doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.010

柔性机械式大豆精量排种器设计与试验

侯守印　邹　震　魏志鹏　祝祎璠　陈海涛
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对免耕播种作业时沙土和碎秸等飘浮物被气吸式排种器吸入充种室内,导致排种工作部件损坏、排种质量降低等问题,设计了一种柔性清护种机械式大豆精量排种器。对排种器工作过程进行理论分析,确定了影响工作性能的主要结构与工作参数;通过单因素对比试验确定了对排种性能影响最小的护种毛刷材料;采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法,以作业速度、充种倾角、护种距离为试验因素,以合格指数、漏播指数、重播指数和破损指数为评价指标,应用 Design-Expert 8.0.6.1 软件对试验结果进行方差分析。结果表明:各因素对合格指数的影响显著性由大到小依次为作业速度、护种距离、充种倾角,各因素对漏播指数的影响显著性由大到小依次为护种距离、作业速度、充种倾角,各因素对重播指数的影响显著性由大到小依次为作业速度、充种倾角,护种距离影响不显著,各因素对破损指数的影响显著性由大到小依次为护种距离、作业速度、充种倾角;当作业速度为 8 ~ 12 km/h、充种倾角 70°、护种距离为 -1.5 mm 时,排种合格指数大于 94%、漏播指数小于 3%、重播指数小于 3%、破损指数小于 0.2%,满足免耕大豆高速精量播种作业要求。

关键词: 大豆; 免耕; 排种器; 机械式; 柔性; 精量
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0077-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Flexible Mechanical Soybean Precision Seed-metering Device

HOU Shouyin　ZOU Zhen　WEI Zhipeng　ZHU Yifan　CHEN Haitao
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming at the problems that multiple floating debris like sand and broken straw are often sucked into seeding compartments by air-suction seed-metering devices during no-tillage sowing operations, causing lower seed metering quality, a flexible mechanical type soybean seed-metering device with seed-cleaning and maintaining functions was designed. Through a series of theoretical analyses of operation process of seed-metering device, the main structures and working parameters which might affect actual working performances were further determined. And by selecting PE wire, bristle and nylon as seed-protecting brush materials, a series of single-factor comparisons were conducted, it was showed that there was no significant difference between bristle and nylon in making effects on pass indexes. But PE wire had significant effects upon these pass indexes. As for effects on missed-sowing index and repeated-sowing index, there was no significant difference between nylon and bristle. However, PE wire achieved significant effect upon this index. For the damage index, there were significant differences between the above three materials. And through further comparative analyses, by selecting nylon as brush material, adopting 3-factor 5-level orthogonal revolving combination way and Design-Expert 8.0.6.1, taking operation speed, seed-filling inclination angle and seed-protection distance as test factors, as well as applying pass index, missed index, repeated index and damage index as evaluation indicators, the experimental data was further processed. It was showed that the actual effect degrees of all the above factors which made on pass index were operation speed, seed-protection distance and seed-filling

收稿日期: 2020-01-11　修回日期: 2020-03-18
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(GARS-04)、黑龙江省自然科学基金项目(E2018008)、国家重点研发计划项目(2018YFD0201004)和北方寒地现代农业装备技术重点实验室开放项目(KF18-05)
作者简介: 侯守印(1986—),男,工程师,博士生,主要从事旱作农业装备研究,E-mail: houshouyin.cn@163.com
通信作者: 陈海涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备及生物质材料研究,E-mail: htchen@neau.edu.cn

inclination angle from the greatest to the least. Actual effects of all the above factors made on index missed-sowing index were seed-protection distance, seed-filling inclination angle and operation speed from the greatest to the least. And actual effects of all these factors made upon repeated-sowing index were operation speed, seed-filling inclination angle and seed-protection distance from the greatest to the least. And actual effects of all these above factors brought on damage index were seed-protection distance, operation speed and seed-filling inclination angle from the greatest to the least. When operating speed was 8 ~ 12 km/h, seed-filling inclination angle reached 70° and seed protection distance came to be -1.5 mm, such seed-metering device can pass 94% of total seeds, and missed-seeding index was less than 3%, missed-sowing index was less than 3%, and damage index was less than 0.2%, meeting the agronomic technical requirements for soybeans high-speed precision sowing under condition of no-tillage.

Key words: soybean; no-tillage; seed-metering device; mechanical; flexibility; precision

0 引言

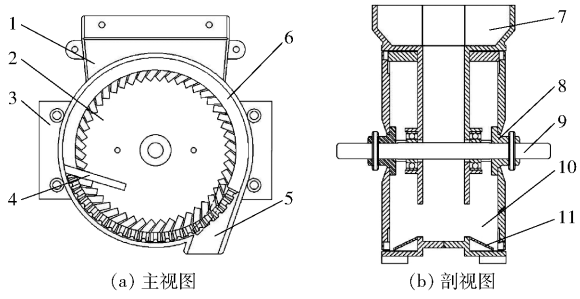
免耕是保护性农业的核心技术[1-5]。免耕作业时地表覆盖大量作物残茬,残茬处理装置工作时产生的碎秸、沙土等飘浮物被气吸式排种器吸入种室内,造成排种工作部件堵塞而无法正常工作。

排种器是播种机的核心部件,高速、精量排种是现代农业的发展方向。从原理上排种器可分为气吸式和机械式。气吸式排种器能够实现 10 km/h 以上的高速精量排种作业,由于排种原理的制约,导致其无法适应免耕播种环境[6-8];机械式排种器则可避免碎秸、沙土进入排种室而导致的排种部件堵塞、排种质量降低的问题。大豆种植粒距较小,现有机械式排种器难以满足大豆高速精量排种作业的要求。相关学者对机械式大豆排种器的高速化和精量化进行了研究。陈玉龙等[9]设计了一种大豆高速精密凸勺排种器,其靠种子自身重力实现充种和清种功能,由于无护种装置,高速作业时漏播指数较高;刘宏新等[10]设计了一种对置斜盘式机械高速精密大豆排种器,由于采用硬接触护种装置,护种过程对种子尺寸要求较严格,种子尺寸不规则时破损指数较高;王业成等[11-12]设计了一种摩擦型立式圆盘大豆排种器,通过增大摩擦力提高大豆充种效率,但高速作业时摩擦力导致充种过程破损指数较高。

为解决大豆高速精量播种作业时机械式排种器排种性能差、种子破损指数高等问题[13-15],本文设计一种柔性清护种机械式大豆精量排种器,通过增设充种倾角提高立式圆盘侧向充种性能,通过柔性清护种毛刷与充种型孔在不同区域的配合控制种子的位置及运动,提高清护种质量,保证排种性能,从而实现大豆高速精量排种。

