

付浩,张学军,史增录,等. 扰种侧充槽盘式玉米精量排种器设计与测试[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 229-239.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.026

扰种侧充槽盘式玉米精量排种器设计与测试

付浩¹, 张学军^{1,2}, 史增录^{1,2}, 程金鹏¹, 吴海峰¹, 王美静¹, 于永良³

1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆天诚农机具制造有限公司, 铁门关 841007

摘要 为提高玉米排种器的充种性能,设计了一种扰种侧充槽盘式玉米精量排种器。以玉米籽粒尺寸参数为依据,提出了一种扰种侧充式取种结构,在充种的同时实现调姿扰种与导种,有效提升种群活跃度与充种时长,提高充种效率。建立力学与运动学模型对排种器关键结构参数进行设计及取种原理分析,并采用EDEM软件进行仿真分析明确扰种性能,在此基础上获得了影响排种器工作效率的关键因素:取种盘转速、槽孔深度、充种偏角,并以此为因素进行三因素三水平中心组合试验,建立了合格指数、漏播指数、重播指数的回归模型,分析优化得出在取种盘转速为28 r/min、槽孔深度为8.2 mm、充种偏角为67°时,优化模型预测的合格指数为94.32%、漏播指数为1.95%、重播指数为3.73%。田间试验结果显示:合格指数92.97%、漏播指数2.14%、重播指数4.89%,符合优化模型预测结果,扰种侧充槽盘式玉米精量排种器的各项评价指标符合播种农艺要求。

关键词 精量排种器; 机械式排种器; 玉米; 侧充槽盘式; 扰种

中图分类号 S223.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0229-11

玉米精量播种是指按照玉米播种农艺要求,以精确的粒数、间距将种子播入土壤中的种植技术^[1-3],具有提高作物产量、节省土地资源等优势^[4-5]。实现玉米精量播种技术的核心装置是精量排种器,其结构设计的合理性直接影响精量播种作业效果^[6-7]。现有精量排种器根据工作原理不同主要分为气力式和机械式两大类:气力式排种器具有播种精度高、对种子外形尺寸适应性强的特点,但存在结构复杂、对密封性要求高、维修困难等问题;机械式排种器通过优化设计取种部件,对籽粒进行单粒囊取,达到精量播种的作业效果,因其作业可靠、结构简单、造价低廉等优势在现阶段农业生产过程中得到广泛应用^[8-9]。

根据作业机构形式不同,机械式精量排种器主要有水平圆盘式、竖直圆盘式、勺轮式、指夹式等^[10-11],近年来国内外学者对此做了大量研究,李成华等^[12]基于分种勺结构特点和分种性能,对排种器内部种子力学特性进行分析,设计了倾斜圆盘勺式精密排种器;Singh等^[13]通过试验验证了排种器型孔

结构参数对排种精度有直接影响。王金武等^[14]对指夹式排种器的取种、清种、排种作业过程进行优化设计,将排种器作业合格指数提升至86.90%;王业成等^[15]设计了一种摩擦型立式圆盘精密排种器,通过分析利用作业过程中摩擦力以提升充种力,实现促进种群相互作用、改善排种器充种效果的目的;刘艳芬等^[16]通过优化设计排种盘型孔的结构参数,提升排种器高速作业效果,增强了排种盘对不同品种籽粒的适应性。由上述研究可知,现有精量排种器已基本实现精准农业单粒播种的作业要求,但是仍然存在作业效果不稳定、结构复杂、故障率高的问题。

为解决上述问题,本研究以玉米籽粒尺寸参数为依据,基于竖直圆盘式排种器的研究基础,提出了一种扰种侧充式取种结构,将扰种结构、导种结构和取种结构简化设计为独立取种单元,并集成于竖直取种盘上,实现在充种的同时调姿扰种与导种,有效提升种群活跃度与充种时长,提升充种效率,旨在为盘式玉米精量排种器的设计以及玉米播种机具的优

收稿日期:2023-03-11

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02003-3);新疆农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-14)

付浩, E-mail: foch71@163.com

通信作者:张学军, E-mail: tuec@163.com

化设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 排种器结构与工作原理

1)排种器结构。扰种侧充槽盘式玉米精量排种器的总体结构如图1A所示,主要包括前盖、取种盘、取种室壳、法兰、排种室壳、叶片轮、排种器轴、后盖。各部件相互配合,通过螺栓轴向固定,组成排种器整体。如图1B所示,排种器左右分为取种室与排种室,取种盘安装于排种器取种室内部,通过轴键与排种器轴连接;装于排种器后端的叶片轮又将排种室分为12个独立的投种仓,如图1C所示,取种盘与叶片轮通过轴键连接限位,共速转动,实现取种槽与投种仓的同步对应。

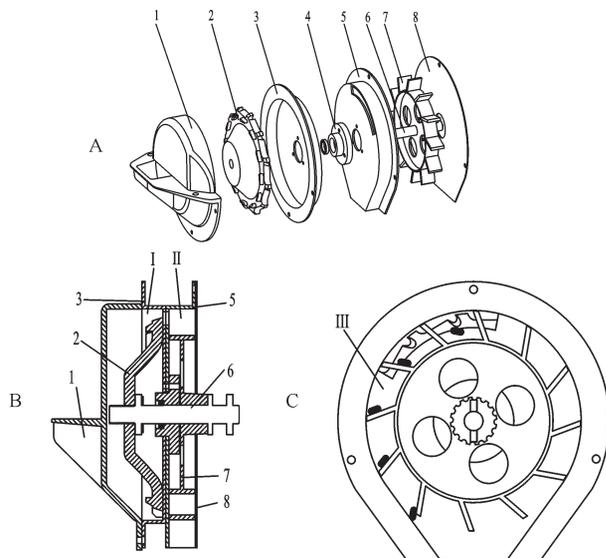


图1 扰种侧充槽盘式玉米精量排种器结构图
A:排种器结构爆炸图 Exploded view of seed metering device structure; B:排种器半剖图 Half section of seed rower; C:排种器后视图(去掉后盖) Rear view of seed rower (without rear cover); 1.前盖 Front cover; 2.取种盘 Seed pickup tray; 3.取种室壳 Seed pickup chamber housing; 4.法兰 Flange; 5.排种室壳 Seed discharge chamber housing; 6.排种器轴 Seed discharge shaft; 7.叶片轮 Vane wheel; 8.后盖 Rear cover; I.取种室 Seed pickup chamber; II.排种室 Seed discharge chamber; III.投种仓 Seed drop bin.

