

独立分充式大豆双排毛刷高速精量排种器设计与试验

李玉环¹ 赵烁¹ 杨丽² 宋泉¹ 李宝刚¹ 杨发展¹

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院, 青岛 266520; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为解决机械式大豆排种器高速播种质量差的问题,设计了一种独立分充式大豆双排毛刷高速精量排种器,采用双排种盘结构增加型孔数量,独立分充避免种群积压互扰,实现高速精量排种作业。通过理论分析,明确了充种、投种性能的影响因素,并确定了型孔与导流槽相关参数。以作业速度、型孔倾角、导流槽倾角为试验因素进行了正交试验,试验结果表明:在大豆株距为8 cm、排种器作业速度为9 km/h时,较优组合为型孔倾角54°、导流槽倾角39°,此时合格指数为95.5%,漏播指数为2.0%,株距变异系数为13.1%。对比试验结果表明:作业速度为8~12 km/h时,独立分充式排种器合格指数比常规毛刷式排种器至少提升1.3个百分点,漏播指数至少减少0.8个百分点,株距变异系数至少减少2个百分点。窄行密植农艺适应性试验结果表明:在作业速度8~12 km/h的条件下,独立分充式排种器合格指数达到90.1%,漏播指数不高于4.6%,株距变异系数不大于20.1%,窄行密植种植农艺适应性较高。

关键词: 大豆; 精量排种器; 独立分充; 双排; 高速

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0101-10

OSID:



Design and Test of High-speed Precision Seeder of Independent Fractionated Soybean Double-row Brush

LI Yuhuan¹ ZHAO Shuo¹ YANG Li² SONG Quan¹ LI Baogang¹ YANG Fazhan¹

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor high-speed sowing quality of mechanical soybean seeder, an independent part-filling soybean double-row brush high-speed precision seeder was designed, which increased the number of holes by using the double-row seed tray structure, and independently divided the filling to avoid the mutual disturbance of the population backlog, so as to realize the high-speed precision seeding operation. Through theoretical analysis, the influencing factors of seed filling and seeding performance were clarified, and the relevant parameters of the molding hole and diversion groove were determined. The results showed that when the soybean plant spacing was 8 cm and the seed distributor operating speed was 9 km/h, the optimal combination was the hole inclination angle of 54° and the diversion trough inclination angle of 39°, the pass index was 95.5%, the missing seeding index was 2.0%, and the plant spacing variation coefficient was 13.1%. The results of the comparative test showed that when the operating speed was 8~12 km/h, the qualification index of the independent sub-filling seed dispenser was increased by more than 1.3 percentage points, the missed seeding index was reduced by more than 0.8 percentage points, and the plant spacing variation coefficient was reduced by more than 2 percentage points. The results of the agronomic adaptability test of narrow row dense planting showed that under the condition of operation speed of 8~12 km/h, the qualification index of independent sub-filling seed discharger under narrow row dense planting agronomy was above 90.1%, the missed seeding index was no more than 4.6%, and the coefficient of variation of plant spacing was no more than 20.1%, and the agronomic adaptability of narrow row dense planting was high.

Key words: soybeans; precision seeder; independent charging and unloading; double row; high speed

收稿日期: 2023-11-13 修回日期: 2024-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000404)、山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QE231)和国家自然科学基金青年项目(52202508)

作者简介: 李玉环(1991—),男,讲师,博士,主要从事农业装备研究,E-mail: 18612897966@163.com

通信作者: 杨发展(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: fazhany@163.com

0 引言

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,在我国应用最为广泛,但机械式精量排种器在高速作业时充种性能明显下降,漏播严重,进而造成断苗减产,严重影响作物产量^[1-7]。

为提高机械式排种器的高速作业性能,研究人员在排种器高质充种、高效清种、稳定携种等方面开展了大量工作。张芙娴等^[8]为解决现有圆盘式大豆排种器易出现空排的问题,对种子充入端的型孔边缘进行高度差设计,减少大豆种子在充种过程出现的架空问题。黄玉祥等^[9]为解决现有机械式排种器在高速作业时充种效果较差、运种过程不稳定的问题,设计了大豆高速播种机侧置导引式精量排种器,通过将型孔结构变为利于充种的形状,增强了充种效果。侯守印等^[10]针对机械式大豆排种器排种性能差、易造成种子损伤的问题,设计了一种柔性清护种机械式大豆精量排种器,通过柔性清护种毛刷与型孔之间的配合来保证种子按照确定的轨迹移动,从而保证播种质量。上述研究通过改变型孔结构、增设促充机构、改进清种装置等方式提高播种精度,在一定程度上改善了高速作业播种质量。但多数研究仅从型孔结构上进行创新优化,以提升高速作业下的充种效果,速度提升具有局限性。

本研究设计一种独立分充式大豆双排毛刷高速精量排种器,采用双排种盘型孔错位分布的方式增加型孔数量,降低高速作业工况下排种器转速;独立的双腔结构,避免种群积压互扰影响充种的问题,提升充种效果。通过调整两个排种部件的距离以实现不同行距的“窄行密植”高速精量播种。

1 排种器结构和原理

1.1 排种器整体结构

独立分充式大豆双排毛刷式高速精量排种器内部结构如图 1 所示,主要由左传动轴、左固定环、左壳体、左护种毛刷固定件、左护种毛刷、左挡种装置、左法兰盘、联轴器、左排种盘、右排种盘、右法兰盘、右挡种装置、右护种毛刷、右护种毛刷固定件、右壳体、右固定环、右传动轴等组成。左传动轴安装在左壳体中心位置,依次连接左法兰盘和联轴器,左排种盘固定在左法兰盘上,左挡种装置安装在左壳体内部的充种区域内,左护种毛刷安装在排种器携种区域内,并通过左护种毛刷固定件与左壳体固定。右侧排种装置与左侧排种装置安装配合关系相同,通过中间联轴器连接左右两组排种装置,双盘转速一致,实现双排播种。

