

苏微,袁波,赖庆辉,等.双列限姿导引侧充式玉米高速精量排种器设计与试验[J].华南农业大学学报,2025,46(5): 692-706.
SU Wei, YUAN Bo, LAI Qinghui, et al. Design and test of a double-row high-speed precision corn seed metering device with guided side-filling and posture control[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(5): 692-706.

双列限姿导引侧充式玉米高速精量排种器设计与试验

苏微¹, 袁波¹, 赖庆辉², 周生武¹, 宛渊¹, 李如烨¹

(1 昆明理工大学 现代农业工程学院, 云南 昆明 650500; 2 云南师范大学 能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500)

摘要:【目的】针对现有的机械式玉米排种器在高速作业条件下播种质量下降的问题,设计一种双列限姿导引侧充式玉米高速精量排种器。【方法】采用限姿板配合排种盘和护种盘分级限制引导种子侧充进入充种型孔前的姿态,同时利用径向突变结构辅助种子自重清种,实现高速精量排种作业。结合玉米种子的形状特征与尺寸,分析种子分级限姿导引侧充的原理,确定关键部件的基本结构参数。运用离散元法与多体动力学(Discrete element method and multi-body dynamics, DEM-MBD)耦合的方法,以型孔插件顶部宽度、护种盘后侧高度以及护种盘底部角度为试验因素,以合格指数、重播指数与漏播指数为评价指标,设计二次正交旋转回归组合仿真试验,并开展台架试验验证仿真试验的可靠性。【结果】仿真试验结果表明:在作业速度为12 km/h时,型孔插件顶部宽度为4.65 mm、护种盘后侧高度为5.10 mm、护种盘底部角度为81.86°时,玉米排种质量最优,此时排种合格指数、重播指数和漏播指数分别为92.18%、5.13%和2.69%。台架验证试验结果表明:在作业速度为12 km/h时,排种合格指数为91.45%,与仿真试验的相对误差为0.79%,仿真优化试验结果可靠;在作业速度为8~16 km/h时,合格指数均大于90%,重播指数均小于7%,漏播指数均小于4%,且排种效果优于传统的勺轮式排种器。【结论】设计的排种器对作业速度的适应性较好,满足玉米精量播种的技术要求。

关键词: 机械式排种器; 精量播种; 高速播种; 玉米; 限姿导引; DEM-MBD

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2025)05-0692-15

Design and test of a double-row high-speed precision corn seed metering device with guided side-filling and posture control

SU Wei¹, YUAN Bo¹, LAI Qinghui², ZHOU Shengwu¹, WAN Yuan¹, LI Ruyue¹

(1 College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2 College of Energy and Environmental Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: 【Objective】Aiming at the problem that the existing mechanical corn seed metering device decreases the seeding quality at the condition of high speed operation, a double-row high-speed precision corn seed metering device with guided side-filling and posture control was designed. 【Method】The posture limiting plate, combined with the seed metering plate and the seed protection plate, was used to limit and guide the posture of seeds before side-filling into the seed filling holes in stages. Meanwhile, the radial mutation structure was used to assist the gravity seed cleaning to achieve high speed and precise seeding. Based on the shape characteristics and dimensions of corn seeds, the principle of staged posture control and guided side-filling and

收稿日期:2025-01-21 网络首发时间:2025-07-10 15:16:59

首发网址:<https://link.cnki.net/urlid/44.1110.s.20250710.1002.002>

作者简介:苏微,主要从事农业机械化生产和管理研究, E-mail: laisubo@163.com; 通信作者: 赖庆辉,主要从事农业机械装备与计算机测控研究, E-mail: laiqinghui007@163.com

基金项目:国家自然科学基金(52165031)

the basic structural parameters of key components were determined. Using the coupled discrete element method and multi-body dynamics (DEM-MBD) approach, with the top width of the orifice plug, the rear height of the seed protection plate, and the bottom angle of the seed protection plate as test factors, and with the qualified index, replay index and leakage index as evaluation indexes, a quadratic orthogonal rotational regression combined simulation test was designed, and the reliability of the simulation test was verified by bench test.

【Result】 The simulation results demonstrated that under an operating speed of 12 km/h, the optimal corn seeding quality was achieved with the following parameters: Orifice plug top width of 4.65 mm, rear height of the seed protection plate of 5.10 mm, and bottom angle of the seed protection plate of 81.86°. Under these conditions, the qualified index, replay index, and leakage index were 92.18%, 5.13%, and 2.69%, respectively. Bench validation tests indicated that at 12 km/h, the qualified index reached 91.45%, showing a relative error of 0.79% compared to the simulation results, thereby confirming the reliability of the simulation optimization. Furthermore, within the operating speed range of 8–16 km/h, the qualified index consistently exceeded 90%, while the replay index and leakage index remained below 7% and 4%, respectively. The seeding performance was notably superior to that of traditional spoon-wheel seed metering devices. **【Conclusion】** The designed seed metering device exhibits good adaptability to varying operating speeds and fulfills the technical requirements for precision corn seeding.

Key words: Mechanical seed metering device; Precision seeding; High-speed seeding; Corn; Guided posture control; DEM-MBD

玉米已成为我国种植面积最大的粮食作物,为了满足玉米机械化种植高精度与高效率的要求,高速精量排种技术是玉米播种装备发展的重要方向^[1-3]。

高速精量排种器是实现机械化高速精量播种的核心工作部件,其排种性能直接影响播种质量^[4-7]。按工作原理可将排种器分为机械式^[8-9]和气力式^[10-12]2种。机械式精量排种器因结构简单、可靠性好、制造和使用成本低等优点,在我国中小规模的农业生产中具有广泛的应用前景^[13-17]。但随着排种器作业速度的提高,机械式精量排种器在高速作业时,难以实现稳定的充种和清种,从而导致漏播和重播现象严重,无法发挥其优点。

为提升机械式排种器在高速作业时的充种性能, Ma 等^[18]针对现有机械式排种器作业速度慢、对种子适应能力差的问题,设计了一种主动夹取种子的取种滑块。Chen 等^[19]为提高勺轮式排种器的高速作业性能,利用离散元法 (Discrete element method, DEM) 对种勺的结构参数进行了优化。都鑫等^[20]设计了一种扰种条增加充种区种群活跃度、降低种群内摩擦力,从而提高了机械式排种器的充种率和对速度的适应性。在高速清种性能提升研究方面,唐汉^[21]在排种盘上设计了一种振动凹凸面结构,利用机械振动与清种毛刷配合进行复合清种,提高清种效果。李玉环等^[22]采用双侧清种方法,有效降低了漏清率,对高速条件下的过清率也有所改

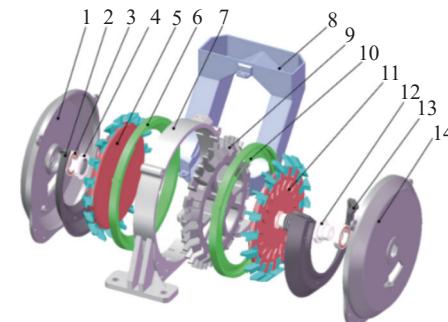
善。上述研究取得了一些成果,但是主要侧重于优化型孔、增设促充和改进清种结构来提高排种器的工作性能,对于高速作业条件下,种子无序堆积、充种姿态各异的状态并未改变,这将会影响排种器的充种与清种过程,从而造成机械式排种器在高速作业时作业性能下降。

为此,本文设计一种基于分级限姿导引侧充-径向突变辅助清种的双列限姿导引侧充式玉米高速精量排种器。该排种器可通过分离种群并规划种子运动轨迹的方法,有效降低种子无序堆积、充种姿态各异对充种过程的干扰,同时借助径向突变辅助清种结构,提升排种器在高速作业条件下的清种效率。根据种子的物理特性和充种阶段种子的填充姿态,结合对排种器工作过程的理论分析,进一步确定关键部件的基本结构参数。采用 DEM 与多体动力学 (Multi-body dynamics, MBD) 耦合 (DEM-MBD) 仿真试验和响应面优化方法对充种型孔的关键结构参数进行优化,并开展台架试验,验证仿真试验的可靠性和排种器高速作业时的作业速度适应性,以期为机械式高速精量排种器的研发提供参考。

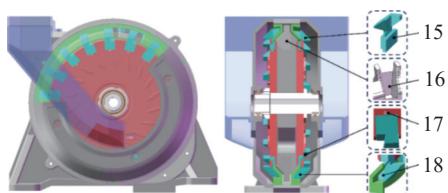
1 排种器结构与工作原理

双列限姿导引侧充式玉米高速精量排种器总体结构如图 1 所示,主要由前壳、左限姿板、轴承、

轴端螺母、左排种盘、左护种盘、外壳、Π 形入种管、导种盘、右护种盘、右排种盘、传动轴、右限姿板、后壳、型孔插件、压缩弹簧等部件组成(图 1a)。



a: 排种器结构图
a: Structural diagram of seed metering device



b: 排种器装配图
b: Assembly drawing of seed metering device

1: 前壳, 2: 左限姿板, 3: 轴承, 4: 轴端螺母, 5: 左排种盘, 6: 左护种盘, 7: 外壳, 8: Π 形入种管, 9: 导种盘, 10: 右护种盘, 11: 右排种盘, 12: 传动轴, 13: 右限姿板, 14: 后壳, 15: 型孔插件, 16: 导种槽, 17: 压缩弹簧, 18: 充种型孔。

1: Front shell, 2: Left posture limiting plate, 3: Bearing, 4: Shaft end nut, 5: Left seed metering plate, 6: Left seed protection plate, 7: Shell, 8: Π shaped seed intake tube, 9: Seed guiding tray, 10: Right seed protection plate, 11: Right seed metering plate, 12: Drive shaft, 13: Right posture limiting plate, 14: Back shell, 15: Orifice plug, 16: Seed guiding channel, 17: Compression spring, 18: Seed filling hole.

