

气吸双盘组合式玉米小区排种器设计与试验

杨然兵^{1,2} 何宇鹏^{1,2} 陈栋泉^{2,3} 陈林^{1,2} 李国莹⁴ 查显涛^{1,2}

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 农业农村部热带高效农业智能装备重点实验室, 海口 570228;
3. 海南大学信息与通信工程学院, 海口 570228; 4. 青岛普兰泰克机械科技有限公司, 青岛 266109)

摘要: 针对现有玉米小区排种器难以根据不同品种玉米发芽率不停机切换对应粒数播种模式的问题, 本文设计了一种气吸双盘组合式玉米小区排种器, 可通过改变排种盘相对位置实现播种模式切换。阐述了排种器工作原理和播种模式切换过程, 通过理论分析确定了关键部件结构参数。利用 Fluent 软件对 3 种播种模式型孔负压平均值进行了分析, 结果表明, 3 种播种模式型孔负压变化较小。利用 EDEM 软件明确了棘槽组合盘具有良好的扰种性能, 以漏播率、重播率、合格率为评价指标, 开展了不同排种器播种性能架架试验。试验结果表明, 当负压大于 4 kPa 时, 气吸双盘组合式玉米小区排种器合格率大于普通排种器。播种模式切换试验结果表明, 在切换时间为 1 s 时, 切换相邻播种模式和切换间隔播种模式排种轴最佳反转速度分别为 15、26 r/min。提出的气吸双盘组合式玉米小区排种器能实现不停机切换播种模式, 研究结果可为玉米小区气吸式排种器设计与优化提供参考。

关键词: 玉米; 小区播种; 组合盘式; 气吸式排种器; 离散元

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)06-0067-11

OSID:



Design and Experiment of Air-suction Double Disc Combined Maize Plot Seed Meter

YANG Ranbing^{1,2} HE Yupeng^{1,2} CHEN Dongquan^{2,3} CHEN Lin^{1,2} LI Guoying⁴ ZHA Xiantao^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China

2. Key Laboratory of Tropical Intelligent Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou 570228, China

3. School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China

4. Qingdao Plantech Mechanical Technology Co., Ltd., Qingdao 266109, China)

Abstract: Aiming to address the limitations of existing maize seeding devices, which struggle to seamlessly switch sowing modes based on the germination rates of different maize varieties, a novel air-suction maize plot seeding device with a double disc combined seeding plate was designed. This device allowed rapid switching between sowing modes by adjusting the seeding plate's position. The structure and working principle of the seed-metering device were detailed, and the key structural parameters were determined through theoretical analysis. The average negative pressure values of the holes under three sowing modes were analyzed by Fluent software, the experiment showed that there was little change in negative pressure at the hole under three sowing modes. Simulations with EDEM software confirmed that the spine-groove combination disk had good disturbance performance. A comparative bench test was conducted on the seeding performance of different seeders based on the evaluation indicators of missed sowing rate, replay rate, and qualification rate. The test results showed that with the seeding plate speed setting at 22 r/min and negative pressure greater than 4 kPa, the qualified rate of sowing double disc combined device was greater than that of conventional seeder. A sowing mode switching test was conducted for the air-suction double disc combined maize plot seeding device, with the switching state of the seeding pattern as an evaluation indicator. Tests showed that when the switching time was 1 s, the optimal switching speed of the adjacent and the interval sowing mode was 15 r/min and 26 r/min. The proposed air-suction double disc combined maize plot seeder can achieve non-stop switching of sowing

收稿日期: 2024-11-12 修回日期: 2025-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2000400)

作者简介: 杨然兵(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: yangranbing@163.com

通信作者: 查显涛(1989—),男,讲师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: zhaxt@hainanu.edu.cn

modes, the research result can provide a reference for the design and optimization of air-suction seeders for maize plots.

Key words: maize; plot sowing; combination plate; air-suction metering device; discrete element

0 引言

玉米是我国第一大粮食作物^[1],年产量达世界总量的23%^[2]。随着对玉米需求的提高,需通过育种繁育优良玉米品种提升玉米单产^[3]。在选育优良玉米品种时,需进行大规模小区试验。人工播种因播种效率低、试验精度差,已逐步被机械播种取代^[4-6]。

为提高机械化种植精度与效率^[7],气吸式排种器成为机械播种主流^[8-10]。排种盘是气吸式排种器关键部件,为改善排种性能、满足不同播种农艺需求,国内外学者从不同角度对排种盘进行了改进。HE等^[11]设计了可调整种子吸附的排种盘,提高了型孔吸附效果。德国Horsch公司研发的Maestro气吸式排种器,设计了渐开线型孔并在其边缘设置倒角,使其更有利于种子吸附^[12]。陈玉龙等^[13]设计了一种具有倾斜凸台式取种结构的排种盘,能对扁平种子吸附姿态进行调节,提高排种器作业性能。丁力等^[14]设计了带有型孔凸台的排种盘,在充种区起到扰种和托种的作用。颜丙新等^[15]设计了一种排种盘和负压腔室同步旋转的气吸式排种器,能使排种盘和密封垫之间不产生相对运动,相同条件下所需负压更低。王伟等^[16]为实现作物高速精密播种,设计了双行型孔错置分布排种盘,提高了播种效率。孙文胜等^[17]针对玉米种子品字形播种时均匀性差等问题,设计了带有交错角的排种盘,满足玉米宽窄行品字形密植模式高速精播要求。上述研究均只考虑同一品种种子播种,而在小区播种时每个小区种子品种都不相同^[18],发芽率低的种子小区试验时一般采用双粒播种后期间苗模式;发芽率高的种子则采取单粒播种。现有小区播种机具切换播种模式时需要停机更换排种盘。当小区数量较大时,难以根据不同种子发芽率快速切换播种模式。

针对现有玉米小区播种机难以做到不停机切换播种模式的问题,本文设计一种气吸双盘组合式玉米小区排种器,针对小区试验中不同发芽率的种子,通过改变2个排种盘相对位置,实现不停机快速切换3种播种模式。利用流体仿真对3种播种模式气室负压进行研究,利用离散元仿真对不同排种盘扰种性能进行研究;开展台架试验,明确播种和播种模式切换时最佳工作参数,以期为玉米小区气吸式排种器设计与优化提供参考。