1 结构与工作原理

柔性机械式大豆精量排种器结构如图 1 所示。主要由分体式壳体、排种盘、充种斜面、清种毛刷、护种毛刷等组成。充种斜面、清种毛刷和护种毛刷固装在壳体上,排种盘通过法兰与排种轴连接。分体式结构可实现大豆单、双行排种。



(a) 主视图 (b) 剖视图

图 1 排种器结构简图

Fig. 1 Structure diagram of seed-metering device

1. 分体式壳体 2. 排种盘 3. 安装座 4. 清种毛刷 5. 投种口 6. 护种毛刷 7. 进种口 8. 法兰 9. 排种轴 10. 充种室 11. 充种斜面

工作原理如图 2 所示,排种器工作时,排种盘随排种轴逆时针转动,排种盘上的充种型孔经过由排种盘、充种斜面和分体式壳体组成的充种室时,在充种斜面和排种盘导流槽的作用下完成侧向充种;充满种子的型孔经过清种毛刷时,为实现单粒精量排种,清种毛刷清除型孔中多余的种子,被清除的种子流回充种室继续参与后续充种;清种后的型孔旋转至护种区,种子被封闭在由排种盘、护种毛刷和分体式壳体组成的柔性空间内,确保护种阶段种子不会

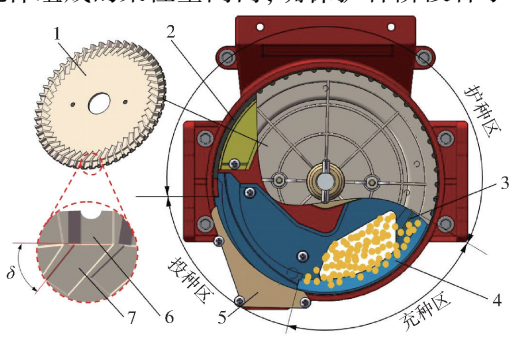


图 2 排种器工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of seed-metering device

1. 排种盘 2. 护种毛刷 3. 清种毛刷 4. 充种斜面 5. 投种口 6. 型孔 7. 导流槽

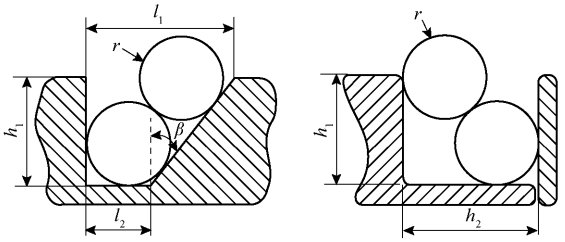
脱离型孔，同时柔性护种避免了种子与壳体摩擦、挤压破损；排种盘转动至投种区，型孔与护种毛刷、分体式壳体分离，种子在重力和离心力的作用下脱离型孔，经投种口完成投种作业。由于清种、护种过程均采用柔性部件，最大限度避免了种子的破损，为大豆高速排种奠定了基础。

2　关键部件设计与参数确定

2.1　排种盘设计

2.1.1　型孔结构

增大充种室内大豆种子群与型孔接触面积，可以提高排种器充种性能，将型孔设计为开口沿排种盘圆周切线方向尺寸逐渐增大的倒梯形结构，如图 3a 所示。



(a) 切向剖面　　(b) 径向剖面

图 3　型孔结构简图

Fig. 3　Shape hole structure diagrams

为实现单粒精量播种，当型孔内充入多粒种子时，需确保多余种子被清除。由图 3 可知，型孔顶边长度 l_1 和型孔轴向深度 h_1 过大会造成多粒种子质心均位于型孔内部，影响清种效果，导致重播指数增加。为提高充种和清种性能，型孔结构尺寸需满足

$$\begin{cases} r < h_1 < 2r\cos\beta + r \\ 2r < l_1 < r\left(1 + 2\sin\beta + \dfrac{1}{\cos\beta}\right) \\ 2r < h_2 < 2r + \sqrt{3r^2 - h_1^2 + 2h_1 r} \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\sin\beta = \frac{l_1 - l_2}{\sqrt{l_1^2 - l_2^2 + h_1^2}}$$

$$\cos\beta = \frac{h_1}{\sqrt{l_1^2 - l_2^2 + h_1^2}}$$

式中　β——型孔倾角，(°)

l_2——型孔底边长度，mm

r——大豆种子半径，mm

h_2——型孔径向深度，mm

通过分析，充种过程中排种盘最大线速度与型孔倾角关系为

$$v_{max} = (l_2 + h_1\tan\beta)\sqrt{\frac{F}{2mr}} \tag{2}$$

式中　v_{max}——排种盘最大线速度，m/s

F——种子侧充力，N

m——种子质量，kg

由式(2)可知，排种盘最大线速度与型孔倾角正相关，增大充种倾角可以提高排种盘最大线速度，但排种盘最大线速度过大会导致种子与型孔发生碰撞时冲量增加。查阅资料，型孔倾角为 30°时可获得最佳充种性能[16]。

选用“黑河 43”大豆为研究对象，随机抽取 100 粒大豆样本进行测定，平均直径为 6.2 mm，将型孔倾角和大豆种子直径代入式(1)可得型孔轴向深度范围为 3.3 ~ 8.9 mm，型孔径向深度范围为 6.5 ~ 10.3 mm，根据型孔轴向深度和径向深度越大，种子在型孔内稳定性越好，型孔轴向深度和径向深度设计为 8.5 mm 和 10 mm；型孔顶边长度范围为 6.5 ~ 13.4 mm，增大型孔顶边长度可以增加充种时间，型孔顶边长度设计为 13 mm，型孔底边长度为 8 mm。

为提高充种性能，在排种盘上设计与型孔底面相连的导流槽对充种室种子群进行扰动，并引导种子进入型孔，如图 2 所示，试验测定大豆种子与排种盘滚动摩擦角为 18.6°，位置角 δ 设计为 70°。

