.27%, the missed seeding index was no more than 4.73%, and the damage index was lower than 0.53%, which met the requirements of high-speed precision seeding.

Key words: soybean; mechanical seed metering device; high speed precision; guided seed filling

收稿日期:2022-05-03　修回日期:2022-07-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31971802)、国家重点研发计划项目(2021YFD2000405-5)和陕西省重点研发计划项目(2019ZDLNY02-03)

作者简介:黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail:hyx@nwsuaf.edu.cn

0　引言

高速精密播种技术以其节本增效的优点成为现代播种技术的发展方向和趋势。精量排种器作为精密播种技术的核心工作部件直接影响播种精度、效率等[1-2]。精量排种器按原理分为机械式与气力式两类[3]。机械式精量排种器具有结构简单、造价低廉、可靠性好等优点，在我国具有广阔的应用前景，受作业速度影响，机械式精量排种器在高速作业时存在充种和清种效果明显下降的缺陷，漏播现象严重，进而造成断苗减产，无法发挥其优点[3-5]。

为提高机械式排种器的高速充种性能，研究人员在排种器充种影响因素、充种方法、充种结构等方面开展了大量工作[6-18]，文献[8-9,11]通过增加排种器倾角和搅拌装置等方式降低种腔内种子的堆积现象，有效改善高速充种性能；李沐桐等[13]提出了一种离心锥盘推送式充种方式，顿国强等[14]研究了型孔结构对充种性能的影响，为型孔结构设计提供了参考。在高速清种的过程、方法和结构方面，李俊伟等[18]利用 ADAMS 平台仿真揭示了清种过程种子的运动规律，李玉环等[19]采用双侧清种方法，有效降低了漏清率，对高速条件下的过清率也有所改善。王金武等[21]将排种器的清种结构设计为凹凸不平的表面。XUE 等[22]设计了一种双定种排种器，利用双定种结构与接种杯配合完成递种，但递种时对种子的约束力不强，易受振动等因素影响。上述研究取得了一些研究成果，但主要侧重通过改变充填与清种的方向、角度或利用其他结构辅助充种、清种、递种来提高排种器工作性能，高速作业条件下种子无序、紊乱、不受控的状态并未改变，这将会影响排种器的充种、清种及递种过程，从而影响排种质量。

为此，本研究设计大豆高速播种机侧置导引式精量排种器，采用导引板引导大豆种子有序充种，利用侧向放置双定结构来提高充填力，在半封闭式型孔内通过缩短递种距离、增加对种子的约束来提高递种稳定性。通过对排种器进行动力学分析，得到影响排种性能的关键参数，并开展中心旋转组合试验来优化参数，为大豆高速精量排种器的设计提供参考。

1　结构与工作原理

排种器结构如图 1a 所示，主要由排种器前壳体、排种轴、排种盘、排种器后壳体、上挡种条、下挡种条和破拱毛刷组成。排种盘由排种轴带动，与排种轴通过轴承安装在排种器前壳体上。上、下挡种条安装在排种盘中部凹槽内，与排种盘配合形成半封闭取种腔，通过螺栓与排种器前后壳体固定。两侧毛刷分别粘结在前后壳体上，柔性梳刷种子，促进种子有序排列，并且能够避免大豆在取种口处结拱。型孔结构放大后如图 1b 所示，型孔的主要结构有导引板和导引壁面，弧形板，第一、第二定种板以及开口斜面。结合现有取种方式将型孔侧向放置，利用弧形板改变充入种子的运动方向，进而提高充填力，型孔侧置方式如图 1c 所示。

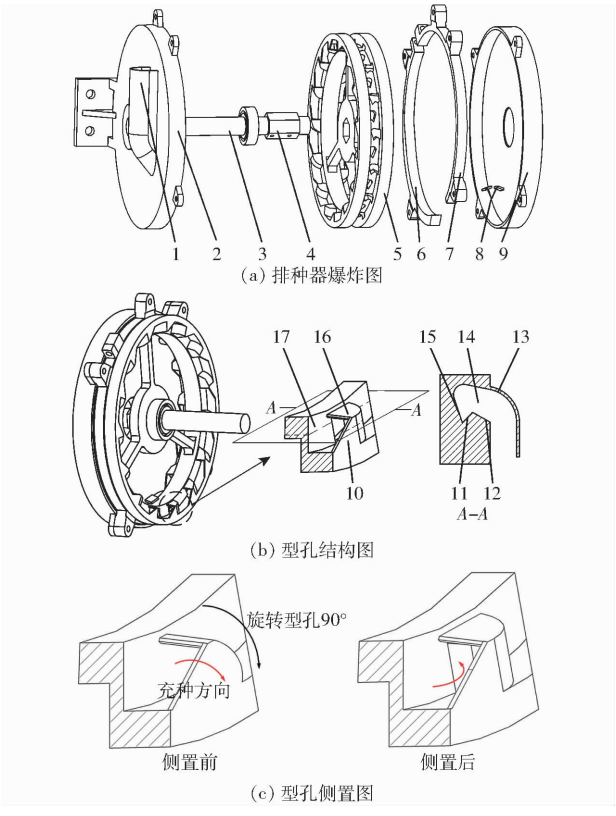


图 1　排种器结构图

Fig. 1　Structural diagrams of seed metering device

1. 进种口　2. 排种器前壳体　3. 排种轴　4. 轴承　5. 排种盘　6. 下挡种条　7. 上挡种条　8. 破拱毛刷　9. 排种器后壳体　10. 导引板　11. 第二定种板　12. 开口斜面　13. 弧形板　14. 取种腔　15. 第一定种板　16. 导引壁面　17. 排种盘盘体

排种器工作过程如图 2 所示，主要包括充种、清种、递种、护种和投种 5 个阶段。工作时，地轮驱动排种轴带动排种盘转动，种子通过进种口进入排种器中，在重力和种群摩擦力作用下形成分层；在主充种区Ⅰ，底层种子在导引板与排种盘盘体间有序排列，在重力和种间作用力下，经弧形板作用改变其运动方向后，充入取种腔与第一定种板接触，完成充种；对于未能完全充种的情况，在经过辅充种区Ⅱ时，倾斜的导引壁面促使种子完全充入型孔腔，保证充种质量。在清种区Ⅲ，导引板与排种盘盘体间的种子先落回种群，而后取种腔内多余种子将在重力、结构作用下沿开口斜面及弧形板返回，退出取种腔，