图1 扰种侧充槽盘式玉米精量排种器结构图

Fig.1 Structure diagram of the seed disturbing side filling slotted disc type corn precision seed metering device

2)工作原理。扰种侧充槽盘式玉米精量排种器按工作区域划分为预充种区、二次充种区、清种区、递种区、携种区、投种区。其工作原理如图2所示,播种作业时,随着播种机前进,动力由装于播种机底部的地轮传递到排种器轴,并带动取种盘与叶片轮做同步回转运动。玉米籽粒由前盖进种口进入排种器

并在取种室底部无序堆积,随着取种盘扰种台的扰动作用打破种群固有堆积状态,玉米籽粒随之调整姿态并构成差速圆周种子层,种群流动性增加,种间作用力活跃性增大。导种槽附近的玉米籽粒在种群相互作用力、重力、离心力以及籽粒粒形特征共同影响下滑入导种槽空白空间,完成预充种过程。长轴平行于导种斜面的种子姿态稳定,并随取种盘转动产生速度差,被引导充入取种槽空白空间,完成二次充种。

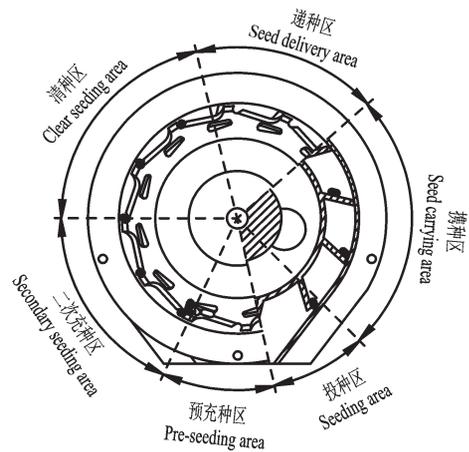


图2 排种器工作原理图

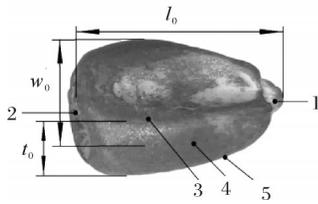
Fig.2 Principle of operation of seed metering device

导种槽内未充入取种槽的玉米籽粒以及取种槽中多余的玉米籽粒,在随取种盘转动到清种区时由于力系方向变化导致受力失衡落回种群;取种槽中的玉米籽粒在稳定运动到递种区时,取种室壳面支持力瞬间消失,籽粒在重力、取种槽面支持力的共同作用下落入同步对应的投种仓内;投种仓内籽粒随叶片轮回转运动被运往投种区完成投种作业。

1.2 取种盘主要参数设计

1)玉米籽粒外形参数统计及粒形特征分析。玉米籽粒的外形参数是取种盘设计的主要参考依据,其形状和尺寸对取种盘取种性能有重要影响。本研究选取我国新疆地区种植较为广泛的“新玉77号”扁平马齿形玉米籽粒为参考对象,随机选取100粒玉米籽粒,如图3所示对籽粒长 l_0 、宽 w_0 、高 t_0 三轴尺寸进行测量,测量结果如表1所示。

根据表1可知,玉米籽粒尺寸均一性较差,其厚度相较于长度和宽度数值波动性较小。由参考文献[17]可知,扁平玉米籽粒在运动过程中,不同姿态下运动状态不同,通常有“平躺”“侧卧”和“竖立”3种姿态。平躺时,籽粒重心低,受力所产生的力矩小,籽粒不易翻转改变姿态,且籽粒台面为接触面,在作用



1. 芽面 Bud surface; 2. 顶面 Top surface; 3, 5. 台面 Table surface; 4. 侧面 Side.

图3 玉米籽粒外形参数

Fig.3 Corn kernel shape parameters

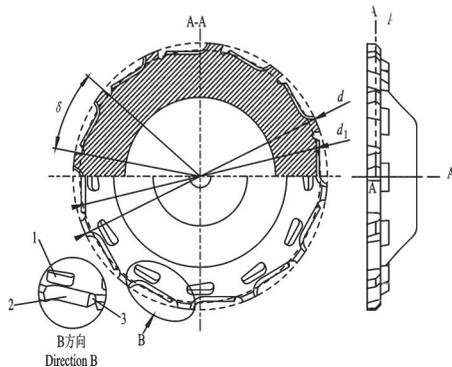
表1 玉米籽粒尺寸测量结果

Table 1 Measurement results of maize seed size mm

指标 Indicator	最大值 Maxium	最小值 Minium	均值 Average	标准差 Standard deviation
长度 l_0 Length	13.0	9.1	11.5	0.8
宽度 w_0 Width	9.6	7.6	8.6	0.5
厚度 t_0 Thickness	5.8	4.5	5.1	0.3

力一定的情况下,作用面积越大,所受摩擦力越大,故平躺时籽粒运动姿态稳定。侧卧时,籽粒重心相对较高且侧面与长轴存在倾角,在受力状态下玉米籽粒易产生倾向长轴方向滑动或绕长轴翻转的趋势。竖立时,籽粒重心高受力不稳,易受边界形状的影响改变运动姿态,故平躺和侧卧时运动状态相对稳定。为实现排种器单粒精量播种,确保每个取种槽只攫取单一籽粒,本研究采用平躺式导种、侧卧式充种的取种方式。

2)取种盘参数设计。取种盘是扰种侧充槽盘式玉米精量排种器核心部件,是由周向均布的扰种台、导种槽、取种槽构成,结构如图4所示,扰种台起到调



1. 扰种台 Seed disturbing table; 2. 导种槽 Seed guiding trough; 3. 取种槽 Seed picking trough.

