

双盘交错气压式玉米品字形密植高速精量排种器研究

孙文胜¹ 衣淑娟¹ 齐海龙² 王 淞¹ 李衣菲^{1,3} 戴智博¹

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 北大荒现代农业服务集团, 哈尔滨 150030;

3. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对目前玉米宽窄行品字形密植模式下精量排种器高速(10~16 km/h)作业时排种均匀性差且对品字形播种效果缺乏针对性评价指标的问题,设计了一种双腔双盘交错同步回转的气压式高速精量排种器,并提出了品字合格指数对排种效果进行评价。阐述了排种器基本结构与工作原理,运用理论分析与数值模拟的方法确定了排种盘的关键结构参数,建立了种子充种过程的力学模型,确定充种高度、作业速度、气腔正压是影响排种器性能的主要因素;以充种高度、作业速度、气腔正压作为试验因素,以品字合格指数、双行株距变异系数作为试验指标进行了三因素五水平中心组合试验,得到了排种器最优参数组合并对其进行了试验验证,选用“和育187”、“迪卡C2235”、“奥洋红A9”、“法尔利1439”4种类型的玉米种子进行了排种器适播试验。结果表明:排种器最优参数组合为:充种高度40.598 mm、气腔正压3.763 kPa、作业速度11.358 km/h,验证试验表明该参数组合品字合格指数为94%、双行株距变异系数为6.11%,与优化结果相符,可满足玉米宽窄行品字形密植模式的高速精量播种要求。

关键词: 玉米; 高速精量排种器; 品字形; 气压式; 双盘交错

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0168-12

OSID:



Design and Experiment of Twin Discs Intertwined Air-pressure High-speed Precision Seed-metering Device for Maize Delta-row Dense Plantings

SUN Wensheng¹ YI Shujuan¹ QI Hailong² WANG Song¹ LI Yifei^{1,3} DAI Zhibo¹

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. Beidahuang Agricultural Reclamation Group Co., Ltd., Harbin 150030, China

3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the uniformity of current corn wide and delta-row narrow planting mode under high speed (10~16 km/h) operation of precision seed-metering device and the delta-row sowing effect of lack of targeted evaluation indexes of the problem, a double-cavity double-disc staggered synchronous rotary pneumatic high-speed precision planter was designed and the zigzag qualification index of the “delta-row” evaluation of the effect was put forward. The effect of “delta-row” was evaluated. The basic structure and working principle of the seed discharger were described, the key structural parameters of the seed discharging disc were determined by theoretical analysis and numerical simulation, the mechanical model of the seed charging process was established, and it was determined that the charging height, operating speed, and the positive pressure value of the air cavity were the main factors affecting the performance of the seed discharger. The three-factor, five-level Central Composite test was conducted with seed filling height, operating speed, air cavity pressure value as the influencing factors, and the “delta-row” qualification index and the maize seeds, namely “WAYO 187”, “DECA C2235”, “AOYO RED A9” and “FARLEY 1439”, were used to conduct the sowing test of the optimal parameter combinations of seeders. The results showed that the optimal parameter combination of the seed dispenser was 40.598 mm of seed filling height, 3.763 kPa of positive air cavity pressure and 11.358 km/h of operation speed, and the delta-row qualification index W of the parameter combination was 94% and the coefficient of variation

收稿日期: 2024-04-12 修回日期: 2024-05-17

基金项目: 黑龙江省重点研发计划重大项目(2022ZX05B02)和北大荒农垦集团有限公司2023年农机研发制造推广应用一体化试点项目

作者简介: 孙文胜(1998—),男,博士生,主要从事玉米播种机械研究, E-mail: 1377416980@qq.com

通信作者: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事玉米播种机械研究, E-mail: yishujuan_2005@126.com

of the two-row spacing W_1 was 6.11% , which was in line with the optimization results , and it can satisfy the requirements of high-speed precision sowing of maize in the delta-row dense-planting mode.

