

摆动夹取式玉米精量排种器设计与试验

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

(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)

摘要: 针对玉米种子三轴尺寸差异大,在取种过程中易造成漏取和重取的问题,设计了一种摆动夹取式玉米精量排种器,阐述其结构组成及工作原理,并对关键部件进行设计;通过建立的模型进行力学和运动学分析,得到了影响排种器取种性能的关键因素;通过 EDEM 软件建立仿真模型,分析种群高度及排种器转速对种群流转速度的影响规律,得到了排种器取种性能曲线;以取种块开合角、进种筒安装高度、排种器转速为试验因素,取种单粒率、漏取率、重取率为评价指标进行二次正交旋转组合仿真试验,结果表明最优参数组合为取种块开合角 43.87°、进种筒安装高度 37.84 mm、排种器转速 0.41 r/s,在最优参数组合下进行排种性能台架验证试验,得到排种器排种合格指数为 94.11%、漏播指数为 2.52%、重播指数为 3.37%,满足行业标准及农艺要求,研究结果为机械式玉米精量排种器关键部件的设计优化提供了理论参考。

关键词: 玉米; 精量排种器; 摆动夹取式; EDEM; 试验

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0038-13 OSID: 

Simulation and Experiment of Seed Taking Performance of Swing-clamp Type Maize Precision Seed-metering Device

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

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

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

Abstract: In response to the problem of large differences in size of three axes of maize seeds, which are prone to omission and re-taking during seed picking, a swing-clamp type maize precision seed-metering device was designed, its structure and working principle were introduced and analyzed, and the key components were designed. The key factors affecting the seed extraction performance of the seed-metering device were obtained by establishing mechanical and kinematic models for analysis. The simulation model was established by EDEM software to further analyze the influence law of population height and seed-metering device's rotational speed on population flow speed, and the seed-metering device's fetching performance curve was obtained. The seed picking block opening and closing angle, seed feeding cylinder installation height and seed-metering device's rotation speed were used as experimental factors, and the single seed picking rate, leakage rate and multiple picking rate were used as evaluation indexes for the secondary orthogonal rotation combination simulation test, the results showed that the optimal combination of parameters was 43.87° of seed picking block opening and closing angle, 37.84 mm of seed feeding cylinder installation height and 0.41 r/s of seed-metering device's rotational speed. Under the optimal combination of parameters, the seed row performance bench validation test was conducted, and the seed row qualification index of the seed rower was 94.11%, the missed seed index was 2.52% and the reseeding index was 3.37%, meeting the industry standard and agronomic requirements. The research result provided a theoretical reference for the design optimization of different working area components of the mechanical corn precision seed-metering device.

Key words: maize; precision seed-metering device; swing-clamp type; EDEM; experiment

收稿日期: 2022-06-23 修回日期: 2022-09-26

基金项目: 新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(科技援疆计划)(2021E02055)和新疆农机研发制造推广应用一体化项目(YTHSD2022-02)

作者简介: 张学军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: tucc@163.com

0 引言

精量播种是精准农业的重要组成部分,也是实现玉米种植降本增效的重要手段^[1-5]。精量排种器作为玉米精量播种机的关键部件,在玉米机械化种植过程中得到了广泛应用^[6]。根据作业方式不同,玉米精量排种器可分为气力式和机械式两大类^[7],机械式玉米精量排种器因其作业环境要求低、结构简单等优点,在玉米农艺生产中占有重要比重^[8-9],按其作业原理,机械式玉米排种器又可分为舀勺式、指夹式、夹持式及伸缩杆式等^[10-14]。

随着 DEM 技术的不断发展,其在农业机械设计及优化环节中也得到了广泛应用^[15]。近年来,国内外学者针对排种器的离散元仿真模型优化进行了大量研究,王国伟等^[16]采用 DEM - CFD 耦合法对气吸式大豆高速精密排种器的取种性能进行了仿真,并通过台架试验验证了仿真结果的合理性;张春艳等^[17]以滚筒式棉花穴播器为研究对象,采用离散元法对排种过程中的种群运动路径及种子速度进行仿真,阐明了排种器作业性能影响机理;顿国强等^[18]利用离散元分析软件对交替换岗式大豆排种器的取种、投种、清种过程进行模拟,验证了机构的可行性;LYSYCH 等^[19]对林木丸粒化种子排种器进行离散元仿真,得到了满足排种器作业性能的最佳工作参数;GUZMAN 等^[20]采用 DEM 法对槽轮式排种器进行数值模拟,得到了排种器取种过程质量流率与滚筒转速及阻尼系数之间的关系。上述研究表明,排种器取种过程受多种因素影响,而取种效果对于排种器作业质量起决定性作用,因此对于精量排种器取种性能的分析及工作参数的设计优化至关重要。

本文设计一种摆动夹取式玉米精量排种器,对取种机构进行参数化设计,建立取种过程力学和运动学模型,分析取种块对玉米籽粒的攫取机理,利用 EDEM 软件对取种性能进行仿真分析,通过三因素五水平二次正交旋转组合仿真试验优化排种器作业参数,并通过台架试验验证排种器的作业性能。

1 排种器结构与工作原理

1.1 整机结构

如图 1 所示,摆动夹取式玉米精量排种器主要由进种筒、端盖定盘、钢带、固定盘、隔种芯盘、开合控制板、排种模块总成(包括鸭嘴、取种块、储种盒、拐臂和扭簧)、运动盘、轴等组成。各部件通过螺栓相互配合固定,共同构成排种器整体。

在图 1 中,排种模块总成由 8 个独立排种模块通过卡槽相互连接构成,固定盘与运动盘通过螺栓

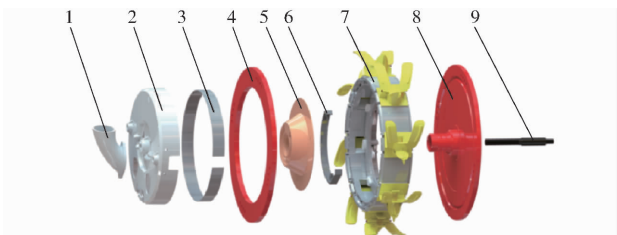


图 1 摆动夹取式玉米精量排种器结构示意图

Fig. 1 Schematic of seed-metering device's structure

1. 进种筒 2. 端盖定盘 3. 钢带 4. 固定盘 5. 隔种芯盘 6. 开合控制板 7. 排种模块总成 8. 运动盘 9. 轴

固装于两端对其进行轴向固定;进种筒与钢带装于端盖定盘内外两侧组成定盘总成,起到进种与挡种作用;开合控制板通过螺栓装于隔种芯盘一侧,隔种芯盘通过挡肩装于排种模块总成内部,将排种器分为左右运种室与控制室两部分,如图 2 所示,在排种器的自转运动作用下,位于控制室内的拐臂与开合控制板不断啮合分离,进而带动运种室内取种块在各工作区域完成开启闭合,从而完成取种、投种等过程。

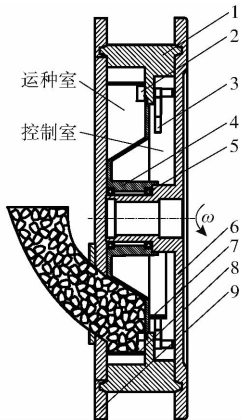


图 2 排种器剖视图

Fig. 2 Cutaway view of seed-metering device

1. 储种盒 2. 取种块 3. 拐臂 4. 隔种芯盘 5. 轴承 6. 运动盘 7. 开合控制板 8. 钢带 9. 固定盘

1.2 工作原理

如图 3a 所示,排种器工作区域划分为取种区、持种区、清种区及投种区,其中投种区又分为一次投种区和二次投种区。作业时,玉米种子由进种筒进入排种器内,在排种器自转影响下于取种区形成籽粒群,通过取种块的开合摆动完成对籽粒的取种与投种过程,取种块的开合原理如图 3b 所示,取种模块中的拐臂与开合控制板接触后带动取种块旋转一定角度,使取种块与端盖定盘内侧钢带之间形成取种空间,玉米种在重力、离心力及籽粒间作用力的共同作用下进入取种空间;当拐臂与开合控制板的接触运动结束后,取种块在扭簧弹力的作用下对所攫取的种子进行压持推进运动,到达清种区后,多余夹