1 结构与工作原理

1.1 排种器结构

设计的可快速切换3种播种模式排种器总体结构如图1所示,主要由充种气缸、清种气缸、排种器前壳、凹槽排种盘、棘齿排种盘、传动圆盘、弹簧、棘爪、排种器后壳组成。其中,凹槽排种盘通过螺栓固定在传动圆盘上,传动圆盘与排种轴靠销连接。传动圆盘上有棘爪和弹簧,当所受力有指向圆心方向分力时会缩回传动圆盘。

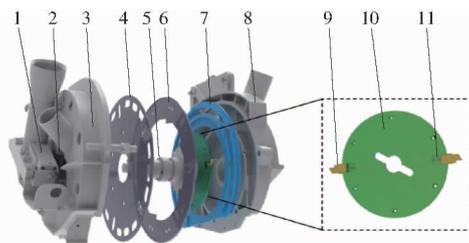


图1 排种器结构图

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

1. 充种气缸
2. 清种气缸
3. 排种器前壳
4. 凹槽排种盘
5. 排种轴
6. 棘齿排种盘
7. 气吸垫片
8. 排种器后壳
9. 棘爪
10. 传动圆盘
11. 弹簧

1.2 排种器工作原理

排种器作业时,种子从充种口落入。充种气缸运动,种子掉入充种腔内部,电机带动传动轴正向转动,与其相连的凹槽排种盘也正向转动。传动圆盘上的棘爪在弹簧弹力作用下伸出,带动棘齿排种盘转动,2个排种盘转动方向和速度一致。在风机负压作用下玉米种子紧贴排种盘型孔运动,当种子运动到落种区时,种子所受负压消失,从排种口投出。1个小区播种结束后,清种气缸打开闸门,残余种子从充种腔被吸入清种腔。清种结束后,充种气缸打开闸门,清种气缸关闭闸门。下1个小区种子从充种口落入种腔,重复上述播种过程。

1.3 播种模式切换

上述换种过程中,播种机如需切换播种模式,则在2个小区间过道反向旋转传动轴,带动与其相连的凹槽排种盘反向转动。此时,棘爪接触到棘齿排种盘棘齿斜面,棘爪缩回,凹槽排种盘失去轴向力作用,停止转动,从而与棘齿排种盘相对位置发生变化。当棘爪完全经过棘齿斜面后,排种轴反转停止,此时棘爪完全伸出且不与棘齿盘接触,直到下1个小区开始播种排种轴正转时,棘爪重新带动棘齿排

种盘转动。控制排种轴反转时间和速度就能做到精确切换播种模式,播种模式切换示意图如图2所示。

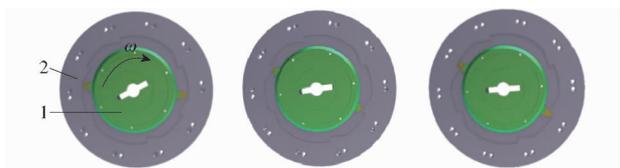


图2 播种模式切换过程示意图

Fig.2 Schematic of seeding mode switching process

1. 动盘 2. 定盘

2 关键部件设计

为保证播种效果,设计排种器前需对玉米种子进行尺寸测量。选取郑单958玉米种子为试验对象,将1000粒种子按形状分为类球形和马齿形2种,测量每类种子三维尺寸。多次测量后平均值如表1所示。

表1 玉米种子尺寸参数

Tab.1 Maize seed size parameters mm

参数	类球形			马齿形		
	长度	宽度	厚度	长度	宽度	厚度
平均值	9.57	9.23	4.87	11.89	8.51	4.23
最大值	11.91	11.35	6.34	12.13	8.89	4.92
最小值	9.14	9.07	4.36	8.54	7.23	3.20
标准差	1.10	0.52	0.23	0.72	0.53	0.46

2.1 棘齿排种盘设计

棘齿排种盘为双型孔结构,通过改变与凹槽排种盘的相对位置可切换3种播种模式。主要设计参数有排种盘直径 D_1 、型孔数量 n 、型孔直径 D_2 、型孔间隔角 θ 和棘齿分布。

2.1.1 型孔直径

气吸式排种器型孔直径直接影响播种效果,是排种盘设计中的重要参数。根据文献[19],型孔直径计算式为

$$D = (0.64 \sim 0.66)B \quad (1)$$

其中 $B = \sqrt[3]{LWT}$

式中 B ——种子平均粒径,mm

D ——型孔直径,mm

\bar{L} ——种子平均长度,mm

\bar{W} ——种子平均宽度,mm

\bar{T} ——种子平均厚度,mm

以郑单958玉米种子为例,结合测得玉米尺寸,排种器型孔直径为4.8~5.0mm。

在充种过程,玉米种子被扰动后逐渐脱离种群,被吸附到型孔上。对被吸附的种子周围压力进行分析^[16]可得

$$\begin{cases} p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = C \\ F = ps \\ s = (k_2 - k_1) \frac{2Q}{\pi D} \\ Q = vs \end{cases} \quad (2)$$

式中 p ——气室压力,Pa

C ——常数

h ——垂直高度,m

v ——气体流速,m/s

F ——种子所受吸附力,N

k_2 ——常数,取0.2

k_1 ——常数

ρ ——空气密度,kg/m³

s ——气体对种子作用面积,m²

Q ——气体流量,m³/s

整理式(2)可得

$$F = (C - \rho gh)(k_2 - k_1) \frac{2Q}{\pi D} - \frac{\rho Q \pi D}{4(k_2 - k_1)} \quad (3)$$

由式(3)可知,气流对种子作用力与型孔直径成反比。型孔直径越大,充种完成后种子所需的负压越小,但型孔直径过大易导致1个型孔同时吸附2粒种子。综合以上因素,排种器型孔直径设为4.9mm。

2.1.2 型孔间隔角

双粒/单双粒播种后期间苗时,2粒种子落下后间距不超过10cm且不小于5cm,小区播种时播种机作业速度不超过3.6km/h,排种盘转速一般为22r/min^[20],以此计算型孔间的角度。取播种机田间行走速度为3.6km/h,则有

$$\begin{cases} L = v_1 t \\ L_{\min} \leq L \leq L_{\max} \\ \omega t = \frac{\theta}{2\pi} \end{cases} \quad (4)$$

式中 L ——种子落下后的间距,m

t ——时间,s

v_1 ——播种机田间行走速度,m/s

ω ——排种盘转速,rad/s

代入数据得 $4.32^\circ \leq \theta \leq 8.64^\circ$,为便于后文凹槽排种盘直槽口设计, θ 取 6° ,即两型孔中心间圆心角为 6° ,且中心都分布在排种盘同一半径的圆周上。