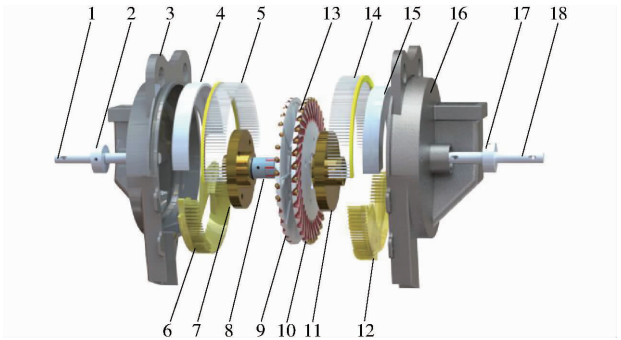


图 1 排种器结构示意图

Fig. 1 Schematic of explosion structure of seed discharger

1. 左传动轴 2. 左固定环 3. 左壳体 4. 左护种毛刷固定件
5. 左护种毛刷 6. 左挡种装置 7. 左法兰盘 8. 联轴器 9. 左排种盘 10. 右排种盘 11. 右法兰盘 12. 右挡种装置 13. 豆种 14. 右护种毛刷 15. 右护种毛刷固定件 16. 右壳体 17. 右固定环 18. 右传动轴

其中双排种盘作为排种器核心部件,采用双排型孔错位分布方式,如图 2 所示,左右两侧型孔错开布置,左排种盘型孔对应右排种盘型孔中间位置,右排种盘型孔对应左排种盘型孔中间位置,且双排种盘分别对应独立的充种腔室,避免种群积压造成阻力过大,影响充种。

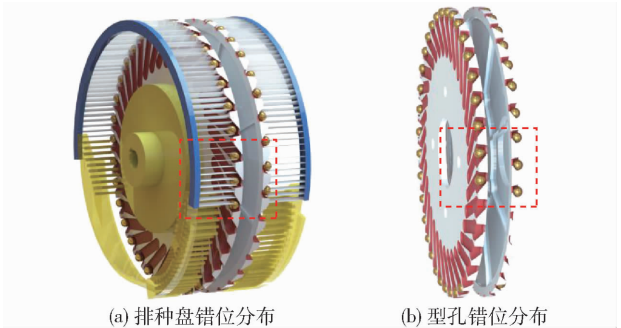


图 2 错位分布示意图

Fig. 2 Schematics of misalignment distribution

1.2 排种器工作原理

左侧排种器工作过程如图 3 所示。首先种箱内的种子通过自身重力充入到壳体内部空间,随着排种盘的转动,充入到壳体内部的种子被囊取到型孔中;进入到清种区域时,未被完全囊取的种子会被清种装置清除,落回充种空间,进行二次充种;进入携种区域,清种刷与排种盘同轴心分布,毛刷紧贴种盘,对型孔内的种子进行挤压,保证种子在携种过程中的稳定运移;进入投种区域,种子在自身重力的作用下从型孔中滑落完成投种过程。左右传动轴采用联轴器连接,转向与转速均一致,右侧排种器充种区域、清种区域、携种区域、投种区域与左侧排种器镜像对称,其工作过程与左侧排种器相同,如图 3 所示。采用双腔独立分充、双盘型孔错位分布的方式,增大充种空间,减小种间阻力;增加型

孔数量,降低排种器转速,增加充种时间,提升充种性能。为匹配“窄行密植”农艺要求^[11-18],可通过调节左右两侧排种器距离实现 120 ~ 160 mm 的双窄行密植播种,简化了窄行密植气吸式精量播种机整机结构,避免了“一器双行”气力式排种器配备裤衩管分种器进行窄双行排种易造成株距均匀性差的问题。

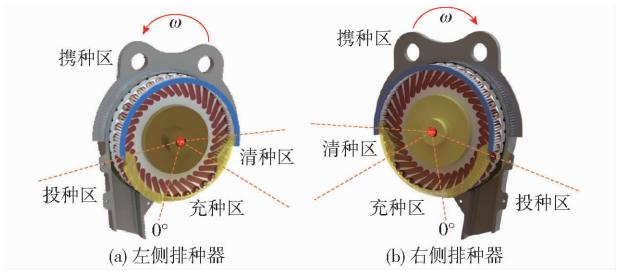


图 3 排种器工作过程示意图

Fig. 3 Schematics of working process of seeder

2 排种器关键参数确定

2.1 充种过程

为确定排种器关键参数,对豆种充种过程进行受力分析,探寻排种器充种效果的影响因素。由力的平移定理,忽略型孔摩擦力对种子等效力矩的影响,以即将充入型孔种子质心为原点建立 $Oxyz$ 三维坐标系,豆种与种盘平行方向(与排种盘转动方向相切)为 x 轴正向,垂直方向(指向型孔)为 y 轴正向,重力的反方向为 z 轴正向,豆种受力分析如图 4 所示。

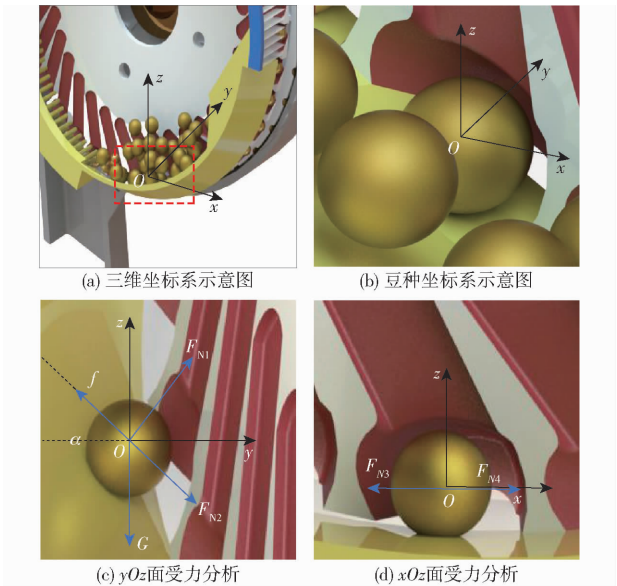


图 4 充种过程示意图

Fig. 4 Schematic of charging process

当离型孔最近的种子充入型孔中,后一粒种子至少要运动单位豆种粒径的距离才可完全充入下一个型孔中。为保证充种效果,需满足

$$\begin{cases} F_{N2} + G\sin\alpha - f = ma \\ G\cos\alpha = F_{N1} \\ f = \mu F_{N1} \\ F_{N3} = F_{N4} \\ d = \frac{at_1^2}{2} \\ t_2 = \frac{\varepsilon}{6n} \\ t_1 < t_2 \end{cases} \quad (1)$$