2.1.2　型孔数与直径的确定

型孔数和排种盘直径是影响排种性能的关键参数，当排种粒距与作业速度一定时，增加型孔数可以降低排种盘转速，增加排种器充种时间，提高充种性能。但型孔数的增加会导致排种盘直径增大，过大的排种盘直径会造成排种器结构尺寸增大和质量增加。型孔数可表示为[17-18]

$$k = \frac{\pi D v_m}{(1-c)Lv_d} \tag{3}$$

其中

$$v_d = \frac{\pi n D}{60}$$

式中　D——排种盘直径，mm

v_m——作业速度，m/s

c——地轮滑移率，%

v_d——排种盘线速度，m/s

n——排种盘转速，r/min

L——排种粒距，mm

免耕播种作业时由于受残茬处理装置限制，作业速度一般为 7.2 ~ 10.8 km/h[19-20]，作业速度设计为 10.8 km/h。根据大豆双行种植农艺要求，单行粒距为 8 ~ 10 cm，排种粒距设计为 8 cm。地轮传动滑移率为 10%[21]，排种盘最大转速为 50 r/min，由式(3)可得排种盘型孔数为 48。排种盘直径与型孔结构尺寸及型孔数有关，可表示为

$$D = \frac{kl_1}{\pi} + 2h_2 \tag{4}$$

将型孔数、型孔顶边长度和型孔径向深度代入

式(4)可得排种盘直径为 220 mm。

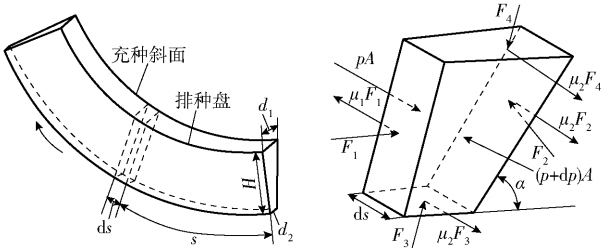
2.2 排种过程分析

通过对柔性机械式大豆精量排种器的充种、护种和投种过程分析,确定影响排种性能的关键参数,为参数组合优化试验研究奠定理论基础。

2.2.1 充种过程

种子群在重力作用下进入充种斜面与排种盘形成的管状空间内,在摩擦力的作用下随排种盘运动,从管状空间的另一侧流出进入排种盘型孔,实现充种。

取圆弧充种区域内的种子群为研究对象,由于种子尺寸相对于种子管状空间较小,为简化分析过程,将其视为截面为梯形的连续体,如图 4 所示。



(a) 种子群微分段 (b) 种子群微分段受力

图 4 种子群微分段受力分析

Fig. 4 Force analysis of seed group in micro segment

取种子微分段 ds 为研究对象,设种子流向为正向,对种子微分段进行受力分析,充种区域内的种子受排种盘支反力和摩擦力,壳体向上支反力和摩擦力,充种斜面支反力和摩擦力及顶部种子群重力共同作用。通过对种子群微分段受力分析,可得力学平衡方程为

$$A\mathrm{d}p=\mu_1F_1-\mu_2F_2-\mu_2F_3-\mu_2F_4 \tag{5}$$

其中

$$A=\frac{(d_1+d_2)H}{2}\qquad d_1=d_2+\frac{H}{\tan\alpha}$$

$$F_1=\lambda pH\mathrm{d}s\qquad F_2=\frac{\lambda pH\mathrm{d}s}{\sin\alpha}$$

$$F_3=\lambda pd_2\mathrm{d}s\qquad F_4=\lambda pd_1\mathrm{d}s$$

式中 p——种子群截面压力,MPa

A——种子群截面面积,mm^2

d_1——排种盘与充种斜面上端距离,mm

d_2——排种盘与充种斜面下端距离,mm

H——充种高度,mm

F_1——种子群微段左表面法向力,N

F_2——种子群微段右表面法向力,N

F_3——种子群微段下表面法向力,N

F_4——种子群微段上表面法向力,N

μ_1——种子与排种盘动摩擦因数

μ_2——种子与充种斜面和壳体动摩擦因数

λ——端面压力比

α——充种倾角,(°)

s——种子群微分段距充种起始处弧长,mm

整理式(5)可得

$$\frac{\mathrm{d}p}{p}=\frac{2\lambda\{\mu_1H\sin\alpha-\mu_2[H+\sin\alpha(d_1+d_2)]\}}{H\sin\alpha(d_1+d_2)}\mathrm{d}s \tag{6}$$

在种子群端面均匀分布初始截面压力 p_0,其大小由排种器内种子群的高度、密度和内摩擦角等因素决定,根据散体理论深谷模型进行估算[22],由式(6)可得种子群各截面压力为

$$p=p_0\exp\left(\frac{2\lambda[\mu_1H\sin\alpha\tan\alpha-\mu_2(H\tan\alpha+H\sin\alpha+2d_2\sin\alpha\tan\alpha)]}{(2d_2\sin\alpha\tan\alpha+H\sin\alpha)H}s\right)$$

$$\left(0\leqslant s\leqslant l_0,0<\alpha<\frac{\pi}{2}\right) \tag{7}$$

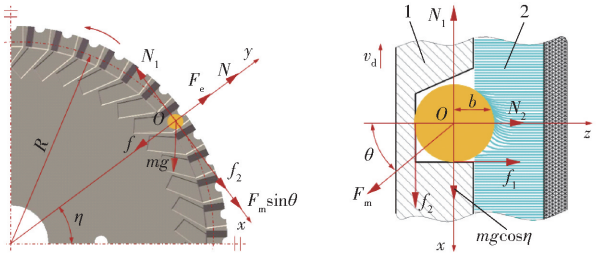
式中 l_0——充种区域种子群长度,mm

由式(7)可知,种子群截面压力 p 与充种空间截面距充种室距离 s 呈指数关系增大,种子可获得远大于其自重的填充力,提高了种子充种性能和充种效率。端面压力比与摩擦角有关,通过试验测定端面压力比为 0.32,种子与排种盘、壳体动摩擦因数分别为 0.337、0.344[10],排种盘与充种斜面下端距离 d_2 设计为 10 mm,充种高度 H 为 40 mm,将数据代入式(7)可知,种子群截面压力随充种倾角的增大呈先增大后减小趋势,当充种倾角为 70°时达到最大值。

2.2.2 护种过程

根据排种器工作原理可知,完成充种的型孔旋转至与护种毛刷接触时,排种器进入护种过程。为解决机械式排种器护种阶段种子容易破损问题,采用柔性护种毛刷与排种盘配合完成护种,护种过程种子被封闭在由排种盘、护种毛刷和壳体组成的柔性封闭空间,并随排种盘旋转,避免常规护种过程中出现夹种、嗑种和摩种现象。为保证护种过程种子运移的平稳性,不出现漏种,对护种过程的种子进行受力分析。护种毛刷对护种过程的种子起支撑作用,确保种子运移过程中不脱离型孔,当种子高出型孔顶平面时,护种毛刷对种子施加斜向型孔的支反力,克服种子与型孔间的摩擦力使种子完全进入型孔,毛刷属于柔性部件,避免了护种过程种子的破损。在对护种过程种子受力分析时,忽略振动对种子受力状态的影响,选取型孔内单粒种子质心 O 为原点,沿排种盘旋转方向的切向和法向建立 xOy 坐标系,型孔内种子主要受自身重力、型孔侧壁支反力 N_1、型孔内壁支反力 N_2、底面支反力 N、型孔侧壁摩擦力 f_1、型孔内壁摩擦力 f_2、径向摩擦力 f 和离心力