取的种子在清种机构及自身重力的作用下落回至取种区;继续被压持的玉米种子随取种块运动到一次投种区,在扭簧弹力作用下进入储种盒中,继续运送到二次投种区后在重力作用下进入鸭嘴内,随着鸭嘴的开启完成投种作业。如此循环完成持续播种作业。

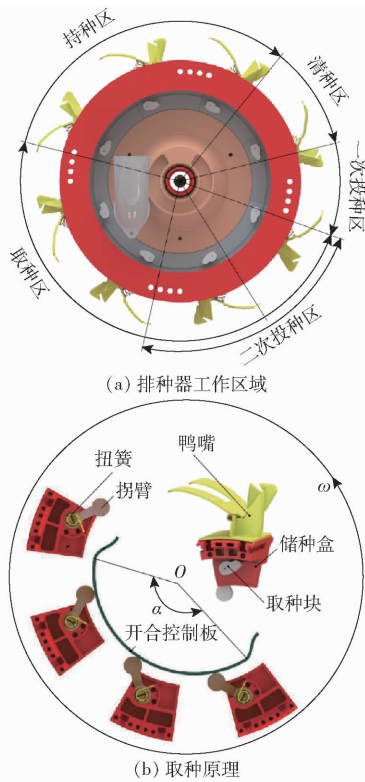


图3 排种器工作原理图

Fig.3 Working principle diagram of seed-metering device

2 取种块参数设计

2.1 玉米籽粒几何参数

玉米籽粒的几何尺寸参数是取种块结构设计的重要依据^[21],不同籽粒的几何尺寸为取种块的参数设计提供了重要参考。选用在我国北方地区种植较为广泛的登海8883号、新玉33号、辽作1号作为测量对象,对其长度、宽度、厚度进行测量,测量结果如表1所示。

表1 籽粒几何参数				
Tab.1 Maize seed geometrical parameters				
品种	参数	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm
登海8883号	长度	13.0	8.6	11.6
	宽度	9.2	8.2	8.6
	厚度	5.4	5.1	5.3
新玉33号	长度	11.7	8.5	10.1
	宽度	8.9	7.9	8.3
	厚度	5.8	5.2	5.5
辽作1号	长度	11.6	8.3	9.2
	宽度	8.0	7.2	7.9
	厚度	5.5	5.1	5.3

由表1可看出,不同品种玉米籽粒之间的尺寸差异较大,同一品种之间也存在一定差异,其中长度差异较大,宽度和厚度差异相对较小。

2.2 取种块结构参数设计

取种块是玉米精量穴播排种器取种机构的核心作业部件,其形状及结构参数对取种性能起到了直接影响作用,取种块结构尺寸设计如图4所示。

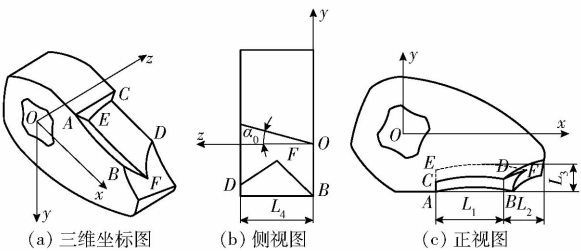


图4 取种块三维结构示意图

Fig.4 Schematics of three-dimensional structure of seed picking block

如图4c中,取种块结构可分为导种段 L_2 和持种段 L_1 ,其中导种段在取种过程中对籽粒起取种导向作用,持种段则为持种过程中的主要工作段。为提高对不同尺寸玉米籽粒的取种适配度,将持种段设计为双凹面结构,使其配合钢带对种子形成三点接触夹持,以保证运种工作稳定性。以取种块回转中心为原点建立空间直角坐标系,基于取种机构整体结构考虑, OA 段在 y 轴方向投影距离为7 mm,在 x 轴方向投影距离为6 mm。

为提高取种块对不同尺寸玉米籽粒的夹取契合度,其设计原则应遵循^[22]

$$\begin{cases} \frac{3}{2}d > L_4 > \frac{1}{2}l \\ b > L_1 > L_2 > \frac{1}{2}l \end{cases} \quad (1)$$

式中 d ——玉米籽粒厚度,mm
 L_4 ——取种块厚度,mm
 l ——玉米籽粒长度,mm
 b ——玉米籽粒宽度,mm

根据表1中玉米籽粒尺寸参数,设定 $L_1 = 7.2\text{ mm}$, $L_2 = 6.6\text{ mm}$, $L_4 = 6.9\text{ mm}$ 。为使双凹持种面对不同尺寸的玉米籽粒外形能有较好的契合度,根据玉米籽粒外形特点及文献[22],设定凹面边界圆弧 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{CD}$ 、 $\widehat{EF}$ 为等半径圆弧,圆心在 x 轴上投影于同一点且 $r_{AB} = r_{CD} = r_{EF} = 6.8\text{ mm}$,点 A 、 E 在 y 轴方向的投影距离 L_{AE} 为3 mm。当玉米籽粒在取种区进入持种段时,为使取种块对籽粒有持续压持作用,取种块的张角应始终大于零,即 $\widehat{EF}$ 的顶点到取种块底端在 y 轴方向的投影距离 L_3 应小于等于最小籽粒

厚度 $d_{\min}$, 同时若 L_3 过小则会导致圆弧 $\widehat{EF}$ 过平进而使取种块对种子的稳定效果下降, 因此取 $L_3 = d_{\min} = 5.1 \text{ mm}$, 由公式

$$\left(\frac{L_{EF}}{2}\right)^2 + (r_{EF} - L_3 + L_{AE})^2 = r_{EF}^2 \quad (2)$$

得到点 E 、 F 之间距离 $L_{EF} = 9.8 \text{ mm}$, 因此圆弧 $\widehat{EF}$ 在 xOy 面上投影方程为

$$\begin{aligned} (x - 10.9)^2 + (y - 8.7)^2 &= 46.24 \\ (-4 \text{ mm} \leq y \leq -1.9 \text{ mm}) \end{aligned} \quad (3)$$

圆弧 $\widehat{AB}$ 的方程为

$$\begin{aligned} (x - 10.9)^2 + (y - 11.7)^2 &= 46.24 \\ (-7 \text{ mm} \leq y \leq -4.9 \text{ mm}) \end{aligned} \quad (4)$$

如图 4b 所示, 为防止持种过程中种子受取种姿态影响从侧面滑落, 设立工作面轴向倾角 α_0 , α_0 的取值受持种及投种过程籽粒姿态影响, α_0 过大时会导致投种过程中种子侧向位移过大; 过小则在持种过程中无法实现轴向护种, 因此 α_0 过大或过小均会影响取种效果, 考虑到投种口尺寸及玉米籽粒在持种过程中的稳定维持姿态, 轴向倾角 α_0 取 15° , 则 A 、 C 两点在 y 轴方向的投影长度 L_{AC} 为 1.8 mm , 圆弧 $\widehat{CD}$ 在 xOy 面上投影方程为

$$\begin{aligned} (x - 10.9)^2 + (y - 10.5)^2 &= 46.24 \\ (-5.8 \text{ mm} \leq y \leq -3.7 \text{ mm}) \end{aligned} \quad (5)$$