图4 取种盘结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the structure of seed extraction tray

整籽粒姿态、增加种群流动性的作用,导种槽起到引导适位籽粒进入取种槽、促进取种槽充种的作用,取种槽起到稳定持种、顺畅递种的作用,三者相互配合,构成独立取种单元。

取种盘直径是取种盘基本参数,其大小决定排种器整体结构尺寸以及取种单元排布,影响作业性能。在排种器作业过程中,当取种盘转速保持一定时,增大取种盘直径,取种槽转过种群的时间增大,籽粒有充足的时间进入取种槽,取种槽充种率增加,取种性能提升;但当取种盘直径过大时,加工和安装难度增加,降低排种器的实用性。为满足不同类型排种器间的互换性,结合文献[18]以及对现有排种器尺寸的测量结果,设定取种盘直径 d 为 190 mm,槽孔中心直径 d_1 为 180 mm。

充种过程中,在取种盘直径和播种机作业速度一定的条件下,增加取种槽数量,取种盘取种线速度随之降低,取种槽充种性能得到提升;但当取种槽数量过多时,相邻取种槽中心对应圆心角 δ 减小,取种单元跨度减小,不利于籽粒调整姿态,进入导种空间备用。故取种盘应在满足导种、充种的工作需求下,尽可能多地增加取种槽数量,且取种槽数量需满足:

$$Z = \frac{\pi d_1 v_m}{S v_p (1 - c)} \quad (1)$$

式(1)中: d_1 为取种槽中心直径,mm; v_m 为播种机作业速度,m/s; v_p 为取种盘线速度,m/s; c 为地轮滑移系数; S 为株距,mm。

其中:

$$v_p = \frac{\pi n_p d_1}{60} \quad (2)$$

式(2)中: n_p 为取种盘工作转速,r/min。

整理得:

$$Z = \frac{60 v_m}{S n_p (1 - c)} \quad (3)$$

由式(3)可知,取种槽数量与取种盘转速呈反比,与播种机行进速度呈正比。考虑到播种机作业效率与作业质量,本研究选取播种机行进速度 v_m 为 1.5 m/s(一般为 0.5~1.5 m/s);取种盘转速 n_p 取 33 r/min;株距 S 取 25 cm(一般为 18~30 cm);地轮滑移系数 c 取 8%;得取种槽数 Z 为 12,相邻取种槽中心对应圆心角 δ 为 30° 。

3)取种槽参数设计。为保证取种精确性以及排种器作业可靠性,依据玉米籽粒粒形特征与外形尺寸对取种槽进行结构设计,取种槽结构如图5所示,

其主要结构参数包括槽孔长度 l 、槽孔宽度 b 、槽孔深度 h 。

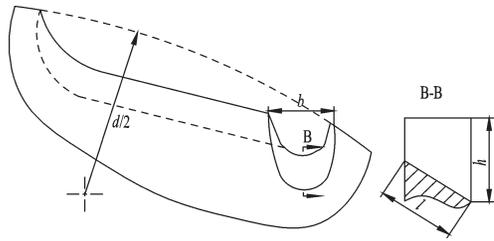


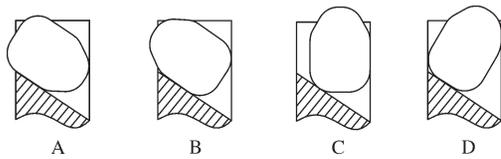
图5 取种槽结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the structure of the seed extraction tank

通过前期试验观察发现取种槽内籽粒姿态多分为侧卧(图6A、B)、竖直(图6C、D)2种。为确保取种槽充种精确性,以每槽1粒侧卧式玉米籽粒为充种目标,确定槽孔尺寸应满足:

$$\begin{cases} \frac{2}{3}l_{\max} < l - \Delta l < \frac{3}{2}w_{\min} \\ t_{\max} < b - \Delta b < w_{\min} \\ \frac{1}{2}w_{\max} < h - \Delta h < w_{\min} + \frac{1}{2}t_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: Δl 为槽长间隙,mm; Δb 为槽宽间隙,mm; Δh 为槽深间隙,mm。



A: 正侧卧 Positive side lying; B: 侧卧 Side lying; C: 正竖直 Positive vertical; D: 竖直 Vertical.

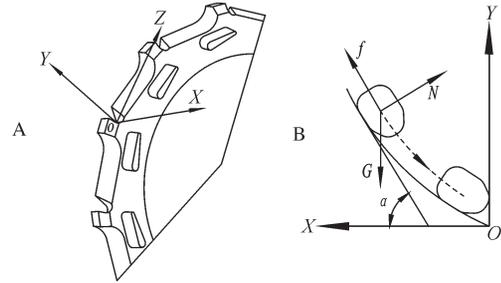
图6 取种槽内种子姿态

Fig.6 Posture of seeds in the pick-up tank

根据表1中籽粒尺寸测量结果,确定槽孔长度 l 为11.2 mm、槽孔宽度 b 为6.8 mm、槽孔深度 h 为6.63~9.85 mm。由于玉米籽粒在长度和宽度方向上尺寸差异较大,为提高取种合格指数,槽孔深度 h 的取值由后续试验优化结果得出。

4)取种槽倾角设计。为确保充种、递种作业的连续性,运用最速降线理论对取种槽倾角进行设计,保证籽粒在充种阶段能够迅速沿槽面倾角充入取种槽,在递种阶段可沿取种槽面迅速滑出。根据图7A空间直角坐标系,以取种槽中籽粒为研究对象,建立其运动抽象分析图(图7B)。

根据图7B,简化取种槽中籽粒下落轨迹为抛物线 $y=ax^2$,对 XOY 平面内的籽粒滑落状态进行分析,则有:



A.空间坐标 Spatial coordinates system;B.平面坐标 Plane coordinate system.

图7 籽粒运动示意图

Fig.7 Schematic diagram of seed movement

$$\begin{cases} mg \cos \alpha = N \\ f = \mu_1 N \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: m 为籽粒质量, g 为重力加速度, m/s^2 ; α 为取种槽倾角, $^\circ$; N 为籽粒受到取种槽面支持力, N ; f 为籽粒与取种槽面摩擦力, N ; μ_1 为籽粒动摩擦因数。

假设籽粒开始下滑时速度为 v_1 ,籽粒脱离取种槽时速度为 v_2 ,期间下滑高度为 h_1 ,则其水平位移为 $\sqrt{h_1/a}$ 。籽粒下滑过程中摩擦力始终存在,可将摩擦力做功 W 表示为:

$$W = \int_0^{\sqrt{h_1/a}} \mu_1 mg dx = \mu_1 mg \sqrt{h_1/a} \quad (6)$$

此时,籽粒运动过程符合能量守恒定理,即:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \mu_1 mg \sqrt{h_1/a} + \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (7)$$

整理得:

$$a = h_1 \left(\frac{2\mu_1 g}{v_1^2 - v_2^2 + 2gh_1} \right)^2 \quad (8)$$

将上式代入 $y' = 2ax = \tan \alpha$ 可得:

$$\alpha = \arctan \left[2h_1 \left(\frac{2\mu_1 g}{v_1^2 - v_2^2 + 2gh_1} \right)^2 x \right] \quad (9)$$