F_e的共同作用，如图 5 所示。



(a)xOy面　　(b)xOz面

图 5　护种过程种子受力分析

Fig. 5　Analysis of seed force in process of seed protection

1. 排种盘　2. 护种毛刷

通过受力分析可得护种过程中种子受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_m\sin\theta + mg\cos\eta + f_2 - N_1 = 0 \\ F_e + N - f - mg\sin\eta = 0 \\ N_2 + f_1 - F_m\cos\theta = 0 \end{cases} \tag{8}$$

其中

$$F_e = Rm\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2$$

$$f_1 = \mu(F_m\sin\theta + mg\cos\eta + f_2)$$

$$f_2 = \mu(F_m\cos\theta - f_1)$$

式中　F_m——毛刷支反力，N

θ——毛刷支反力与 z 轴夹角，(°)

η——种子相位角，(°)

μ——种子与排种盘静摩擦因数

R——种子质心旋转半径，mm

排种盘转动时，型孔内种子受到护种毛刷施加的力矩而产生自转，导致种子与型孔之间摩擦而破损，为消除种子自转，护种毛刷对种子施加的力矩需满足

$$F_m b\sin\theta - F_m\sqrt{r^2 - b^2}\cos\theta < (f_1 + f_2)r \tag{9}$$

式中　b——护种毛刷与种子之间力作用点距种子质心水平距离，mm

整理式(8)和式(9)可得

$$F_m < \frac{(1-\mu)mg\cos\eta}{\sin\theta[\mu b - (1-\mu)r] - \mu\cos\theta[\sqrt{r^2 - b^2} - r(\mu+1)]} \tag{10}$$

通过对护种过程受力分析，由式(10)可知，当排种盘型孔结构参数一定时，护种效果由种子与排种盘静摩擦因数、护种毛刷与种子之间力作用点距种子质心水平距离决定，而护种毛刷与种子之间力作用点距种子质心水平距离由毛刷材料、护种距离决定，后文将通过多重比较和参数组合优化试验确定护种毛刷材料和护种距离。

2.2.3　投种过程

投种过程中，护种毛刷不再对型孔内种子提供支撑力，种子在离心力和重力作用下平行于排种盘转动平面速度可分解为水平速度 v_x 和竖直向下速度 v_y[23-24]，如图 6 所示。

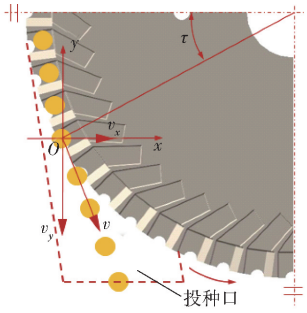


图 6　投种过程运动分析

Fig. 6　Motion analysis of seed dropping process

以种子质心 O 为原点在排种盘的转动平面建立 xOy 直角坐标系，可得种子运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X = v_x t \\ Y = v_y t + \dfrac{gt^2}{2} \end{cases} \tag{11}$$

其中

$$v_x = v\sin\tau$$

$$v_y = v\cos\tau$$

$$v = \frac{n\pi R}{30}$$

式中　X——水平方向位移，mm

Y——竖直方向位移，mm

v_x——投种速度水平方向分量，m/s

v_y——投种速度竖直方向分量，m/s

τ——投种角，(°)

t——投种时间，s

v——投种速度，m/s

整理式(11)可得种子在 xOy 面运动轨迹方程为

$$\begin{cases} X = \dfrac{n\pi R\sin\tau}{30}t \\ Y = \dfrac{n\pi R\cos\tau}{30}t + \dfrac{gt^2}{2} \end{cases} \tag{12}$$

为保证投种质量，种子在型孔内运动至完全脱离型孔后不能与相邻型孔碰撞，需满足条件

$$\frac{n\pi R\cos\tau}{30}t_0 + \frac{gt_0^2}{2} > R(1 - \cos\sigma) \tag{13}$$

其中

$$\sigma = \frac{n\pi t_0}{30}$$

式中　σ——种子脱离型孔过程排种盘转角，(°)

t_0——种子脱离型孔时间，s

由投种过程运动分析可知，当排种盘结构参数一定时，种子运动轨迹与排种盘转速相关。投种角 τ 设计值为 45°，排种盘最大转速为 50 r/min，将数据代入式(13)得种子脱离型孔时间小于 1×10^{-4} s，满足投种作业要求。

3 参数优化试验

3.1 试验材料与试验设备

选用“黑河 43”大豆为试验样本,百粒质量为 21.3 g,平均几何尺寸为 6.48 mm×5.66 mm×6.42 mm(对 100 粒种子进行测量取平均值),试验于 2019 年 10 月 1—7 日在东北农业大学排种实验室 JPS-12 型排种器性能测试试验台(黑龙江省农业机械工程研究院)上实施,如图 7 所示,试验装置为柔性机械式大豆精量排种器。

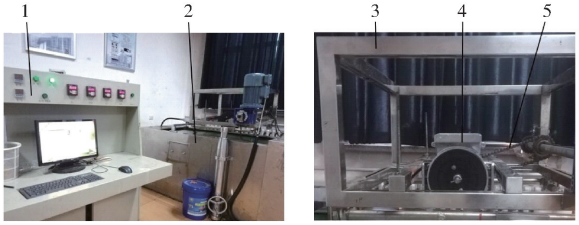


图 7 试验装置实物图

Fig. 7 Physical diagram of test device

1. 控制与数据采集系统 2. 试验台 3. 排种器安装架 4. 排种器 5. 传动系统

3.2 试验方案

大豆表皮强度较低,排种过程与护种部件碰撞、摩擦容易导致表皮破损,影响种子出苗,因此护种毛刷材质选取标准为材质柔软、耐磨、成本低。取 PE 丝、猪鬃和尼龙作为护种毛刷材料进行单因素对比试验,探究毛刷材料对排种性能指标的影响,确定清护种毛刷材料。

根据前文对充种过程和护种过程的理论分析,确定作业速度和充种倾角是影响排种器充种性能的关键参数,护种距离是影响护种性能和种子破损的关键参数,因此,选取作业速度、充种倾角、护种距离为试验因素。采用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法,以作业速度、充种倾角和护种距离为试验因素,粒距合格指数、漏播指数、重播指数和破损指数为性能评价指标,参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》实施。为实现排种器高速作业,选取作业速度范围为 7.2~14.4 km/h;通过前文理论分析,当充种倾角为 70°时,排种器可获得最佳充种性能,选取充种倾角范围为 50°~90°;合理的护种距离能够保证护种过程的稳定性,同时避免种子破损,通过预试验确定护种距离取值范围为 -3~1 mm。试验因素编码如表 1 所示。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 护种毛刷材料对排种性能的影响