为了减小取种过程中对籽粒的损伤, 使种子能够平滑进入取种空间, 应将取种块边缘进行倒圆角处理。

3 取种过程分析

3.1 开合控制板设计

取种块的开合与关闭主要由开合控制板进行控制, 为使取种块在充种区能精准平稳地开合, 本文采用摆动从动件盘状凸轮导引方式设计限位导引板外形轮廓, 以对摆臂进行定角摆动控制。为防止取种块摆动产生的冲击力对籽粒造成损伤, 将取种块的开合过程设定为柔性过渡, 因此从动件运动方式采用简谐运动, 重点对进入取种区的推程段及取种区进入持种区的回程段进行设计, 其相位曲线方程为

$$\begin{cases} S_1 = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi\varphi}{\varphi_1} \right) & \left(\frac{\pi}{3} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \right) \\ S_2 = h \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_2} + \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi\varphi}{\varphi_2} \right) & \left(\frac{8}{9}\pi \leq \varphi \leq \frac{19}{18}\pi \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中 S_1 ——进入取种区段推程位移, mm

S_2 ——进入持种区段回程位移, mm

h ——拐臂远休止角行程, mm

φ ——相位角, $(^\circ)$

φ_1 ——推程运动角, $(^\circ)$

φ_2 ——回程运动角, $(^\circ)$

对应的相位角曲线如图 5 所示, 取种机构中拐臂配合扭簧形成力锁合凸轮机构, 采用反转法根据相位曲线图绘制凸轮理论轮廓与实际轮廓如图 6 所示。

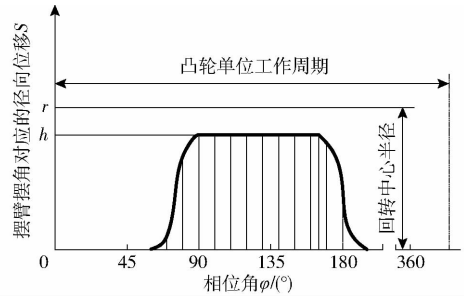


图 5 相位关系

Fig. 5 Phase relationship diagram

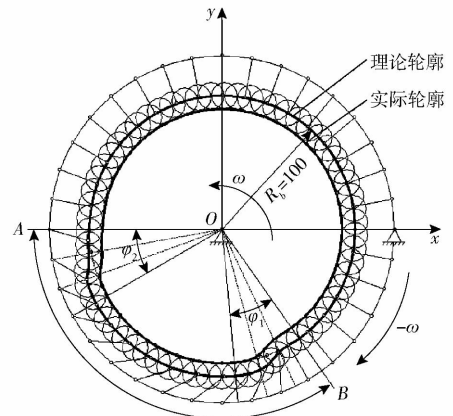


图 6 凸轮轮廓曲线

Fig. 6 Cam profile curves

实际轮廓曲线中的 AB 段即为开合控制板的外轮廓曲线, 根据取种块开合的空间及时间需求设定与二次投种区间 (未持种) 拐臂接触端中心组成的圆为基圆, 其半径 R_b 为 100 mm , 为使拐臂开合平稳, 设定进入取种区推程运动角 φ_1 为 30° ; 取种区进入持种区的回程运动角 φ_2 为 30° 。取种过程是投种作业过程中的初始环节, 取种区域作业范围与取种块开合角度是影响充种效果的关键, 取种块开合角度过大, 易夹取过多籽粒, 导致清种过程困难, 造成重取; 开合角度过小则会导致籽粒难以充入取种空间, 造成漏取。

3.2 取种过程运动学分析

取种块取种是一个复杂的过程, 在此过程中, 玉米籽粒受重力、摩擦力、离心力及种群间相互作用力的共同影响, 形成一个实时变化的动态力学系统。而取种过程又是整个精量播种循环过程的第 1 步, 因此对于取种过程中玉米籽粒充取机理的分析尤为

重要^[23-25]。玉米种进入排种器后,在排种器自转作用下形成自流动籽粒群^[26],此时种子进入取种空间的过程运动学分析如图 7 所示。

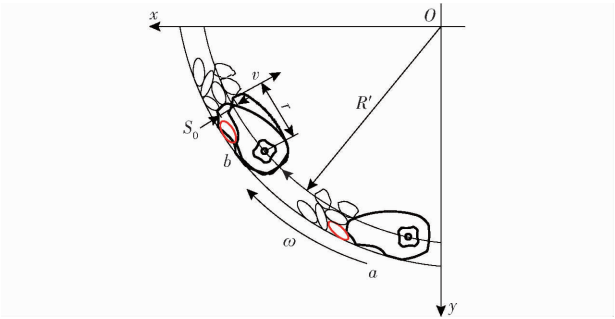


图 7 取种过程示意图

Fig. 7 Diagram of seed-filling process

图 7 中 a 为取种块开启运动起始处, b 为终止处,由前文可知,取种块的运动过程为简谐运动,则其运动轨迹方程为

$$S_0 = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t_1 + \psi_0 \right) \quad (7)$$

其中
$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (8)$$

式中 A ——取种块运动幅值, mm
 T ——取种块由 a 到 b 所用时长的 2 倍, s
 ω ——排种器角速度, rad/s
 ψ_0 ——取种块初始相位角, ($^\circ$)
 t_1 ——取种块运动时间, s
 S_0 ——简谐运动位移,即取种块作开合摆动时端点的运动距离, mm

将式(7)两端对 t_1 求一阶导数可得取种块运动速度方程为

$$v = A\omega \cos(\omega t) \quad (9)$$

取种块的实际运动速度 v_1 为其简谐运动速度 v 与随排种器圆周运动线速度 v_0 的矢量和,即

$$v_1 = \sqrt{v^2 + v_0^2} = \sqrt{A^2 \omega^2 \cos^2(\omega t) + 4\pi^2 n^2 R'^2} \quad (10)$$

其中
$$v_0 = \omega R' = 2\pi n R' \quad (11)$$

式中 R' ——取种块回转运动半径,取 138 mm
 n ——排种器转速, r/s

由分析可知,在取种过程中,取种块的开合及随转动会对籽粒群的自身流转运动产生扰动作用,进而影响玉米种的取种效果,当取种块回转半径一定时,取种块运动幅值(开合角)、排种器转速是影响取种块运动的主要因素,播种作业中拖拉机常用前进速度为 2 km/h^[25],其对应的排种器转速约为 0.4 r/s,为保证取种块取种的单粒率,取种块开合角 γ 应满足

$$\frac{d_{\min}}{L_x} \leq \tan \gamma \leq \frac{b_{\min}}{L_x} \quad (12)$$

式中 $d_{\min}$ ——玉米籽粒厚度最小值, mm
 $b_{\min}$ ——玉米籽粒宽度最小值, mm
 L_x ——图 4 中 OA 段于 x 轴方向上的投影距离,取 6 mm

由表 1 可得, $d_{\min} = 5.1$ mm, $b_{\min} = 7.2$ mm,将数值代入式(10)可得取种块开合角的取值范围为 $40.36^\circ \leq \gamma \leq 50.2^\circ$ 。

3.3 种群高度分析

适度增加种群高度可有效提高取种时长,进而改善取种效果^[27],但种群高度过高则会影响籽粒群的流动特性,增加排种器质量、改变鸭嘴入土角度,进而影响下种效果。现对排种器内籽粒群高度进行分析,如图 8 所示。

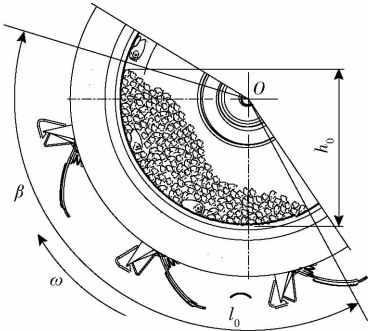


图 8 种群高度示意图

Fig. 8 Seeds cluster height diagram

设取种过程中流动籽粒群高度为 h_0 ,各因素对于取种过程的影响方程为

$$\begin{cases} t_2 = \frac{l_0}{v_0} \\ l_0 = \beta R_0 \\ v_0 = \frac{2\pi n}{60} R_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中 t_2 ——取种块经过取种区所用时间, s
 l_0 ——圆弧长度, mm
 R_0 ——排种器半径, mm
 β ——种群分布角, ($^\circ$)
整理式(13)可得

$$t_2 = \frac{30\beta}{\pi n} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,取种块经过取种区的时长与籽粒群弧度及排种器转速有关,而籽粒群弧度 β 与籽粒群高度 h 有关,通过设定进种筒的安装高度可有效限制排种器内籽粒群的高度,从而控制取种时长。当进种筒安装高度过高时会导致种群高度过高,致使种群粘结性增加,流动减缓,影响取种性能;进种筒安装高度过低则会导致取种块不能与种群进行充分接触,从而导致漏播现象。结合排种器半径及前期预试验设定进种筒安装高度为 30 ~ 50 mm,