整理得到

$$n < \frac{\varepsilon}{6\sqrt{\frac{2md}{F_{N2} + G\sin\alpha - \mu G\cos\alpha}}} \quad (2)$$

式中 f ——豆种与壳体之间的摩擦力, N
 α ——豆种位移切线方向与 y 轴夹角, ($^\circ$)
 G ——豆种所受重力, N
 F_{N1} ——壳体底面对豆种的支持力, N
 F_{N2} —— yOz 平面内种间合力, N
 F_{N3} —— xOz 平面内右侧种间合力, N
 F_{N4} —— xOz 平面内左侧种间合力, N
 m ——单粒豆种质量, g
 a ——豆种加速度, m/s^2
 μ ——豆种与壳体内壁之间摩擦因数
 d ——大豆种子直径, mm
 ε ——单盘两型孔之间种盘圆心角, ($^\circ$)
 t_1 ——大豆种子充入型孔的时间, s
 t_2 ——排种盘转过角 ε 所需的时间, s
 n ——排种器转速, r/min

由式(2)可知,排种器转速和种间作用力、种子所受重力、豆种位移切线方向与 y 轴夹角、两型孔中心之间的圆心角成正比,与单粒豆种质量、大豆种子单位粒径成反比。其中单粒豆种质量、大豆种子单位粒径为种子自身物理特性参数, yOz 平面内豆种对要充入型孔种子作用力 F_{N2} 、种子所受重力 G 与种层压力的合力与充种空间有关,在充种空间固定的情况下近似认为是恒定值。因此在保证充种效果和型孔数量不减少的前提下,可通过增大型孔之间的种盘圆心角 ε 提高排种器转速,实现高速作业。

2.2 双排独立分充型孔间圆心角

采用双排独立分充的结构形式,可增加型孔数量,同时可扩大单盘型孔之间圆心角度,提升作业效果。对相邻的型孔间圆心角进行分析,如图 5 所示。

排种盘直径与型孔数量、尺寸之间的关系为

$$\pi D = k(b + c) \quad (3)$$

式中 k ——型孔数量
 b ——型孔开口处的种盘弧长, mm

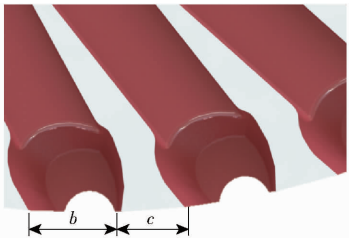


图 5 种盘边缘示意图

Fig. 5 Schematic of edge of seed plate

c ——型孔之间的种盘弧长,mm

D ——排种盘直径,mm

型孔之间圆心角为

$$\varepsilon = \frac{360(b+c)}{\pi D} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得

$$\varepsilon = \frac{360}{k} \quad (5)$$

在保持排种盘直径 D 和型孔开口处的种盘弧长 b 不变的情况下,假设独立分充式排种器单盘之间型孔角为 ε_1 、型孔间种盘弧长为 c_1 、型孔数为 k_1 ,常规毛刷式排种器单盘之间型孔角为 ε_2 、型孔间种盘弧长为 c_2 、型孔数为 k_2 ,为改善充种效果,需满足 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$,则在种盘设计过程中要满足 $c_1 > c_2, k_1/2 < k_2 < k_1$ 。

2.3 投种过程

为保证豆种在投种点位进行投种,确保豆种株距均匀,对豆种投种过程进行受力分析。当脱离护种毛刷后,为使种子在自身重力下完成投种过程,应当设定合理的型孔投种侧倾角。由力的平移定理,不考虑型孔摩擦力对种子等效力矩的影响,以豆种质心 O 为原点建立 xyz 三维坐标系,垂直种盘方向(背向型孔)为 x 轴正向,平行种盘方向(指向型孔开口方向)为 y 轴正向,重力反方向为 z 轴正向,其受力分析简图如图 6 所示。

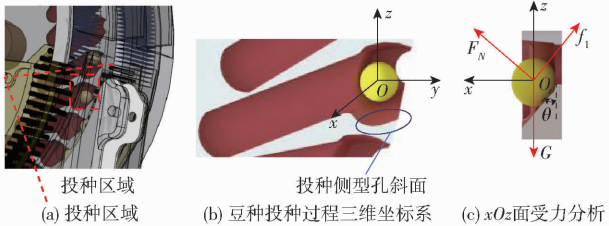


图 6 豆种投种过程受力分析示意图

Fig. 6 Schematics of stress analysis in process of soybean seed seeding

在 xOz 平面内,沿型孔斜面方向受力公式为

$$\begin{cases} G\cos\theta > f_1 \\ f_1 = \mu_1 G\sin\theta \end{cases} \quad (6)$$

式中 μ_1 ——种子与种盘之间摩擦因数

θ ——型孔倾角, ($^\circ$)

f_1 ——种子所受型孔的摩擦力,N

沿型孔斜面垂直方向受力公式为

$$G\sin\theta = F_N \quad (7)$$

式中 F_N ——种子所受型孔斜面的支持力,N

联立式(6)、(7)得

$$\tan\theta < \frac{1}{\mu_1} \quad (8)$$

因此,当型孔投种侧斜面倾角小于一定值时,豆种脱离护种毛刷后,可凭借自重完成投种过程。

2.4 型孔参数设计

由上述分析可知,型孔参数是影响排种器充种及投种性能的关键因素,为提高排种器播种性能,对型孔参数进行设计。

2.4.1 型孔形状

型孔形状是影响排种器充种性能的主要参数。依据种盘旋转方向将型孔设计为:一侧弧形内凹曲面结构,改善兜种效果;另一侧为斜面结构,防止种子投种过程产生卡顿,如图 7 所示。