图 1 排种器结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of seed metering device

如图 1b 所示, 左、右排种盘分别装有 18 个均匀分布的型孔插件, 通过压缩弹簧分别卡入左、右护种盘中, 共同组成充种型孔; 把左、右护种盘固定在外壳上, 将传动轴依次穿过右排种盘、导种盘和左排种盘后用轴端螺母固定, 通过轴承连接到前、后壳体上; 前、后壳体上分别固定左、右限姿板, 与排种盘和护种盘共同组成种子的分级限姿引导通

道, 从而实现分级限制引导种子姿态的目的。

种子从 Π 形入种管进入前、后对称种室后, 依次经过充种、清种、递种、携种、投种这 5 个阶段。充种阶段可以分为 2 个过程: 在过程一中, 种子经过限姿板、排种盘、型孔插件以及护种盘共同组成的限姿通道以合适的姿态到达预充种位置, 完成分级限姿引导过程; 在过程二中, 随着排种盘的转动, 预充种位置的种子侧充进入护种盘与型孔插件共同组成的充种型孔内, 完成整个充种过程。在清种阶段中, 种子随排种盘转动到清种区域时, 在重力以及型孔插件径向突变产生的摩擦力的作用下, 完成快速清种, 清种完成后, 充种型孔内仅余单粒种子。在递种阶段中, 单粒种子随排种盘转动到护种盘的递种口时, 种子在递种口失去护种盘的支持力, 将在重力的影响下运动至导种盘的导种槽内, 完成递种过程。在携种阶段中, 种子随着导种盘的转动运动至投种口, 完成携种过程。在投种阶段中, 排种器外壳内壁对种子的支持力消失, 种子在重力的作用下从投种口排出, 完成整个排种过程。

2 关键部件设计

2.1 种子的形状特征及尺寸

种子的形状特征及尺寸是排种器关键零部件结构设计的重要依据。本文选用‘郑单 958’玉米种子为研究对象, 根据形状特征将宽厚比 >1.5 的玉米种子定义为扁平种子, ≤ 1.5 的定义为圆粒种子。然后根据玉米种子尺寸大小分为大圆粒、小圆粒、大扁平和小扁平 4 类, 其中 l_0 和 l_1 分别为圆粒种子和扁平种子的长度, w_0 和 w_1 分别为圆粒种子和扁平种子的宽度, t_0 和 t_1 分别为圆粒种子和扁平种子的厚度。选取 1000 粒玉米种子, 使用游标卡尺测量它们的三轴尺寸, 测量结果以及 2 种种子的占比如表 1 所示。

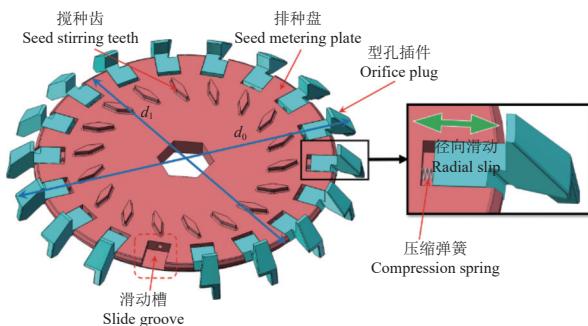
表 1 玉米种子三轴尺寸和分布占比
Table 1 Three-axis size and distribution proportion of corn seeds

| 种子类型 Seed type | 大小 Size | 长度/mm Length | | | 宽度/mm Width | | | 厚度/mm Thickness | | | 占比/% Proportion |
|-------------------|------------|-----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|
| | | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 平均值 Avg. | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 平均值 Avg. | 最小值 Min. | 最大值 Max. | 平均值 Avg. | |
| | | | | | | | | | | | |
| 圆粒 Round | 大 | 10.57 | 11.68 | 11.05 | 8.55 | 9.71 | 9.07 | 7.51 | 8.49 | 7.73 | 10.6 |
| | 小 | 9.52 | 10.49 | 9.92 | 7.31 | 8.47 | 7.89 | 6.16 | 7.44 | 6.87 | 11.6 |
| | | 平均值 | | | 10.34 | | | 8.77 | | | 7.06 |
| 扁平 Flat | 大 | 11.53 | 12.82 | 12.13 | 8.82 | 9.98 | 9.42 | 5.06 | 5.84 | 5.41 | 48.5 |
| | 小 | 10.46 | 11.42 | 10.99 | 7.62 | 8.79 | 8.27 | 4.17 | 5.00 | 4.55 | 29.3 |
| | | 平均值 | | | 11.68 | | | 9.15 | | | 5.06 |

2.2 排种盘结构设计

排种盘的直径决定型孔插件的数量及分布, 对整机性能至关重要。《农业机械设计手册》^[23]中, 机械式排种器的种盘直径通常取 140~260 mm, 不宜过大或过小。排种盘直径过小时, 排种器高速作业时转速提升, 不利于排种均匀、稳定; 排种盘直径过大时, 型孔插件数量增多, 有利于降低排种器的工作转速, 提高排种稳定性, 但也会相应提升制造成本、装配难度及作业功耗。故本文综合考虑后选取排种盘外径 d_0 为 220 mm, 内径 d_1 为 180 mm。

为实现型孔插件的径向滑动, 排种盘上设计型孔插件的滑动槽, 型孔插件在压缩弹簧的弹力作用下在滑动槽内径向滑动。同时排种盘上设有搅种齿用于搅动种室内的种群, 在增加种群流动性的同时改变种群中种子的姿态, 提高充种效率(图 2)。



d₀: 排种盘外径, d₁: 排种盘内径。

d_0 : Outer diameter of seed metering plate, d_1 : Inner diameter of seed metering plate.

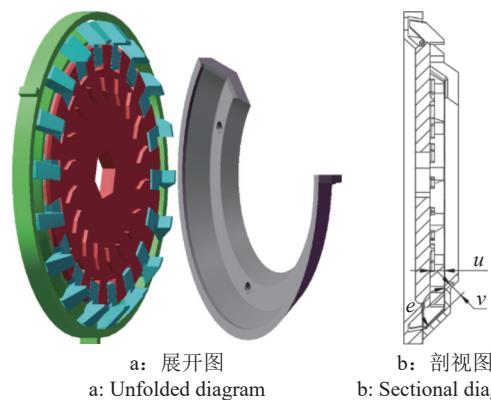
图 2 排种盘装配示意图

Fig. 2 Assembly schematic diagram of seed metering plate

2.3 限姿板结构设计

限姿板配合排种盘与型孔插件形成限姿通道, 在种子进入充种型孔前预先调控种子姿态, 使种子以理想的姿态到达护种盘与型孔插件共同组成的充种型孔前端的预充种位置。限姿板确保排种器在高速作业时种子快速地进入充种型孔, 从而保证排种器在高速作业时的充种速度和充种效果的稳定, 提升排种性能。限姿板的装配展开图和剖视图如图 3 所示。

由于种群中扁平种子的占比较大, 所以选取扁平种子为主要研究对象。根据测量的玉米种子的三轴尺寸特征, 可以发现扁平种子的长度均大于 10 mm, 宽度和厚度均小于 10 mm。因此设计限姿通道竖直距离 u 为 10 mm, 限姿通道倾斜距离 v 为 10 mm, 为使种子顺利滑至预充种位置, 限姿通道夹角 e 应大于种子的摩擦角 (28°) 加 90° , 即 118° 。综合考虑, 设计夹角 e 为 135° , 使限姿板与排种盘和



u: 限姿通道竖直距离, v: 限姿通道倾斜距离, e: 限姿通道夹角。
u: Vertical distance of posture limiting channel, v: Inclination distance of posture limiting channel, e: Angle of posture limiting channel.

图 3 限姿板结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of posture limiting plate

护种盘配合来调控玉米种子的充前姿态。

2.3.1 分级限姿引导过程分析 根据种子的分级限姿引导过程, 并基于限姿板、排种盘以及护种盘的结构特征, 将种子受限区域分为 4 个区域(图 4)。

首先是一级限姿引导, 种子从 II 形入种管进入种室后到达区域①, 在区域①的种子姿态大致分为 6 种, 分别为: 正面平躺、侧面平躺、侧面竖立、正面竖立、底面竖立和底面平躺, 其中正面平躺和侧面平躺的扁平种子由于长度方向上垂直于排种盘, 而区域②限姿通道竖直距离 u 为 10 mm, 所以这 2 种姿态的种子无法进入区域②, 因此进入区域②的种子姿态大致分为 4 种, 分别是: 侧面竖立、正面竖立、底面竖立和底面平躺。其次是二级限姿引导, 区域③限姿通道倾斜距离 v 为 10 mm, 区域②与区域③的限姿通道夹角 e 为 135° , 所以区域②的正面竖立姿态的玉米种子无法进入区域③, 其余 3 个姿态则沿限姿板斜面滑跃进入区域③, 所以区域③的种子姿态大致分为 4 种, 分别是侧面竖立、侧面斜躺、底面竖立和底面斜躺。最后是三级限姿引导, 区域④的种子在重力、离心力和种群间作用力的综合作用下, 到达区域④的预充种位置, 区域④的种子姿态大致分为 4 种, 分别是侧面竖立、侧面平躺、底面竖立和底面平躺, 从而实现了调整玉米种子进入充种型孔前姿态的目的, 使种子更快、更稳定地进入充种型孔。

2.3.2 种子运动轨迹力学分析 根据对种子分级限姿引导过程的分析, 将种子的运动轨迹分为轨迹一和轨迹二 2 种(图 5a)。并对限姿通道的 4 个区域内种子的运动过程进行受力分析(图 5b)。