具体数值将通过后续试验获得。

3.4 籽粒抢位分析

由于玉米籽粒尺寸参数差异较大,因此在取种块攫取种子的过程中,籽粒间存在相互抢位的可能,导致玉米种不能有效进入取种空间,造成空穴。现分别以取种过程中相互抢位的两粒玉米种子为研究对象,同时分析籽粒1和籽粒2的受力情况,如图9所示。

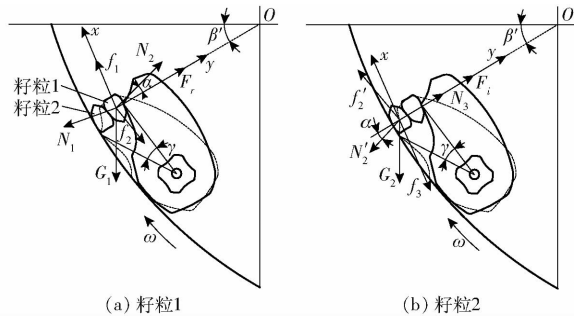


图9 抢位籽粒受力分析

Fig.9 Force analysis of robbed seeds

在图9a中,以籽粒1质心为坐标原点,以排种器速度切线方向为 x 轴,法线方向为 y 轴建立直角坐标系,则此刻籽粒1的力学平衡方程为

$$\begin{cases} f_1 + N_2 \sin \alpha + N_1 \sin \gamma = G_1 \sin \beta' + f_2 \cos \alpha \\ F_r + N_2 \cos \alpha + f_2 \sin \alpha = N_1 \cos \gamma + G_1 \cos \beta' \end{cases} \quad (15)$$

在图9b中,籽粒2的力学平衡方程为

$$\begin{cases} f_2' \cos \alpha = N_3 \sin \alpha + G_2 \sin \beta' + f_3 \\ F_i + N_2' = f_2' \sin \alpha + N_3 \cos \alpha + G_2 \cos \beta' \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} F_r = \omega^2 R_1 \\ F_i = \omega^2 R_2 \\ f_1 = N_1 \mu_1 \\ f_2 = N_2 \mu_2 \\ f_3 = N_3 \mu_3 \\ f_2' = N_2' \mu_2 \end{cases} \quad (17)$$

式中 N_1 ——取种块对籽粒1的支持力,N
 N_2 ——籽粒2对籽粒1的支持力,N
 N_3 ——钢带对籽粒2的支持力,N
 N_2' ——籽粒1对籽粒2的支持力,N
 F_r ——籽粒1所受向心力,N
 F_i ——籽粒2所受向心力,N
 f_1 ——取种块对籽粒1的静摩擦力,N
 f_2 ——籽粒2对籽粒1的静摩擦力,N
 f_3 ——钢带对籽粒2的动摩擦力,N
 f_2' ——籽粒1对籽粒2的静摩擦力,N
 α ——籽粒间的压力与 y 轴方向夹角, $(^\circ)$
 β' ——此刻取种块运动角, $(^\circ)$
 μ_1 ——取种块与籽粒之间的静摩擦因数

μ_2 ——籽粒间静摩擦因数

μ_3 ——籽粒与钢带间动摩擦因数

γ ——取种块开合角, $(^\circ)$

R_1 ——籽粒1回转半径,m

R_2 ——籽粒2回转半径,m

此时,在排种器匀速转动下,籽粒1与籽粒2保持相对静止,达到“相互卡位”的平衡状态,在此状态下,多余夹取的种子不易掉落,进而造成重复取种现象,而由式(15)~(17)可知,当取种块开合角 γ 发生变化时,会使相互抢位的玉米籽粒间的受力平衡受到破坏,即籽粒1和籽粒2所受支持力改变,在摩擦因数恒定的前提下,二者之间的相互摩擦力突破临界状态,产生相对滑动,由于籽粒2所受钢带的滑动摩擦力 f_3 指向种子填充方向,因此可获得沿 x 轴负方向的加速度。

此时籽粒2抢位成功,进入取种空间,籽粒1回落至取种区。因此通过设定取种块经过取种区籽粒群的同时进行自身开启运动,可使被攫取籽粒更易获得指向取种空间的加速度,有效提升取种率,避免漏播。

3.5 持种过程分析

籽粒进入取种空间后由取种块压持推进的过程称为持种过程,此过程中取种块对籽粒的压持力直接影响排种器的持种性能,压持力过小易导致籽粒脱落造成漏播,压持力过大则会对籽粒造成损伤,影响出苗率的同时加快钢带的磨损,现取持种过程中的取种块进行受力分析,如图10所示。

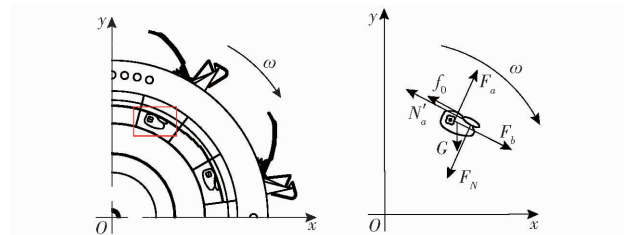


图10 持种过程取种块受力分析

Fig.10 Force analysis of seed-holding process

为使取种块持种过程中运动平稳,应使取种块回转中心 a 所受力矩平衡,即

$$\sum M_a = 0 \quad (18)$$

$$Gl_1 + F_N l_2 = F_a s_1 + f_0 s_2 + N' s_3 \quad (19)$$

其中 F_b 为拐臂轴对取种块的支持力,力臂为零;为减小对种子的刚性冲击,取种块采用树脂材料,因此可忽略取种块重力对于 M 的影响,式(19)可写为

$$F_N = \frac{F_a s_1 + f_0 s_2 + N' s_3}{l_2} \quad (20)$$

式中 M_a ——取种块回转中心力矩, $N \cdot m$

F_N ——籽粒对取种块径向支持力, N
 F_a ——扭簧弹力, N
 f_0 ——隔种钢圈对取种块摩擦力, N
 N' ——籽粒对取种块切向支持力, N
 s_1 ——扭簧力臂, mm
 s_2 ——取种块回转中心与隔种钢圈距离, mm
 s_3 ——籽粒表面与取种块回转中心径向距离, mm
 l_2 ——籽粒表面与取种块回转中心法向距离, mm

由式(20)可知,取种块压持力主要受扭簧弹力和玉米籽粒尺寸的影响,以此为基础,以持种过程中玉米籽粒为研究对象,进行受力分析,研究排种器转速与取种块压持力的关系,如图 11 所示。

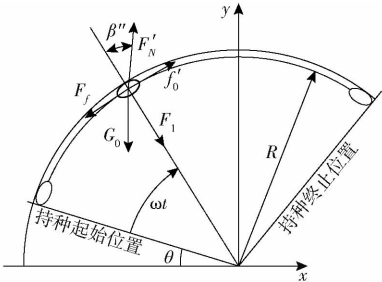


图 11 持种过程籽粒受力分析
Fig. 11 Force analysis of maize seeds

由于排种器持种起止位置恒定,因此取种块旋转角($\omega t + \theta$)始终在($0, \pi$)内变化,此时对径向力进行分解得

$$F_1 + G_0 \sin(\theta + \omega t) - F'_N \cos\beta'' = m\omega^2 R \quad (21)$$

$$F'_N = \frac{F_1 + G_0 \sin(\theta + \omega t) - m\omega^2 R}{\cos\beta''} \quad (22)$$