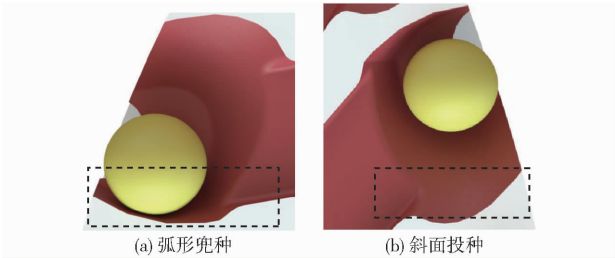


图 7 弧形兜种和斜面投种示意图

Fig. 7 Schematics of arc-shaped seeding and inclined plane seeding

2.4.2 型孔尺寸

型孔尺寸过小,种子难以充入到型孔中,造成漏充;型孔尺寸过大,可能会导致多粒种子充入到型孔中,造成重播。为提高充种效果,将型孔截面设计为上宽下窄的梯形结构,如图 8 所示。

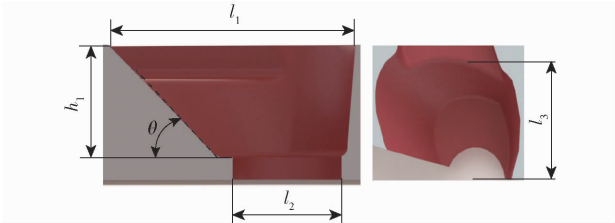


图 8 型孔结构示意图

Fig. 8 Schematic of hole structure

为使单粒种子顺利充入型孔中,结合文献[19]

得

$$\begin{cases} 2.5r < l_1 < 3r \\ 2r < l_2 < 2.5r \\ 2.5r < l_3 < 3r \\ r < h_1 < 2r \end{cases} \quad (9)$$

式中 r ——豆种平均半径,mm
 l_1 ——型孔顶边长度,mm
 l_2 ——型孔底边长度,mm
 l_3 ——型孔径向长度,mm
 h_1 ——型孔深度,mm

选用“中黄 13”大豆为研究对象,随机选取 100 粒种子测得其三轴尺寸为 8.62 mm × 5.56 mm × 6.21 mm,可得到豆种平均半径为 3.8 mm,代入式(9)可得 l_1 为 9.5 ~ 11.4 mm, l_2 为 7.6 ~ 9.5 mm, l_3 为 9.5 ~ 11.4 mm, h_1 为 3.8 ~ 7.6 mm。结合试验确定型孔尺寸 l_1 为 11 mm, l_2 为 9 mm, l_3 为 10.5 mm, h_1 为 5 mm。

2.4.3 型孔倾角

型孔倾角为型孔左侧径向底边和径向顶边的连线与径向底边的夹角,如图 8 所示,型孔倾角过小,易造成重播,保证单粒豆种充入到型孔中,应满足

$$\begin{cases} l_1 - l_2 < 2r \\ \tan\theta = \frac{h_1}{l_1 - l_2} \end{cases} \quad (10)$$

整理得 $\theta > \arctan \frac{h_1}{2r}$ (11)

计算得 $\theta > 33^\circ$ 。

型孔倾角过大,豆种进入投种区域后,沿型孔斜面投种时自身重力分力难以大于豆种与型孔之间的摩擦力,造成“滞投”。为保证豆种到达投种点位后及时投种,应保证型孔投种侧斜面倾角小于一定值。排种盘材料选用透明树脂,与大豆种子之间的摩擦系数为 0.337^[19],结合式(8),计算得到 $\theta < 71.5^\circ$,因此型孔倾角的范围为 $33^\circ < \theta < 71.5^\circ$ 。结合型孔倾角单因素试验,最终确定型孔倾角最优范围为 $50^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 。

2.4.4 型孔数量

如图 9 所示,排种盘直径与型孔数量关系近似为

$$D = \frac{k(l_1 + c)}{\pi} \quad (12)$$

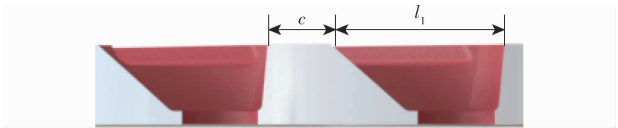


图 9 排种盘局部尺寸示意图

Fig. 9 Schematic of local size of seed tray

结合前文 $l_1 = 11$ mm, $c_1 > c_2$,此外为避免型孔之间间隙 c 太小增加加工难度,选取 c 为 8 mm,排种盘直径 D 取 220 mm^[10],计算得到单盘的型孔数为 36 个,双盘型孔数为 72 个,相较于传统毛刷式精量

排种器的 60 孔,满足 $k_1/2 < k_2 < k_1$ 的设计要求。

2.5 导流槽设计

导流槽具有扰动种群、促进充种的作用,对辅助充种具有重要作用,为获得最佳辅助充种效果,对导流槽相关参数进行设计。

2.5.1 导流槽尺寸

导流槽越长,其扰动种群效果越好,增加充种合格指数,其长度应大于两粒大豆种子长轴尺寸。导流槽宽度应能稳定容纳一粒大豆种子,同时为实现单粒精播,其宽度应小于两粒大豆种子短轴长度。导流槽过浅,对种群扰动性较差,不利于充种;导流槽过深,种子难以脱离导流槽,清种困难。同时考虑到型孔尺寸,结合文献[19-20],最终确定导流槽长度为 30 mm,宽度为 8 mm,深度为 2 mm,如图 10 所示。

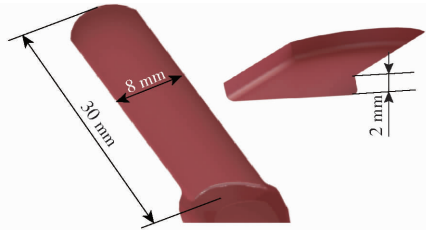


图 10 导流槽尺寸示意图

Fig. 10 Schematic of size of deflector

2.5.2 导流槽倾角

在充种区,导流槽应能辅助充种,在清种区域和携种区域,导流槽中的种子应在清种毛刷和种子自重作用下脱落到充种区域内,否则会在投种过程中产生重播现象。为使导流槽获得最佳辅助充种效果,对导流槽倾角进行理论设计。导流槽倾角 δ (定义为导流槽左侧边与型孔的交点和排种盘转动中心的连线,与导流槽左侧边的夹角,如图 11 所示)是影响导流槽辅助充种的关键参数。 B_1 为导流槽左侧边与型孔交点; B_2 为导流槽左侧边延长线上的点; δ 为导流槽倾角,即 $\angle QB_1B_2$ 。