2.1.3 排种盘直径及厚度

当前玉米排种盘直径一般为120~260mm,型孔位置一般位于排种盘边缘15~20mm处^[21-22]。结合排种器结构和玉米小区播种农艺要求,棘齿排种盘直径 D_1 设为240mm,型孔中心距排种盘边缘

距离 D_2 设为 15 mm。考虑到加工精度和成本,棘齿排种盘厚度取 2 mm。为保持其能绕轴旋转,其边缘处有圆形凸起,能放置凹槽排种盘,通过凹槽排种盘达到定位效果。

2.1.4 型孔数量

小区播种玉米时,播种机前进速度一般不超过 3.6 km/h,株距为 20 ~ 30 cm^[23],株距与型孔数之间满足

$$\frac{M}{2} = \frac{\pi D_1 v_1 (1 + \eta)}{v_a k} \quad (5)$$

式中 M ——型孔数

η ——地轮滑移率

v_a ——种子脱落时线速度, m/s

k ——株距, m

由式(5)可以看出,型孔数量与播种机行进速度成正比,与株距和排种盘转速成反比。因小区播种特殊性,每个小区单行播种数非常少,因此排种盘型孔不宜过多。但型孔数过少会使排种盘转速过高降低充种率。综合分析,取排种盘转速为 22 r/min,型孔数 M 取 20。

2.1.5 棘齿分布

排种盘棘齿分布是达成切换播种模式的关键。根据型孔位置分布,播种模式设计为双粒-单粒-单双粒-双粒循环,对应旋转角度为 50°、77°、53°。综合以上分析,设计得棘齿排种盘如图 3 所示。

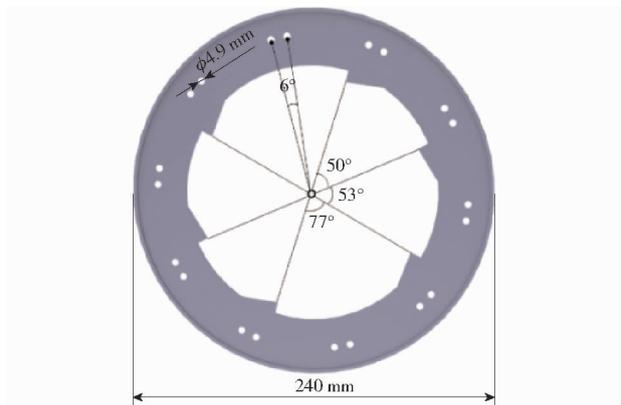


图 3 棘齿排种盘示意图

Fig. 3 Schematic of ratchet seed plate

2.2 凹槽排种盘设计

凹槽排种盘型孔处是一个直凹槽,与棘齿排种盘组合后方能进行吸种。气吸式排种器吸种时,主要有 3 种吸附姿态,分别定义为平躺、竖直和侧躺,如图 4 所示。为保证种子不掉落,需满足

$$F \frac{D}{2} \geq Q_0 d_1 \quad (6)$$

式中 Q_0 ——离心力和种子间内摩擦力合力, N

d_1 ——种子重心到型孔距离, mm

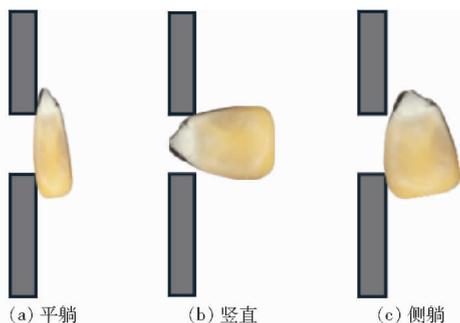


图 4 种子吸附姿态

Fig. 4 Adsorption attitude of seed

由式(6)可得,种子被稳定吸附时,重心离型孔距离越远,所需吸力越大。因此,种子吸附姿态对于排种器排种性能有很大影响。平躺时种子重心离型孔距离最近,种子吸附更为容易,其受种群内摩擦阻力小,不易在携种过程中滑落,为种子主要吸附姿态^[24]。以平躺姿态分析双粒播种模式下横置直槽口充种过程。此时会出现 3 种不同吸附情况,即玉米种子被型孔完全吸附(图 5a)、单粒玉米种子被 2 个型孔同时吸附(图 6a)、多粒玉米种子被单个型孔吸附(图 7)。玉米种子被型孔完全吸附时,玉米种子位置与受力如图 5 所示。

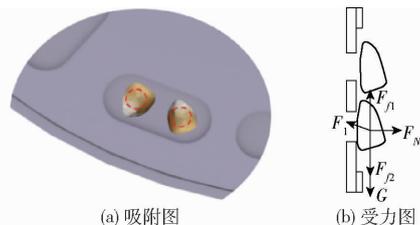


图 5 种子被型孔完全吸附示意图及受力

Fig. 5 Schematics and force diagram of seeds being completely adsorbed by holes

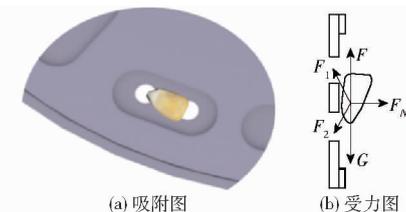


图 6 单粒种子被双孔吸附示意图及受力

Fig. 6 Schematics and force diagram of a single seed adsorbed by two holes

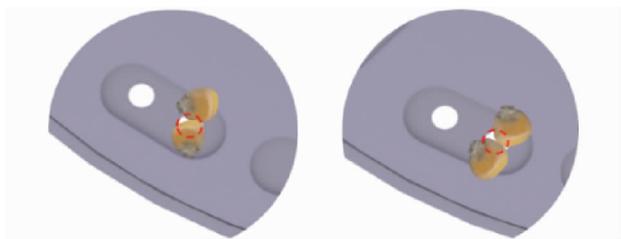


图 7 双粒种子被单个吸孔吸附示意图

Fig. 7 Schematic of two seeds being adsorbed by a single suction hole

此时每个型孔只吸附1粒玉米。玉米受到重力 G 、型孔吸力 F_1 、种群摩擦力 F_{f1} 、种盘摩擦力 F_{f2} 和支持力 F_N 。种子被稳定吸附时,气室处负压为

$$p = \frac{8GaK_1K_2}{\pi D^3} \left(1 + \zeta + \frac{V_p^2}{gD} \right) \quad (7)$$