当作业速度为 10.8 km/h,充种倾角为 70°,护种距离为 -1 mm 时,对 3 种材料的护种毛刷进行对比试验(排种性能测试试验台只能测试单行排种性能,试验时双行排种器各行分别测量,将两行结果取平均值作为最终结果),每组试验重复 3 次,取平均值[25],试验结果如表 2 所示。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Test factors codes

编码	因素		
	作业速度/(km·h^{-1})	充种倾角/(°)	护种距离/mm
1.682	14.4	90.0	1.00
1	12.9	81.9	0.19
0	10.8	70.0	-1.00
-1	8.7	58.1	-2.19
-1.682	7.2	50.0	-3.00

注:护种距离为负值时表示护种毛刷处于受压状态。

表 2 毛刷材料对比试验结果

Tab. 2 Comparison test results of brush materials

%

毛刷材料	合格指数	漏播指数	重播指数	破损指数
PE 丝	90.2^{b}	6.3^{a}	3.5^{a}	0.07^{c}
猪鬃	95.6^{a}	2.3^{b}	2.1^{b}	0.78^{a}
尼龙	95.4^{a}	2.3^{b}	2.3^{b}	0.15^{b}

注:同列相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著。

由表 2 可知,3 种材料的护种毛刷排种合格指数均高于 90%,对于合格指数的影响,猪鬃和尼龙材料之间无显著性差异,而猪鬃、尼龙材料与 PE 丝之间均存在显著性差异;对于漏播指数和重播指数的影响,尼龙和猪鬃之间无显著性差异,而尼龙、猪鬃与 PE 丝之间均存在显著性差异;对于破损指数的影响,3 种材料之间均存在显著性差异。PE 丝材料护种毛刷排种效果最差,合格指数 90.2%,漏播指数 6.3%,漏播指数高的主要原因是 PE 丝材质刚度较小,无法提供护种阶段种子需要的支撑力,导致种子脱离型孔,造成漏播。猪鬃材料的护种毛刷排种合格指数 95.6%,漏播指数 2.3%,破损指数 0.78%,破损指数高的主要原因是猪鬃材质刚度较大,在高速排种过程容易造成种子表皮破损,如图 8 所示。尼龙材料的护种毛刷,综合性能较好,合格指数 95.4%,漏播指数 2.3%,破损指数 0.15%。后续参数组合优化试验清护种毛刷选用尼龙材料。

3.3.2 参数组合优化试验

运用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验设计方法,共实施 23 组处理,每组处理重复 3 次,取平均值,试验方案和结果如表 3 所示,X_1、X_2、X_3为因素编码值。应用 Design-Expert 8.0.6.1 软件对试验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,各试验因素对合格指数均具有极

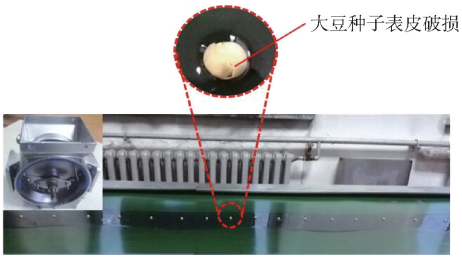


图 8　种子表皮破损

Fig. 8　Seed epidermis damaged

显著影响，影响由大到小依次为作业速度、护种距离、充种倾角；各试验因素对漏播指数均具有极显著影响，影响由大到小依次为护种距离、作业速度、充种倾角；作业速度和充种倾角对重播指数具有极显著影响，护种距离影响不显著，影响由大到小依次为作业速度、充种倾角、护种距离；各试验因素对破损指数均具有极显著影响，影响由大到小依次为护种距离、作业速度、充种倾角。

如图 9a 所示，作业速度对合格指数的影响比充种倾角显著；合格指数随作业速度的增大呈先升高后降低趋势，并且下降趋势逐渐明显，主要是由于作业速度较低时导流槽对充种区种子扰动效果较差，导致充种质量下降，但作业速度较低时因型孔经过充种区时间较长，在较小侧向填充力条件下，充种指数仍能达到 92% 以上，而随作业速度增大，型孔经过充种区时间缩短，种子没有足够时间完成充种作业，导致合格指数下降；合格指数随充种倾角的增大呈先升高后降低趋势，这是由于种子侧向填充力随充种倾角的增大先增大后减小。

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test design and results

序号	试验因素			试验指标			
	X_1	X_2	X_3	合格指数/%	漏播指数/%	重播指数/%	破损指数/%
1	−1	−1	−1	96.85	2.54	0.61	0.17
2	1	−1	−1	93.27	2.98	3.75	0.42
3	−1	1	−1	95.87	1.79	2.34	0.30
4	1	1	−1	93.14	3.25	3.61	0.36
5	−1	−1	1	95.21	4.31	0.48	0.07
6	1	−1	1	93.26	3.56	3.18	0.18
7	−1	1	1	93.67	3.12	3.21	0.24
8	1	1	1	93.16	3.76	3.08	0.24
9	−1.682	0	0	95.61	3.94	0.45	0.17
10	1.682	0	0	90.72	5.31	3.97	0.35
11	0	−1.682	0	95.61	2.74	1.65	0.13
12	0	1.682	0	93.26	1.93	4.81	0.24
13	0	0	−1.682	96.12	1.67	2.21	0.37
14	0	0	1.682	94.13	3.22	2.65	0.14
15	0	0	0	95.62	2.21	2.17	0.16
16	0	0	0	95.92	2.17	1.91	0.13
17	0	0	0	94.62	2.02	3.36	0.11
18	0	0	0	95.78	2.14	2.08	0.14
19	0	0	0	95.47	2.31	2.22	0.12
20	0	0	0	95.26	2.12	2.62	0.12
21	0	0	0	95.91	1.96	2.13	0.13
22	0	0	0	95.74	2.18	2.08	0.14
23	0	0	0	95.31	2.16	2.53	0.13