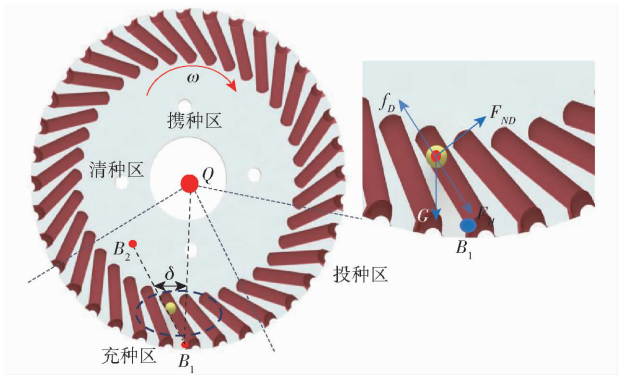


图 11 导流槽倾角示意图

Fig. 11 Schematic of inclination angle of deflector

对导流槽内的豆种进行受力分析,得

$$\begin{cases} G\cos\delta + F_H > f_D \\ f_D = \mu_1 F_{ND} \\ F_{ND} = G\sin\delta \end{cases} \quad (13)$$

式中 f_D ——种子所受导流槽摩擦力,N
 F_{ND} ——种子所受导流槽支持力,N
 F_H ——种子所受其他豆种合力,N

充入导流槽内的种子,在其余豆种合力和自身重力分力作用下向型孔方向运动,由式(13)可知, δ 越小,辅助充种效果越好,但易过充,造成重播现象,代入相关数值计算,结合文献[21–26],确定导流槽倾角范围 $30^\circ \leq \delta \leq 40^\circ$ 。

3 台架试验

3.1 试验材料与装置

选用“中黄 13”大豆为试验样本,平均几何尺寸为 $8.62\text{ mm} \times 5.56\text{ mm} \times 6.21\text{ mm}$ (对 100 粒种子进行测量取平均值),试验台架如图 12 所示,主要包括导种管、独立分充式高速精量排种器、铝型材台架与排种器性能检测仪。选用中国农业大学自主研发的排种器性能检测仪^[27],可按照工作要求设定大豆种植株距、作业速度与传动轴转速,并通过导种管上的红外传感器采集排种信息,传送给检测仪终端,计算并显示排种粒距合格指数、排种粒距漏播指数、排种粒距重播指数、株距变异系数等排种性能参数。



图 12 试验台架

Fig. 12 Test benches

1. 导种管 2. 独立分充式排种器 3. 铝型材台架 4. 侧面视图
5. 排种器性能检测仪

3.2 试验指标

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》以及大豆种植农艺要求,每组试验重复 3 次,并取平均值作为试验结果,以合格指数、漏播指数、株距变异系数作为排种器性能评价指标。

3.3 试验方案

根据前文对影响充种和投种性能的相关参数理论研究结果,确定作业速度、型孔倾角、导流槽倾角为影响排种器播种性能的关键因素。因此,选取作业速度、型孔倾角、导流槽倾角为试验因素,合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 、株距变异系数 Y_3 为性能评价指标。通过前文理论分析,选取作业速度为 8 ~

12 km/h,确定型孔倾角范围 $50^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$,导流槽倾角范围 $30^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$,试验因素编码如表 1 所示,试验方案见表 2, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Experiment factor coding

编码	因素		
	作业速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	型孔倾角/($^\circ$)	导流槽倾角/($^\circ$)
−1	8	50	30
0	10	55	35
1	12	60	40

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test protocol and results

序号	因素			试验指标		
	X_1	X_2	X_3	合格指数 $Y_1/\%$	漏播指数 $Y_2/\%$	株距变异 系数 $Y_3/\%$
1	−1	0	1	94.8	2.1	12.8
2	0	−1	1	95.6	2.8	15.7
3	0	0	0	94.9	2.2	13.9
4	1	−1	0	92.8	4.3	20.2
5	1	1	0	92.5	3.2	17.2
6	−1	−1	0	95.9	2.9	15.0
7	0	0	0	95.1	2.0	13.3
8	−1	0	−1	92.8	3.2	13.9
9	0	−1	−1	93.9	3.9	18.3
10	0	0	0	94.7	2.1	13.6
11	0	0	0	95.3	1.5	14.0
12	1	0	−1	92.1	3.6	16.7
13	−1	1	0	93.2	2.7	14.4
14	0	1	−1	92.6	2.6	15.1
15	1	0	1	93.1	3.2	15.9
16	0	1	1	93.8	2.4	15.2
17	0	0	0	94.9	2.1	13.6

3.4 试验结果分析

3.4.1 试验结果

根据 Box – Behnken 试验原理设计试验,共实施 17 组处理,每组处理重复 3 次后取平均值,试验结果如表 2 所示。

3.4.2 回归模型建立与显著性试验

通过 Design-Expert 软件对表 2 中的数据开展方差分析,结果如表 3 所示。开展多元回归拟合分析,建立 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 对 X_1 、 X_2 、 X_3 的响应面回归模型

$$Y_1 = 94.98 - 0.775X_1 - 0.7625X_2 + 0.7375X_3 + 0.6X_1X_2 - 0.25X_1X_3 - 0.125X_2X_3 - 1.08X_1^2 - 0.3025X_2^2 - 0.7025X_3^2 \quad (14)$$

$$Y_2 = 2.06 + 0.425X_1 - 0.375X_2 - 0.35X_3 - 0.225X_1X_2 + 0.175X_1X_3 + 0.225X_2X_3 + 0.6575X_1^2 + 0.5575X_2^2 + 0.3075X_3^2 \quad (15)$$