在区域①中, 种子受力为限姿板对种子的支持力 F_a 、种子与排种盘之间的摩擦力 f_b 、种子与限姿

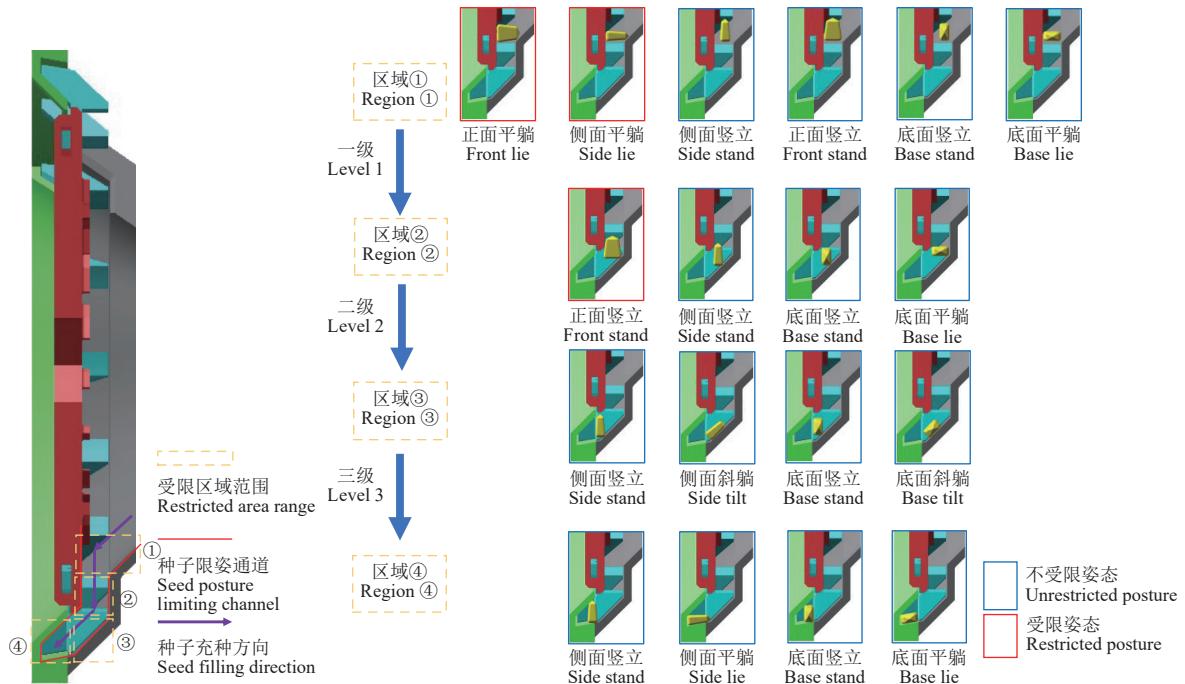
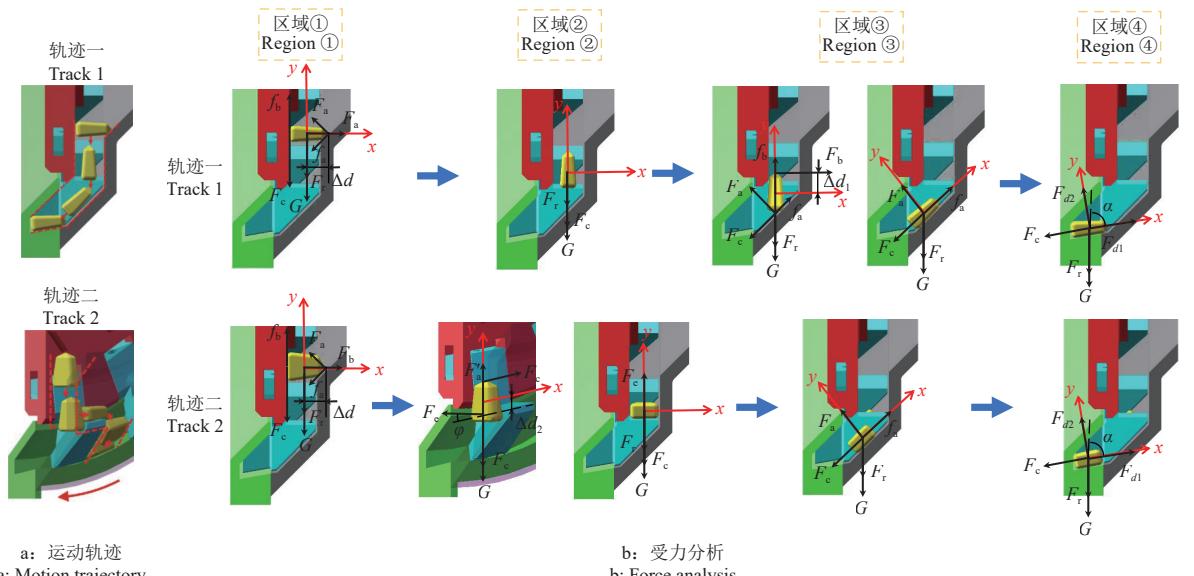


图 4 玉米种子分级限姿引导过程分析

Fig. 4 Analysis of staged posture control and guiding process for corn seeds



F_a : 限姿板对种子的支持力, f_a : 种子与限姿板之间的摩擦力, F_b : 排种盘对种子的支持力, f_b : 种子与排种盘之间的摩擦力, F_c : 种子之间的接触力, $F_{c'}$: 型孔插件与种子之间的接触力, F_{d1} : 护种盘底部对种子的支持力, F_{d2} : 护种盘后侧对种子的支持力, F_r : 种子受到的离心力, F_a' : 限姿板对种子的支持力在 y 轴的分力, G : 种子所受重力; Δd : 种子与限姿板接触点的质心距; Δd_1 : 种子与排种盘接触点的质心距; Δd_2 : 种子与型孔插件接触点的质心距; α : 护种盘底部角度。

F_a : Seed support force by posture limiting plate, f_a : Friction between seed and posture limiting plate, F_b : Seed support force by seed metering plate, f_b : Friction between seed and seed metering plate, F_c : Contact force between seeds, $F_{c'}$: Contact force between orifice plug and seed, F_{d1} : Seed support force by the bottom of seed protection plate, F_{d2} : Seed support force by the rear side of seed protection plate, F_r : Centrifugal force on seed, F_a' : y -axis component of seed support force by posture limiting plate, G : Gravity on seed; Δd : Centroidal distance from seed to contact point with posture limiting plate; Δd_1 : Centroidal distance from seed to contact point with seed metering plate; Δd_2 : Centroidal distance from seed to contact point with orifice plug; α : Bottom angle of seed protection plate.

图 5 种子限姿过程中的运动轨迹与受力分析

Fig. 5 Motion trajectory and force analysis in the process of seed posture limiting

板之间的摩擦力 f_a 、种子之间的接触力 F_c 、向种子质心取矩可得:

$$\sum M = 0.5l_1(F_c - f_b) + \frac{\sqrt{2}}{2}\Delta d(F_a - f_a), \quad (1)$$

式中, M 为种子受力 \times 力臂所产生的使种子旋转的力矩, Δd 为种子与限姿板接触点的质心距, l_1 为扁平种子的平均长度。

种子在排种盘径向 (y 轴向) 的合力 F_y 与轴向

(x 轴向)的合力 F_x 满足:

$$\begin{cases} F_y = G + F_r + F_c + \frac{\sqrt{2}}{2}(f_a - F_a) - f_b \geq 0 \\ F_x = F_b - \frac{\sqrt{2}}{2}(F_a + f_a) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} G = mg \\ f_a = \mu F_a \\ f_b = \mu F_b \\ F_r = m\omega^2 r \end{cases}, \quad (3)$$

式中, m 为玉米种子的质量, g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 , μ 为种子与排种器之间的滑动摩擦因数, ω 为排种器角速度, G 为种子所受重力, r 为种子受到的离心力半径, F_r 为种子受到的离心力, F_b 为排种盘对种子的支持力。

当种子即将调整姿态时, 质心距 Δd 约为种子长度的 $1/2$, 因此取 Δd 为 $0.5l_1$, 代入公式(1)并联立公式(2)、(3), 得到种子质心处的合力矩大于 0, 因此种子将绕质心转动。完成姿态调控后, 种子由区域①进入区域②。

在区域②中, 当长轴垂直于排种盘的种子完成调姿后, 种子运动轨迹可以分为 2 种。

第 1 种是如图 5 轨迹一所示, 种子姿态满足从区域②下落至区域③, 此时种子在区域②中的 F_y 与 F_x 满足:

$$\begin{cases} F_y = G + F_r + F_c \geq 0 \\ F_x = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

由式(4)可知, 在合外力的作用下, 此时种子将沿排种盘径向方向由区域②下落至区域③。

第 2 种是如图 5 轨迹二所示, 种子姿态保持正面竖立, 此时由于限姿板的角度 e , 部分大扁平种子将无法从区域②下落至区域③, 此时种子受力为型孔插件与种子之间的接触力 F_e 、 F_c , 向种子质心取矩可得:

$$\sum M = 0.5l_1 F_c + \Delta d_2 F_e \cos \varphi, \quad (5)$$

式中, Δd_2 为种子与型孔插件接触点的质心距, φ 为型孔插件侧面角度。

种子的 F_y 与 F_x 满足:

$$\begin{cases} F_y = G + F_r + F_e \sin \varphi + F_a' = 0 \\ F_x = 0.5l_1 F_c + \Delta d_2 F_e \cos \varphi \geq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

其中,

$$F_a' = \frac{\sqrt{2}}{2} F_a, \quad (7)$$

式中, F_a' 为限姿板对种子的支持力在 y 轴的分力。

当种子即将调整姿态时, 质心距 Δd_2 约为种子长度的 $1/3$, 因此取 Δd_2 为 $0.3l_1$, 代入公式(5)并联立公式(3)、(6)、(7), 得到种子质心处的合力矩大于 0, 因此种子将绕质心转动。完成姿态调控后, 种子以底面平躺姿态平躺在型孔插件上方。

此时种子的 F_y 与 F_x 满足:

$$\begin{cases} F_y = G + F_r + F_c - F_e = 0 \\ F_x = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

由式(8)可知, 此时种子在排种盘径向截面中的合外力为 0。而随着排种盘的转动, 种子失去型孔插件的支持力 F_e 后, 由区域②进入区域③。

在区域③中, 部分保持侧面竖立姿态的大扁平种子在刚到达时, 种子受力为 F_b 、 F_a 、 f_a 、 F_c , 向种子质心取矩可得:

$$\sum M = \frac{\sqrt{2}}{4} l_1 (F_c + F_a - f_a) + \Delta d_1 F_b, \quad (9)$$

式中, Δd_1 为种子与排种盘接触点的质心距。

种子的 F_y 与 F_x 满足:

$$\begin{cases} F_y = G + F_r + \frac{\sqrt{2}}{2} (F_c - f_a - F_a) - f_b = 0 \\ F_x = \frac{\sqrt{2}}{2} (F_a + F_c - f_a) - F_b \geq 0 \end{cases}. \quad (10)$$