如图 9b 所示，作业速度对合格指数的影响比护种距离显著；在作业速度较低时，合格指数随护种距离增大而降低，这是由于随护种距离增大，护种毛

表 4　方差分析

Tab. 4　Analysis of variance

变异来源	合格指数				漏播指数				重播指数				破损指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	43.04	9	26.45	<0.000 1	18.72	9	112.82	<0.000 1	23.60	9	13.75	<0.000 1	0.21	9	107.63	<0.000 1
X_1	21.15	1	116.94	<0.000 1	1.23	1	66.55	<0.000 1	12.18	1	63.88	<0.000 1	0.038	1	176.99	<0.000 1
X_2	3.29	1	18.19	0.000 9	0.59	1	31.85	<0.000 1	6.66	1	34.90	<0.000 1	0.017	1	79.71	<0.000 1
X_3	3.77	1	20.86	0.000 5	3.38	1	183.43	<0.000 1	0.011	1	0.055	0.817 5	0.060	1	278.64	<0.000 1
X_1X_2	0.66	1	3.62	0.079 3	0.73	1	39.37	<0.000 1	2.76	1	14.48	0.002 2	0.011	1	52.06	<0.000 1
X_1X_3	1.85	1	10.25	0.007 0	0.51	1	27.38	0.000 2	0.42	1	2.22	0.160 2	5×10^{-3}	1	23.14	0.000 3
X_2X_3	0.035	1	0.19	0.666 7	0.033	1	1.76	0.207 1	0.14	1	0.71	0.415 1	3.2×10^{-3}	1	14.81	0.002 0
X_1^2	10.21	1	56.49	<0.000 1	12.07	1	654.62	<0.000 1	0.078	1	0.41	0.534 7	0.035	1	163.96	<0.000 1
X_2^2	1.98	1	10.93	0.005 7	0.061	1	3.31	0.091 8	1.34	1	7.04	0.019 9	6.8×10^{-3}	1	31.52	<0.000 1
X_3^2	0.19	1	1.04	0.326 4	0.16	1	8.77	0.011 0	1×10^{-3}	1	5×10^{-3}	0.943 6	0.033	1	151.91	<0.000 1
残差	2.35	13			0.24	13			2.48	13			2.8×10^{-3}	13		
失拟	0.99	5	1.16	0.404 1	0.16	5	2.97	0.082 9	0.92	5	1.15	0.504 3	1.1×10^{-3}	5	1.06	0.446 6
误差	1.36	8			0.084	8			1.56	8			1.7×10^{-3}	8		
总和	45.39	22			18.96	22			26.08	22			0.21	22		

注：$0.01<P<0.05$ 表示差异显著，$P<0.01$ 表示差异极显著。

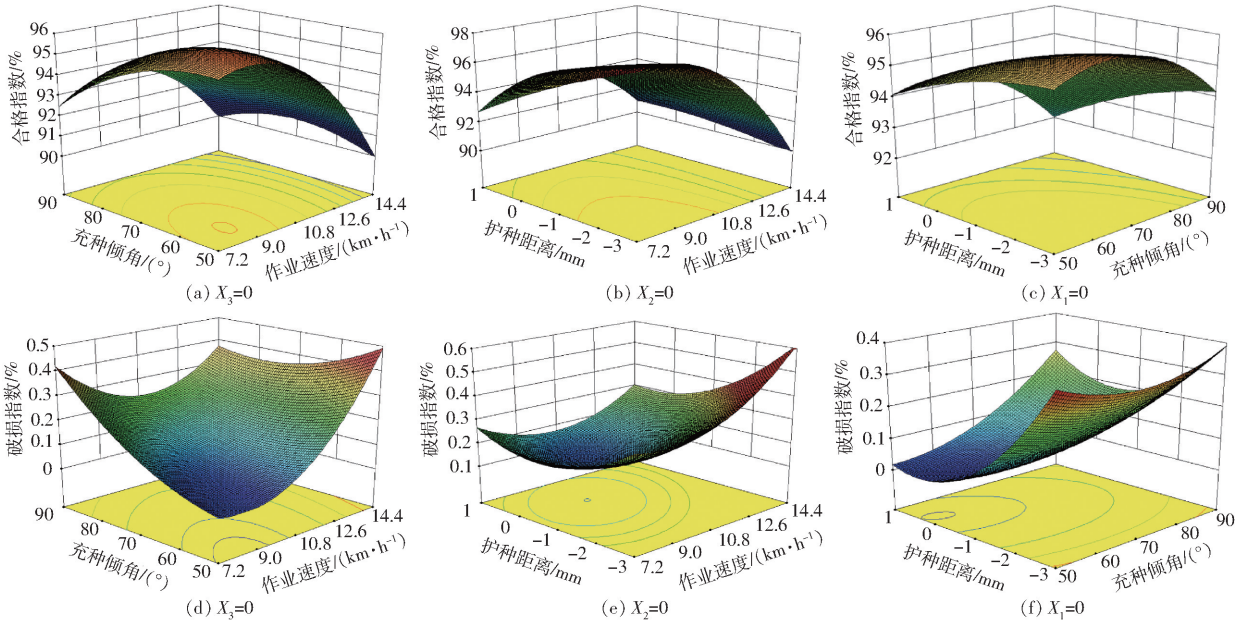


图 9 各因素交互作用对性能评价指标的影响

Fig. 9 Influences of interaction of various factors on performance evaluation index

刷提供型孔内种子的支反力减小,种子脱离型孔导致漏播指数升高、合格指数下降;在作业速度较高时,合格指数随护种距离增大呈先升高后降低趋势,主要是由于护种距离过小,高速作业时护种毛刷容易将型孔内的种子清除,漏播指数升高,导致合格指数降低;护种距离和作业速度交互作用对合格指数影响极显著。

如图 9c 所示,护种距离对合格指数的影响比充种倾角显著;合格指数随护种距离增大而降低,并且下降趋势加大;合格指数随充种倾角增大呈先升高后降低趋势;护种距离和充种倾角交互作用对合格指数影响不显著。

如图 9d 所示,作业速度对破损指数的影响比充种倾角显著;在充种倾角较小时,破损指数随作业速度增大而升高,在充种倾角较大时,破损指数随作业速度增大呈先降低后升高趋势,主要是由于随作业速度增大,种子在充种时与型孔面冲击力增大,导致破损指数升高,当充种倾角较大时,破损指数总体都在 0.2% 以上;在作业速度较小时,破损指数随充种倾角增大呈先降低后升高趋势,在作业速度较大时,破损指数随充种倾角增大变化不明显,主要是由于在作业速度较低时,破损指数主要由种子侧向填充力决定,侧向填充力随充种倾角增大呈先增大后减小趋势,未实现充种的种子容易被排种盘导流槽反复冲击造成损伤,而在作业速度较高时,破损指数总体大于 0.3%;作业速度和充种倾角交互作用对破损指数影响极显著。

如图 9e 所示,护种距离对破损指数的影响比作业速度显著;破损指数随护种距离增大呈先降低后升高趋势,升高趋势不明显,主要是由于随护种距离增大,种子受到护种毛刷侧向支撑力减小,破损概率降低,当护种距离超过 0 mm,即护种毛刷与排种盘之间无挤压时,种子容易脱离型孔后多次充种导致破损指数升高;作业速度和护种距离交互作用对破损指数影响极显著。

如图 9f 所示,护种距离对破损指数的影响比充种倾角显著;破损指数随充种倾角增大呈先降低后升高趋势,当护种距离较小时,破损指数总体高于 0.3%;破损指数随护种距离增大呈先降低后升高趋势,当充种倾角较大时,破损指数总体高于 0.2%;充种倾角和护种距离交互作用对破损指数影响极显著。