完成清种;未能落回种群的种子在导引板和排种盘盘体间依旧呈有序排列状态,进入充种区后将再次充入取种腔,提高充种效率;在递种区Ⅳ,待投种子在重力及结构作用下沿第一定种板运动,被第一、第二定种板固定;在护种区Ⅴ,待投种子在定种板固定下,随盘转动;进入投种区Ⅵ,待投种子在离心力、重力作用下从投种口投出,完成投种。

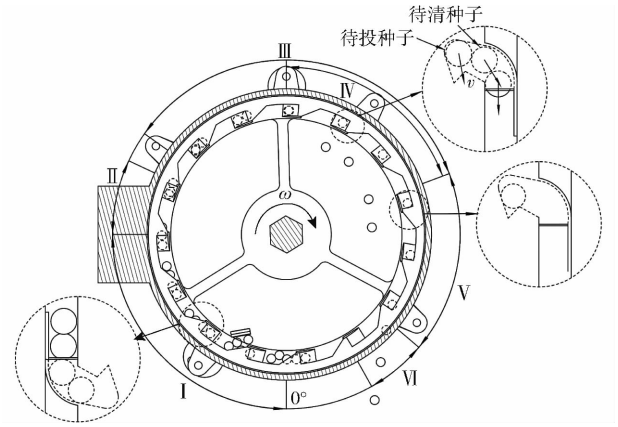


图 2 排种器工作区示意图

Fig. 2 Working area of seed metering device

Ⅰ. 主充种区 Ⅱ. 辅充种区 Ⅲ. 清种区 Ⅳ. 递种区 Ⅴ. 护种区 Ⅵ. 投种区

2 关键部件设计

2.1 排种盘设计

排种盘是排种器的主要工作部件,如图 1b 所示,排种盘上型孔双排错位布置,经过导引取种、清种、递种和护种 4 个过程,将种子从投种口投出。排种盘在排种轴驱动下转动,排种盘辐条增加种群扰动,减少种群结拱,提高充种效果[17]。根据《农业机械设计手册》可知,排种盘直径过大,不易加工和安装,过小易导致型孔数量少产生过高转速,一般直径为 200 mm 左右。根据文献[22]设计双排型孔单侧 15 个,型孔间弧长 42.1 mm,可计算得到型孔直径为 201 mm,考虑排种盘强度,设计排种盘外径 D 为 220 mm;单侧型孔宽 13 mm,中间槽宽 13 mm,双排取种器向中间取种,共用中间位置,设计其宽度 B 为 40 mm。

2.1.1 型孔结构

型孔结构直接影响排种器的工作性能,是排种器结构的核心设计参数。侧置双定种取种结构包括导引板、弧形板及导引壁面,定种结构包括第一定种板、第二定种板,定种板尺寸参考课题组前期研究[22]。为保证型孔结构单粒导引充种,取种结构尺寸应满足一定的要求,如图 3b,取种腔宽度 L_1 过大使开口过大,导致型孔入口及内部易卡种,同时充填路径过长,影响充种质量,过小容易导致部分种子无法充入。型孔高度 L_2 应保证能且仅能容下一粒种子,确保结构能充种,不卡种。弧形板末端与斜面相切,增加弧形板末端斜面充种倾角 α 提高充填力,提高充填率。开口角 β 控制取种腔内部空间,确保充种过程顺利,多余种子在清种区能顺利清种,结合文献[16-17,22],各尺寸应满足

$$\begin{cases} 1.5d_{\max} > L_1 > d_{\max} \\ 1.5d_{\max} > L_2 > d_{\max} \\ \alpha > 0° \\ \beta > 90° \end{cases} \tag{1}$$

式中 $d_{\max}$——种子最大尺寸,mm

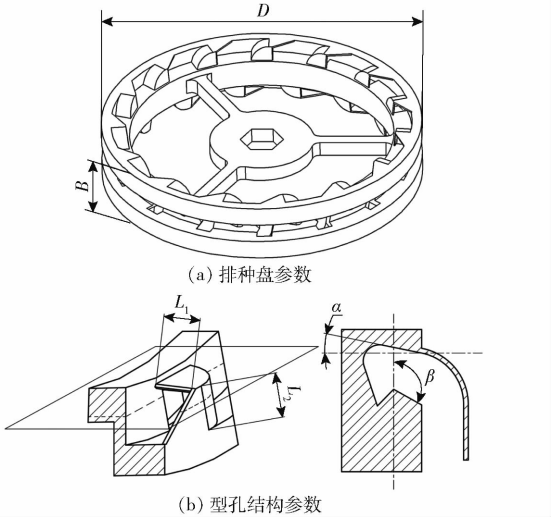


图 3 关键结构参数示意图

Fig. 3 Diagrams of key structural parameters

试验以广泛种植的绥农 26 号大豆种子为研究对象,通过随机选取 1 000 粒种子测得大豆三轴尺寸中最大尺寸为 8.73 mm,代入式(1)计算得 L_1 与 L_2 范围为 8.73 ~ 13.09 mm。

2.1.2 型孔分布

型孔的分布是影响排种器工作质量的关键因素之一,在株距和作业速度一定时,型孔数量增多,排种盘转速降低,能适当提高充种时间,提高充种合格指数[23]。如图 4a,在临界转速下,种子在顶端所需向心力与重力相同,其受力状态应满足[24-25]

$$G = m\omega^2 r \tag{2}$$

式中 G——种子重力,N

m——大豆质量,kg

ω——排种盘角速度,rad/s

r——排种盘半径,m

排种器转速需低于临界转速,此时在图 4b、4c 中,种子在充种、清种及递种过程中才能沿排种盘切向运动。计算得到排种器临界工作转速为 86.34 r/min。将最高作业速度 14 km/h、理论株距 10 cm 代入公式