由式(9)可知,当下滑初始速度 v_1 及籽粒脱离取种槽速度 v_2 确定时,取种槽倾角 α 仅与下滑高度 h_1 有关,下滑高度 h_1 的大小取决于槽孔深度 h ,其最佳取值将通过试验测定。

5)取种槽充种偏角设计。为保证取种盘周向侧位充种效果,以取种槽中籽粒为研究对象,分析取种过程中籽粒受力状态。将籽粒视为均匀材质的刚体,设合力作用于籽粒质心,并以籽粒质心为原点 O_1 ,取种盘径向为 X 方向,切向为 Y 方向,建立 XOY 坐标系,分析其受力情况如图8所示。

依据达朗贝尔原理,当玉米籽粒与取种槽不发

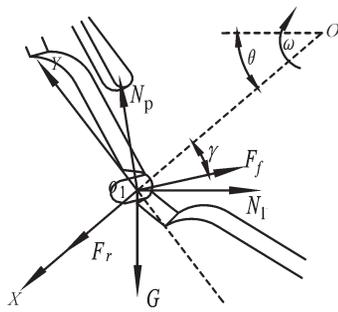


图8 取种槽籽粒受力分析图

Fig.8 Analysis of the force on seeds in the seed extraction tank

生相对位移时,籽粒沿运动趋势方向(X方向)和运动轨迹切线方向(Y方向)皆受力平衡,此时2个方向受力情况应满足:

$$\begin{cases} \sum F_x = F_r + G \sin \theta - N_1 \cos \theta - F_f \cos \gamma - N_p \sin \gamma \leq 0 \\ \sum F_y = N_p \cos \gamma - N_1 \sin \theta - F_f \sin \gamma - G \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} F_r = \frac{1}{2} m \omega^2 d_1 \\ F_f = \mu_2 N_p \end{cases} \quad (11)$$

式(10)、(11)中: F_r 为离心力,N; N_1 为种间作用力,N; N_p 为槽孔支持力,N; F_f 为槽孔与籽粒间摩擦力,N; G 为籽粒所受重力,N; γ 为充种偏角, $(^\circ)$; θ 为取种位置角, $(^\circ)$; μ_2 为籽粒与槽孔间最大静摩擦因素; ω 为取种盘角速度,rad/s。

求解式(10)可得:

$$\theta \geq \arccos \frac{\omega^2 d_1}{2g \sqrt{1 + \left(\frac{\mu_2 \cos \gamma + \sin \gamma}{\cos \gamma - \mu_2 \sin \gamma} \right)^2}} - \arctan \frac{\cos \gamma - \mu_2 \sin \gamma}{\mu_2 \cos \gamma + \sin \gamma} \quad (12)$$

由式(12)可知,充种偏角 γ 与取种位置角 θ 、取种槽中心直径 d_1 、角速度 ω 等有关。排种器工作过程中取种盘角速度 ω 为定值,充种偏角 γ 与取种位置角 θ 呈正相关,即充种偏角越大,取种位置角越大,取种起始位置越靠前。考虑种群堆积角度,取种槽取种位置角的取值范围应该在 $80^\circ \sim 105^\circ$,结合取种盘转速和取种槽中心直径,求得取种槽充种偏角的取值范围为 $53.8^\circ \sim 77.4^\circ$ 。

1.3 取种原理

为延长单次充种时长,提高充种稳定性与效率,于取种盘表面取种槽充种方向上设计扰种台与导种槽,与取种槽一一对应,构成独立取种单元,以实现

在取种过程中先后对籽粒进行扰流调姿式扰种与导引位移式导种,二者相互配合,协调促充。

1)扰流调姿式扰种。玉米籽粒进入取种室后,依据自身散粒体力学特性,在重力作用下无序堆积形成种群,并在种群底部籽粒间形成准直线形接触力链,使得种群结构稳定,活跃度降低,且力链相互链接导致籽粒结拱,籽粒姿态难以调整造成漏充^[19-20]。为减少籽粒因结拱、架空导致充种失败的概率,提高种群活跃度,在取种盘上表面周向均布扰种台,通过扰种台随取种盘转动作用,推动充种区玉米籽粒,破坏导种槽上方种群力链,调整籽粒姿态,提高充种性能。如图9所示,扰种台布置方向与导种槽方向平行,为避免籽粒与扰种台接触时造成籽粒磕损,对抗种台两端进行圆角设计。

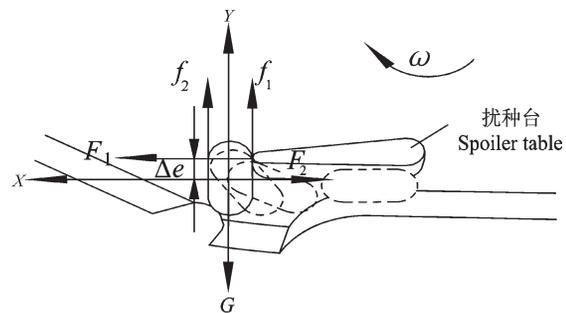


图9 扰种过程及受力分析图

Fig.9 Disturbance process and force analysis diagram

选取种群中接触扰种台的籽粒进行受力分析如图9所示,将籽粒受到扰种台推力、摩擦力以及种间摩擦力向籽粒质心处取矩得:

$$\sum M = F_1 \Delta e + \frac{1}{2} t (f_1 - f_2) \quad (13)$$

式(13)中: Δe 为籽粒与扰种台接触点的质心距,mm; F_1 为籽粒受扰种台的推力,N; f_1 为籽粒与扰种台间接接触的摩擦力,N; f_2 为种间摩擦力,N。

此时,在X轴与Y轴方向上,籽粒所受合力满足:

$$\begin{cases} \sum F_x = F_1 - F_2 \geq 0 \\ \sum F_y = f_1 + f_2 - G \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: F_2 为种间作用力,N。

将(13)、(14)式联立可知:当籽粒与扰种台接触的瞬间,籽粒质心处的合力矩大于0,籽粒将绕质心翻转,翻转方向与扰种台推力对籽粒产生的扭矩方向一致,翻转至籽粒台面压覆于扰种台侧面,此时籽粒受到的扰种台推力及种间作用力平衡,籽粒姿态完成调整。扰种台随取种盘转动实现对种群的连续扰动,并实现对籽粒姿态的调整。