表 3 方差分析
Tab.3 Analysis of variance

变异来源	合格指数 Y_1				漏播指数 Y_2				株距变异系数 Y_3			
	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	23.56	9	40.24	<0.000 1	7.97	9	63.93	<0.000 1	60.69	9	52.13	<0.000 1
X_1	4.80	1	73.84	<0.000 1	1.45	1	104.28	<0.000 1	24.15	1	186.70	<0.000 1
X_2	4.65	1	71.48	<0.000 1	1.13	1	81.19	<0.000 1	6.66	1	51.50	0.000 2
X_3	4.35	1	66.87	<0.000 1	0.980 0	1	70.72	<0.000 1	2.42	1	18.71	0.003 5
X_1X_2	1.44	1	22.13	0.185 9	0.202 5	1	14.61	0.006 5	1.44	1	11.13	0.012 5
X_1X_3	0.250 0	1	3.84	0.307 7	0.122 5	1	8.84	0.020 7	0.0225	1	0.1739	0.689 1
X_2X_3	0.062 5	1	0.960 5	0.724 7	0.202 5	1	14.61	0.006 5	1.82	1	14.09	0.007 1
X_1^2	4.89	1	75.12	0.021 4	1.82	1	131.36	<0.000 1	3.30	1	25.49	0.001 5
X_2^2	0.385 3	1	5.92	0.353 7	1.31	1	94.44	<0.000 1	19.19	1	148.37	<0.000 1
X_3^2	2.08	1	31.93	0.089 3	0.398 1	1	28.73	0.001 1	0.284 6	1	2.20	0.181 5
残差	0.455 5	7			0.097 0	7			0.905 5	7		
失拟	0.247 5	3	1.59	0.325 1	0.045 0	3	1.15	0.429 9	0.597 5	3	2.59	0.190 5
误差	0.208 0	4			0.052 0	4			0.308 0	4		
总和	24.02	16			8.07	16			61.59	16		

$$Y_3 = 13.68 + 1.74X_1 - 0.9125X_2 - 0.55X_3 - 0.6X_1X_2 + 0.075X_1X_3 + 0.675X_2X_3 + 0.885X_1^2 + 2.13X_2^2 + 0.26X_3^2 \quad (16)$$

由表 3 可知,合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 、株距变异系数 Y_3 的 P 值均小于 0.000 1,表明 3 个模型影响极显著;其失拟项 P 值分别为 0.325 1、0.429 9、0.190 5(均大于 0.05),表明 3 个模型拟合程度较高;其决定系数 R^2 分别为 0.981 0、0.988 0、0.985 3,表明 98% 以上的响应值可用这 3 个模型解释。因此,该模型可以预测独立分充式排种器工作参数。

3.4.3 交互因素显著项对性能指标影响的响应面
根据试验结果,考察作业速度 X_1 、型孔倾角 X_2

及导流槽倾角 X_3 对各性能指标的影响,并利用 Design-Expert 软件绘制交互因素对合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 、株距变异系数 Y_3 的影响响应面。如图 13a 所示,减小作业速度有助于减小漏播指数,其原因为作业速度降低时,充种时间增加,漏充率降低,从而降低漏播指数;漏播指数随型孔倾角的增大先降低后升高,其原因为型孔倾角增大时,型孔开口面积减小,漏播指数降低,当型孔倾角继续增大时,豆种难以充入型孔,造成漏播。如图 13b 所示,增大导流槽倾角有助于降低漏播指数,其原因为较大的导流槽倾角具有较强的辅助充种作用,降低漏播指数。如图 13c 所示,增大型孔倾角有助于降低漏播指数,增大导流槽倾角有助于降低漏播指数。

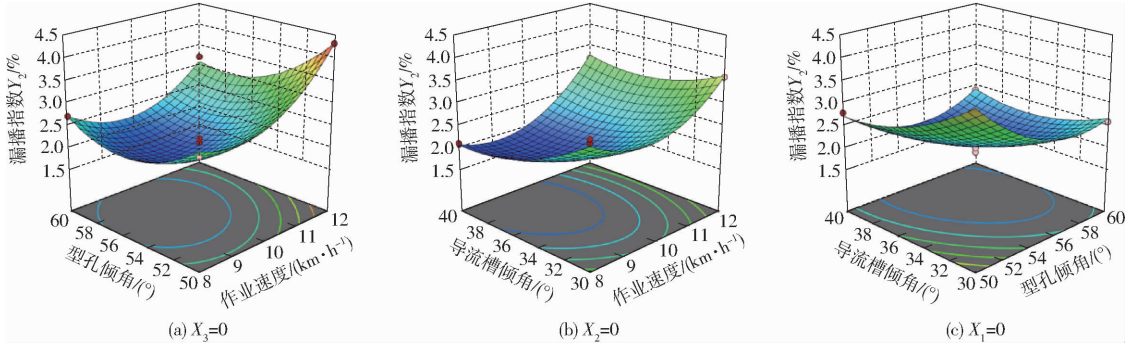


图 13 各因素交互作用对漏播指数影响的响应曲面
Fig.13 Effects of interaction of various factors on missed seeding index

如图 14a 所示,减小作业速度有利于降低株距变异系数,其原因为作业速度较高,株距不变时排种盘转速增加,进入投种区域的豆种所受离心力增加,到达投种点位后难以凭借自身重力完成投种,产生“滞投”现象,进而造成株距变异系数升高。株距变异系数随型孔倾角的增大先降低后升高,其原因为

型孔倾角较小时,豆种脱离护种毛刷时在型孔内所受重力分力较大(图 6),易出现提前投种的现象;型孔倾角较大时,豆种脱离护种毛刷后所受重力分力较小,到达投种点位后,在型孔内侧摩擦力的作用下易出现“滞投”现象。作业速度和型孔倾角交互作用对株距变异系数影响显著。如图 14b 所示,适当