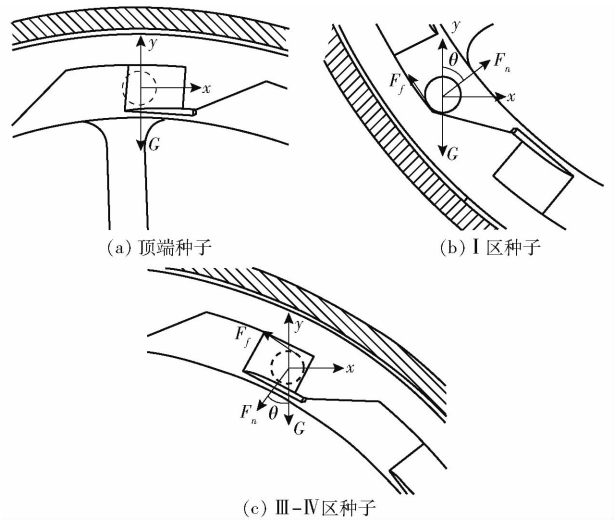


图 4　临界转速状态种子受力分析

Fig. 4　Stress analysis of seed in critical state

$$v = \frac{6Zhn}{10\,000} \tag{3}$$

式中　v——播种机前进速度，km/h

Z——株距，cm

n——排种轴转速，r/min

h——型孔数量

计算得到 $h > 26.26$，为降低转速、保证充种质量[25]，型孔间能容 3 ~ 4 粒种子，单粒种子最大直径 8.73 mm，型孔间距不应小于 35 mm，设计型孔数量为 30，双侧错位布置，单侧 15 个型孔，两型孔间距 42.1 mm，由式(3)可计算得排种器在 14 km/h 条件下转速为 77.78 r/min，满足要求。

2.2　排种过程分析

通过对排种器的充种、清种和递种过程进行动力学分析，确定影响排种器工作性能的关键因素。

2.2.1　充种过程

主要对主充种区的充种过程进行分析，即图 2 位置角在 0° ~ 90° 范围内的充种过程。主充种区内，种子通过充种口进入排种器随排种盘运动，在重力与种群力的作用下分层，底层种子首先进入到型孔间。随着排种盘转动，在相邻型孔间均匀容下 4 颗左右种子，种子沿排种盘转动切向进入取种腔，有利于高速充种。

在充种过程中，分别以排种盘轴心为原点，建立图 5a 所示 xyz 坐标系，主充种区Ⅰ内种子受力包括重力 G、取种腔支持力 F_{n1}及其摩擦力 F_{f1}、弧形板支持力 F_{n2}及其对应的摩擦力 F_{f2}、种间作用力 F_{n3}。在上述力的综合作用下，如图 5b，种子单列有序充入取种腔。分析中将摩擦力平移到种子质心，由于种子半径小，忽略摩擦力对种子的力矩。根据达朗贝尔原理，将充种过程中种子动力学方程分解为切向、径向和 z 向，有

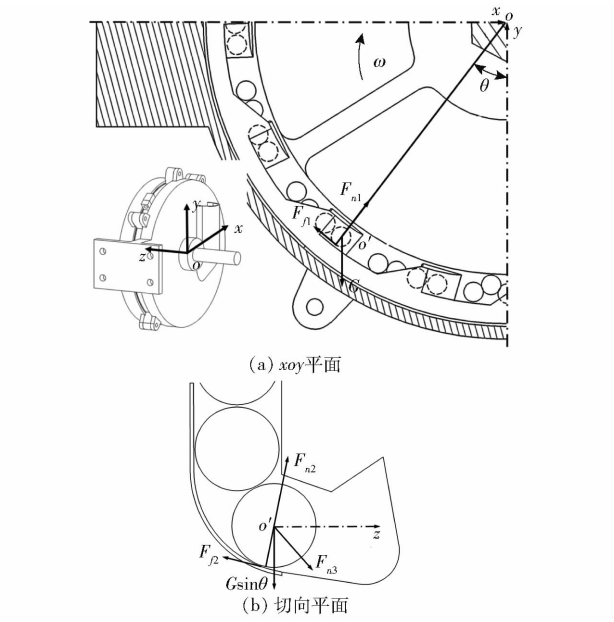


图 5　充种受力分析

Fig. 5　Diagrams of filling force

$$\begin{cases} ma_\tau + F_{f2}\sin\alpha + F_{f1} + F_{n2}\cos\alpha = G\sin\theta + F_{n3}\sin\gamma \\ F_{n1} = G\cos\theta + m\omega^2 r \\ ma_z + F_{f2}\cos\alpha = F_{n3}\cos\gamma + F_{n2}\sin\alpha \\ F_{f2} = \mu F_{n2} \\ F_{f1} = \mu F_{n1} \end{cases} \tag{4}$$

式中　a_τ——种子切向加速度，m/s^2

a_z——种子 z 向加速度，m/s^2

θ——大豆种子位置与竖直方向夹角，(°)

μ——大豆种子与壳体摩擦因数

γ——种间作用力与 z 方向夹角，(°)

充种种子在径向不能产生位移，其合力应为零。在种子运动方向上，切向合力为种子运动提供切向加速度促使种子向型孔运动，z 向合力为种子提供 z 向加速度促使种子向取种腔内部运动，实现完全充种。式(4)中切向合力即充填力 F_τ，z 向合力即为充填力 F_z，计算式为

$$\begin{cases} F_\tau = G\sin\theta + F_{n3}\sin\gamma - F_{f2}\sin\alpha - F_{f1} - F_{n2}\cos\alpha \\ F_z = F_{n3}\cos\gamma + F_{n2}\sin\alpha - F_{f2}\cos\alpha \end{cases} \tag{5}$$

在作业速度 10 km/h 对应的转速下，充种倾角 α 取值范围为 0° ~ 15°，将式(5)代入 Matlab 计算可得充填力曲面图，如图 6 所示。从图 6 中可以看出，在 z 向上其充填力随 θ 的增大呈现逐渐增大的趋势，在较小充种倾角时，z 向充填力逐渐增大，而后其增速下降逐渐达到最大值；而切向充填力随着位置角增大，呈先增大后下降的趋势，其极值出现在

58°左右。侧置导引式结构能够在运动中逐渐增大充填力,提高充填效果,在切向充填力达到极值后虽略有下降,但在种子惯性及充填力作用下,种子仍能够保证一定充种效果,完成充种过程。