2) 扰种性能仿真分析。为了明确扰种台对种群的扰动效果,对有/无扰种台的2种取种盘开展对照仿真分析。简化扰种侧充式玉米精量排种器,对排种器取种室结构进行建模后导入EDEM软件中,在排种器轴处添加转动副,如图10所示,在排种器前盖进种口位置建立颗粒工厂生成种群,对接触模型及仿真参数进行设定后开展仿真分析。

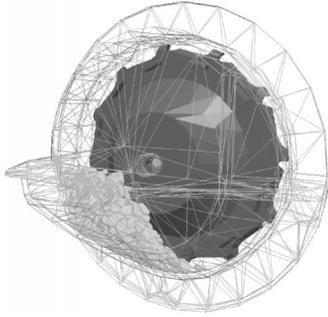
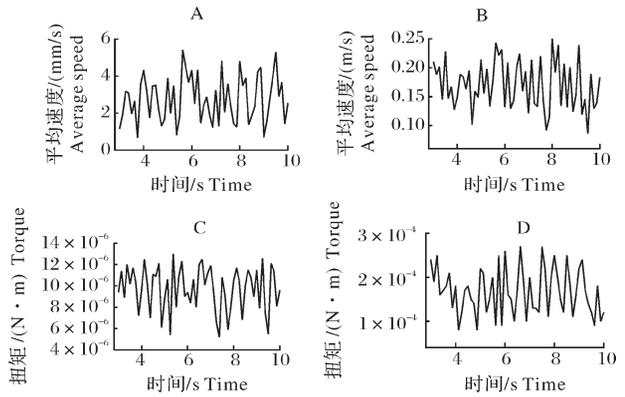


图10 仿真模型建立

Fig.10 Simulation model building

种群流动速度受扰种台扰动性能的直接影响,扰种台的扰动强度越大,种群速度越大,种群活跃度越好,有助于籽粒产生取种方向加速度,提高充种效率。充种区籽粒扭矩反应扰种台对籽粒姿态扰动程度,扭矩越大导种槽周围籽粒越容易翻转,进一步反应扰种台的籽粒姿态调整效果。如图11所示,取充种区内种群稳定运动阶段,对种群流动速度及籽粒扭矩进行检测,得出平面盘的种群平均速度在 $6.8 \times 10^{-4} \sim 5.4 \times 10^{-3}$ m/s波动,籽粒平均扭矩在 $5.2 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-5}$ N·m波动;扰种盘的种群平均速度在0.086~0.25 m/s波动,籽粒平均扭矩在 $0.8 \times 10^{-4} \sim 2.7 \times 10^{-4}$ N·m波动。仿真结果说明扰种盘对种群的扰动能力有显著提升,且扰种台能够有效实现籽粒翻转,调节充种区籽粒的充种姿态。

3) 导引位移式导种。种群中玉米籽粒姿态各异,受籽粒粒形特征限制,取种槽在取种过程中直接进行适位填充的条件相对苛刻。为提高取种槽充种效率,在取种槽取种方向周向布置导种槽,使其尽可能多地攫取适位籽粒充入导种槽空白空间并引导其充入取种槽,实现籽粒预充种。如图12A所示,当导种槽运动到种群时,玉米籽粒受种间作用力迅速占据导种空间,此时导种空间内籽粒始终接触种群与导种斜面。若进入导种空间的籽粒呈竖立或侧卧姿态,其几何质心位于导种空间外受力不稳定,易产生翻转或被速度较低的种群带出导种空间。如图12B所示,对导种槽中呈平躺姿态且完全进入或者大部

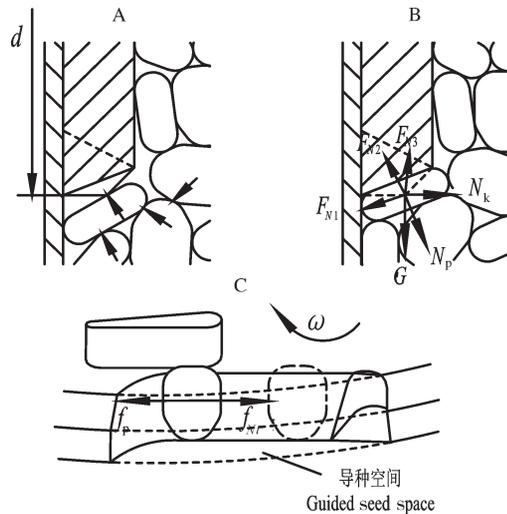


A:平面盘种群速度曲线 Planar disc population velocity curve; B:扰种盘种群速度曲线 Spoiler disc population velocity curve; C:平面盘种群扭矩曲线 Planar disc seed torque curve; D:扰种盘种群扭矩曲线 Spoiler disc seed torque curve.

图11 仿真分析结果

Fig.11 Simulation analysis result

分进入导种空间的籽粒进行受力分析可知,此时籽粒受支持力(N_p 、 N_k)、种间作用力(F_{N1} 、 F_{N2} 、 F_{N3} 、 \dots 、 F_{Ni})、籽粒粒形特征的耦合作用保持姿态稳定。如图12C所示,随着取种盘的转动,籽粒在取种盘摩擦力 f_p 与种群摩擦力 f_{Ni} 的作用下,与取种盘产生速度差,沿导种面滑动至取种槽口,在重力、种间作用力的共同作用下,沿长轴翻转切向进入取种槽,完成充种过程。



A: 导种槽未填充状态 Diagram of unfilled state of seed guide slot; B: 稳定导种状态 Stable seed guide state diagram; C: 导种过程受力分析 Force analysis diagram of the guided seeding process.

图12 导种原理分析

Fig.12 Principle analysis of seed guide

4) 取种极限转速确定。取种盘转速直接影响排种器工作效率,是决定取种盘取种效果的关键因素之一。当取种盘转速过大时,籽粒靠自身重力很难

克服离心力做功,导致清种区取种槽中多余籽粒无法自行清种,重播指数增加;递种区籽粒无法向投种仓滑落,漏播指数增加。因此,确保籽粒所受重力大于离心力是满足排种作业稳定性的关键,即:

$$\begin{cases} mg \geq md_1\omega^2/2 \\ n = 30\omega/\pi \end{cases} \quad (15)$$

求解得:

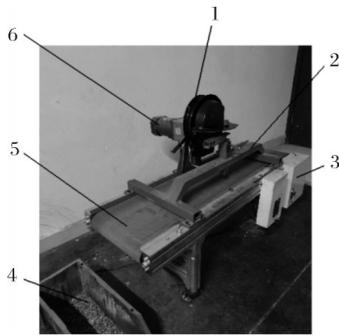
$$n \leq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g}{d_1}} \quad (16)$$