当种子即将调整姿态时, 质心距 Δd_1 约为种子长度的 $1/2$, 因此取 Δd_1 为 $0.5l_1$, 代入公式(9)并联立公式(3)、(10), 得到种子质心处的合力矩大于 0, 因此种子将绕质心进行转动完成姿态调控。

完成姿态调控后, 区域③的种子在与限姿板接触面法线方向 (y 轴向) 的合力 F_y' 和接触面方向 (x 轴向) 的合力 F_x' 满足:

$$\begin{cases} F_y' = \frac{\sqrt{2}}{2} (G + F_r) - F_a = 0 \\ F_x' = \frac{\sqrt{2}}{2} (G + F_r) + F_c - f_a \geq 0 \end{cases}, \quad (11)$$

由式(11)可知, 完成姿态调控后的侧面竖立的大扁平种子与其余 3 种姿态的种子在合外力的作用下, 沿种子与限姿板接触面方向由区域③滑至区域④。

在区域④中, 种子到达预充种位置后, 种子在与护种盘接触面法线方向 (y 轴向) 的合力 F_y'' 和接触面方向 (x 轴向) 的合力 F_x'' 满足:

$$\begin{cases} F_y'' = (G + F_r) \sin \alpha - F_{d2} = 0 \\ F_x'' = (G + F_r) \cos \alpha + F_c - F_{d1} = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

式中, α 为护种盘底部角度, F_{d1} 为护种盘底部对种子的支持力, F_{d2} 为护种盘后侧对种子的支持力。

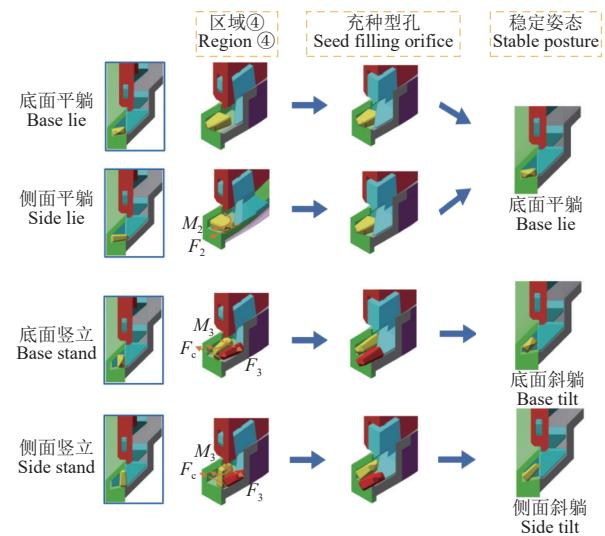
由式(12)可知, 种子到达预充种位置后, 在排种盘径向截面中种子的合外力为 0。随着排种盘的转动, 种子准备进入充种型孔, 完成充种过程。

2.4 充种型孔结构设计

2.4.1 充种型孔填充姿态分析 为了达到单粒精密播种的要求, 排种器在工作时应将有且仅有 1 粒种子填入充种型孔内。如果充种型孔足够大, 种子在充种型孔内的姿势可以大致分为 6 种: 正面竖立、侧面竖立、底面竖立、正面平躺、侧面平躺、底面平躺。此时充种型孔满足种子的各种填充姿态, 但是充种型孔就会很大, 充种时会将多粒种子侧充进入充种型孔中, 这将严重降低排种器的性能, 大大增加排种器作业时的重播率。因此, 在设计充种型孔时, 必须选择理想的充填姿态, 以达到只充填 1 粒种子的目的。

2.4.2 侧充过程分析 充种型孔的结构与尺寸应依据充入型孔内的种子姿态来确定。当种子呈正面竖立、侧面竖立、正面平躺或侧面平躺时, 它们的长度方向均垂直于型孔插件和护种盘构成的充种型孔的下底面和左侧面, 这将导致充种型孔过大, 无法确保在清种后孔内仅剩 1 粒种子。因此, 选择保留底面竖立和底面平躺这 2 种姿态, 并通过调整护种盘与型孔插件的结构参数来限制或调整其他 4 种姿态。

种子经过限姿板限制姿态后到达区域④的预充种位置, 此时种子会随着排种盘的转动进行姿态调整, 然后侧充进入充种型孔内直至达到稳定姿态。如图 6 所示, 底面平躺姿态的种子随着排种盘的转动, 直接充入充种型孔。侧面平躺姿态的种子随着排种盘的转动, 与型孔插件发生接触时, 型孔插件会对种子施加推力 F_2 。由于种子与型孔的接触点在种子的边缘区域, 支持力的作用点与种子质心之间存在一定距离, 此时产生力矩 M_2 。在 M_2 的作用下, 种子姿态被调整为底面平躺, 以便其顺利进入充种型孔, 随后通过排种盘的转动被充入充种型孔。底面竖立和侧面竖立姿态的种子受到种群间其他种子的作用力 F_c 和护种盘上斜面的支持力 F_3 , 产生力矩 M_3 , 在 M_3 的作用下, 种子姿态分别被调整为底面斜躺和侧面斜躺 2 个姿态, 最终随着排种盘的转动侧充进入充种型孔并达到稳定姿态。



F_2 : 型孔插件对种子的推力, F_c : 种子之间的接触力, F_3 : 护种盘上斜面对种子的支持力, M_2 : F_2 产生的力矩, M_3 : F_c 与 F_3 产生的力矩。

F_2 : Thrust of the orifice plug on seed, F_c : Contact force between seeds, F_3 : Seed supporting force by the inclined plane on seed protection plate, M_2 : Torque generated by F_2 , M_3 : Torque generated by F_c and F_3 .

图 6 种子由区域④侧充进入充种型孔的充种过程及稳定姿态

Fig. 6 Seed filling process and stable posture from region ④ to the filling orifice through side-filling

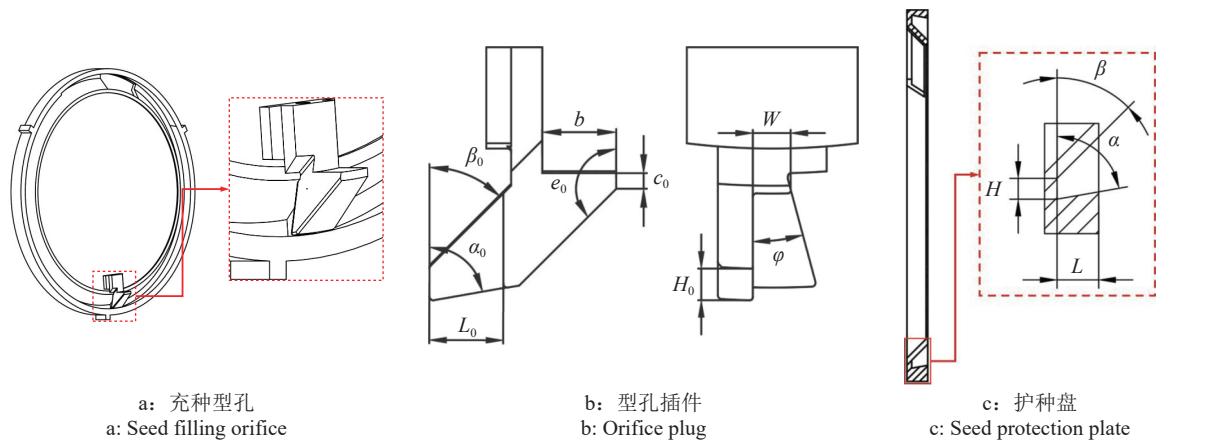
2.4.3 型孔结构参数设计 型孔插件与护种盘共同组成的充种型孔直接与种子接触, 因此, 这 2 个零件的结构形状和参数对排种器工作性能有着重要的影响。

型孔插件结构形状如图 7a、7b 所示, 护种盘结构形状如图 7c 所示, 两者结构参数中与充种型孔相关的有型孔插件顶部宽度 W 、型孔插件底部角度 α_0 、型孔插件底部长度 L_0 、型孔插件前侧高度 H_0 、型孔插件顶部角度 β_0 、和型孔插件侧面角度 φ 、护种盘后侧高度 H 、护种盘底部长度 L 、护种盘底部角度 α 和护种盘顶部角度 β 。其中, φ 的设计主要是为了减小初始清种角, 同时确保不影响充种效果。综合考虑, 选取 $\varphi=15^\circ$ 。为了确保充种型孔的充种效果, 型孔插件和护种盘与充种型孔相关的结构参数需要满足下式:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 \\ \beta = \beta_0 \\ L = L_0 + 0.5 \\ H = H_0 + 0.5 \end{cases}, \quad (13)$$

式中, 0.5 为型孔插件与护种盘的配合间隙宽度。

其余结构参数分别为型孔插件后侧厚度 b 、型孔插件后侧角度 e_0 、型孔插件后侧高度 c_0 、护种盘顶部厚度 c 。结合限姿板与排种盘的尺寸特征, 综合考虑, 取 b 为 9.5 mm, e_0 为 135° , c_0 为 2 mm。为



α_0 : 型孔插件底部角度, β_0 : 型孔插件顶部角度, L_0 : 型孔插件底部长度, H_0 : 型孔插件前侧高度, b : 型孔插件后侧厚度, e_0 : 型孔插件后侧角度, c_0 : 型孔插件后侧高度, W : 型孔插件顶部宽度, φ : 型孔插件侧面角度, α : 护种盘底部角度, β : 护种盘顶部角度, H : 护种盘后侧高度, L : 护种盘底部长度。

α_0 : Bottom angle of orifice plug, β_0 : Top angle of orifice plug, L_0 : Bottom length of orifice plug, H_0 : Front height of orifice plug, b : Rear thickness of orifice plug, e_0 : Rear angle of orifice plug, c_0 : Rear height of orifice plug, W : Top width of orifice plug, φ : Side angle of orifice plug, α : Bottom angle of seed protection plate, β : Top angle of seed protection plate, H : Rear height of seed protection plate, L : Bottom length of seed protection plate.