其中 $\zeta = (6 \sim 10) \tan \theta$

式中 ζ ——玉米种子摩擦因数

V_p ——型孔中心线速度, m/s

δ ——种子休止角, ($^\circ$)

a ——种盘平面与种子质心间距离, mm

K_1 ——吸种可靠性系数, 取 1.8

K_2 ——工作可靠性系数, 取 1.9

因种子质心和吸孔中心线速度会变化, 吸种负压取 4 ~ 8 kPa。

单粒玉米被 2 个型孔同时吸附时, 玉米种子位置和受力如图 6 所示。

棘齿排种盘两型孔分度圆圆心间距离计算式为

$$\begin{cases} R_1 = \frac{D_1}{2} - D_2 \\ L_1 = R_1 \sqrt{2 - 2\cos\theta} \end{cases} \quad (8)$$

式中 R_1 ——型孔分度圆半径

L_1 ——型孔圆心间直线距离

代入数据得 $L_1 = 10.99$ mm。如图 6 所示, 种子受到型孔吸力 F_1 和 F_2 , 种群摩擦力 F_{f1} 、种盘摩擦力 F_{f2} 、排种盘支持力 F_N , 重力 G 。由表 1 可知, 玉米种子尺寸中玉米种子长度最大为 12.13 mm, 且种子表面为不规则平面, 种子无法完全覆盖 2 个型孔。种子在此位置时会因吸力无法克服摩擦力和重力而滑落, 型孔从种群吸附种子继续充种。

当多粒玉米被单个型孔吸附时, 会出现多粒玉米竞争 1 个吸孔情况。因型孔直径限制, 3 粒及多粒玉米难以被稳定吸附在型孔上, 因此只需考虑 2 粒种子竞争吸附情况。参与竞争的玉米种子位置如图 7 所示。

当 2 粒玉米种子中 1 粒位于凹槽口内, 另 1 粒部分悬于凹槽排种盘上方时, 由于排种盘间高低差, 悬于上方的种子无法完全贴合棘齿排种盘表面, 吸附力不足以克服摩擦力和重力, 导致种子在充种过程脱落, 无法与位于凹槽内的种子竞争。当 2 粒种子均部分悬于凹槽排种盘上方时, 同样因高低差无法被稳定吸附。随着排种盘旋转, 种子在种群摩擦力作用下移动, 型孔会从种群中重新充种, 直至 1 粒种子被稳定吸附。为达到单粒吸附效果并降低多粒种子被单个型孔吸附的概率, 需要优化凹槽排种盘的直槽长度和宽度。具体设计要求为: 直槽宽度应

为种子平均宽度的 1.3 ~ 1.4 倍, 直槽长度应保证型孔中心到直槽端点的距离大于玉米种子平均长度的 2/3。多次预试验后, 优化确定直槽长 2.6 cm、宽 1.2 cm。为防止厚度过大影响吸种, 确定厚度为 1 mm。组合后 3 种播种模式如图 8 所示。

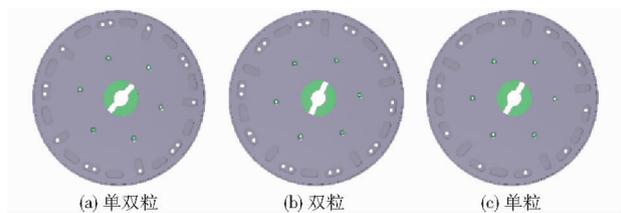


图 8 3 种播种模式示意图

Fig. 8 Schematics of three sowing modes

2.3 传动圆盘与棘爪设计

为实现播种模式切换效果, 在棘爪底部设计一个圆柱形凹槽用于安放弹簧。棘爪安装在传动圆盘的棘爪槽内。为防止棘爪在弹簧弹力作用下弹出传动圆盘, 棘爪底部设有凸起, 并在传动圆盘棘爪槽底部设计了更深的槽。该设计确保棘爪在与棘齿排种盘完全接触时, 传动圆盘能够精准限位棘爪, 保证稳定运作。棘爪与传动圆盘如图 9 所示。

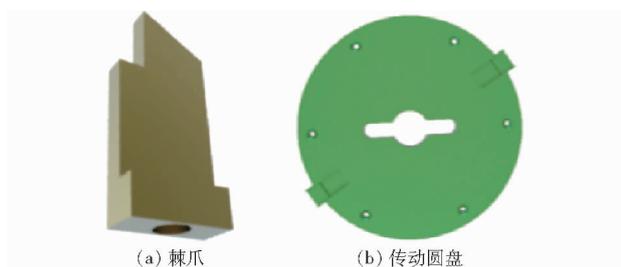


图 9 传动部件图

Fig. 9 Transmission components diagrams

3 仿真试验

3.1 气室压力分布仿真试验

3.1.1 仿真模型建立

3 种播种模式型孔数不同, 可能对气室压力分布产生影响。为探究 3 种播种模式气室负压变化, 利用 Fluent 软件对排种器进行仿真。将排种器模型简化后导入 Fluent 中进行网格划分, 如图 10 所示。

模型选择 $k-\varepsilon$, 时间选择瞬态, 重力加速度取 9.81 m/s^2 , 壁面边界条件设置为无滑移边界条件, 求解方案采用 SIMPLE 算法, 其余参数保持默认即可。充种腔为压力入口, 负压设为 0 kPa。进风管口为压力出口, 负压设置为 2、4、6、8、10 kPa, 对 3 种播种模式进行气室压力分布仿真试验。