3.4 参数优化与验证试验

3.4.1 参数优化

试验优化原则为在保证排种器工作性能前提下提高作业效率。在作业速度为 7.2 ~ 14.4 km/h、充种倾角为 50° ~ 90°、护种距离为 -3 ~ 1 mm 的约束条件下应用 Design-Expert 8.0.6.1 软件进行优化。根据上述分析,当作业速度为极限值 14.4 km/h,充种倾角为 70°时,合格指数大于 90%、重播指数小于 4%、漏播指数小于 6%、破损指数小于 0.4%,选取充种倾角为 70°进行优化,优化结果如图 10 所示。图中黄色区域为最佳工作区域,当作业速度为 7.6 ~ 12.2 km/h、护种距离为 -2.1 ~ 0.6 mm 时,排种合格指数大于 94%、漏播指数小于 3%、重播指数小于 3%、破损指数小于 0.2%。

护种距离对护种毛刷磨损影响较大,护种距离越小,护种毛刷受排种盘压力越大,两者之间均会造

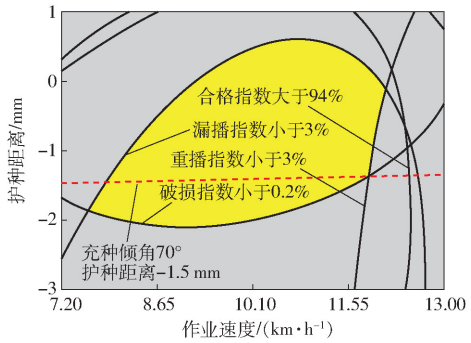


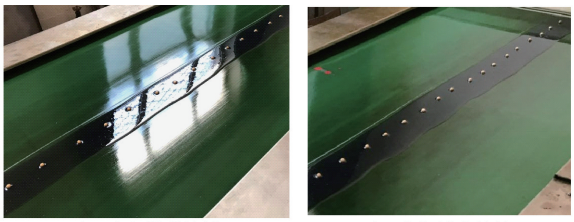
图 10　优化结果

Fig. 10　Optimization result

成较大磨损，为提高护种毛刷使用寿命，选取护种距离为 -1.5 mm。由图 10 可知，当作业速度为 8 ~ 12 km/h，充种倾角为 70°，护种距离为 -1.5 mm 时，排种性能指标在优化范围内。

3.4.2　验证试验

为验证参数组合优化的正确性，在充种倾角为 70°、护种距离为 -1.5 mm，试验材料为“黑河 43”大豆种子条件下，测试排种器在作业速度 8 ~ 12 km/h 时排种性能。选取 8、9、10、11、12 km/h 的 5 种作业速度进行验证试验，每组试验重复 5 次取平均值为最终结果，试验效果如图 11 所示，试验结果如图 12 所示。



(a) 左行排种效果　　(b) 右行排种效果

图 11　验证试验排种效果

Fig. 11　Verification effect of seed metering

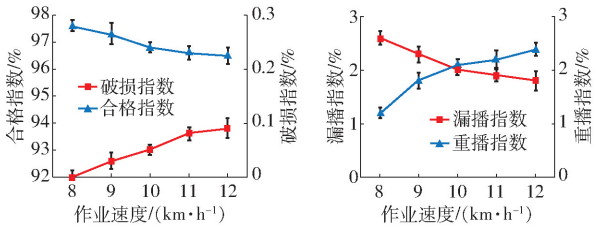


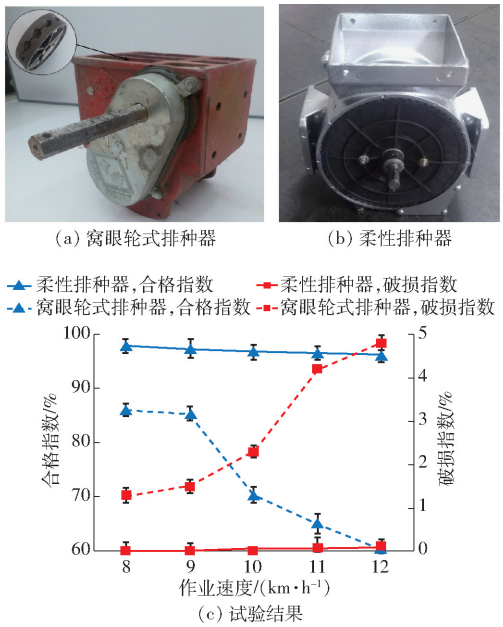
图 12　验证试验结果

Fig. 12　Verification test results

验证试验结果表明，当作业速度为 8 ~ 12 km/h 时，排种器合格指数大于 94%、漏播指数小于 3%、重播指数小于 3%、破损指数小于 0.2%，排种性能评价指标结果均在优化区间范围内，优化组合结果可信。

3.5　对比试验

为证明柔性机械式大豆精量排种器相对于现有常规机械式排种器在排种性能方面的优越性，进行排种性能对比试验。选取大豆排种技术比较成熟的窝眼轮式排种器为对照组，如图 13a 所示。以作业速度为试验因素，合格指数和破损指数为评价指标进行单因素对比试验，每组试验重复 5 次取平均值为最终结果，试验结果如图 13c 所示。



(a) 窝眼轮式排种器　(b) 柔性排种器

(c) 试验结果

图 13　对比试验结果

Fig. 13　Comparison test results

对比试验结果表明：当作业速度为 8 km/h 时，窝眼轮式排种器合格指数仅为 86.1%，而破损指数达到 1.3%，并且当作业速度大于 9 km/h 时，排种器合格指数急剧下降，破损指数升高，说明窝眼轮式大豆排种器排种性能不符合高速排种作业要求。

4　结论

(1)设计了一种柔性机械式大豆精量排种器，解决了现有排种器难以满足大豆免耕高速精量播种的问题。阐述了排种器的整体结构及工作原理，对排种盘和型孔结构进行了设计，同时对充种过程、护种过程和投种过程进行了理论分析，建立了相关参数数学模型，探明了影响排种性能的关键结构与工作参数，并确定了参数取值范围。

(2)通过三因素五水平二次正交旋转中心组合试验，采用多目标优化方法，分析了各因素对排种性能评价指标的影响规律，对多目标优化求解获得的最优组合参数进行了排种性能台架验证试验。结果表明：当作业速度为 8 ~ 12 km/h、充种倾角为 70°、护种距离为 -1.5 mm 时，合格指数大于 94%、漏播指数小于 3%、重播指数小于 3%、破损指数小于 0.2%，满足免耕大豆高速精量播种作业要求。

参 考 文 献

[1] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[2] ZHANG Shixiu, LI Qi, LU Ying, et al. Conservation tillage positively influences the microflora and microfauna in the black soil of Northeast China [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 149: 46 - 52.