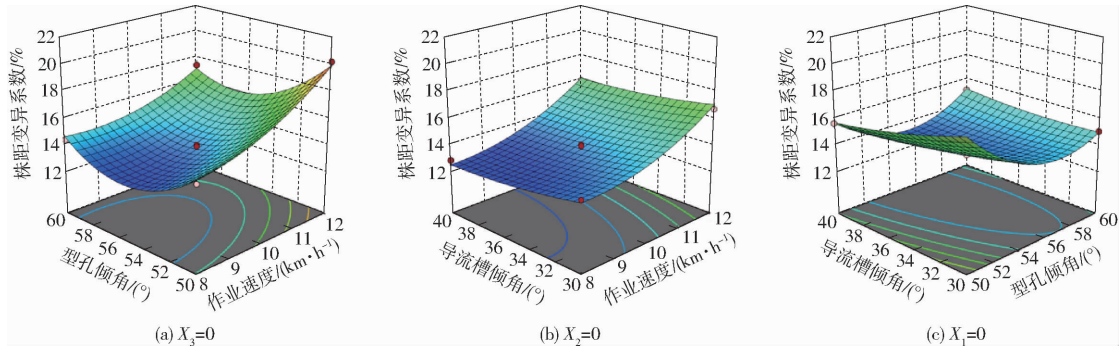


图 14 各因素交互作用对株距变异系数影响的响应曲面

Fig. 14 Effects of interaction of various factors on coefficient of variation of plant spacing

增大导流槽倾角有助于降低株距变异系数,其原因为导流槽倾角增大时,排种器漏播指数降低,从而间接降低株距变异系数,作业速度和导流槽倾角交互作用对株距变异系数影响不显著;如图 14c 所示,型孔倾角和导流槽倾角交互作用对株距变异系数影响极显著。

3.5 参数优化与验证试验

根据合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 及株距变异系数 Y_3 的数学模型,可在约束条件内选取排种器最优参数组合,并进行验证。根据大豆种植农艺“宁重勿漏”的准则,以最大合格指数 Y_1 、最小漏播指数 Y_2 和最小株距变异系数 Y_3 为评价指标,建立优化数学模型

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

采用 Design-Expert 软件求解最优参数组合为:作业速度 8.8 km/h、型孔倾角 53.7°、导流槽倾角 38.9°,对应的合格指数为 95.6%,漏播指数为 1.9%,株距变异系数为 12.8%。

由于加工误差的存在,很难调整到理论求解的优化值,选择较为接近的工作参数进行验证试验,选择的参数组合为:作业速度 9 km/h、型孔倾角 54°、导流槽倾角 39°。采用相同方式的台架进行试验验证,其合格指数为 95.5%,漏播指数为 2.0%,株距变异系数为 13.1%。

3.6 对比试验

在作业速度 8 ~ 12 km/h、株距 80 mm 条件下,开展独立分充式大豆双排毛刷高速精量排种器(图 15a)与具有 60 型孔的常规毛刷式排种器(图 15b)的对比试验。

以作业速度为试验因素,合格指数、漏播指数和

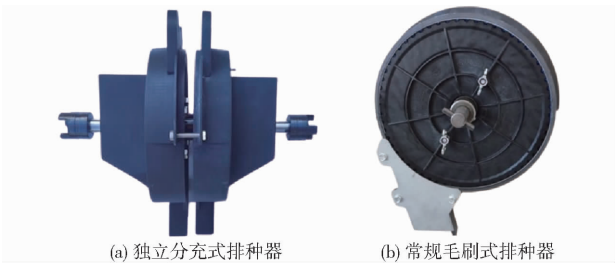


图 15 对比试验装置

Fig. 15 Comparative test setup

株距变异系数为评价指标进行单因素对比试验,每组试验重复 3 次取平均值为最终结果,试验结果如表 4 所示。

表 4 对比试验结果

Tab. 4 Results of comparative test

排种器类型	作业速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	合格指数/ %	漏播 指数/%	株距变异 系数/%
独立分充式	8	95.4	2.0	13.3
	10	95.1	2.4	15.9
	12	94.4	3.2	18.1
常规毛刷式	8	94.1	2.8	15.6
	10	93.2	3.3	17.9
	12	90.5	4.4	20.2

对比试验结果表明:同等作业速度条件下,独立分充式排种器合格指数高于常规毛刷式排种器至少 1.3 个百分点,漏播指数低于常规毛刷式排种器至少 0.8 个百分点,株距变异系数低于常规毛刷式排种器至少 2 个百分点。

3.7 “窄行密植”农艺适应性试验

为考察研制的排种器对“窄行密植”农艺(窄行行距 120 mm,株距 80 mm^[28])的适应性,在作业速度 8 ~ 12 km/h、行距 120 mm、株距为 80 mm 的条件下,选取合格指数、漏播指数、株距变异系数为试验指标,开展“窄行密植”种植农艺适应性试验,试验结果如表 5 所示。

在株距 80 mm、作业速度 8 ~ 12 km/h 的条件下,独立分充式排种器在宽窄行交替排列式种植农

表 5 农艺适应性试验结果

Tab.5 Results of variety adaptability test

作业速度/ (km·h ⁻¹)	合格指数/%	漏播指数/%	株距变异 系数/%
8	94.1	2.5	14.9
10	93.6	2.9	17.6
12	90.1	4.6	20.1

艺下的合格指数达到 90.1%，漏播指数不高于 4.6%，株距变异系数不大于 20.1%，满足该种植农艺要求。

4 结论

(1)设计了一种独立分充式大豆双排毛刷高速精量排种器,对豆种充种过程进行力学分析,为保证充种效果,在保证充种效果和型孔数量不变的前提下,可通过增大单盘型孔之间的圆心角提高排种器转速,实现高速作业。独立分充式排种器采用双盘错位分布的方式兼顾增大单排型孔之间的圆心角和

增加总体型孔数量,在保证充种效果的同时提高作业速度。

(2)根据豆种物料特性参数,设计利于充种和投种的型孔与导流槽相关参数,结合充种过程和投种过程的理论分析,确定型孔倾角最佳范围为 50°~60°,导流槽倾角最佳范围为 30°~40°。