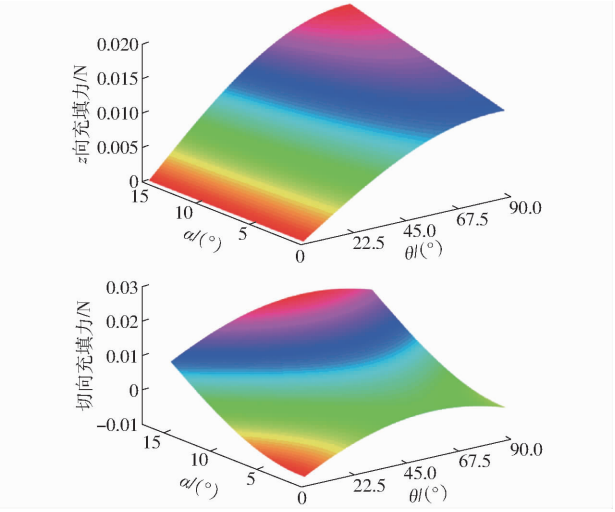


图 6 充填力曲面

Fig. 6 Filling force surface diagrams

从图 6 中可以看到,在不同位置角 θ,充种倾角 α 对充填力的影响效果及影响程度均不同。在低位置角时,充种倾角 α 增大过程中 z 向充填力基本不变;而在高位置角时,z 向充填力随着 α 增大逐渐增大;对于切向充填力,随着充种倾角 α 的增大,切向充填力显著增大,但从结构上看,充种倾角 α 的增大会使充填路径变长,使充种时间变长,不利于充种,后续将针对充种倾角 α 开展优化试验确定其最优值。

2.2.2 清种与递种过程

本研究设计方案中,递种过程与清种过程同时进行,为保证清种顺利和递种稳定,对清种与递种过程进行动力学分析。

排种器运动进入清种区后,取种口处种子先掉落回种群。取种腔内种子在越过最高点后,各力不断变化,清种和递种运动开始。种子的动力学分析包括两部分:运动开始的临界点前与临界点后。在清种与递种运动即将开始的临界点前,种子运动可视为匀速率圆周运动,这一过程中,待清种子分别受到取种腔结构作用力 F_{n9}、F_{n5}、F_{n6}、F_{n7},种间作用力 F_{n3}、重力 G 以及型孔结构对种子的摩擦力,如图 7a、7b 所示,待清种子合力方向变化,大小不变,仅改变运动方向,种子与型孔保持相对静止,未发生清种及递种运动。

清种临界点之前如图 7b 待清种子,在 xoy 平面上,待清种子受重力、导引壁面支持力及其摩擦力;从切向平面上看,种子受种间作用力、开口斜面支持力及其对应的摩擦力,待清种子保持匀速率圆周运动,其受到外力的大小不变,呈现平衡状态,根据达朗贝尔原理,待清种子受力方程可以分解为径向、切向、z 向,有

$$\begin{cases} F_{n9} + G\cos\theta = F_{\omega} \\ G\sin\theta + F'_{n3}\sin\gamma = F_{f7}\sin\beta + F_{n7}\cos\beta + F_{f92} \\ F'_{n3}\cos\gamma + F_{n7}\cos\beta = F_{f7}\sin\beta \\ F_{\omega} = m\omega^2 r \end{cases} \tag{6}$$

式中 F_{ω}——离心力,N

F_{n9}——上挡种条对种子支持力,N

F_{f92}——上挡种条对待清种子摩擦力,N

F_{n7}——开口斜面支持力,N

F_{f7}——开口斜面摩擦力,N

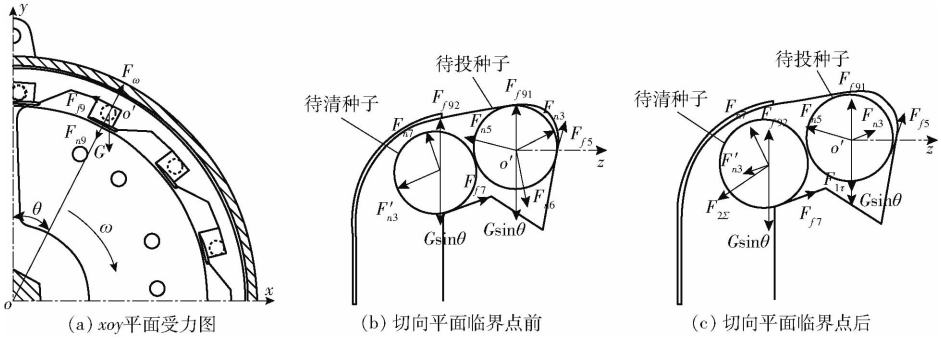
临界点之后,排种盘继续转动,待清种子原匀速率运动状态被打破,如图 7c 切向平面上,重力分量 $G\sin\theta$ 逐渐增大,摩擦力 F_{f7} 变为动摩擦力,种间作用力 F_{n3} 将逐渐减小,切向及 z 向上合力增大不再为零,即将开始清种。有

$$F_{f7} = \mu F_{n7} \tag{7}$$

清种受力分析如图 7c 所示,合力 $F_{2\Sigma}$ 为

$$\begin{cases} F_{2\tau} = G\sin\theta + F'_{n3}\sin\gamma - F_{f92} - F_{n7}\sin\beta - F_{f7}\cos\beta \\ F_{2z} = F'_{n3}\cos\gamma + F_{n7}\cos\beta - F_{f7}\sin\beta \\ F_{2\Sigma} = \sqrt{F_{2\tau}^2 + F_{2z}^2} \end{cases} \tag{8}$$

式中 $F_{2\tau}$——待清种子切向合力,N



(a) xoy平面受力图 (b) 切向平面临界点前 (c) 切向平面临界点后

图 7 清种与递种受力图

Fig. 7 Force diagrams of seed clearing and transfer

F_{2z}——待清种子 z 向合力，N

总合力 $F_{2\Sigma}$指向取种腔外，待清种子将在合力作用下逐渐退出取种腔，而后在重力及惯性作用下落回种群。开口角 β 的大小将会影响图 7c 中开口斜面支持力 F_{n7}的方向，进而影响切向及 z 向合力，影响临界点后待清种子合力 $F_{2\Sigma}$方向，在取值范围内，为保证清种及时且不影响充种，开口角 β 将通过试验优化至最优值。