[3] 张翼夫,王庆杰,胡红,等. 华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):138 - 145,154.
ZHANG Yifu, WANG Qingjie, HU Hong, et al. Effect of maize straw mulching on water and soil conservation in sandy soil and loam soil of North China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 138 - 145, 154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160519&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.019. (in Chinese)

[4] 李胜龙,李和平,林艺,等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征[J]. 水土保持学报,2019,33(4):110 - 118,220.
LI Shenglong, LI Heping, LIN Yi, et al. Effects of tillage methods on wind erosion in farmland of northeastern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 110 - 118, 220. (in Chinese)

[5] PANDEY D, AGRAWAL M, BOHRA J. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 136: 51 - 60.

[6] YANG Li, HE Xiantao, CUI Tao, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter [J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2015, 8(4): 1 - 9.

[7] 刘佳,崔涛,张东兴,等. 气吹式精密排种器工作压力试验研究[J]. 农业工程学报,2011,27(12):18 - 22.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Experimental study on pressure of air-blowing precision seed-metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 18 - 22. (in Chinese)

[8] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade [J]. Biosystems Engineering, 2015, 129(1): 329 - 340.

[9] 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/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):95 - 104.
CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of convex scoop row seed-laying device for high-speed and precise soybean seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 95 - 104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170810&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.010. (in Chinese)

[10] 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 Hongxin, XU Xiaomeng, GUO Lifeng, et al. Research on seed-filling mechanism of vertical shallow basin type seed-metering device with composite filling force [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 9 - 16. (in Chinese)

[11] 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 Yecheng, QIU Lichun, ZHANG Wenjiao, et al. Design and experiment of friction vertical plate precision seed-metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 22 - 26. (in Chinese)

[12] 王业成,高云鹏,台文硕,等. 夹持式玉米精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):40 - 46.
WANG Yecheng, GAO Yunpeng, TAI Wenshuo, et al. Design and experiment of clamping maize precision seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 40 - 46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190905&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.005. (in Chinese)

[13] 罗锡文,王在满,蒋恩臣,等. 型孔轮式排种器弹性随动护种带装置设计[J]. 农业机械学报,2008,39(12):60 - 63.
LUO Xiwen, WANG Zaiman, JIANG Enchen, et al. Design of disassemble rubber guard device for cell wheel feed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 60 - 63. (in Chinese)

[14] 张翔,杨然兵,尚书旗. 内侧充种圆盘排种器防伤种装置的设计[J]. 农机化研究,2014,36(10):75 - 78,83.
ZHANG Xiang, YANG Ranbing, SHANG Shuqi. Design on inside-filling disk metering device for peanut seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(10): 75 - 78, 83. (in Chinese)

[15] 王冲,宋建农,王继承,等. 机械式排种器同步柔性皮带护种器的设计[J]. 农业工程学报,2009,25(10):107 - 111.
WANG Chong, SONG Jiannong, WANG Jicheng, et al. Design of synchronization flexible belt protecting device for metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 107 - 111. (in Chinese)

[16] 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)

[17] 王吉奎,坎杂,曹卫彬,等. 内侧充种式棉花穴播器的充种和清种机理[J]. 农业机械学报,2006,37(6):42 - 44,62.
WANG Jikui, KAN Za, CAO Weibin, et al. Study on seed-filling and seed-clearing mechanism of inside-filling cotton dibbler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 42 - 44, 62. (in Chinese)

[18] 张德文,李林,王慧民. 精密播种机械[M]. 北京:农业出版社,1982.

[19] 马成林. 精密播种理论[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1999.

(下转第 108 页)

Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 171 - 175. (in Chinese)
[19] 张德文,李林,王慧民,等. 精密播种机械[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
[20] 马成林. 精密播种理论[M]. 长春:吉林科学技术出版社, 1999: 231.
[21] 雷小龙,杨文浩,刘礼阳,等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 58 - 67.
LEI Xiaolong, YANG Wenhao, LIU Liyang, et al. Design and experiment of seed hill feeding device in pneumatic centralized metering device for hybrid rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 58 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181107&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.007. (in Chinese)
[22] 刘景春,苏文彬,刘香亭,等. 侧充排种器的研究[J]. 粮油加工与食品机械, 1982(4): 16 - 22.
LIU Jingchun, SU Wenbin, LIU Xiangting, et al. Research on side charge seed meter[J]. Machinery for Cereals Oil and Food Processing, 1982(4): 16 - 22. (in Chinese)
[23] 张国忠,臧英,罗锡文,等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 1 - 8.
ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Experiment of sucking precision of sucking plate with group holes on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1 - 8. (in Chinese)
[24] 刘宏新,蒋长春,陈海涛,等. 侧充重力清种圆盘型孔式精密排种器[J]. 农机化研究, 2000, 22(1): 45 - 47.
LIU Hongxin, JIANG Changchun, CHEN Haitao, et al. Side-filled gravity seed cleaning disc-type precision seed metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2000, 22(1): 45 - 47. (in Chinese)
[25] 张国忠,张沙沙,杨文平,等. 双腔侧充种式水稻精量穴播排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 9 - 17.
ZHANG Guozhong, ZHANG Shasha, YANG Wenping, et al. Design and experiment of double cavity side-filled precision hole seed metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 9 - 17. (in Chinese)
[26] 王在满,黄逸春,王宝龙,等. 播量无级调节水稻精量排种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 9 - 16.
WANG Zaiman, HUANG Yichun, WANG Baolong, et al. Design and experiment of rice precision metering device with sowing amount stepless adjusting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 9 - 16. (in Chinese)

(上接第 86 页)

[20] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6):41 - 51,217.
HOU Shouyin,CHEN Haitao,ZOU Zhen,et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):41 - 51,217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190605&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005. (in Chinese)
[21] 夏连明,耿端阳,王相友,等. 免耕播种机行星啮合式防滑地轮设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):56 - 60.
XIA Lianming,GENG Duanyang,WANG Xiangyou,et al. Design and experiment of planetary geared anti-sliding ground wheel for no-tillage planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):56 - 60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120811&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.011. (in Chinese)
[22] 周祖锷. 农业物料学[M]. 北京:北京出版社,1994.
[23] 郭丽峰,刘宏新,李彦龙,等. 定量容腔可变的立式圆盘排种器机理研究与结构设计[J]. 农机化研究,2016,38(9):141 - 146.
GUO Lifeng,LIU Hongxin,LI Yanlong,et al. Mechanism research and structure design on variable quantify vessel for vertical plate precision planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(9):141 - 146. (in Chinese)
[24] 王金武,唐汉,王金峰,等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):29 - 37,46.
WANG Jinwu,TANG Han,WANG Jinfeng,et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):29 - 37,46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170105&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.005. (in Chinese)
[25] 史嵩,周纪磊,刘虎,等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):61 - 70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190507&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.007. (in Chinese)