3.1.2 仿真结果

试验方案与结果如表 2 所示。由表 2 可以看

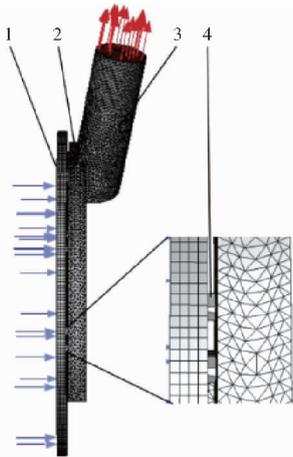


图 10 排种器简化模型

Fig. 10 Simplified model diagram of seeder

1. 充种腔网格 2. 气室网格 3. 进风管网格 4. 型孔网格

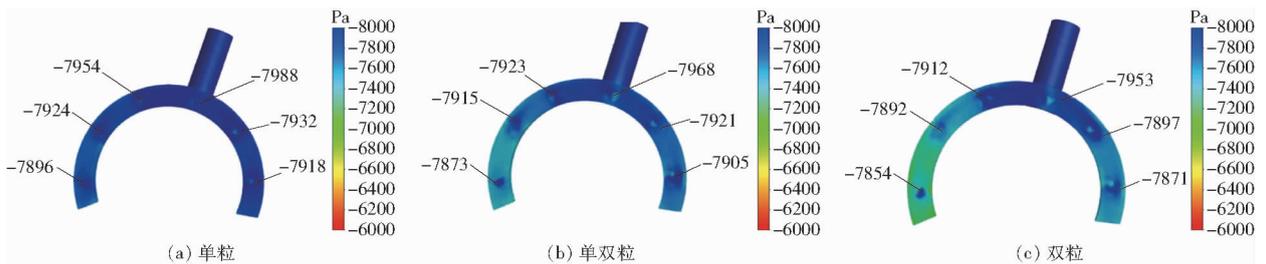


图 11 3种播种模式压力分布

Fig. 11 Pressure distributions of three sowing modes

由图 11 可看出,离进风管口越远,3种播种模式气室负压越小。其中双粒播种模式负压衰减最大,但其气室与型孔接触处负压大于周围气室负压,接近 8 kPa,其余 2 种播种模式型孔与气室交界处负压也接近 8 kPa,不会对吸种效果造成较大影响。

3.2 抗种性能仿真试验

3.2.1 仿真模型建立

EDEM 仿真软件能模拟和记录种群颗粒在排种器运动全过程,分析仿真数据,可得不同排种盘抗种效果,从而为后续台架试验提供充足的理论依据^[25]。为明确棘槽组合盘排种性能,选普通单粒排种盘和带扰种槽单粒排种盘进行对比试验。3种排种盘结构如图 12 所示。

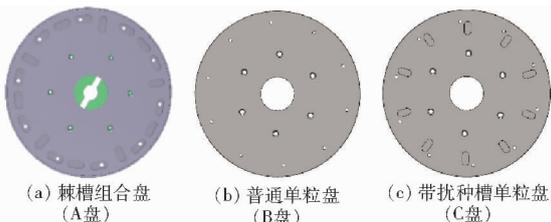


图 12 排种盘仿真结构

Fig. 12 Seed plate simulation structure diagrams

根据测得的玉米种子尺寸在 Solidworks 中进行建模,保存为 igs 格式后导入 EDEM,自动填充后玉米种子如图 13 所示。

出,不同压力出口负压情况下,播种模式对型孔与气室接触面影响很小。

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test scheme and results

压力出口 负压/kPa	型孔与气室接触面负压平均值/Pa		
	单粒	单双粒	双粒
2	1 934 ± 51	1 924 ± 47	1 911 ± 50
4	3 944 ± 45	3 928 ± 46	3 911 ± 44
6	5 933 ± 48	5 921 ± 46	5 913 ± 47
8	7 942 ± 46	7 921 ± 48	7 904 ± 50
10	9 941 ± 44	9 923 ± 47	9 914 ± 51

以压力出口负压为 8 kPa 时为例,分析 3 种播种模式气室负压分布,仿真结果如图 11 所示,标出的数字为该处型孔与气室接触面压力平均值。

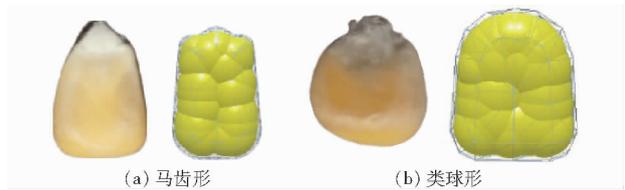


图 13 玉米种子仿真模型

Fig. 13 Simulation models of maize grains

3.2.2 仿真参数设定

将排种器模型导入 EDEM 软件,仿真采取 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,排种盘为 ABS 塑料,排种器壳体为铸铁,相关仿真参数如表 3 所示^[26]。

在 EDEM 仿真中设排种盘转速为 22 r/min,仿真颗粒数设置为 60,颗粒生成速率为 1 000 粒/s,总时长设置为 3 s。为防止由于种子在落种时弹跳影响结果,设置排种盘 0.5 s 后开始运动。仿真过程如图 14 所示。

3.2.3 仿真结果

排种盘转动时,其附近玉米种子会不断与其他种群及排种盘表面发生碰撞,产生不规则运动。在 EDEM 软件中,提取种群颗粒在竖直方向速度瞬时变化曲线,通过竖直瞬时速度变化特征来推断排种盘对种子扰动效果,从而推断充种性能。在竖直方向上,速度曲线波动越显著,表明排种盘对种群的扰动强度越高,充种性能越优;反之,速度曲线越平稳,

表 3 仿真所需物理和力学特性参数

Tab.3 Physical and mechanical characteristics required for simulation

项目	参数	数值
玉米种子	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1.37×10^8
	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.197
排种盘	泊松比	0.5
	剪切模量/Pa	1.77×10^8
	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.180
排种器壳体	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1×10^8
	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.150
种子-种子	碰撞恢复系数	0.284
	静摩擦因数	0.342
	动摩擦因数	0.054 5
种子-排种盘	碰撞恢复系数	0.621
	静摩擦因数	0.482
	动摩擦因数	0.093 1
种子-排种器壳体	碰撞恢复系数	0.3
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.3

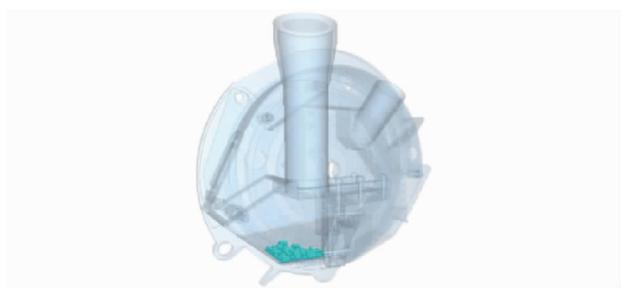


图 14 仿真过程示意图

Fig. 14 Schematic of simulation process

则说明扰动强度较弱,充种性能较差。

3 种排种盘种群在竖直方向上的平均瞬时速度如图 15 所示。由图 15 可知,A 盘转动对种群瞬时速度变化影响最剧烈,而 B 盘转动不改变种群平均速度。由此,A 盘对种群扰动效果最优,C 盘次之,B 盘对种群无扰动效果。