参考资料可知,取种盘工作线速度约为极限速度的70%~80%^[21],故取种盘转速 $n \leq 69.8$ r/min时,取种盘才能实现清种和递种作业的稳定性。

1.4 排种性能试验

1)试验条件。试验选用“新玉77号”玉米种子,千粒重为368 g,含水率为13.5%,人工精选剔除破损种子。使用三维打印机对不同参数取种盘进行3D打印(打印材料为ABS树脂,打印精度0.1 mm)。试验设备为排种器排种性能试验台,排种轴转速可调范围10~120 r/min,种床带速度可调范围1.5~9.0 km/h。

将扰种侧充槽盘式玉米精量排种器固定在试验台上,利用试验控制台控制排种器转速及种床带转速,试验装置如图13所示。



1. 排种器 Seed rower; 2. 支撑架 Support frame; 3. 控制台 Console; 4. 收种箱 Seed collection box; 5. 种床带 Seed bed belt; 6. 电机 Motor.

图13 试验装置
Fig.13 Test setup

2)试验因素和指标。根据前期取种盘参数设计结果,选取取种盘转速、槽孔深度和充种偏角作为试验因素,基于理论分析及前期单因素试验结果选取各试验因素取值范围为:取种盘转速25~35 r/min,槽孔深度7.2~9.2 mm,充种偏角55°~75°。根据国标GB/T6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》要求,选取合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 、重播指数 Y_3 作为试验指标,试验指标计算公式如下:

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{N_1}{N} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{N_2}{N} \times 100\% \\ Y_3 = \frac{N_3}{N} \times 100\% \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: N 为试验总穴数,个; N_1 为单穴是1粒的穴数,个; N_2 为单穴无种的穴数,个; N_3 为单穴大于1粒的总穴数,个。

利用试验控制台改变取种盘转速,通过更换不同的取种盘改变槽孔深度及充种偏角。采用Box-Behnken试验法进行中心组合试验设计,试验水平编码如表2所示。

表2 试验因素水平编码

Table 2 Experimental factors and level codes

编码水平 Code level	取种盘转速 A/(r/min) Seed pickup disc speed	槽孔深度B/mm Slot hole depth	充种偏角C/(°) Seeding deviation angle
-1	25	7.2	55
0	30	8.2	65
1	35	9.2	75

2 结果与分析

2.1 回归模型的建立与分析

根据试验方案共进行17组试验,每组试验250穴,重复3次取平均值作为试验结果,结果如表3所示。

利用Design-Expert软件对试验结果进行分析,得出合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 、重播指数 Y_3 与各因素的回归模型,对回归模型进行方差分析,结果如表4所示,并得到合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 、重播指数 Y_3 与各试验因素的回归方程为:

$$Y_1 = 94.17 - 0.95A - 0.19B + 0.28C - 0.75AB + 0.013AC + 0.38BC - 1.80A^2 - 0.95B^2 - 0.29C^2 \quad (18)$$

$$Y_2 = 1.85 + 0.26A - 0.21B - 0.63C + 0.22AB - 0.22AC - 0.65BC + 2.08A^2 + 0.83B^2 - 0.097C^2 \quad (19)$$

$$Y_3 = 3.98 + 0.70A + 0.41B + 0.34C + 0.53AB + 0.20AC + 0.27BC - 0.27A^2 + 0.13B^2 + 0.38C^2 \quad (20)$$

由表4数据可知,合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 、重播指数 Y_3 的响应面模型决定系数 R^2 分别为0.992 3、0.994 5、0.985 4,表明所建模型预测值与实际值相关性较高,回归模型与实际相符;失拟项 P 值分别为0.266 3、0.217 2、0.488 7,均大于0.05,表明回归方程

表3 试验方案及结果

Table 3 Experimental protocol and results

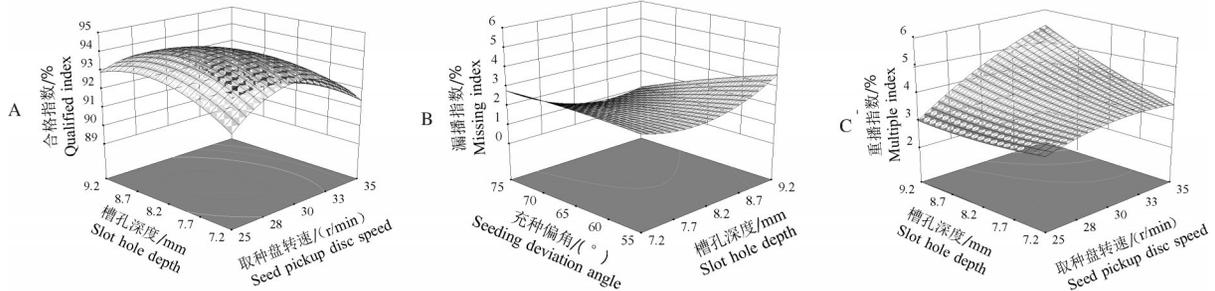
序号 No.	A/(r/min)	B/mm	C/(°)	Y ₁ /%	Y ₂ /%	Y ₃ /%
1	-1	-1	0	91.67	5.42	2.91
2	1	-1	0	91.38	5.55	3.08
3	-1	1	0	92.96	4.42	2.62
4	1	1	0	89.67	5.42	4.92
5	-1	0	-1	92.90	4.37	2.73
6	1	0	-1	90.85	5.27	3.88
7	-1	0	1	93.29	3.71	3.00
8	1	0	1	91.29	3.75	4.95
9	0	-1	-1	93.24	3.24	3.53
10	0	1	-1	91.91	4.24	3.85
11	0	-1	1	93.20	3.11	3.70
12	0	1	1	93.39	1.53	5.08
13	0	0	0	94.34	2.14	3.51
14	0	0	0	93.99	2.38	3.63
15	0	0	0	94.16	2.19	3.66
16	0	0	0	94.06	2.40	3.53
17	0	0	0	94.32	2.37	3.31

不失拟,可用来进行排种器参数优化。

为直观反映各交互因素对合格指数 Y₁、漏播指数 Y₂、重播指数 Y₃ 的影响,根据方差分析结果,利用 Design-Expert 软件绘制响应曲面图,如图 14 所示。

由图 14A 可知,当充种偏角位于中心水平时,合

格指数随取种盘转速和槽孔深度的增大先增大后减小。由图 14B 可知,当取种盘转速位于中心水平时,漏播指数随槽孔深度和充种偏角的增大而减小。由图 14C 可知,当充种偏角位于中心水平时,重播指数随取种盘转速和槽孔深度的增大而增大。



A: $Y_1(X_1, X_2, 65)$; B: $Y_2(30, X_2, X_3)$; C: $Y_3(X_1, X_2, 65)$.