对切向力进行分解得

$$f'_0 + F'_N \sin\beta'' = \mu_3 F_1 + G_0 \cos(\theta + \omega t) \quad (23)$$

$$F_1 = \frac{f'_0 + F'_N \sin\beta'' - G_0 \cos(\theta + \omega t)}{\mu_3} \quad (24)$$

将式(24)代入式(22)中得

$$F'_N = \frac{f'_0 - G_0 \cos(\theta + \omega t) + \mu_3 G_0 \sin(\theta + \omega t) - \mu_3 m\omega^2 R}{\mu_3 \cos\beta'' - \sin\beta''} \quad (25)$$

为进一步研究排种器取种块压持力随角速度的变化规律,将式(25)两端对 ω 二阶求导可得

$$\frac{d^2 F'_N}{d\omega^2} = \frac{gt^2 \cos(\theta + \omega t) - \mu_3 gt^2 \sin(\theta + \omega t) - 2\mu_3 R}{\mu_3 \cos\beta'' - \sin\beta''} \quad (26)$$

式中 F_1 ——隔种钢圈对籽粒支持力, N
 F'_N ——取种块对籽粒压持力, N
 m ——籽粒质量, kg
 R ——所持籽粒回转半径, mm

θ ——持种区起始角度, ($^\circ$)
 t ——持种运动时间, s
 β'' ——压持力法线方向夹角, ($^\circ$)

其中 β'' 与籽粒大小有关, $\beta'' \in (\pi/9, 2\pi/9)$; 由文献[28]可知,籽粒与钢带间摩擦因数 μ 可取 0.3, 将其余各值赋值计算可求当 $(\theta + \omega t) \leq \frac{7\pi}{18}$ 时,二阶导数小于零, F'_N 函数曲线为凸曲线,随转速的增大,压持力先增大后减小;当 $(\theta + \omega t) > \frac{7\pi}{18}$ 时,二阶导数大于零, F'_N 函数曲线为凹曲线,随转速的增大,压持力先减小后增大。为防止持种过程对玉米籽粒造成损伤,压持力 F'_N 应满足

$$F'_N \cos\beta'' < F_c \quad (27)$$

式中 F_c ——厚度方向玉米籽粒极限受压载荷且 F_c 的取值范围为 80.38 ~ 338.72 N, 代入式(27)可得 F'_N 可取最大值为 82.9 N。

由式(20)、(26)可以看出,扭簧弹力及排种器转速是影响取种块持种性能的主要因素,综合排种器整体循环工作过程及前期预试验得到扭簧弹力较优值为 0.12 N, 因此对排种器转速进行合理优化会有效提升取种块的持种性能,提高作业稳定性。

4 排种器取种过程仿真分析

4.1 仿真模型建立

根据前期参数测量结果,玉米籽粒按形状可分为圆角矩形、类圆锥形、类球形 3 类,依据籽粒特征尺寸绘制三维模型,并将模型导入 EDEM 软件中进行非球形颗粒填充,生成与实际外形尺寸相吻合的填充颗粒,填充结果如图 12 所示。设定圆角矩形、类球形、类圆锥形的生成数量比例为 5:3:1^[29], 共生成 1 000 个颗粒。

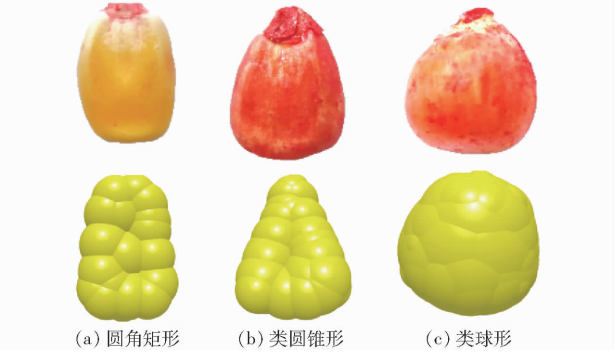


图 12 籽粒仿真填充结果
Fig. 12 Seed simulation filling

对摆动夹取式玉米精量排种器在三维软件中进行等比例建模,将不影响仿真结果的结构进行简化,将简化后的模型导入 EDEM 中,在排种器进种筒对应位置建立颗粒工厂生成籽粒群,结果如图 13 所

示。由于玉米籽粒间无表面粘附力^[30],因此设接触模型为 Hertz - mindlin 接触模型,对颗粒与模型的自身物理参数、颗粒-颗粒、颗粒-模型之间的相互作用参数进行设定,结果如表 2 所示。

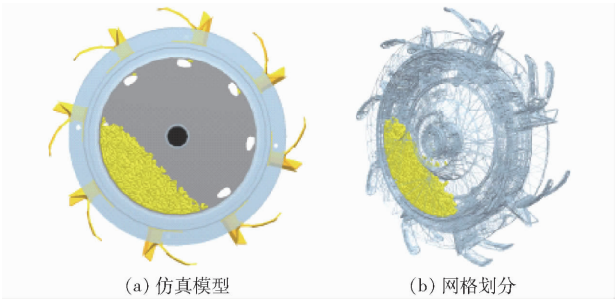


图 13 仿真模型建立
Fig. 13 Simulation model building

表 2 仿真参数设定
Tab. 2 Simulation parameters setting

项目	参数	数值
玉米籽粒	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 276
	剪切模量/MPa	127
	泊松比	0. 4
取种块	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 300
	剪切模量/MPa	1. 39
	泊松比	0. 3
钢带	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 800
	剪切模量/MPa	7×10^4
	泊松比	0. 3
籽粒-籽粒	静摩擦因数	0. 32
	动摩擦因数	0. 05
	碰撞恢复系数	0. 75
籽粒-取种块	静摩擦因数	0. 33
	动摩擦因数	0. 01
	碰撞恢复系数	0. 66
籽粒-钢带	静摩擦因数	0. 31
	动摩擦因数	0. 02
	碰撞恢复系数	0. 72

4. 2 仿真结果分析

4. 2. 1 种群速度

为模拟排种器的实际工作过程,在排种器转轴处添加线性回转运动副,同时设定计算域网格尺寸为 5R,仿真时长 10 s,并对种群的运动速度进行统

计,生成种群速度曲线,如图 14 所示。

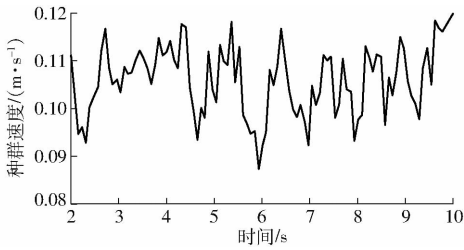


图 14 种群速度曲线
Fig. 14 Velocity curve of seed population

由图 14 可知,随着排种器的转动,种群速度随着时间的推移呈现无规律的波动,为探明种群速度的影响因素,分别统计排种器转速 n 为 0. 3、0. 4、0. 5 r/s 及进种筒安装高度 h' 为 30、40、50 mm 下的种群速度曲线,如图 15 所示。

由图 15 可知,在不同因素水平下,种群的运动速度在 0. 07 ~ 0. 14 m/s 范围内无规律波动,但随着排种器转速提高,种群速度呈现增加趋势,种群活跃度的提高有利于籽粒在取种方向产生加速度,增加籽粒充入概率;图 15a 中种群速度曲线波动范围由进种筒安装高度 $h' = 30$ mm 时的 0. 09 ~ 0. 12 m/s 降低到 $h' = 50$ mm 时的 0. 075 ~ 0. 09 m/s,说明随着种群高度增加,种群的运动速度呈递减趋势,且波动范围随之减小,其原因为种群高度增加,籽粒间压强增大,籽粒群的自转流动粘滞阻力增大,运动速度减缓,速度波动范围减小。因此,选取合适的作业参数水平,对增加籽粒充入概率,提高取种性能具有重要影响。

4. 2. 2 取种性能

由于玉米籽粒之间具有较大尺寸差异,因此存在重复取种和漏取种的可能,其为影响排种器作业性能的主要因素,仿真过程中的重复取种和漏取种现象如图 16 所示,由图 16b 可知,当取种块开启角未满足压持玉米籽粒的最小尺寸要求时,会导致籽粒不能有效进入取种空间,需被压持的籽粒在种群籽粒间复杂作用力的影响下掉落至取种区,造成漏取;由图 16c 可知,当取种块开启角度过大或籽粒特征尺寸较小时,会导致同时压持两粒籽粒的情况,导