图 7 型孔插件和护种盘的结构参数设计

Fig. 7 Structural parameter design of orifice plug and seed protection plate

了保证后期台架试验材料制作的护种盘质量, 综合考虑, 取 c 为 3 mm。

为了确保充种型孔不仅适用于扁平种子, 还能有效充入圆粒种子, 通过对扁平种子与圆粒种子的形状特征, 得到护种盘顶部角度 β 需要满足下式:

$$\frac{w_0 - t_1}{0.5w_0} < \tan(180 - \beta), \quad (14)$$

式中, w_0 为圆粒种子的平均宽度, t_1 为扁平种子的平均厚度。

根据公式 (14) 求得 $\beta < 49.77^\circ$ 。 β 不仅影响充种阶段的充种效果, 而且对清种阶段有影响, 因此, 综合考虑, 取 $\beta = 45^\circ$ 。

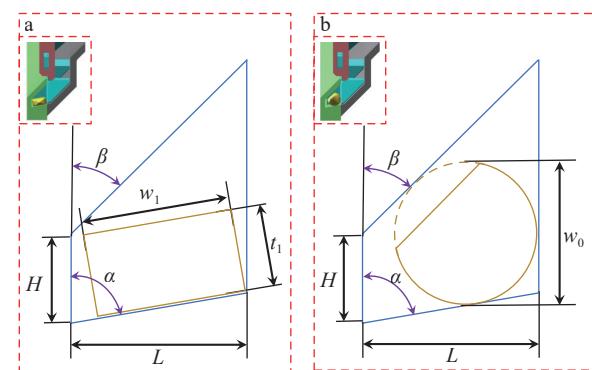
充种型孔的参数取值应依据充入型孔内的种子姿态决定, 由图 6 的侧充过程分析结合扁平种子与圆粒种子的形状特征, 对型孔插件与护种盘的结构参数进行设计。

由扁平种子和圆粒种子与充种型孔的结构示意图(图 8)可知, 充种型孔同时满足充入扁平种子与圆粒种子条件时, 参数 H 、 L 、 α 应满足下式:

$$\begin{cases} t_{1\min} \leq H \leq t_{1\max} \\ w_{1\max} \leq L \leq l_{1\min} \\ w_0 \leq \frac{0.5L}{\tan\beta} + H - \frac{0.5L}{\tan\alpha} \\ \alpha \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (15)$$

式中, $w_{1\max}$ 为扁平种子宽度最大值, $t_{1\min}$ 为扁平种子厚度最小值, $t_{1\max}$ 为扁平种子厚度最大值, $l_{1\min}$ 为扁平种子长度最小值。

通过公式 (15) 得到 L 的范围为 9.98~10.42 mm,



α : 护种盘底部角度, β : 护种盘顶部角度, H : 护种盘后侧高度, L : 护种盘底部长度, w_0 : 圆粒种子宽度, t_1 : 扁平种子厚度, w_1 : 扁平种子宽度。

α : Bottom angle of seed protection plate, β : Top angle of seed protection plate, H : Rear height of seed protection plate, L : Bottom length of seed protection plate, w_0 : Round seed width, t_1 : Flat seed thickness, w_1 : Flat seed width.

图 8 扁平种子 (a) 和圆粒种子 (b) 与充种型孔的结构示意图

Fig. 8 Structural diagram of seed filling orifices with flat seed (a) and round seed(b)

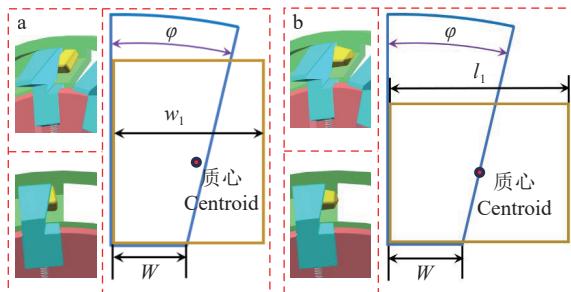
H 的范围为 4.17~5.86 mm, α 的范围为 76.02°~90.00°。综合考虑, 取 $L=10$ mm, 由于 H 和 α 取值范围过大, 为了提高充种型孔对种子的适应性, H 和 α 的取值依据具体试验优化结果。

根据侧充过程分析得到扁平种子侧面斜躺与底面平躺充种型孔的结构示意图(图 9)。为了保证排种盘转动时充种型孔能够顺利充种, 且清种阶段充种型孔内的种子不掉落, 型孔插件顶部宽度 W 的优选范围应靠近种子的质心, 即应满足下式:

$$0.5w_{1\min} \leq W \leq 0.5l_{1\max}, \quad (16)$$

式中, $w_{1\min}$ 为扁平种子宽度最小值, $l_{1\max}$ 为扁平种子长度最大值。

通过公式(16)得到 W 的范围为 3.81~6.41 mm。由于 W 取值范围过大,为了提高充种型孔对种子的适应性,提高清种效果, W 的取值依据具体试验优化结果。



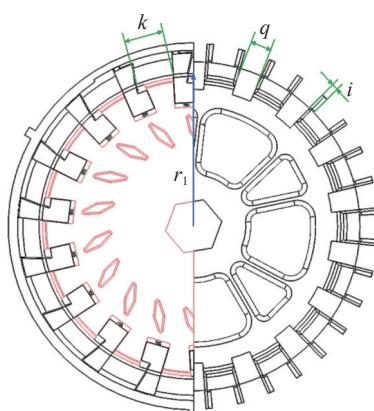
W : 型孔插件顶部宽度, φ : 型孔插件侧面角度, w_1 : 扁平种子宽度, l_1 : 扁平种子长度。

W : Top width of orifice plug, φ : Side angle of orifice plug, w_1 : Flat seed width, l_1 : Flat seed length.

图 9 扁平种子侧面斜躺(a)和底面斜躺(b)与充种型孔的结构示意图

Fig. 9 Structural diagram of seed filling orifices with flat seeds in lateral oblique(a) and basal oblique(b) postures

2.4.4 型孔插件数量及分布 排种器在满足充种、清种、递种、携种和投种 5 个工作阶段的需求下,应尽量增加型孔插件,以便降低排种盘工作转速并提高投种频率,进而提高排种器的作业速度。型孔插件数量及分布相关参数如图 10 所示。



r_1 : 导种槽递种口位置半径, q : 递种口位置宽度, k : 相邻两型孔插件的距离, i : 导种槽两侧厚度。

r_1 : Radius at seed delivery port of seed guiding channel, q : Width of seed delivery port, k : Distance between two adjacent orifices, i : Thickness at both sides of seed guiding channel.

图 10 型孔插件数量分布及相关参数

Fig. 10 Parameters related to the quantity and distribution of the orifice plugs

为确保种子能够及时到达预充种位置,相邻 2 个型孔插件的距离 k 应大于 1.5 倍的种子最大长度,同时为了保证递种时种子能够顺利进入导种盘的导种槽内,导种槽的递种口位置宽度 q 应大于种子最大长度,即型孔插件数量 z 需满足下式:

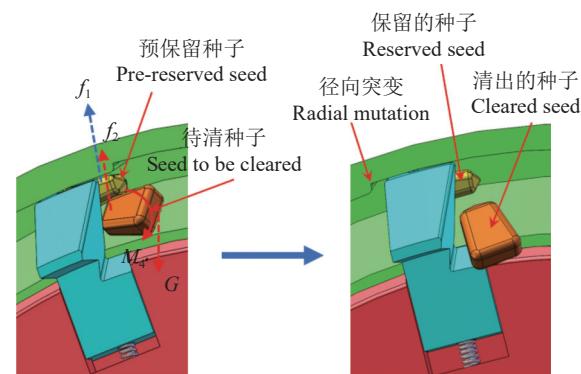
$$\begin{cases} \frac{\pi d_1}{z} - d_1 \arcsin\left(\frac{W_{\max}}{d_1}\right) > d_1 \arcsin\left(\frac{k}{d_1}\right) \\ \frac{2\pi r_1}{2z} - 2r_1 \arcsin\left(\frac{i}{2r_1}\right) > 2r_1 \arcsin\left(\frac{q}{2r_1}\right) \end{cases}, \quad (17)$$

式中, r_1 为导种槽递种口位置半径, W_{\max} 为型孔插件顶部宽度的最大值, i 为导种槽两侧厚度。

取 $i=3$ mm, $r_1=95$ mm, 根据式(17)求得 $z<18.86$, 综合考虑, 取 $z=18$ 。

2.5 护种盘径向突变结构设计

根据侧充过程分析,当充种状态稳定后,充种型孔内种子姿态大致分为 3 种,而底面平躺姿态下充种型孔内的剩余空间可能会有部分较小的种子卡入,导致种子难以利用自重快速完成清种,所以需要考虑底面平躺姿态的清种问题。因此,设计一个径向突变结构辅助种子自重清种,加快清种速度,以达到减小重播指数的目的。如图 11 所示,型孔插件经过径向突变结构时,在压缩弹簧的弹力作用下实现变径。保留种子受到型孔插件对种子的摩擦力 f_1 , 减小对待清种子的压力。待清种子受到型孔插件对种子的摩擦力 f_2 , 同时受到重力 G 作用,此时会产生力矩 M_4 , 最后种子在力矩 M_4 的辅助下沿护种盘斜面下滑,达到快速清种的目的。



f_1 : 型孔插件对保留种子的摩擦力, f_2 : 型孔插件对待清种子的摩擦力, M_4 : f_2 与 G 产生的力矩, G : 种子所受重力。

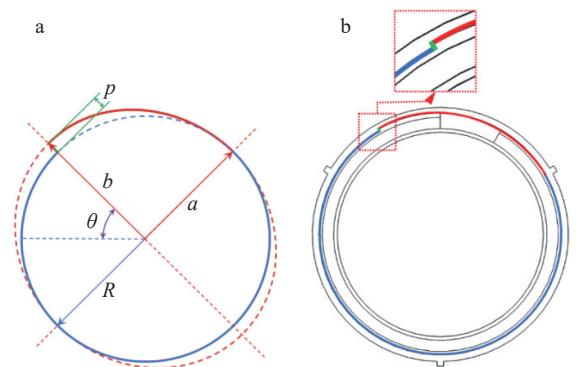
f_1 : Frictional force of orifice plug on retained seed, f_2 : Frictional force of orifice plug on the seed to be cleared, M_4 : Torque generated by f_2 and G , G : Gravity on the seed.