图 14 响应曲面图

Fig.14 Response surface diagram

2.2 参数优化与验证

1) 参数优化。为进一步获得扰种侧充槽盘式玉米精量排种器的最佳参数组合,对试验结果进行目标优化分析,建立回归方程约束条件为:

$$\begin{cases} \max Y_1(A, B, C) \\ \min Y_2(A, B, C) \\ \min Y_3(A, B, C) \\ 25 \leq A \leq 35 \\ 7.2 \leq B \leq 9.2 \\ 55 \leq C \leq 75 \end{cases} \quad (21)$$

根据公式(21)建立优化模型,并分析求解可得最优参数组合为:取种盘转速为 28 r/min、槽孔深度为 8.2 mm、充种偏角为 67°,此时优化模型预测的合格指数为 94.32%、漏播指数为 1.95%、重播指数为 3.73%。

2) 田间试验验证。为验证扰种侧充槽盘式玉米精量排种器的田间作业性能,于 2022 年 4 月在新疆巴州焉耆县开展整机田间试验,试验时参照台架试验最优参数组合,通过拖拉机牵引控制免耕播种机

表4 回归方程方差分析
Table 4 Analysis of variance of regression equations

方差来源 Variance source	合格指数 Y_1 Qualified index				漏播指数 Y_2 Missing index				重播指数 Y_3 Multiple index			
	平方和 Sum of Squares	自由度 DF	F	P	平方和 Sum of Squares	自由度 DF	F	P	平方和 Sum of Squares	自由度 DF	F	P
模型 Model	30.19	9	99.97	<0.000 1	27.98	9	139.77	<0.000 1	8.68	9	52.51	<0.000 1
A	7.28	1	216.91	<0.000 1	0.54	1	24.08	0.001 7	3.88	1	211.17	<0.000 1
B	0.30	1	9.07	0.019 6	0.37	1	16.43	0.004 8	1.32	1	71.89	<0.000 1
C	0.64	1	19.20	0.003 2	3.15	1	141.63	<0.000 1	0.94	1	51.10	0.000 2
AB	2.25	1	67.07	<0.000 1	0.19	1	8.51	0.022 4	1.13	1	61.76	0.000 1
AC	0.000 625	1	0.019	0.895 3	0.18	1	8.31	0.023 5	0.16	1	8.71	0.021 4
BC	0.58	1	17.22	0.004 3	1.66	1	74.82	<0.000 1	0.28	1	15.30	0.005 8
A^2	13.69	1	408.10	<0.000 1	18.14	1	815.66	<0.000 1	0.31	1	17.06	0.004 4
B^2	3.81	1	113.45	<0.000 1	2.91	1	130.65	<0.000 1	0.07	1	3.71	0.095 4
C^2	0.35	1	10.43	0.014 5	0.04	1	1.77	0.224 9	0.62	1	33.94	0.000 6
残差 Residual	0.23	7			0.16	7			0.13	7		
失拟项 Lack of fit	0.14	3	1.93	0.266 3	0.10	3	2.19	0.231 8	0.05	3	0.93	0.503 3
误差 Error	0.096	4			0.06	4			0.08	4		
总和 Total	30.42	16			28.14	16			8.81	16		

注： $P < 0.01$, 极显著； $P < 0.05$, 显著。Note: $P < 0.01$ is extremely significant, $P < 0.05$ is significant.

平均前进速度为 4.5 km/h, 同时通过调节传动装置链轮的齿数改变传动比, 设置排种器取种盘转速为 28 r/min, 安装槽孔深度为 8.2 mm、充种偏角为 67°的取种盘。在忽略其他次要因素后, 每次随机连续挖取 350 粒, 重复 5 次, 试验过程如图 15 所示。试验结果为: 合格指数 92.97%、漏播指数 2.14%、重播指数 4.89%, 在台架试验结果在误差允许范围内。田间验证试验表明, 扰种侧充槽盘式玉米精量排种器的各项评价指标满足玉米播种农艺要求。



图 15 田间试验
Fig.15 Field test

3 讨论

本研究设计了一种扰种侧充槽盘式玉米精量排种器, 通过将扰种结构、导种结构和取种结构简化设计为独立取种单元, 并集成于竖直取种盘上, 在充种的同时实现调姿扰种与导种, 有效提升种群活跃度

与充种时长以及充种效率。建立力学与运动学模型对排种器关键结构参数进行设计及取种原理分析, 并采用 EDEM 软件进行仿真分析明确扰种性能, 在此基础上确定了影响排种器工作效率的关键因素: 取种盘转速、槽孔深度、充种偏角, 并以此为试验因素进行三因素三水平中心组合试验。

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行数据分析, 基于响应面优化试验建立了排种性能指标与各因素之间的回归模型, 优化得出在取种盘转速为 28 r/min、槽孔深度为 8.2 mm、充种偏角为 67°时, 优化模型预测的合格指数为 94.32%、漏播指数为 1.95%、重播指数为 3.73%, 此时排种性能较优。通过田间试验验证排种器在最优参数组合下的实际作业性能, 得出各指标分别为: 合格指数 92.97%、漏播指数 2.14%、重播指数 4.89%。田间试验结果与优化模型预测结果基本一致, 扰种侧充槽盘式玉米精量排种器的各项评价指标符合播种农艺要求。

本研究表明, 由于玉米籽粒结构形态的特殊性, 玉米精量排种器进行取种作业时受玉米姿态影响, 取种效率不稳定, 本研究设计的玉米精量排种器排种过程中的取种效率有明显提升。后续可通过改进导种槽与扰种台结构参数进一步优化取种盘设计, 提高取种效率。