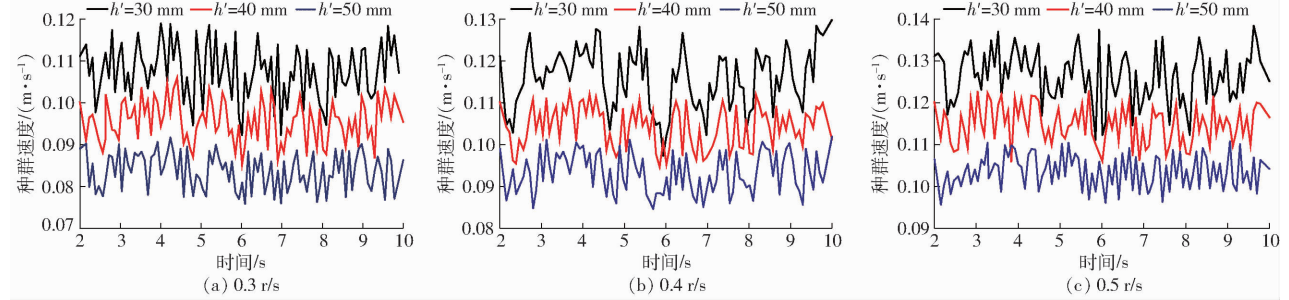


图 15 不同因素下种群速度曲线
Fig. 15 Seed population's velocity curves under different factors

致重取,为分析排种器的取种性能,在排种器取种区结束处建立监测网格,如图 17 中所示的 Grid Bin Group 监测方块,记录任意时刻经过监测方块的颗粒累计数量,绘制成如图 18 所示的折线图来分析重取和漏取数。

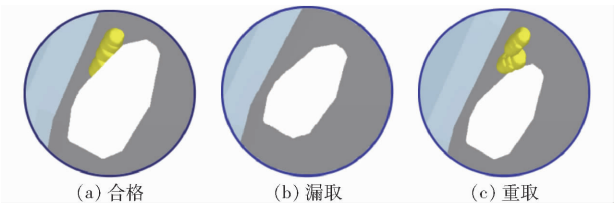


图 16 取种情况统计

Fig. 16 Statistics of filling situation

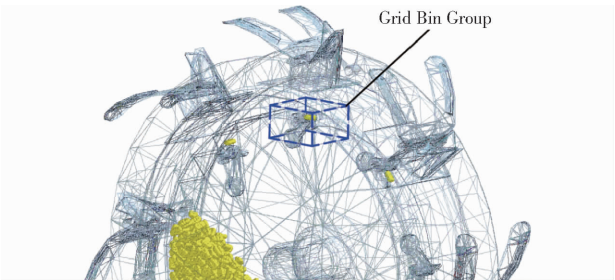


图 17 监测区域设置

Fig. 17 Monitoring area setting

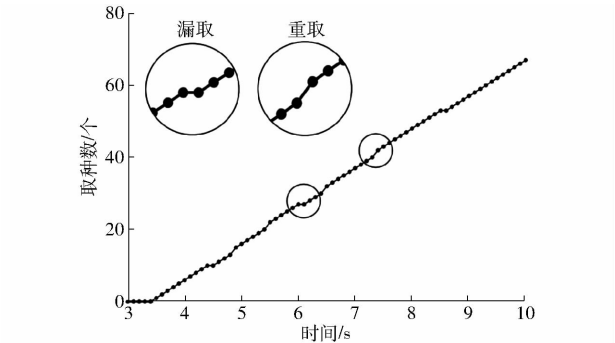


图 18 取种性能曲线

Fig. 18 Seeding performance curve

由图 18 可以看出,取种性能曲线整体呈线性上升趋势,但于 4.4、6、8.7 s 处存在水平现象,于 4.9、5.6、6.6、7.5 s 处存在上升突变现象,通过分析数据可知,曲线突变上升是由于经过该处的取种块同时夹取多粒种子而视为重取;曲线水平则表示经过该处的取种块未夹取种子而视为漏取,由模块监测结果可知,在仿真过程中,排种器取种性能整体稳定,但存在指数变异点,通过统计取种合格指数及变异指数即可得到排种器的取种单粒率、漏取率及重取率。

5 仿真试验

5.1 试验方案

结合前文理论分析,以取种块开合角、进种筒安装高度、排种器转速为试验因素,以排种器取种单粒

率 Y_1 、漏取率 Y_2 、重取率 Y_3 为评价指标进行二次正交旋转组合仿真试验,因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Factors codes of experiment

编码	因素		
	取种块开合角 $x_1/(^{\circ})$	进种筒安装高度 x_2/mm	排种器转速 $x_3/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$
-1.682	36.6	23.2	0.23
-1	40.0	30.0	0.30
0	45.0	40.0	0.40
1	50.0	50.0	0.50
1.682	53.4	56.8	0.57

在试验过程中,通过控制 EDEM 中模型线性回转速度对排种器转速进行调节;通过控制颗粒工厂的高度位置坐标调节进种筒安装高度;通过控制三维建模软件中模型的取种块安装角度控制取种块开合角。每组试验统计颗粒 100 粒,重复试验 3 次取均值。

5.2 试验结果分析

将所得试验数据导入 Design-Expert 12.0 中进行数据分析,结果如表 4 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为编码值。由表 4 可知,摆动夹取式玉米精量排种器的取种单粒率均大于 93%,漏取率与重取率均小于

表 4 试验结果

Tab.4 Experiment results

序号	因素			单粒率 $Y_1/\%$	漏取率 $Y_2/\%$	重取率 $Y_3/\%$
	取种块开合角 X_1	进种筒安装高度 X_2	排种器转速 X_3			
1	-1	-1	-1	93.72	2.71	3.57
2	1	-1	-1	93.30	2.90	3.80
3	-1	1	-1	93.56	2.75	3.69
4	1	1	-1	93.22	2.94	3.84
5	-1	-1	1	93.62	2.64	3.74
6	1	-1	1	93.64	2.79	3.57
7	-1	1	1	93.48	2.89	3.63
8	1	1	1	93.56	2.77	3.67
9	-1.682	0	0	93.73	2.75	3.52
10	1.682	0	0	93.10	3.08	3.82
11	0	-1.682	0	93.81	2.64	3.55
12	0	1.682	0	93.48	2.79	3.73
13	0	0	-1.682	93.48	2.87	3.65
14	0	0	1.682	93.72	2.75	3.53
15	0	0	0	94.07	2.60	3.33
16	0	0	0	94.14	2.56	3.30
17	0	0	0	94.20	2.45	3.35
18	0	0	0	94.15	2.58	3.27
19	0	0	0	94.17	2.51	3.32
20	0	0	0	94.17	2.58	3.25
21	0	0	0	94.23	2.56	3.21
22	0	0	0	94.09	2.60	3.31
23	0	0	0	94.14	2.52	3.34