图 11 径向突变辅助清种分析

Fig. 11 Analysis of seed cleaning assisted by radial mutation

为了保证甩出的型孔插件能够及时复位,设计 1 个椭圆结构的护种盘将型孔插件推回原位,如图 12a 所示,其中,椭圆短轴 a 为护种盘圆周半径 R ,长轴 b 为护种盘圆周半径 R 加上径向突变宽度 p 。护种盘径向突变轮廓曲线如图 12b 所示。

为了更好地辅助种子自重清种,避免影响递种过程,综合考虑,径向突变起始角度 θ 取 65° , p 取 1.5 mm。



a: 椭圆短轴, b: 椭圆长轴, R: 护种盘圆周半径, p: 径向突变宽度, θ : 径向突变起始角度。
a: Short axis of ellipse, b: Long axis of ellipse, R: Radius of seed protection plate, p: Radial mutation width, θ : Radial mutation starting angle.

图 12 护种盘外轮廓参数 (a) 和曲线 (b) 设计

Fig. 12 Design of contour parameters (a) and curve (b) of seed protection plate

3 充种型孔参数优化仿真试验

充种型孔的结构参数是影响排种质量的重要因素。为了确定充种型孔的最佳结构参数组合, 设计基于 DEM-MBD 耦合的参数优化仿真试验。

3.1 仿真模型的建立

3.1.1 物理参数设置 为了保证仿真结果的准确性, 需要获取排种器和玉米种子的物理参数与接触参数。排种器与种子接触的关键部件的材料均为树脂。根据前期试验得到种子的泊松比 (0.4)、剪切模量 (1.37×10^8 Pa) 和密度 ($1197 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 树脂的泊松比 (0.5)、剪切模量 (1.77×10^8 Pa) 和密度 ($1180 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 种子间的碰撞恢复系数、静摩擦系数和动摩擦系数分别为 0.18、0.03 和 0.01, 种子与树脂间的碰撞恢复系数、静摩擦系数和动摩擦系数分别为 0.71、0.46 和 0.09。

3.1.2 玉米种子模型建立 本研究中, DEM 方法是基于 EDEM 2021 软件来完成的。为了使模拟更真实, 选取 ‘郑单 958’ 玉米杂交种作为建模对象, 在 EDEM 中采用颗粒填充法将种子分别填充建模, 如图 13 所示。

3.1.3 仿真模型建立 本研究中, DEM-MBD 方法是基于 EDEM 2021 与 RecurDyn 2023 软件来完成的。首先在 SolidWorks 中将装配好的排种器三维模型转化为 x-t 格式, 导入 RecurDyn, 利用 RecurDyn 对机构添加 joint、force、contact 等仿真参数。参数设置完成后, 利用 RecurDyn 中 External SPI 功能模块下的 EDEM 接口模块将各部件以 wall 文件形式导出。将 RecurDyn 中生成的 wall 文件导入 EDEM 中 Geometries 模块下的 Import Geometry from RecurDyn 功能。然后在 EDEM 中建立颗粒工

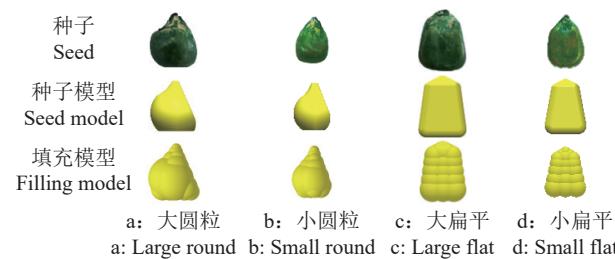
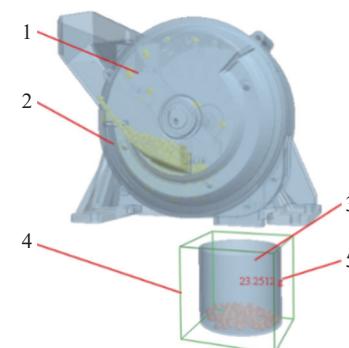


图 13 基于 ‘郑单 958’ 玉米不同类型种子的填充模型

Fig. 13 Filling models based on ‘Zhengdan 958’ corn seeds with different types

厂生成颗粒, 颗粒工厂在 1 s 内生成全部所需玉米籽粒。仿真完成后, 在菜单栏 File 的 Export 功能下的 Simulation Deck 导出生成 1 个 input 文件, 勾选 Set Simulation Time 并设置为 0 s。然后打开 input 文件, 设置 Fixed Time Step 为 1×10^{-6} s, 最后打开 RecurDyn 的 Analysis 功能模块下的 Dyn/Kin, 设置仿真时间为 20 s、step 为 1 000 进行耦合仿真。

为了检测种子排种时间间隔, 在落种口处设置收集器, 并通过 EDEM 后处理功能添加监测器, 记录种子的排出时间间隔, 如图 14 所示。参照《单粒(精密)播种机试验方法》(GB/T 6973—2005)^[24], 排种时间间隔在 0.5~1.5 倍理论时间间隔的为合格, 大于 1.5 倍理论时间间隔的为漏播, 小于 0.5 倍理论时间间隔的为重播。根据计算, 当播种株距为 25 cm、作业速度为 12 km/h 时, 理论排种时间间隔为 0.075 s, 因此当排种时间间隔小于 0.039 s 时为重播, 在 0.039~0.113 s 之间的为合格, 大于 0.113 s 的为漏播。



1: 种子填充模型, 2: 排种器模型, 3: 收集器, 4: 监测器, 5: 收集器内种子质量。
1: Seed filling model, 2: Seed metering device model, 3: Collector, 4: Monitor, 5: Seed mass in the collector.

图 14 排种器 EDEM 后处理
Fig. 14 EDEM post-processing for seed metering device

3.2 参数优化仿真试验

3.2.1 试验因素与试验指标 根据前面的理论分析, 型孔插件顶部宽度 W 、护种盘后侧高度 H 和护种盘底部角度 α 为影响排种器工作性能的主要因素, 以合格指数 Y_1 、重播指数 Y_2 和漏播指数 Y_3 为

试验指标, 以 251 粒种子为 1 组, 记录其排种时间间隔, 共 250 个时间间隔, 每组试验重复 3 次, 取平均值; 各个指标的计算公式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1 = \frac{n_1}{N} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{n_2}{N} \times 100\% \\ Y_3 = \frac{n_3}{N} \times 100\% \end{array} \right. , \quad (18)$$

式中, n_1 为排种时间间隔在 0.5~1.5 倍理论时间间隔的排种数, n_2 为排种时间间隔大于 1.5 倍理论时间间隔的排种数, n_3 为排种时间间隔小于 0.5 倍理论时间间隔的排种数, N 为理论排种数。

3.2.2 试验方案 根据充种型孔结构参数对排种影响的理论分析, 选取试验因素的取值范围: W 为 3.81~6.41 mm、 H 为 4.17~5.86 mm、 α 为 76.02°~90.00°。针对上述关键因素开展三因素五水平二次正交旋转回归组合试验, 试验编码表如表 2 所示。

3.2.3 试验结果与分析 基于 EDEM 和 RecurDyn 耦合仿真的二次正交旋转回归组合试验的试验方案与结果如表 3 所示, 利用 Design-expert 13 软件对试验结果进行回归分析, 试验因素对试验指标的显著性影响见表 4。

表 2 排种试验因素和水平

Table 2 Factors and levels of seed metering experiment

| 水平 Level | 因素 ¹⁾ Factor | | |
|-------------|-------------------------|-----------------|------------------|
| | X_1/mm | X_2/mm | $X_3/(\text{°})$ |
| 1.682 | 6.41 | 5.86 | 90.00 |
| 1 | 5.88 | 5.52 | 87.17 |
| 0 | 5.11 | 5.02 | 83.01 |
| -1 | 4.34 | 4.52 | 78.85 |
| -1.682 | 3.81 | 4.17 | 76.02 |

1) X_1 : 型孔插件顶部宽度, X_2 : 护种盘后侧高度, X_3 : 护种盘底部角度。

1) X_1 : Top width of orifice plug, X_2 : Rear height of seed protection plate, X_3 : Bottom angle of seed protection plate.

表 3 排种试验方案及结果
Table 3 Design and result of seed metering experiment

| 试验编号 Test number | 因素 ¹⁾ Factor | | | 评价指标 Evaluation index | | |
|---------------------|-------------------------|-----------------|------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| | X_1/mm | X_2/mm | $X_3/(\text{°})$ | 合格指数/% Qualified index | 重播指数/% Replay index | 漏播指数/% Leakage index |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 91.47 | 2.28 | 6.25 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 86.46 | 8.71 | 4.83 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 92.16 | 4.14 | 3.70 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 85.48 | 12.06 | 2.46 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 88.73 | 8.45 | 2.82 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 82.74 | 15.11 | 2.15 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 83.27 | 15.41 | 1.32 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 78.56 | 20.21 | 1.23 |
| 9 | -1.682 | 0 | 0 | 91.95 | 3.85 | 4.20 |
| 10 | 1.682 | 0 | 0 | 82.43 | 16.03 | 1.54 |
| 11 | 0 | -1.682 | 0 | 86.26 | 8.48 | 5.26 |
| 12 | 0 | 1.682 | 0 | 82.58 | 15.63 | 1.79 |
| 13 | 0 | 0 | -1.682 | 91.21 | 3.83 | 4.96 |
| 14 | 0 | 0 | 1.682 | 82.12 | 16.23 | 1.65 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 91.92 | 6.25 | 1.83 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 90.61 | 6.77 | 2.62 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 89.54 | 7.96 | 2.50 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 90.24 | 7.58 | 2.18 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 90.16 | 7.91 | 1.93 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 91.39 | 6.93 | 1.68 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 90.29 | 7.60 | 2.11 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 91.57 | 6.57 | 1.86 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 90.18 | 8.01 | 1.81 |

1) X_1 : 型孔插件顶部宽度, X_2 : 护种盘后侧高度, X_3 : 护种盘底部角度。

1) X_1 : Top width of orifice plug, X_2 : Rear height of seed protection plate, X_3 : Bottom angle of seed protection plate.