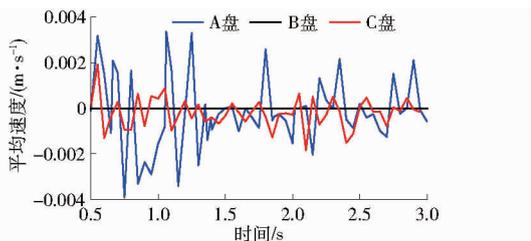


图 15 种群平均瞬时速度随时间变化曲线

Fig. 15 Average instantaneous velocity of population changed with time

排种盘转动过程,扰种性能越好,种群离散程度越大,种群离排种盘平均距离及其变化也更剧

烈^[27]。为进一步探究排种盘扰种性能,以种群和排种盘间平均距离为评价指标,0.5~3 s 间种群与 3 种排种盘间平均距离变化曲线如图 16 所示。

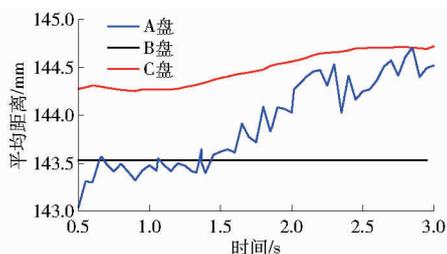


图 16 种群平均距离随时间变化曲线

Fig. 16 Population average distance change curves

由图 16 可知,由于落种随机性,3 次仿真试验种群与排种盘间初始平均距离都不相同;A 盘与种群平均距离在 143~145 mm 范围变化,且距离随时间呈振荡上升趋势;B 盘与种群平均距离不变,约为 143.53 mm;C 盘与种群平均距离在 144.25~144.75 mm 范围变化,也呈振荡上升趋势,但变化幅度和趋势比 A 盘小。由此,3 种不同排种盘搅种能力从大到小依次为 A 盘、C 盘、B 盘。

A 盘对种群扰动效果最优,能减少种群间内摩擦力,增大种群离散度,从而使种子更易被排种盘吸附。A 盘吸孔限位凹槽,对种子吸附有限位功能,可能对吸种过程造成影响。EDEM 仿真条件设置单一,仅能分析其对种群扰动效果。

4 台架试验

4.1 试验条件

为探索气吸双盘组合式玉米小区排种器性能,利用 3D 打印机加工试制 A 盘和 B 盘,其中 B 盘加工单粒、双粒和单双粒 3 种类型。于 2024 年 8 月 6 日在海南大学三亚南繁研究院智能农机实验室 PTS1-03 型试验台进行台架试验(图 17),其中排种轴由步进电机驱动。输风管上连通标智 GM510 型数字式差压计。排种器外壳采用铸铁,试验材料为郑单 958 玉米种子,含水率为 13%,千粒质量为 328 g。



图 17 试验台架

Fig. 17 Test bench

- 1. 排种器
- 2. 输风管
- 3. 差压计
- 4. 种床输送带

4.2 播种性能试验方法

(1)单粒播种性能试验。将气吸双盘组合式玉米小区排种器调节为单粒播种模式,与带有双粒排种盘的排种器进行对比试验。每穴播种0粒为漏播,1粒为合格,其余为重播。

(2)双粒播种性能试验。将气吸双盘组合式玉米小区排种器调节为双粒播种模式,与常规双粒排种盘的排种器进行对比试验。每穴播种小于2粒为漏播,等于2粒为合格,其余为重播。

(3)单双粒播种性能试验。将气吸双盘组合式玉米小区排种器调节为单双粒播种模式,与带有单双粒排种盘的排种器进行对比试验。相邻种穴中分别为播种1粒和2粒为合格,其余为不合格。

试验时,排种器投种口与传送带距离为40 mm、排种轴转速设为22 r/min。在负压为2、4、6、8、10 kPa条件下,分别开展3种播种模式对比试验,并测定排种性能指标。试验共15组,每组对比试验进行3次,每次试验播种301穴,对3次试验结果取平均值。试验结果如图18所示。排种效果如图19所示。

4.3 试验结果及分析

4.3.1 重播率

由单粒播种(图18a)和双粒播种(图18d)重播率可知,随排种器负压上升,常规排种器重播率明显增加,而气吸双盘组合式玉米小区排种器重播率变化不显著。原因为随负压上升,常规排种器型孔吸力增强,导致其更易吸附多粒种子,使得重播率上升。

气吸双盘组合式玉米小区排种器,直槽口具有限位功能,可有效降低多粒吸附现象,因而随负压变化,其重播率始终较低且变化幅度不大。此外,通过观察口对充种情况进行观察,发现气吸双盘组合式玉米小区排种器重播现象主要发生在小粒种子侧躺吸附时;而小粒种子在种群中占比较小,因此气吸双盘组合式玉米小区排种器重播率始终低于1%,符合小负压试验精度要求。

4.3.2 漏播率

由单粒播种(图18b)和双粒播种(图18e)漏播率可知,随排种器负压上升,2个排种器漏播率均逐渐降低。原因为负压增加提高了型孔对玉米种子的吸附力,使种子更易克服种群摩擦力和重力,随排种盘转动进行播种。

当负压低于4 kPa时,气吸双盘组合式玉米小区排种器漏播率高于常规排种器;而当负压达到4 kPa及以上时,其漏播率低于常规排种器。这一差异主要归因于气吸双盘组合式玉米小区排种器型孔外侧直槽口扰种和限位功能。当负压较低时,气吸双盘组合式玉米小区排种器型孔吸附力不足,种子易因种群离散度的增加而受到扰动,导致吸附种子因碰撞而脱离型孔。此外,凹槽排种盘限位功能在低负压下也会影响吸附效果,当型孔吸力不足时,与凹槽排种盘和棘齿排种盘同时接触的种子易受轻微扰动而回落至种群中。当负压达到4 kPa后,气吸双盘组合式玉米小区排种器扰种功能有效增加了种群离散度,种子分布趋于均匀,从而降低漏播率。而常规排种器缺乏扰种功能,导致其漏播率依然较高。