参考文献References

- [1] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等.自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J].农业工程学报,2019,35(13):23-34.DU X, LIU C L, JIANG M, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 23-34 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李复辉,杜瑞成,刁培松,等.舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(S1):33-38.LI F H, DU R C, DIAO P S, et al. Design and experiment of helm-shaped No-tillage precision fertilization planter for corn[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(S1): 33-38 (in Chinese with English abstract).
- [3] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等.播种机导种技术与装置研究进展分析[J].农业机械学报,2020,51(12):1-14.LIAO Y T, LI C L, LIAO Q X, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(12): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王金武,王梓名,徐常塑,等.坡耕地鸭嘴式玉米排种器间歇同步充补装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(5):57-66.WANG J W, WANG Z M, XU C S, et al. Design and experiment of intermittent synchronous seeding and reseeding device of duck-billed corn seed metering machine in sloping farmland[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(5): 57-66 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李玉环,杨丽,张东兴,等.气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(7):29-39.LI Y H, YANG L, ZHANG D X, et al. Design and test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(7): 29-39 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李娟娟,张和平,毕新胜,等.转轴型孔式精量排种器充种性能仿真分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(5):38-49.LI J J, ZHANG H P, BI X S, et al. Simulation analysis and test on the filling performance of rotary type-hole precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 38-49 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李洪昌,高芳,赵湛,等.国内外精密排种器研究现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2014,35(2):12-16,56.LI H C, GAO F, ZHAO Z, et al. Domestic and overseas research status and development trend of precision seed-metering device[J]. Journal of Chinese agricultural machinery, 2014, 35(2): 12-16, 56 (in Chinese with English abstract).
- [8] 韩丹丹,何彬,周毅,等.气吸式密植精量排种器的设计与试验[J].华中农业大学学报,2023,42(1):237-247.HAN D D, HE B, ZHOU Y, et al. Design and experiment of air suction type dense planting precision seed metering device[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1): 237-247 (in Chinese with English abstract).
- [9] 李兆东,何顺,钟继宇,等.油菜扰动气力盘式穴播排种器参数优化与试验[J].农业工程学报,2021,37(17):1-11.LI Z D, HE S, ZHONG J Y, et al. Parameter optimization and experiment of the disturbance pneumatic plate hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张学军,程金鹏,史增录,等.摆动夹取式玉米精量排种器取种性能仿真与试验[J/OL].农业机械学报:1-14[2023-03-08].<https://kns-cnki-net.webvpn.xjau.edu.cn/kcms/detail/11.1964.s.20230117.1710.012.html>.ZHANG X J, CHENG J P, SHI Z L, et al. Simulation and experiment of seed taking performance of swing clamp type maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAM: 1-14[2023-03-11]. <https://kns-cnki-net.webvpn.xjau.edu.cn/kcms/detail/11.1964.s.20230117.1710.012.html> (in Chinese with English abstract).
- [11] 伍皖闽,陈学庚,王士国,等.组合型孔轮式玉米精量穴播器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(3):60-70.WU W M, CHEN X G, WANG S G, et al. Design and experiment of combined-hole maize precision dibbler[J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(3): 60-70 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李成华,夏建满,何波.倾斜圆盘勺式精密排种器投种过程分析[J].农业机械学报,2005,36(3):48-50.LI C H, XIA J M, HE B. Analysis of seed throwing procedure by declined scope metering device[J]. Transactions of the CSAM, 2005, 36(3): 48-50 (in Chinese with English abstract).
- [13] SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems engineering, 2005, 92(4): 429-438.
- [14] 王金武,唐汉,周文琪,等.指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(9):68-76.WANG J W, TANG H, ZHOU W Q, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(9): 68-76 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王业成,邱立春,张文娇,等.摩擦型立式圆盘精密排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(1):22-26.WANG Y C, QIU L C, ZHANG W J, et al. Design and experiment of friction vertical plate precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 22-26 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘艳芬,林静,李宝筏,等.玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(8):37-46.LIU Y F, LIN J, LI B F, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 37-46 (in Chinese with English abstract).
- [17] 廖庆喜,高焕文,臧英.玉米水平圆盘精密排种器型孔的研究[J].农业工程学报,2003,19(2):109-113.LIAO Q X, GAO H W, ZANG Y. Experimental study on the cell of the horizontal plate precision meter for corn seed[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 109-113 (in Chinese with English abstract).

- [18] 陈志. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007. CHEN Z. Agricultural machinery design manual[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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 B X, ZHANG D X, CUI T, 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 with English abstract).
- [20] 孙其诚, 王光谦. 静态堆积颗粒中的力链分布[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 4667-4674. SUN Q C, WANG G Q. Force distribution in static granular matter in two dimensions[J]. Acta physica sinica, 2008, 57(8): 4667-4674 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张青松, 余琦, 王磊, 等. 油菜勺式精量穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 47-54, 64. ZHANG Q S, YU Q, WANG L, et al. Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(6): 47-54, 64 (in Chinese with English abstract).

Design and test of maize precision seeder with seed-disturbance and side-filling slotted disk

FU Hao¹, ZHANG Xuejun^{1,2}, SHI Zenglu^{1,2}, CHENG Jinpeng¹,
WU Haifeng¹, WANG Meijing¹, YU Yongliang³

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China;

3. Tiancheng Agricultural Equipment Manufacturing Co., Xinjiang, Tiemenguan 841007, China

Abstract This article designed a precision seeder with seed disturbance and side-filling slotted disk type to improve the seed filling performance of maize seeder. A structure of picking up seed with seed disturbance and side filling was proposed based on the size parameters of maize kernels, which can realize the attitude adjustment disturbance and seed guidance during seed filling, and effectively improve the activity of population, and the duration and efficiency of seed filling. The key structural parameters of the seeder were designed and the principle of seed picking was analyzed by establishing the mechanical and kinematics models. The simulation analysis was conducted with EDEM software to clarify the disturbance performance. On this basis, the key factors affecting the efficiency of the seeder including the speed of the seed tray, the depth of the slot hole, and the deviation angle of seed filling were obtained. A central combination test with three factors and three levels was conducted based on these factors. Data analysis was conducted on the results of test, and regression models of the pass index, miss seeding index, and reseeding index were established. The results of analysis and optimization showed that the pass index, miss seeding index, the qualified index, and reseeding index predicted by the optimized model was 94.32%, 1.95%, and 3.73% when the speed of the seed tray, the depth of the slot, and the angle of seed filling was 28 r/min, 8.2 mm, and 67°. The qualification index, the missed sowing index, and the replanting index verified through field test was 92.97%, 2.14%, and 4.89%, which was in line with the predicted results of the model optimized. It is indicated that the evaluation indicators of the maize precision seeder with seed-disturbance and side-filling slotted disk meet the agronomic requirements of sowing.

Keywords precision seeder; mechanical seeder; maize; side-filling slotted disk type; seed disturbance

(责任编辑: 陆文昌)