对于待投种子，在越过最高点后准备开始递种，在递种临界点之前，如图 7b 中待投种子，在 xoy 平面受力情况与待清种子相同，在切向平面上待投种子受第一定种板支持力、弧形板末端斜面支持力及其摩擦力、种间作用力，待投种子与型孔保持相对静止；与待清种子相似，其在径向、切向、z 向上的动力学平衡方程为

$$\begin{cases} F_{n91} + G\cos\theta = F_w \\ F_{n6}\cos\alpha + G\sin\theta = F_{n5}\cos\alpha + F_{f5}\sin\alpha + F_{n3}\sin\gamma \\ F_{n3}\cos\gamma + F_{n6}\sin\alpha + F_{f5}\cos\alpha = F_{n5}\sin\alpha \end{cases} \tag{9}$$

式中　F_{n91}——上挡种条对待投种子的支持力，N

F_{n6}——弧形板末端斜面支持力，N

F_{n5}——第一定种板支持力，N

F_{f5}——第一定种板摩擦力，N

临界点之后，随着排种盘转动，切向方向上重力分量 $G\sin\theta$ 逐渐增大，在切向平面上，弧形板末端斜面支持力 F_{n6}消失，种间作用力 F_{n3}与 F'_{n3}减弱至零，其受力如图 7c 待投种子 1 所示，合力不再为零，切向合力为

$$F_{1\tau} = G\sin\theta - F_{n5}\cos\alpha - F_{f5}\sin\alpha - F_{n3}\sin\gamma - F_{f91} \tag{10}$$

式中　$F_{1\tau}$——待投种子切向合力，N

F_{f91}——上挡种条对待投种子摩擦力，N

受第一定种板约束，且导引壁面朝内倾斜促使 F_{n5}逐渐增大，使 z 向待投种子合力为零，待投种子将在切向合力 $F_{1\tau}$作用下沿第一定种板运动。

在递种完成后，待投种子将在两个定种板结构下固定。如图 8 所示，待投种子在取种腔内第一定种板、第二定种板、导引壁面、上挡种条的支持力 F_{n5}、F_{n8}、F_{n4}、F_{n9}以及重力 G 作用下与排种盘相对静止，将随其继续做匀速率圆周运动。

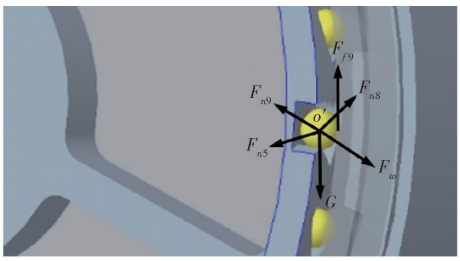


图 8　递种结束受力图

Fig. 8　Force diagram at end of seed transfer

取种腔内沿递种方向尺寸略大于单粒种子尺寸，递种距离短；递种过程在型孔作用力下进行，受转速等因素影响小，稳定可靠。

3　参数仿真试验优化

3.1　仿真平台设置

用三维造型软件建立模型并将文件导入到 EDEM 中，根据前述的大豆种子尺寸参数，通过多球拼合建立大豆种子模型，颗粒间的接触模型选择 Hertz－Mindlin 无滑动模型[25-26]。排种器参数见表 1[15,22]。

表 1　离散元仿真参数

Tab. 1　DEM simulation parameters

项目	参数	数值
种子	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	6.12×10^7
	密度/(kg·m^{-3})	1 267
壳体	泊松比	0.28
	剪切模量/Pa	8.20×10^{10}
	密度/(kg·m^{-3})	7 890
种子-种子	恢复系数	0.55
	静摩擦因数	0.45
	滚动摩擦因数	0.06
种子-壳体	恢复系数	0.52
	静摩擦因数	0.40
	滚动摩擦因数	0.01

在 EDEM 中根据种子的三轴尺寸分布，设置颗粒尺寸按照正态分布产生，标准差为 0.245 mm，大豆尺寸在基本模型种子尺寸的 0.9～1.1 倍间变化，符合正态分布。仿真中颗粒数量为 1 000 粒，生成速度为 0.3 kg/s，仿真步长为 0.000 035 s，数据保存间隔为 0.01 s[22]，作业速度为 10 km/h。

3.2　仿真充填力

利用离散元软件后处理功能，在作业速度 10 km/h 的仿真试验中，以充种倾角 11.5°为例，标记充入种子并导出型孔结构与种子的瞬时法向与切向相互作用力[13]，并统计种子平均受力数据，按照式(5)计算充填力，其结果如图 9 所示。

随着位置角增大，充填力仿真结果整体略高于计算值，但整体趋势与计算结果相符，排种器运动过程中种子在充种过程中存在碰撞、弹跳等因素使种子能量波动，受力数据波动，仿真结果不平滑，存在一定的跳动。在 z 向充填力中，起始点仿真充填力与计算值一致，而后在充种过程中，仿真结果略高于计算值，主要原因是：充种刚开始时，种子没有 z 向

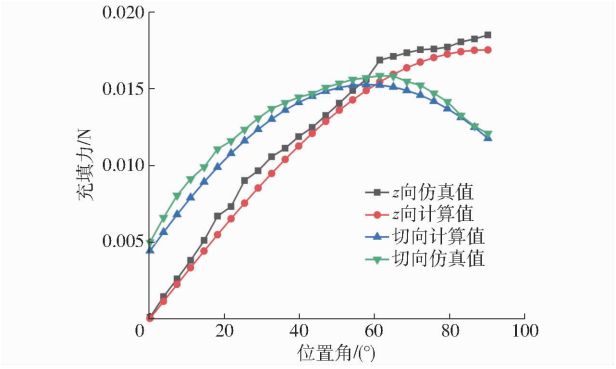


图 9 充填力变化曲线

Fig. 9 Filling force curves

的合力,在运动至弧形板,产生 z 向作用力后,运动速度逐渐增大,多粒种子的种间作用力、种间及与结构碰撞使充填力略高于计算值;切向充填力中,起始点仿真充填力略高于计算值,总体误差小于 0.28%,仿真充填力与计算结果相符,表明仿真试验误差在合理范围内,充填力模型能够用于充种理论研究。