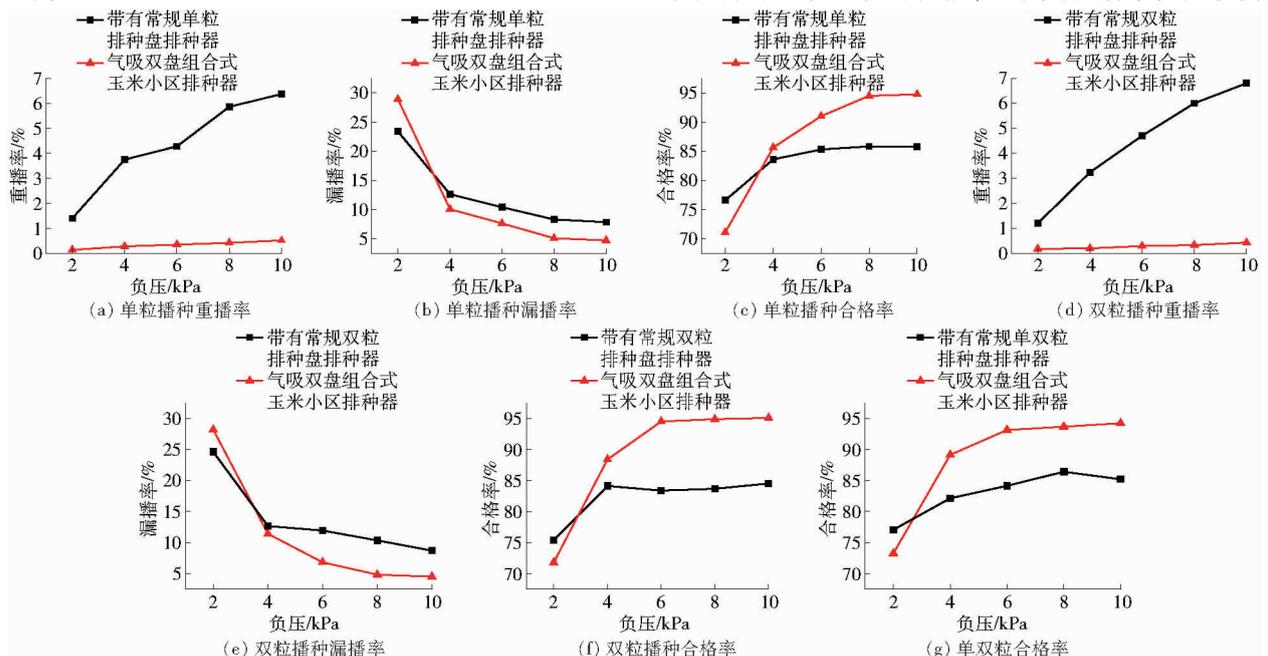


图18 排种效果对比曲线

Fig. 18 Comparison curves of seeding effect

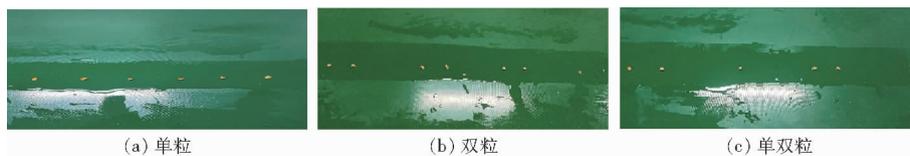


图 19 排种效果

Fig. 19 Planting effect drawings

4.3.3 合格率影响

由单粒播种(图 18c)、双粒播种(图 18f)和单双粒播种(图 18g)的合格率可知,随排种器负压增加,播种合格率呈上升趋势。当负压小于 4 kPa 时,气吸双盘组合式玉米小区排种器的合格率低于常规排种器;当负压达到 4 kPa 或更高时,其合格率则超过常规排种器。原因为在较低负压条件下,气吸双盘组合式玉米小区排种器的组合式排种盘由于结构的特殊性,使得型孔难以有效吸附种子,导致漏播率高于常规排种器。同时,由于吸附力较小,2 个排种器重播率均较低,因此常规排种器在低负压下的合格率相对更高。随着负压增大,组合式排种盘在扰种和限位功能方面的优势逐渐显现。其对种群扰动能力更强,且限位功能有效抑制了重播现象,从而使其合格率进一步提高。当负压超过 8 kPa 后,气吸双盘组合式玉米小区排种器漏播率趋于稳定,但重播

率有所上升。

综合考虑 3 种播种模式重播率、漏播率以及合格率表现,当工作负压为 8 ~ 10 kPa 时能满足小区育种试验播种精度要求。由于在负压超过 8 kPa 后合格率无显著提升,因此最佳工作负压为 8 kPa。

4.4 播种模式切换试验

图 20 为 3 种播种模式排种盘组合状态示意图。播种模式切换及理论所需最小相对转角和最大相对转角如表 4 所示;其中最大反转角度表示排种盘反转不超过该角度时,均可再通过排种轴正转使棘爪重新与棘齿排种盘接触。为保证模式切换准确,切换相邻播种模式时,2 个排种盘相对转角为 77° ~ 103°;切换间隔播种模式时,2 个排种盘相对转角为 130° ~ 180°。为排除摩擦力影响,确保排种器在经过小区过道时,能准确切换播种模式,需进行播种模式切换试验探明最佳排种轴反转速度。

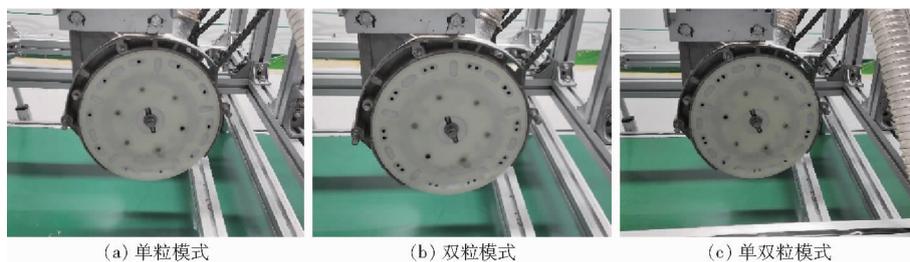


图 20 播种模式示意图

Fig. 20 Seeding mode diagrams

表 4 播种模式切换所需角度

Tab. 4 Required angle for seeding mode switching

切换类型	(°)	
	最小相对角度	最大相对角度
相邻播种模式切换		
单双粒→双粒	53	103
单粒→单双粒	77	130
双粒→单粒	50	127
间隔播种模式切换		
双粒→单双粒	127	180
单双粒→单粒	103	180
单粒→双粒	130	180

次试验,每次试验 3 种播种模式均切换正确为成功,其余为失败。表 5、6 为 2 类播种模式切换试验结果。

表 5 相邻播种模式切换台架试验结果

Tab. 5 Bench test results of switching between adjacent seeding modes

反转速度/(r·min ⁻¹)	成功次数	失败次数	成功率/%
13	3	97	3
15	100	0	100
17	86	14	86

表 6 间隔播种模式切换台架试验结果

Tab. 6 Bench test results of interval seeding mode switching

反转速度/(r·min ⁻¹)	成功次数	失败次数	成功率/%
22	54	46	54
26	100	0	100
30	0	100	0

通常玉米试验小区过道长度为 80 ~ 120 cm,播种机在过道内行进速度小于 2.5 km/h,故播种模式切换试验时,排种轴反转时长设为 1 s。以播种模式切换成功率为评价指标开展播种模式切换试验。2 种模式切换试验中,在各设定转速下分别开展 100