4%,满足行业要求^[31],对试验结果进行分析,得出单粒率、漏取率、重取率与取种块开合角、进种筒安

装高度及排种器转速的回归模型,对模型进行方差分析^[34],结果如表5所示。

表5 方差分析
Tab.5 Analysis of variance

来源	单粒率 Y_1				漏取率 Y_2				重取率 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	2.63	9	61.04	<0.000 1 **	0.521 9	9	19.2	<0.000 1 **	0.878 1	9	26.9	<0.000 1 **
X_1	0.216 5	1	45.31	<0.000 1 **	0.068 2	1	22.58	0.000 4 **	0.041 7	1	11.49	0.004 8 **
X_2	0.075 4	1	15.79	0.001 6 **	0.023 1	1	7.67	0.016 0 *	0.015 0	1	4.14	0.062 9
X_3	0.059 8	1	12.51	0.003 6 **	0.012 4	1	4.11	0.063 6	0.017 7	1	4.88	0.045 7 *
X_1X_2	0.002 5	1	0.512 7	0.486 6	0.009 1	1	3.02	0.106 0	0.002 1	1	0.582 5	0.459 0
X_1X_3	0.092 5	1	19.35	0.000 7 **	0.015 3	1	5.07	0.042 3 *	0.032 5	1	8.96	0.010 4 *
X_2X_3	0.000 1	1	0.010 5	0.920 1	0.002 8	1	0.931 4	0.352 1	0.003 6	1	0.996 1	0.336 5
X_1^2	1.08	1	226.85	<0.000 1 **	0.237 8	1	78.74	<0.000 1 **	0.311 5	1	85.88	<0.000 1 **
X_2^2	0.514 2	1	107.59	<0.000 1 **	0.042 3	1	14.02	0.002 5 **	0.266 1	1	73.36	<0.000 1 **
X_3^2	0.609 1	1	127.46	<0.000 1 **	0.115 4	1	38.2	<0.000 1 **	0.198 3	1	54.68	<0.000 1 **
残差	0.062 1	13			0.003	13			0.047 1	13		
失拟项	0.042 2	5	3.40	0.060 9	0.019 8	5	1.62	0.258 3	0.029 5	5	2.68	0.103 6
误差	0.019 9	8			0.019 5	8			0.017 6	8		
总和	2.69	22			0.561 2	22			0.925 2	22		

注:**为差异极显著($P<0.01$);*为差异显著($P<0.05$)。

由表5可知,单粒率 Y_1 的回归模型显著,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对 Y_1 的影响极显著;漏取率 Y_2 的回归模型显著,其中 X_1 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对 Y_2 的影响极显著, X_2 、 X_1X_3 对 Y_2 的影响显著;重取率 Y_3 的回归模型显著,其中 X_1 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对 Y_3 的影响极显著, X_3 、 X_1X_3 对 Y_3 的影响显著。

去除不显著项后,得到取种块开合角、进种筒安装高度及排种器转速对取种单粒率 Y_1 、漏取率 Y_2 、重取率 Y_3 的回归方程为

$Y_1=94.15-0.12X_1-0.07X_2+0.06X_3+0.1X_1X_3-0.26X_1^2-0.18X_2^2-0.19X_3^2$ (28)

$Y_2=2.55+0.07X_1+0.02X_2-0.04X_1X_3+0.12X_1^2+0.05X_2^2+0.08X_3^2$ (29)

$Y_3=3.29+0.05X_1-0.04X_3-0.06X_1X_3+0.14X_1^2+0.129X_2^2+0.112X_3^2$ (30)

剔除不显著项后,排种器取种单粒率的回归模型中, $P<0.000 1$,决定系数 $R^2=0.98$,模型极显著,回归方程的预测值与实际值有较高相关性;漏取率的回归模型中 $P<0.000 1$,决定系数 $R^2=0.93$,模型极显著,回归方程的预测值与实际值有较高相关性;漏取率的回归模型中 $P<0.000 1$,决定系数 $R^2=0.95$,模型极显著,回归方程的预测值与实际值有较高相关性。

5.3 响应曲面

为直观分析各影响因素的交互作用对于各项评价指标的影响,通过 Design-Expert 12.0 软件绘制取种块开合角、进种筒安装高度及排种器转速对取种单粒率、漏取率、重取率的响应曲面,如图19所示。

由图19a、19b可知,当排种器转速一定时,随着取种块开合角的增大,取种单粒率先增大后减小,这

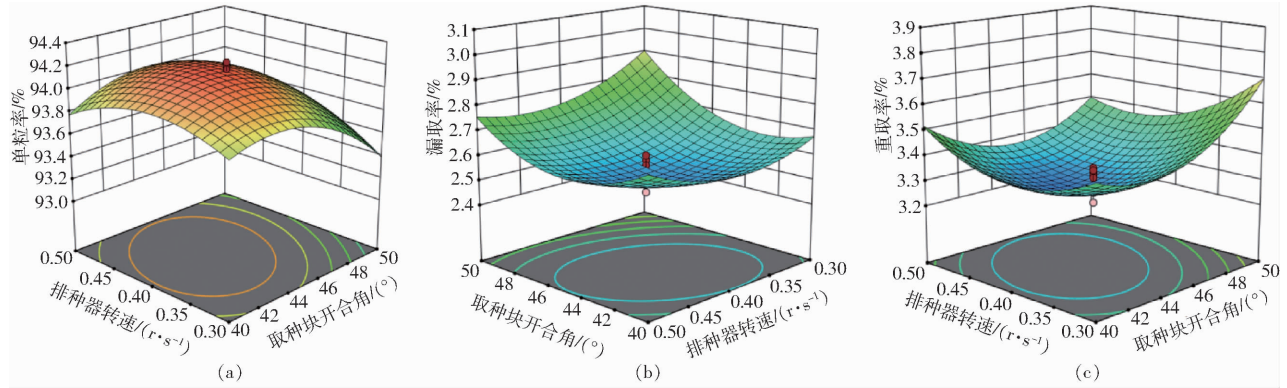


图19 各因素交互作用对取种性能的响应曲面

Fig.19 Corresponding surfaces of interaction of various factors on seeding performance

是由于当取种块开合角过小时不利于特征尺寸较大的籽粒进入取种空间,造成漏取,取种块开合角度过大时则对特征尺寸较小的籽粒不能形成有效压持,使籽粒在取种过程中掉落,导致漏取率提高;当取种块开合角一定时,随着排种器转速的增大,取种单粒率先增大后减小,其原因为当排种器转速过低时,种群的自转流速缓慢,籽粒指向取种空间的加速度变化率降低,造成漏取,当转速过高时,取种块经过种群的时间减少,取种块攫取籽粒的时间降低,使籽粒在有限时间内不能进入取种空间,造成漏取。

由图 19c 可知,当排种器转速一定时,随着取种块开合角的增大,重取率先减小后升高,这是由于当取种块开合角度减小时,仍会对特征尺寸较小的籽粒形成压持作用,当同时有两粒较小尺寸的籽粒进入取种空间形成厚度方向的堆叠压持时,会在取种空间内收到较大的压持力,导致多余攫取的籽粒不能在运种过程中掉落,造成重取,当取种块开合角增大时,一次性攫取的籽粒数量明显增多,造成重取;当取种块开合角一定时,随着排种器转速的增大,重取率先减小后增大,其原因为当转速过低时,籽粒在随取种块运动过程中离心力降低,使多余攫取的种子难以在自身受力情况下自行脱落,导致重取率提高,而当转速过高时,种群自转流速增大,籽粒在短时间内迅速进入取种空间,易导致处于抢位处的籽粒形成“卡位”,使多余充取的种子不能有效清除,导致重取率提升。

5.4 参数优化

为得到影响摆动夹取式玉米精量排种器取种性能的最佳参数组合,以提高取种单粒率、降低漏取率和重取率为目标,对排种器的取种块开合角、进种筒安装高度及排种器转速进行多目标优化分析,得到优化模型为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_3(x_1, x_2, x_3) \\ 36.6^\circ \leq x_1 \leq 53.4^\circ \\ 23.2\text{ mm} \leq x_2 \leq 56.8\text{ mm} \\ 0.23\text{ r/s} \leq x_3 \leq 0.57\text{ r/s} \end{cases} \quad (31)$$

通过分析计算,得到最优参数组合为:取种块开合角 43.87°、进种筒安装高度 37.84 mm、排种器转速 0.41 r/s,此时取种单粒率为 94.18%、漏取率为 2.53%、重取率 3.29%。