3.3 试验优化

3.3.1 试验设计

根据型孔结构设计和理论分析结果可知,充种倾角 α、开口角 β 分别对充填力及充种、清种过程产生不同程度的影响,为探究其最优参数组合,根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,以合格指数、漏播指数作为试验指标,充种倾角 α、开口角 β 为试验因素,进行中心旋转组合试验。在作业速度 10 km/h 下进行 EDEM 仿真试验,根据式(3)计算得排种器对应转速为 55.56 r/min,试验结束后通过回放仿真试验过程统计排种结果,每次排种 250 粒,重复 3 次试验求其平均值,以投出 1 粒种子为合格,投出 2 粒及以上种子为重播,不投为漏播,统计投种次数、合格次数、重播次数与漏播次数,计算各试验指标。

3.3.2 单因素试验

根据型孔结构设计和理论分析,对充种倾角 α、开口角 β、取种腔宽度 L_1、型孔高度 L_2 开展单因素试验优化结构参数。

在作业速度 10 km/h 下分别取 5 个水平,如表 2,进行单因素试验,统计不同水平下试验结果,进行 3 次重复试验计算其平均值,试验结果如图 10 所示。

从图 10 中可知,随着充种倾角 α、开口角 β 的增大,合格指数均呈先增大后减小的变化趋势,漏播指数先降低而后增大,取种腔宽度 L_1、型孔高度 L_2 对合格指数、漏播指数的影响呈线性趋势,在取值范围内,L_1、L_2 最优值均取最低水平 9 mm。

表 2 单因素试验水平

Tab. 2 Single factors test levels

因素	水平				
	1	2	3	4	5
L_1/mm	9.00	10.13	11.25	12.38	13.50
L_2/mm	9.00	10.13	11.25	12.38	13.50
α/(°)	5.00	7.50	10.00	12.50	15.00
β/(°)	90.00	103.75	117.50	131.25	145.00

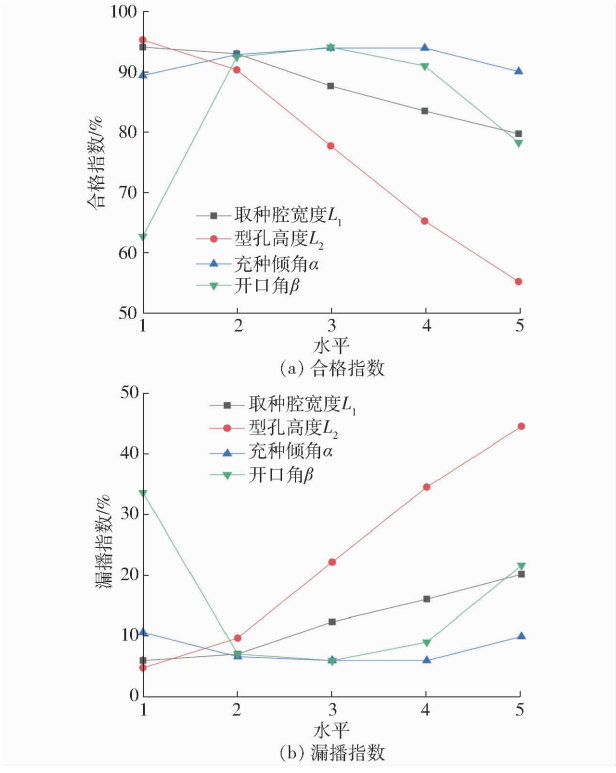


图 10 单因素试验结果

Fig. 10 Single factor test results

3.3.3 中心旋转组合试验

为获取充种倾角 α、开口角 β 的最优组合参数,采用二因素五水平中心旋转组合试验方法,共实施 13 组试验,每组重复试验 3 次。在前期单因素试验的基础上,分别以 10°、110°作为充种倾角 α、开口角 β 的基准值,试验因素编码如表 3 所示,试验结果如表 4。X_1、X_2 分别为充种倾角 α、开口角 β 的编码值。

表 3 因素编码

Tab. 3 Factors and coding (°)

编码	因素	
	α	β
-1.414	5.00	90.00
-1	6.46	95.86
0	10.00	110.00
1	13.54	124.14
1.414	15.00	130.00

由于试验中未发现重播情况,因此在结果中没

有进行重播指数的记录和数据分析。利用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行方差分析，结果如表 5，同时建立合格指数 y_1、漏播指数 y_2 与充种倾角 α、开口角 β 之间的回归方程

$$y_1 = -183.141\,0 - 10.181\,1\alpha + 5.518\,1\beta + 0.160\,9\alpha\beta - 0.476\,3\alpha^2 - 0.029\,5\beta^2 \quad (11)$$

$$y_2 = 283.140\,8 + 10.181\,0\alpha - 5.518\,1\beta - 0.160\,9\alpha\beta + 0.476\,4\alpha^2 + 0.029\,5\beta^2 \quad (12)$$

合格指数、漏播指数模型的 P 值均为 0.000 1，差异极显著，对应的失拟项 F 值分别为 3.79、3.40，P 值分别为 0.113 7、0.120 3，均大于 0.05，失拟项差异不显著，模型拟合的二次回归方程与实际相符，可以较好的对试验结果进行预测。合格指数与漏播指数回归模型中，两因素及其交互项对合格指数、漏播指数有极显著影响。为直观的分析两因素对试验指标的影响关系，建立响应曲面图，如图 11 所示。

表 4　试验设计与结果

Tab.4　Test design and results

试验序号	因素 X_1	因素 X_2	合格指数/%	漏播指数/%
1	1	−1	60.30	39.70
2	0	0	96.63	3.37
3	0	−1.414	65.94	34.06
4	0	0	93.30	6.70
5	0	0	90.96	9.04
6	0	1.414	93.47	6.53
7	−1	−1	92.13	7.87
8	1	1	92.29	7.71
9	1.414	0	70.62	29.38
10	−1.414	0	88.61	11.39
11	0	0	95.38	4.62
12	−1	1	91.94	8.06
13	0	0	92.63	7.37