由表5、6可得,相邻播种模式切换试验中,排种盘反转速度为15 r/min时,播种模式切换成功率达到100%;而间隔播种模式切换试验中,排种轴反转速度为26 r/min时,切换成功率达到100%。因此,反转时间均取1 s时,为保证播种模式切换准确,当反转转速为15 r/min时切换相邻播种模式;当反转速度为26 r/min时切换间隔播种模式。

5 结论

(1)针对当前玉米小区精播无法不停机切换不同粒数播种模式的问题,设计了一种气吸双盘组合式玉米小区排种器。阐述了其整体结构和工作原理,并确定关键结构参数。

(2)对3种播种模式型孔负压平均值进行了仿真,结果表明播种模式改变对型孔负压影响较小。对3种排种盘充种过程进行了仿真,结果表明棘槽组合排种盘在种群扰动效果方面有明显优势,有助于提高充种均匀性。

(3)播种性能试验结果表明,当气压大于4 kPa且排种器转速为22 r/min时,气吸双盘组合式玉米小区排种器在所有播种模式下播种合格率均高于常规排种器。当负压达到8 kPa时,合格率均大于94%,满足小区播种试验精度要求。

(4)播种模式切换试验结果表明,切换时间为1 s时,切换至相邻播种模式和间隔播种模式,最佳排种盘反转速度分别为15、26 r/min。此配置能够实现稳定且高效的播种模式切换。

参 考 文 献

- [1] LUO N, MENG Q F, FENG P, et al. China can be self-sufficient in maize production by 2030 with optimal crop management [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2637.
- [2] 刘佳. 我国玉米生产地位、优势与自给率分析[J]. *新农民*, 2019(24): 48-49.
- [3] 郝建军, 秦家辉, 杨淑华, 等. 勺夹式花生小区单粒精量播种单体设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(3): 33-41.
HAO Jianjun, QIN Jiahui, YANG Shuhua, et al. Design and experiments of a precision sowing unit with the spoon clip for single peanut seed planting in plot[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(3): 33-41. (in Chinese)
- [4] 尚书旗, 吴秀丰, 杨然兵, 等. 小区育种播种装备与技术研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 1-20.
SHANG Shuqi, WU Xiufeng, YANG Ranbing, et al. Research status and prospect of plot-sowing equipment and technology [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 1-20. (in Chinese)
- [5] 刘瑞, 刘忠军, 刘立晶, 等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 50-59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(9): 50-59. (in Chinese)
- [6] DU X, LIU C L. Design and testing of the filling-plate of inner-filling positive pressure high-speed seed-metering device for maize[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 228: 1-17.
- [7] TANG H, XU F D, XU C S, et al. The influence of a seed drop tube of the inside-filling air-blowing precision seed-metering device on seeding quality[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 204: 107555.
- [8] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 61-73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 61-73. (in Chinese)
- [9] LI J H, LAI Q H, ZHANG H, et al. Suction force on high sphericity seeds in an air-suction seed-metering device[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 211: 125-140.
- [10] 李兆东, 何顺, 钟继宇, 等. 油菜扰动气力盘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 Zhaodong, 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)
- [11] HE S Y, ZANG Y, HUANG Z S, et al. Design of and experiment on a cleaning mechanism of the pneumatic single seed metering device for coated hybrid rice[J]. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1239.
- [12] Horsch seed meter[EB/OL]. (2016-01-12). <http://www.horsch.com/us/produkte/sae>.
- [13] 陈玉龙, 刘泽琪, 韩杰, 等. 气吸式排种器扁平种子吸附姿态调节机构设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 1-11.
CHEN Yulong, LIU Zeqi, HAN Jie, et al. Design and experiments of the flat seed-adsorbing posture adjustment mechanism for the air-suction metering device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(23): 1-11. (in Chinese)
- [14] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 1-11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(22): 1-11. (in Chinese)
- [15] 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 Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, 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)

- [16] 王伟, 宋岚洲, 石文兵, 等. 气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 53 - 63.
WANG Weiwei, SONG Lanzhou, SHI Wenbing, et al. Design and experiment of air-suction double-row staggered corn dense planting precision seeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 53 - 63. (in Chinese)
- [17] 孙文胜, 衣淑娟, 齐海龙, 等. 双盘交错气压式玉米品字形密植高速精量排种器研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 168 - 179.
SUN Wensheng, YI Shujuan, QI Hailong, et al. Design and experiment of twin discs intertwined air-pressure high-speed precision seed-metering device for maize delta-row dense plantings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 168 - 179. (in Chinese)
- [18] 杨薇, 李建东, 方宪法, 等. 玉米育种播种机械化国内外现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2018, 8(6): 9 - 15.
YANG Wei, LI Jiandong, FANG Xianfa, et al. Domestic and foreign current situation and development trend of seeding mechanization in maize breeding[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(6): 9 - 15. (in Chinese)
- [19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [20] 杨薇. 玉米育种精量播种关键技术与装备研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2019.
YANG Wei. Research on technology and equipment of precision seeding in maize breeding[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2019. (in Chinese)
- [21] 张开兴, 李金凤, 宋正河, 等. 变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 52 - 63.
ZHANG Kaixing, LI Jinfeng, SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 52 - 63. (in Chinese)
- [22] 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 Dandan, HE Bin, ZHOU Yi, 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)
- [23] 杨薇, 方宪法, 李建东, 等. 种腔自净型气吸式玉米小区精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 64 - 73.
YANG Wei, FANG Xianfa, LI Jiandong, et al. Design and experiment of air-suction precision seed meter with self-clearing seed chamber for corn plot test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 64 - 73. (in Chinese)
- [24] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 40 - 50.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Effect of seed adsorption posture of corn air-suction metering device on seed feeding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 40 - 50. (in Chinese)
- [25] 王云霞, 黄苏同, 张文毅, 等. 交错勾齿式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 142 - 153, 167.
WANG Yunxia, HUANG Sutong, ZHANG Wenyi, et al. Design and experiment of wheat precision seed metering device with staggered hook-tooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 142 - 153, 167. (in Chinese)
- [26] 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 Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, 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)
- [27] 于佳杨. 气吸滚筒式小麦精密排种器设计与试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
YU Jiayang. The design and experimental research on the air-suction roller precision seed-metering device of wheat[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)