(3)验证试验结果表明:当作业速度为 9 km/h、型孔倾角 54°、导流槽倾角 39°时,其合格指数为 95.5%，漏播指数为 2.0%，株距变异系数为 13.1%，满足大豆排种器高速作业播种要求。对比试验结果表明:作业速度 8~12 km/h 时,独立分充式排种器合格指数比常规毛刷式排种器至少提升 1.3 个百分点,漏播指数至少减少 0.8 个百分点,株距变异系数至少减少 2 个百分点。窄行密植农艺适应性试验结果表明:在作业速度 8~12 km/h 的条件下,独立分充式排种器在窄行密植种植农艺下的合格指数达到 90.1%，漏播指数不高于 4.6%，株距变异系数不大于 20.1%，窄行密植种植农艺适应性较高。

参 考 文 献

[1] 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)

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

[3] 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)

[4] 刘宏新,徐晓萌,付露露,等. 立式浅盆型复合种盘大豆排种器结构设计 with 参数优化[J]. 中国机械工程,2016,27(22):3005-3011.
LIU Hongxin, XU Xiaomeng, FU Lulu, et al. Design and parameter optimization on vertical shallow-basin type composites seed-plate soybean seed-metering devices[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(22): 3005-3011. (in Chinese)

[5] 牛媛媛,徐铭辰,李赫,等. 转速对倾斜勺式大豆精密排种器性能影响的试验研究[J]. 河南农业大学学报,2015,49(6):801-805.
NIU Yuanyuan, XU Mingcheng, LI He, et al. Experimental study influence of shaft speed on the performance of tilting spoon type soybean precision seeding apparatus[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2015, 49(6): 801-805. (in Chinese)

[6] 许健,蔡宗寿,甘义权,等. 基于 EDEM 的倾斜圆盘勺式大豆排种器清种过程优化研究[J]. 东北农业大学学报,2018,49(10):79-88.
XU Jian, CAI Zongshou, GAN Yiquan, et al. Optimization study on seed clearing process for declined disc-scoop-type soybean seed metering device based on EDEM[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(10): 79-88. (in Chinese)

[7] WANG Sheng, SUN Yanhong, YANG Chen, et al. Advanced design and tests of a new electrical control seeding system with genetic algorithm fuzzy control strategy[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2021, 21(3): 703-712.

[8] 张芙嫻,秦春兰,王熙. 圆盘精量大豆排种器型孔防空排设计与种子防护研究[J]. 农机化研究,2022,44(8):65-70.
ZHANG Fuxian, QIN Chunlan, WANG Xi. Study on leak in seeding prevention and seed protection of disc precision soybean metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(8): 65-70. (in Chinese)

[9] 黄玉祥,李鹏,董建鑫,等. 大豆高速播种机侧置导引式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):44-53,75.
HUANG Yuxiang, LI Peng, DONG Jianxin, et al. Design and experiment of side-mounted guided high speed precision seed metering device for soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 44-53, 75. (in Chinese)

[10] 侯守印,邹震,魏志鹏,等. 柔性机械式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):77-86,108.
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of flexible mechanical soybean precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 77-86, 108. (in Chinese)

- [11] 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)
- [12] 陈为鹏,胡培杰,张宝昌,等. 交错苗带式大豆免耕精量播种机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(2):1-7.
CHEN Weipeng, HU Peijie, ZHANG Baochang, et al. Staggered seedling belt type soybean no-till precise seeder design and test[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(2): 1-7. (in Chinese)
- [13] 杨梦平,潘丽丽,张勇,等. 株距对不同株型大豆农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学,2017,36(3):377-384.
YANG Mengping, PAN Lili, ZHANG Yong, et al. Effects of plant spacing on agronomic traits and yield of different plant types of soybean[J]. Soybean Science, 2017, 36(3): 377-384. (in Chinese)
- [14] 李成良. 窄行密植精密播种机设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
LI Chengliang. Planting narrow line design and test precision seeder[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [15] 张泽平,马成林,王春桢. 精播排种器及排种理论研究进展[J]. 吉林工业大学学报,1995,25(4):112-117.
ZHANG Zeping, MA Chenglin, WANG Chunheng. The development of the seed-metering device for precision planter and its theoretical study[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1995, 25(4): 112-117. (in Chinese)
- [16] 齐思远,王福林,兰佳伟. 宽窄行种植模式对大豆生长发育和产量的影响[J]. 大豆科学,2022,41(5):557-563.
QI Siyuan, WANG Fulin, LAN Jiawei. Effects of wide and narrow row planting patterns on soybean growth, development and yield[J]. Soybean Science, 2022, 41(5): 557-563. (in Chinese)
- [17] 张百祥. 窄行密植低位投种精密播种机设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
ZHANG Baixiang. Planting narrow line low cast kinds of design and test precision seeder[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [18] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61-73. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 李威,徐浩,李晓红,等. 基于 EDEM 的大豆侧窝排种器的设计与试验[J]. 农机化研究,2023,45(12):164-169.
LI Wei, XU Hao, LI Xiaohong, et al. Design and experiment of soybean side nest seed meter based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(12): 164-169. (in Chinese)
- [21] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 高速播种机玉米姿控驱动式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):108-119.
DONG Jianxin, GAO Xiaojun, ZHANG Shilin, et al. Design and test of maize posture control and driving precision metering device for high-speed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 108-119. (in Chinese)
- [22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [23] 廖庆喜,曹梅,王宝山,等. 齿勾气送式芝麻精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):65-76.
LIAO Qingxi, CAO Mei, WANG Baoshan, et al. Design and experiment of slotted-tooth spoon hole and air-assisted precision centralized metering device for sesame[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 65-76. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75-86, 139. (in Chinese)
- [26] 沈浩. 导种槽式高速精量排种器设计与试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
SHEN Hao. Development of a guiding-groove precision metering device for high speed planting of soybean[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
- [27] 和贤桃,郝永亮,赵东岳,等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(10):19-27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and test of automatic detector for seed discharge quality of corn precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19-27. (in Chinese)
- [28] 陈美舟,刁培松,张银平,等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(21):8-16.
CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of single-disk double-row air-aspirated seed discharger for soybean narrow-row dense-planting planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 8-16. (in Chinese)