表 5　方差分析

Tab.5　Analysis of variance

来源	合格指数 平方和	自由度	F	P	漏播指数 平方和	自由度	F	P
模型	1 722.50	5	33.64	0.000 1 **	1 722.50	5	33.64	0.000 1 **
X_1	404.93	1	39.54	0.000 4 **	404.93	1	39.54	0.000 5 **
X_2	625.48	1	61.07	0.000 1 **	625.48	1	61.07	0.000 1 **
X_1X_2	258.84	1	25.27	0.001 5 **	258.84	1	25.27	0.001 5 **
X_1^2	246.72	1	24.09	0.001 7 **	246.72	1	24.09	0.001 7 **
X_2^2	243.03	1	23.73	0.001 8 **	243.03	1	23.73	0.001 8 **
残差	71.70	7			71.70	7		
失拟项	51.52	3	3.79	0.113 7	51.52	3	3.40	0.120 3
总和	1 794.20	12			1 794.20	12		

注：** 表示差异极显著（$P<0.01$）。

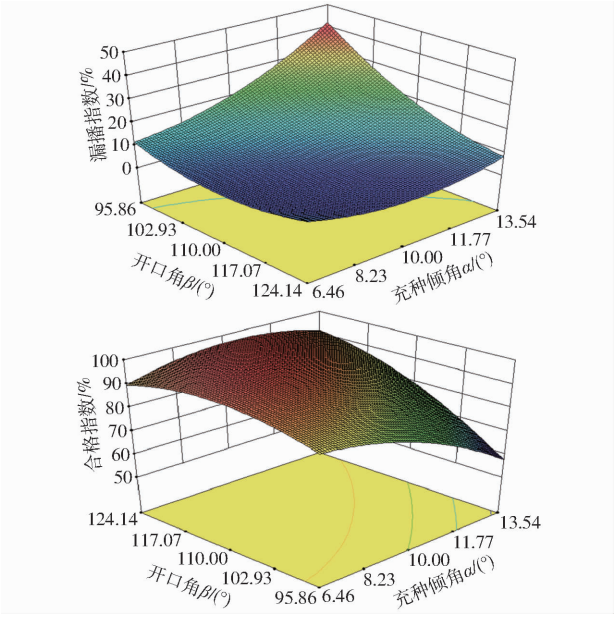


图 11　响应曲面

Fig. 11　Response surface diagrams

从图 11 可以看出，两因素交互作用强，当充种倾角 α 在较低值时，随着开口角 β 的增大合格指数呈现先增大后下降的趋势，漏播指数则呈现相反的趋势，其原因为：开口角的增大使取种腔内部增大，种子充入时碰撞减少，充种更顺畅，且开口角的增大使清种速度更快，但开口角增大到一定程度后，导致取种腔空间过大，使种子在型孔内部产生拥堵、起拱，破坏了其有序充入的状态，影响后续充种，导致合格指数下降，漏播指数上升。当 α 在较高值时，型孔内部变深，种子的充填路径过长，在高速充种情况下种子充填时间不足，而随着开口角 β 的增大，取种腔内部通道的增大与较大的充填力不足以弥补充种路径过长带来的不利影响，导致漏播指数上升，合格指数下降。

当开口角 β 保持在较低值时，充种倾角 α 的增加使合格指数迅速下降，漏播指数上升，分析其原因为：当开口角较小时，种子充入时与开口斜面碰撞，这一过程对充种过程有所阻碍，随着 α 的增大，充填路径变长致使充种效果更差。而随着 β 增大至最大值，α 的增大使合格指数先上升而后下降，主要原因是 α 的增大提高充填力，取种腔空间适宜种子充

种,使充种效果提高;两参数继续增大使充填路径过长,取种腔内部容积过大,导致充填效果不佳,合格指数下降。

为进一步获得排种器最优结构参数,采用多目标优化方法,以合格指数最高、漏播指数最低为目标,寻找两个因素的最优参数组合,其目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \max\ y_1(X_1,X_2) \\ \min\ y_2(X_1,X_2) \\ \text{s.t.}\begin{cases} -1.414 \leqslant X_1 \leqslant 1.414 \\ -1.414 \leqslant X_2 \leqslant 1.414 \end{cases} \end{cases} \tag{13}$$

利用 Design-Expert 软件中 Optimization 模块对两因素最优值进行优化分析,可得到 α 与 β 最优值分别为 11.50°、119.05°。

4 台架试验

4.1 试验系统与方案

为验证参数优化结果,α 与 β 分别取 11.50°、119.05°,利用 3D 打印加工样机并搭建试验台架,如图 12、13,利用 JSP-12 型计算机视觉排种器性能检测试验台开展台架试验,验证排种器在 4、6、8、10、12、14 km/h 共 6 种作业速度下的排种性能。每个速度重复 3 次,取平均值作为试验结果,排种效果如图 14。

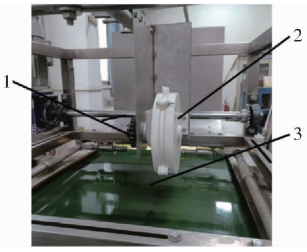


图 12 JSP-12 型试验平台

Fig. 12 JSP-12 test platform

1. 链传动及轴 2. 排种器 3. 种床带

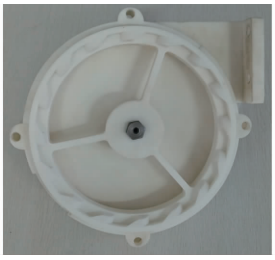


图 13 排种器内部结构

Fig. 13 Internal structure of seed metering device

4.2 试验结果

试验结果如图 15 所示,台架试验中没有发现重播情况。在作业速度 4~10 km/h 下,漏播指数增加到最大值 4.73%,10~14 km/h 又略微下降,其原因为:在速度增大时,充种口起拱导致充种效果下降,