根据表4可知,合格指数、重播指数以及漏播指数的回归模型均为极显著($P<0.01$),失拟项均不显著($P>0.05$),表明回归模型的拟合程度较高,且模型的 R^2 均大于0.92,表明模型可以解释评价指标超过92%的变化。对于合格指数回归模型, X_1 、 X_2 、

X_3 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 均为极显著,其余项均不显著;对于重播指数回归模型, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 均为极显著,其余项均为不显著;对于漏播指数回归模型, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2^2 和 X_3^2 均为极显著, X_2X_3 、 X_1^2 为显著,其余项均不显著。

表4 模型方差分析
Table 4 Variance analysis of model

| 方差来源 Variation source | 合格指数 Qualified index | | | | 重播指数 Replay index | | | | 漏播指数 Leakage index | | | |
|--------------------------|----------------------|----|--------|-----------------|-------------------|----|--------|-----------------|--------------------|----|--------|-----------------|
| | SS | DF | F | P ¹⁾ | SS | DF | F | P ¹⁾ | SS | DF | F | P ¹⁾ |
| 模型 Model | 363.36 | 9 | 81.25 | <0.0001** | 502.41 | 9 | 125.11 | <0.0001** | 42.65 | 9 | 37.14 | <0.0001** |
| X_1 | 107.98 | 1 | 217.29 | <0.0001** | 156.93 | 1 | 351.70 | <0.0001** | 4.56 | 1 | 35.76 | <0.0001** |
| X_2 | 19.03 | 1 | 38.29 | <0.0001** | 62.84 | 1 | 140.83 | <0.0001** | 12.71 | 1 | 99.64 | <0.0001** |
| X_3 | 103.29 | 1 | 207.85 | <0.0001** | 204.48 | 1 | 458.26 | <0.0001** | 17.11 | 1 | 134.12 | <0.0001** |
| X_1X_2 | 0.02 | 1 | 0.04 | 0.8479 | 0.02 | 1 | 0.04 | 0.8478 | 0.07 | 1 | 0.57 | 0.4653 |
| X_1X_3 | 0.12 | 1 | 0.25 | 0.6278 | 1.04 | 1 | 2.34 | 0.1501 | 0.45 | 1 | 3.54 | 0.0826 |
| X_2X_3 | 10.93 | 1 | 21.99 | 0.0004** | 5.87 | 1 | 13.14 | 0.0031** | 0.78 | 1 | 6.12 | 0.0279* |
| X_1^2 | 21.54 | 1 | 43.35 | <0.0001** | 13.47 | 1 | 30.18 | 0.0001** | 0.94 | 1 | 7.40 | 0.0175* |
| X_2^2 | 73.02 | 1 | 146.94 | <0.0001** | 44.23 | 1 | 99.12 | <0.0001** | 3.59 | 1 | 28.13 | 0.0001** |
| X_3^2 | 28.96 | 1 | 58.27 | <0.0001** | 14.41 | 1 | 32.30 | <0.0001** | 2.51 | 1 | 19.68 | 0.0007** |
| 残差 Residual | 6.46 | 13 | | | 5.80 | 13 | | | 1.66 | 13 | | |
| 失拟项 Lack of fit | 1.46 | 5 | 0.47 | 0.7909 | 2.27 | 5 | 1.03 | 0.4618 | 0.82 | 5 | 1.56 | 0.2751 |
| 误差 Error | 5.00 | 8 | | | 3.53 | 8 | | | 0.84 | 8 | | |
| 总和 Total | 369.82 | 22 | | | 508.21 | 22 | | | 44.30 | 22 | | |

1) **: $P<0.01$, *: $P<0.05$.

剔除回归方程中影响不显著因素的系数,建立评价指标与试验因素的二次回归方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1 = 90.65 - 2.81X_1 - 1.18X_2 - 2.75X_3 - \\ \quad 1.17X_2X_3 - 1.16X_1^2 - 2.14X_2^2 - 1.35X_3^2 \\ Y_2 = 7.29 + 3.39X_1 + 2.15X_2 + 3.87X_3 + \\ \quad 0.86X_2X_3 + 0.92X_1^2 + 1.67X_2^2 + 0.95X_3^2 \\ Y_3 = 2.06 - 0.58X_1 - 0.96X_2 - 1.12X_3 + \\ \quad 0.31X_2X_3 + 0.24X_1^2 + 0.48X_2^2 + 0.40X_3^2 \end{array} \right. \quad (19)$$

为了探究试验因素对各指标的影响,分析仿真过程中结构参数的变化导致重播和漏播的原因,利用Design expert 13软件绘制试验因素交互作用的响应曲面,如图15所示。

由表4和图15a可知,护种盘后侧高度与护种盘底部角度的交互项 X_2X_3 对合格指数的影响极显著。当型孔插件顶部宽度一定时,随着护种盘底部角度和护种盘后侧高度的增大,种子进入充种型孔的难度减小,有利于种子的充填,所以合格指数增

大,但随着充种型孔的一直增大,容易发生2粒种子同时进入充种型孔的情况,所以合格指数减小,从而导致合格指数先增大后减小。

由表4和图15b可知,护种盘后侧高度与护种盘底部角度的交互项 X_2X_3 对重播指数的影响极显著。当型孔插件顶部宽度一定时,随着护种盘底部角度和护种盘后侧高度的增大,充种型孔逐渐变大,容易发生2粒种子同时进入充种型孔的情况,从而导致重播指数持续增大。

由表4和图15c可知,护种盘后侧高度与护种盘底部角度的交互项 X_2X_3 对漏播指数的影响显著。当型孔插件顶部宽度一定时,随着护种盘底部角度和护种盘后侧高度的减小,充种型孔逐渐减小,种子进入充种型孔难度增加,从而导致漏播指数持续增大。

为得到该排种器在高速作业条件下的充种型孔最优结构参数组合,以合格指数最大、重播与漏播指数最小为优化目标,对试验指标进行优化求

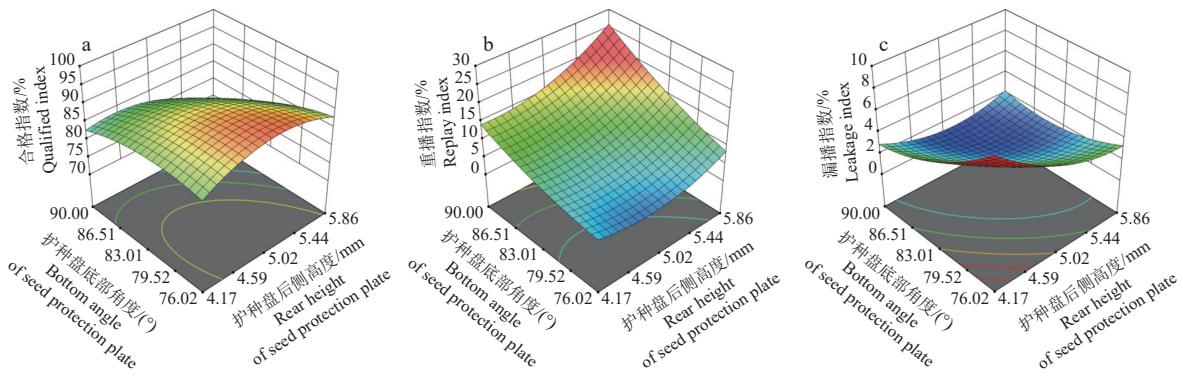


图 15 因素间交互作用对排种器性能影响的响应曲面

Fig. 15 Response surface of influence of interaction between factors on performance of seed metering device

解, 目标函数与约束条件为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t. } \begin{cases} 3.81 \text{ mm} \leq W \leq 6.41 \text{ mm} \\ 4.17 \text{ mm} \leq H \leq 5.86 \text{ mm} \\ 76.02^\circ \leq \alpha \leq 90.00^\circ \end{cases} \end{array} \right., \quad (20)$$

求解得出型孔插件顶部宽度 W 为 4.65 mm、护种盘后侧高度 H 为 5.10 mm、护种盘底部角度 α 为 81.86° 时, 排种质量最优, 此时排种合格指数、重播指数和漏播指数分别为 92.41%、4.88% 和 2.71%。为验证优化结果的准确性, 在相同条件下进行 3 组仿真实验, 结果取平均值, 得到排种器的合格指数、重播指数和漏播指数分别为 92.18%、5.13% 和 2.69%, 接近预测值, 说明二次正交旋转回归组合试验的优化结果准确。

3.2.4 种子受力破碎的风险分析 在排种器工作过程中, 随着作业速度的提高, 种子受到的合力也会随之发生变化。因此, 为了得到排出的种子所受最大合力对种子破碎的影响, 在 W 为 4.65 mm、 H 为 5.10 mm、 α 为 81.86° 的条件下, 作业速度分别为 8、10、12、14、16 km/h 时, 分别统计 4 类种子在排出过程中所受的最大合力, 每类种子各取 50 粒, 取平均值并绘制点线图, 如图 16 所示。

由图 16 可以看出: 随着作业速度的提高, 4 类种子排出过程中所受合力总体均呈现上升趋势, 且种子所受合力的最大值出现在作业速度 16 km/h 下的小扁平种子上, 为 6.27 N。籽粒抗压碎力与抗剪切力是影响破损率的 2 个重要指标。经过查阅文献可知, 玉米品种‘郑单 958’的抗压碎力为 105 N, 抗剪切力为 71.2 N^[25], 均显著高于种子所受合力的最大值。这表明双列限姿导引侧充式排种器在当前试验条件下, 种子的破碎风险较低。