6 台架验证试验

为检验摆动夹取式玉米精量排种器的实际作业

性能,制作了一台物理样机,依据国家标准^[32-33]开展台架验证试验,试验于新疆天诚农机具制造有限公司播种机性能实验室进行,如图 20 所示。

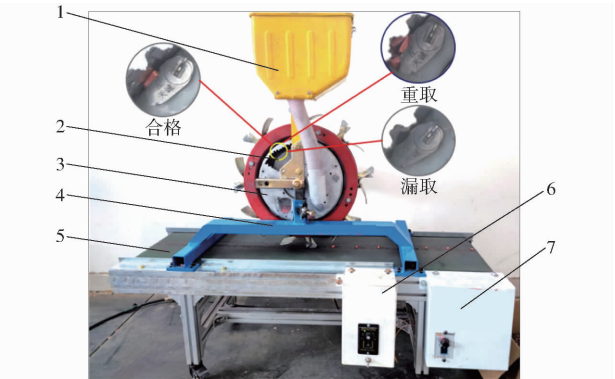


图 20 台架验证试验

Fig. 20 Bench validation test

1. 种箱 2. 观察窗 3. 排种器 4. 支架 5. 传送带 6. 控制台
7. 稳压箱

依据排种器加工精度及试验台的控制精度,将最佳参数组合圆整为:取种块开合角 44°、进种筒安装高度 38 mm、排种器转速 25 r/min。每组测定 250 穴数据,重复 3 次取平均值,试验结果如表 6 所示。由表 6 可知,在最佳参数组合下,得到排种合格指数为 94.11%、漏播指数为 2.52%、重播指数为 3.37%,该结果验证了仿真结果的合理性,满足行业标准要求。

表 6 试验验证结果

Tab. 6 Test validation results %

试验序号	合格指数	漏播指数	重播指数
1	94.26	2.49	3.38
2	93.71	2.51	3.34
3	94.36	2.56	3.39
平均值	94.11	2.52	3.37

7 结论

(1)设计了一种摆动夹取式玉米精量排种器,介绍了其结构及工作原理,并对取种过程主要工作部件参数进行设计;通过建立取种及持种过程力学模型进行力学分析和运动学分析,得出影响排种器取种效果的各项因素。

(2)建立 EDEM 虚拟仿真模型,分析种群运动速度曲线的影响因素,并对排种器取种性能进行仿真验证,结果表明,种群速度与排种器转速呈正相关,与种群高度呈负相关;排种器取种性能曲线总体平稳,存在漏取与重取段。

(3)以取种块开合角、进种筒安装高度及排种器转速为试验因素,以取种单粒率、漏取率和重取率

为评价指标开展二次正交旋转组合仿真试验,并对仿真结果进行优化,得到提高取种性能的最佳工作参数组合为取种块开合角 43.87° 、进种筒安装高度 37.84 mm 、排种器转速 0.41 r/s ,将最优组合圆整后进行台架验证试验,试验结果表明,摆动夹取式玉米精量排种器在最优参数组合下的排种合格指数为 94.11% 、漏播指数为 2.52% 、重播指数为 3.37% ,满足行业标准要求。

参 考 文 献

[1] 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 Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double-side seed cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 29–39. (in Chinese)

[2] 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 Zhaocong, HE Shun, ZHONG Jiyu, 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)

[3] 张春岭,吴晓庆,谢东波,等. 电液混合调控式大蒜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 166–174.
ZHANG Chunling, WU Xiaoqing, XIE Dongbo, et al. Design and experiment of electro-hydraulic mixed garlic planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 166–174. (in Chinese)

[4] 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 Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1–14. (in Chinese)

[5] 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 Hongchang, GAO Fang, ZHAO Zhan, et al. Analysis about dual dynamic mechanism of popularizing conservation tillage technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 12–16, 56. (in Chinese)

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

[7] 张昆,衣淑娟. 玉米精量播种装置的研究进展[J]. 农机化研究, 2018, 40(7): 257–262.
ZHANG Kun, YI Shujuan. Research progress in precise seeding device for maize[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 257–262. (in Chinese)

[8] 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 Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, 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)

[9] 石林榕,孙步功,赵武云,等. 弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器排种性能参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 88–95, 207.
SHI Linrong, SUN Bugong, ZHAO Wuyun, et al. Optimization and test of performance parameters of elastic airsuction type corn roller seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 88–95, 207. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 王奇,朱龙图,李名伟,等. 指夹式玉米免耕精密播种机振动特性及对排种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 9–18.
WANG Qi, ZHU Longtu, LI Mingwei, et al. Vibration characteristics of corn no-tillage finger-type precision planter and its effect on seeding performance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 9–18. (in Chinese)

[12] 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 Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 68–76. (in Chinese)

[13] 王业成,高云鹏,台文硕,等. 指夹式马铃薯精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 49–58.
WANG Yecheng, GAO Yunpeng, TAI Wenshuo, et al. Design and test of pickup finger potato precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 49–58. (in Chinese)

[14] 耿端阳,李玉环,孟鹏祥,等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 38–45.
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 38–45. (in Chinese)

[15] 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): 38–39.
LI Juanjuan, ZHANG Heping, BI Xinsheng, 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)

[16] 王国伟,夏晓蒙,朱庆辉,等. 基于DEM–CFD耦合的辅助取种气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1208–1221.

- WANG Guowei, XIA Xiaomeng, ZHU Qinghui, et al. Design and experiment of soybean high-speed precision vacuum seed metering with auxiliary filling structure based on DEM – CFD[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(5): 1208 – 1221. (in Chinese)
- [17] 张春艳, 康建明, 彭强吉, 等. 棉花气吸滚筒式穴播器二次投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 106 – 116.
- ZHANG Chunyan, KANG Jianming, PENG Qiangji, et al. Design and test of secondary seed feeding mechanism of air-suction roller dibbler for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 106 – 116. (in Chinese)
- [18] 顿国强, 刘文辉, 毛宁, 等. 交替换岗式大豆小区育种排种器优化设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(1): 285 – 296.
- DUN Guoqiang, LIU Wenhui, MAO Ning, et al. Optimization design and experiment of alternate post changing seed metering device for soybean plot breeding[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(1): 285 – 296. (in Chinese)
- [19] LYSYCH M N, CHERNYSHEV V V, NAGAYTSEV V M. Design and simulation of seed metering device for aerosowing of forest pelleted seeds[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2032(1): 12 – 14.
- [20] GUZMAN L J, CHEN Ying, LANDRY H. Discrete element modeling of seed metering as affected by roller speed and damping coefficient[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(1): 189 – 198.
- [21] 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 玉米种子分级处理对气力式精量排种器播种效果的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 109 – 113.
- LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Effects of maize seed grading on sowing quality by pneumatic precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 109 – 113. (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] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 58 – 67. (in Chinese)
- [24] 耿端阳, 张明源, 何珂, 等. 倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 68 – 76.
- GENG Duanyang, ZHANG Mingyuan, HE Ke, et al. Design and experiment of declined disc plate with double ring corn metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 68 – 76. (in Chinese)
- [25] 张学军, 陈勇, 史增录, 等. 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 27 – 36.
- ZHANG Xuejun, CHEN Yong, SHI Zenglu, et al. Design and experiment of double-storage turntable cotton vertical disc hole seeding and metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 27 – 36. (in Chinese)
- [26] 王金武, 唐汉, 关睿, 等. 动定指勾夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 48 – 57.
- WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 48 – 57. (in Chinese)
- [27] 张昆, 衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器取种性能仿真与试验优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 78 – 86.
- ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 78 – 86. (in Chinese)
- [28] 陈泽仁. 玉米种子颗粒群体建模方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- CHEN Zeren. An approach to and validation of maize-seed-assembly modelling based on the discrete element method[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [29] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36 – 42.
- WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 – 42. (in Chinese)
- [30] 刘瑞, 李衍军, 刘忠军, 等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 1 – 8, 18.
- LIU Rui, LI Yanjun, LIU Zhongjun, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters of coated maize seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 1 – 8, 18. (in Chinese)
- [31] 中华人民共和国农业部. 播种机质量评价技术规范: NY/T 1143—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [32] 中国国家标准化管理委员会. 单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [33] 中华人民共和国工业和信息化部. 单粒(精密)播种机技术条件: JB/T 10293—2013[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [34] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.