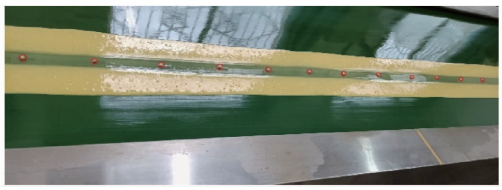


图 14 排种效果

Fig. 14 Verification effect of seed metering

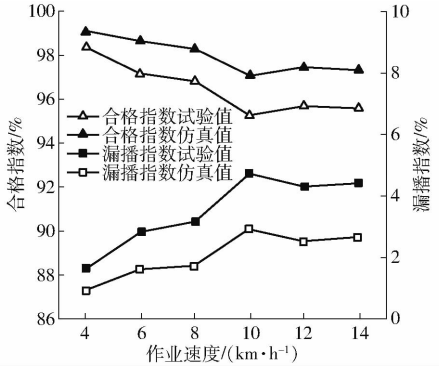


图 15 验证试验结果

Fig. 15 Verification test results

使漏播指数增加,但当作业速度继续增大,转速提升使清种时部分种子在未完全退出取种腔的情况下又继续充种,提高了充种效率,使漏播指数下降,总体漏播指数满足国家标准要求。

高速 8、10、12、14 km/h 下台架试验合格指数分别为 96.84%、95.27%、95.68%、95.59%,排种器的合格指数变化不大,表明该排种器的高速作业性能稳定。在低速 4、6 km/h 下合格指数不低于 97.18%,说明该结构在低速条件下排种效果良好。与仿真单因素结果对比,台架试验结果与仿真试验误差低于 1.80%,表明参数组合优化结果可靠。如图 16,高速作业条件下结构与种子的碰撞增加,以及加工样机时部分零件存在变形导致破损指数增加,总体台架试验破损指数低于 0.53%,满足大豆高速精量播种要求。

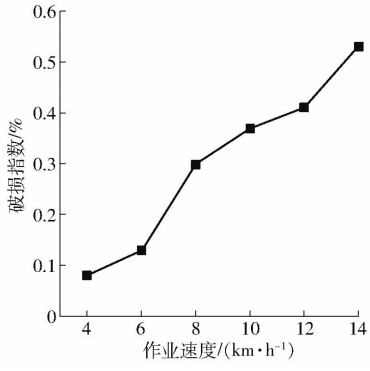


图 16 破损指数变化曲线

Fig. 16 Damage rate curve

5 结论

(1)为提高大豆排种器高速排种性能,设计了

一种侧置导引式高速精量排种器。采用侧置式型孔和导引板实现了高效引导充种、稳定递种，在高速作业条件下排种器工作性能良好，通过对排种盘、型孔等关键部件设计及排种过程的理论分析，得到了影响排种性能的关键因素：充种倾角 α 与开口角 β。

(2)通过充种动力学分析，建立了充填力模型，模型表明切向充填力随着位置角增大而逐渐增大到最大值后下降，z 向充填力逐渐增大到最大值，该结构能够通过增大充填力，实现提高充种效果的目标。

(3)以充种倾角、开口角为因素开展二因素五水平中心旋转组合试验，建立了各因素与排种性能间的回归模型，得到了各因素及其交互作用对排种性能的影响关系。优化了充种倾角 α、开口角 β，其最佳参数组合值分别为 11.50°、119.05°。

(4)经仿真试验和台架试验验证，在作业速度 4 ~ 14 km/h 下，合格指数不低于 95.27%，漏播指数不大于 4.73%，与仿真试验误差低于 1.80%，破损指数低于 0.53%，满足大豆高速精量播种要求。

参 考 文 献

[1] GAO X J, ZHOU Z Y, XU Y, et al. Numerical simulation of particle motion characteristics in quantitative seed feeding system [J]. Powder Technology, 2020, 367: 643 - 658.

[2] 杨丽，颜丙新，张东兴，等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. (in Chinese)

[3] 苑严伟，白慧娟，方宪法，等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报，2018，49(9)：1 - 18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1 - 18. (in Chinese)

[4] GAO X, CUI T, ZHOU Z, et al. DEM study of particle motion in novel high-speed seed metering device[J]. Advanced Powder Technology, 2021, 32(5): 1438 - 1449.

[5] CHEN W, ZHANG B, JIANG L, et al. Research status and development trend of seed-metering device in China[J]. American Journal of Agricultural Research, 2020, 5(11): 98 - 109.

[6] 李玉环，杨丽，韩英，等. 勺夹式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 108 - 116. (in Chinese)

[7] 李玉环，魏亚男，杨丽，等. 扰动促充机械式绿豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 1)：43 - 53.
LI Yuhuan, WEI Ya'nan, YANG Li, et al. Design and experiment of mung bean precision seed-metering device with disturbance for promoting seed filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 43 - 53. (in Chinese)

[8] 刘宏新，刘俊孝，唐师法，等. 对置斜盘高速精密大豆排种器设计与充种机理分析[J]. 农业工程学报，2016，32(20)：24 - 31.
LIU Hongxin, LIU Junxiao, TANG Shifa, et al. Design on opposed inclined-plate high-speed precision seed-metering device and its working mechanism analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 24 - 31. (in Chinese)

[9] CORREIA T P D S, SOUSA S F G, SILVA P R A, et al. Sowing performance by a metering mechanism of continuous flow in different slope conditions[J]. Engenharia Agricola, 2016, 36(5): 839 - 845.

[10] 王业成，孙浩，李宝权，等. 大豆集排带式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(7)：74 - 83.
WANG Yecheng, SUN Hao, LI Baoquan, et al. Design and experiment of centralized belt type soybean seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 74 - 83. (in Chinese)

[11] JIA H, CHEN Y, ZHAO J, et al. Design and key parameter optimization of an agitated soybean seed metering device with horizontal seed filling[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 76 - 87.

[12] XING H, ZANG Y, WANG M Z, et al. Design and experimental analysis of a stirring device for a pneumatic precision rice seed metering device[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(4): 799 - 808.

[13] 李沐桐，李天宇，官晓东，等. 锥盘排种器离心推送结构设计与充种机理分析[J]. 农业机械学报，2018，49(3)：77 - 85.
LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design on push structure of centrifugal cone seed-metering device and its filling mechanism analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 77 - 85. (in Chinese)

[14] 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)

[15] LIAO Y, WANG L, LIAO Q. Design and test of an inside-filling pneumatic precision centralized seed-metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(2): 56 - 62.

[16] 陈玉龙，贾洪雷，王佳旭，等. 大豆高速精密播种机凸勺排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(8)：95 - 104.
CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 95 - 104. (in Chinese)

(下转第 75 页)