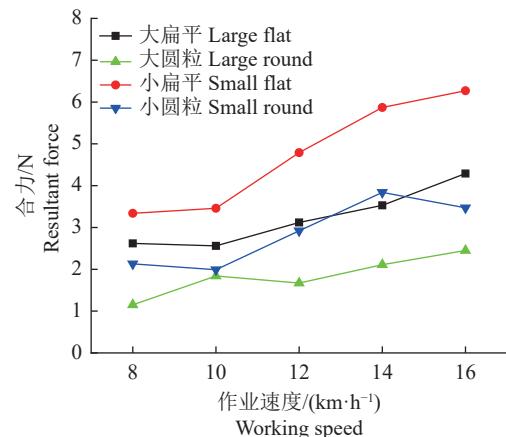


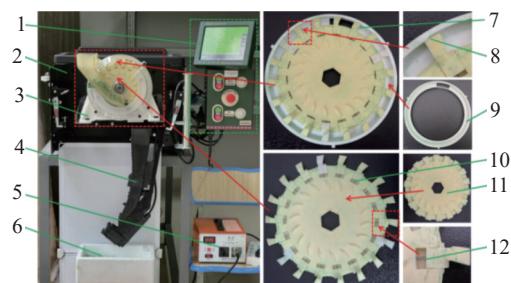
图 16 4 类种子所受合力与作业速度的关系

Fig. 16 Relationship between the resultant force on four types of seeds and the working speed

4 台架性能验证试验

4.1 试验材料与装置

为了验证仿真实验的可靠性, 开展台架性能验证试验; 同时验证排种器在不同作业速度下的排种性能, 试验台架如图 17 所示。



1: 操控台, 2: MeterMax ultra 性能检测器, 3: 排种器, 4: 光电传感器, 5: 变压器, 6: 收集器, 7: 充种型孔装配, 8: 径向突变, 9: 护种盘, 10: 排种盘装配, 11: 排种盘, 12: 滑动槽。

1: Console, 2: MeterMax ultra performance detector, 3: Seed metering device, 4: Photoelectric sensor, 5: Transformer, 6: Collector, 7: Seed filling orifice assembly, 8: Radial mutation, 9: Seed protection plate, 10: Seed metering plate assembly, 11: Seed metering plate, 12: Slide groove.

图 17 排种器试验台架

Fig. 17 Test bench of seed metering device

试验选用未分级的‘郑单958’玉米杂交种子作为研究对象,千粒质量351 g,含水率(ω)12.5%。试验地点为云南师范大学能源与环境科学学院D-02实验室。试验使用的排种器主要零部件通过光固化3D打印技术加工而成,材料为光敏树脂,其余轴类零部件使用45号钢机加工;试验检测装置使用MeterMax ultra排种器性能检测仪(美国P&C Ag Solutions),得到排种器的排种合格指数、重播指数和漏播指数。

4.2 作业速度适应性试验

为了验证本排种器在不同作业速度下的适应性,将作业速度分为3个速度范围,低速:8~10 km/h,中速:11~13 km/h,高速:14~16 km/h,在 W 为4.65 mm、 H 为5.10 mm、 α 为81.86°时,分别在3个作业速度范围内进行试验,每组重复5次取平均值,试验结果如表5所示。

由作业速度适应性试验结果(表5)可知,在作业速度为12 km/h时,排种合格指数为91.45%,与仿真实验结果基本吻合,两者相对误差为0.79%,产生误差的主要原因有两点:一是仿真模拟的玉米籽粒模型与真实籽粒形状存在差异,二是排种器虚拟样机模型为刚体,与台架试验的排种器存在差异。在作业速度为8~11 km/h时,排种器的合格指数均能达到92%以上,重播指数均低于5%,漏播指数均低于3.5%。在作业速度为12~16 km/h时,排种器的合格指数均能达到90%以上,重播指数均低于7%,漏播指数均低于4%,满足国家标准,因此本排种器对作业速度有较强的适应性。

4.3 排种器性能对比试验

基于仿真与台架试验的结果,双列限姿导引侧充式玉米高速精量排种器在 W 为4.65 mm、 H 为

表5 作业速度适应性试验结果

Table 5 Results of working speed adaptability

test

%

| 作业速度 Working speed (v) | 合格指数 Qualified index | 重播指数 Replay index | 漏播指数 Leakage index |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 低 Low | 8 | 92.44 | 4.37 |
| | 9 | 93.05 | 4.21 |
| | 10 | 92.53 | 4.65 |
| 中 Moderate | 11 | 92.09 | 4.90 |
| | 12 | 91.45 | 5.05 |
| | 13 | 91.52 | 5.17 |
| 高 High | 14 | 91.04 | 5.52 |
| | 15 | 90.11 | 6.26 |
| | 16 | 90.57 | 6.01 |

5.10 mm、 α 为81.86°的条件下,与匀轮式排种器分别开展作业速度为8、10、12、14、16 km/h的排种性能对比试验。在“4.2”的基础上,添加每组试验用种的破损率 Y_4 统计结果,综合评价该排种器的高速作业性能。

由排种性能对比试验结果(表6)可知,相较传统的匀轮式排种器,当作业速度为8 km/h时,双列限姿导引侧充式排种器的作业效果与匀轮式排种器差异较小,排种合格指数提升2.10个百分点,种子破损率降低0.03个百分点,但随着作业速度提升,差异逐渐增大,在作业速度16 km/h下排种合格指数较匀轮式排种器提升11.66个百分点,种子破损率降低0.21个百分点,证明基于分级限姿导引侧充-径向突变辅助清种的双列限姿导引侧充式排种器可有效确保排种器高速作业时充、清种效果可靠,比匀轮式排种器对高速作业的适应性更强。

表6 排种器性能对比试验结果

Table 6 Results of comparative test on the performance of seed planter

%

| 类型 Type | 作业速度/(km·h ⁻¹) Working speed | 合格指数 Qualified index | 重播指数 Replay index | 漏播指数 Leakage index | 破损率 Breakage rate |
|--|---|-------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| 双列限姿导引侧充式排种器 Double-row seed metering device with guided side-filling and posture control | 8 | 92.44 | 4.37 | 3.19 | 0.13 |
| | 10 | 92.53 | 4.65 | 2.82 | 0.19 |
| | 12 | 91.45 | 5.05 | 3.50 | 0.25 |
| | 14 | 91.04 | 5.52 | 3.44 | 0.29 |
| | 16 | 90.57 | 6.01 | 3.42 | 0.36 |
| 匀轮式排种器 Spoon-wheel seed metering device | 8 | 90.34 | 6.65 | 3.01 | 0.16 |
| | 10 | 88.12 | 7.05 | 4.83 | 0.25 |
| | 12 | 84.53 | 8.67 | 6.80 | 0.33 |
| | 14 | 81.58 | 10.33 | 8.09 | 0.41 |
| | 16 | 78.91 | 11.06 | 10.03 | 0.57 |

5 结论

1) 本文针对现有的机械式玉米排种器高速作业性能较差的问题,设计了一种基于分级限姿导引侧充-径向突变辅助清种的双列限姿导引侧充式玉米高速精量排种器。通过理论分析和计算,结合种子形状特征、尺寸和种子填充姿态对关键部件参数进行了设计。

2) 基于 EDEM 和 RecurDyn 的耦合仿真的正交试验结果表明,排种器在型孔插件顶部宽度 W 为 4.65 mm、护种盘后侧高度 H 为 5.10 mm、护种盘底部角度 α 为 81.86° 的条件下,排种器的性能达到最优,排种器的合格指数、重播指数和漏播指数分别为 92.18%、5.13% 和 2.69%。

3) 台架性能试验的结果表明,在作业速度为 12 km/h 时,排种合格指数为 91.45%,与仿真实验的相对误差为 0.79%,仿真优化试验结果可靠;在作业速度为 8~16 km/h 时,排种器的合格指数均能达到 90% 以上,重播指数均低于 7%,漏播指数均低于 4%,满足玉米精量播种的技术要求;双列限姿导引侧充式排种器的高速作业性能优于传统的勺轮式排种器。证明采用限姿板分级限制引导种子姿态和径向突变结构辅助清种能有效提升其高速作业时的精量播种能力,使其具备良好的高速适应性及稳定性。

参考文献:

- [1] 梁玉成, 孙士明, 谢宇峰, 等. 我国玉米播种机现状及发展趋势[J]. *农机化研究*, 2022, 44(12): 265-268.
- [2] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 38-48.
- [3] LI Y, HE X T, CUI T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2015, 8(4): 1-9.
- [4] 李兆东, 李姗姗, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器排种性能试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 17-25.
- [5] 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.
- [6] 周勇, 胡梦杰, 夏俊芳, 等. 内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 59-67.
- [7] 赖庆辉, 贾广鑫, 苏微, 等. 凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 60-71.
- [8] 张学军, 程金鹏, 史增录, 等. 摆动夹取式玉米精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(4): 38-50.
- [9] 杨丽, 李治民, 张东兴, 等. 离心式高速玉米精量排种器 T 形槽型孔设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(7): 50-60.
- [10] 廖宜涛, 张百祥, 郑娟, 等. 气力针式行星轮系窄行密植精密排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(11): 86-99.
- [11] 高筱钧, 徐杨, 张东兴, 等. 气送式高速玉米精量排种器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 9-20.
- [12] 高丽萍, 施彬彬, 廖庆喜, 等. 正负气压组合油菜精量排种器锥孔盘排种性能[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 22-33.
- [13] 李玉环, 赵砾, 杨丽, 等. 独立分充式大豆双排毛刷高速精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(6): 101-110.
- [14] 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.
- [15] 张顺, 李勇, 王浩宇, 等. U 型腔道式水稻精量穴播排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 98-108.
- [16] 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.
- [17] 苏微, 陈子威, 赖庆辉, 等. 轮匀式半夏精密排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 60-71.
- [18] MA J, SUN S, WANG J, et al. An experimental analysis of the seed-filling mechanism of maize-precision hole-planter Clamping[J]. *Agriculture*, 2024, 14(3): 398.
- [19] CHEN Z, XUE D, GUAN W, et al. Performance optimization of a spoon precision seed metering device based on a maize seed assembly model and discrete element method[J]. *Processes*, 2023, 11(11): 3076.
- [20] 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.
- [21] 唐汉. 波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [22] 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.
- [23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 上 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [24] 全国农业机械化标准化技术委员会. 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.
- [25] 李银昌, 张兆玉, 曹红波, 等. 玉米秆、穗、粒力学特性的品种与密度效应研究[J]. 山东农业科学, 2019, 51(6): 62-68.