Key words: maize; high-speed precision seed-metering device; delta-row; air-pressure; twin discs intertwine

0 引言

我国常规采用的玉米种植方式是单宽行平作或垄作,这种方式土壤资源利用率差,大大影响玉米单产水平^[1-2]。增密种植是实现玉米单产增产的重要手段,但“密植”模式下的植株间距较小,对播种机具性能要求更高^[3-4]。

国内外学者对作物增密种植下的播种机械进行了深入研究^[5-9]。GAUTAM 等^[10]设计了一种可用于洋葱、胡萝卜等多种丸粒化蔬菜种子的多行种植机械,提升了种植效率,减少了人工种植成本;廖宜涛等^[11-12]设计了用于菠菜等小粒径蔬菜以及西洋参种子密植精密播种的气力针式精密排种器,经试验验证该排种器能够满足小粒径蔬菜以及西洋参种子的播种农艺要求;贾洪雷等^[13]设计了 2BDB-6(110)型大豆仿生智能耕播机,可一次性同时完成浅送、播种、镇压等作业,满足了中国东北地区垄上 4 行的播种农艺要求。对于宽窄行密植作业下窄双行交错布置的品字形种植模式,李玉环等^[14]设计了一种单风道单排种盘双行气吸式高速精量排种器,实现了豆类作物窄行密植种植模式下高速精量播种作业;陈美舟等^[15]设计了一种单盘双行气吸式排种器,满足了黄淮海地区大豆 120 mm 窄行距密植的播种要求;初金星等^[16]设计了一种双腔、双盘、双种带气吸式精量排种器,满足了黑龙江省中小农户在垄距为 60~68 cm 的小垄上大豆窄行播种的要求。国外 LEMKEN 公司研发的 AZURIT 系列播种机最高可在作业速度 20 km/h 下完成高质量、高密度的播种作业,其高效的 Delta-Row 品字形播种方式受到国际市场的广泛好评,需要将其“消化吸收再创造”后才能适合国内黑龙江玉米品字形密植区的种植方式与农艺要求。上述研究对排种器品字形播种效果一般参照《单粒(精密)播种机试验方法》^[17]进行单粒率、漏播率、重播率评价,这种评价方式难以反映品字形种植模式呈现的“品”字特征。另外,当前研究多集中在与形状较为规则的豆、丸粒化蔬菜等种子密植农艺配套的播种机械,玉米种子存在大小、形状差异,窄行距品字形播种作业时种子交错排列且间距较小,高速作业时排种盘转速高,排种器排种时均匀性较差。

针对上述问题,本研究依据黑龙江省玉米宽窄

行密植区的品字形种植农艺要求,基于黑龙江省常用玉米品种特性,利用力学分析、数值模拟、试验研究等方法设计一种双腔室双排种盘交错同步回转气压式玉米高速精量排种器;从玉米宽窄行品字形密植农艺出发,结合一定粒距比例提出品字合格指数对排种效果进行量化评价,为玉米品字形密植模式配套播种机具的研究提供参考。

1 玉米品字形密植模式

品字形密植模式,基于宽窄行的种植方法,宽行相互平行,窄行种子间交错布置呈现三角形的摆放形状(品字形),俗称拐子苗,这种种植方式下生长的植株抗倒伏能力强,单产水平高^[18]。根据黑龙江省玉米宽窄行品字形主要种植区的密植农艺要求,如图 1 所示,玉米窄单行株距 L 为 18~20 cm,窄双行株距 L_1 一般为单行株距一半,窄行行距 L_2 为 13 cm,宽行行距 60 cm 左右,当玉米种子交错排列呈等腰三角形时能够给予单个植株更好的生长空间,相对于单行播种,作物生长面积可以提高 111.24%(以窄单行株距 20 cm 为例),使每个植株都能充分利用光照、土壤资源,进而实现增质高产。

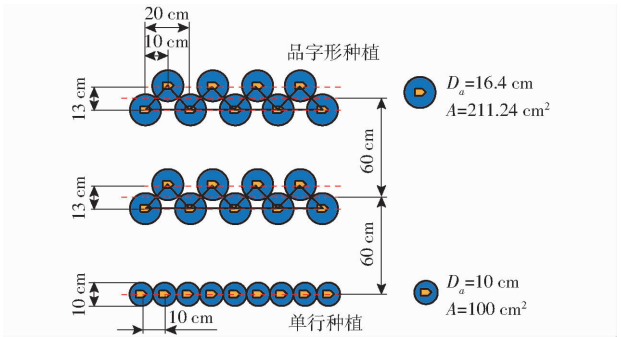


图 1 品字形与单行种植对比示意图

Fig. 1 Comparison diagram of delta-row and single seeding

2 排种器结构与工作原理

2.1 播种单体结构

如图 2 所示,播种机单体由风机、供种装置、排种器、导种管、灭茬轮、开沟器、限位轮、覆土轮、镇压轮及机架等部分组成,可一次性完成灭茬、开沟、播种、镇压、覆土等连续作业环节,提高播种作业质量与效率。

2.2 排种器结构

气压式高速精量排种器由排种盘、清种装置、卸

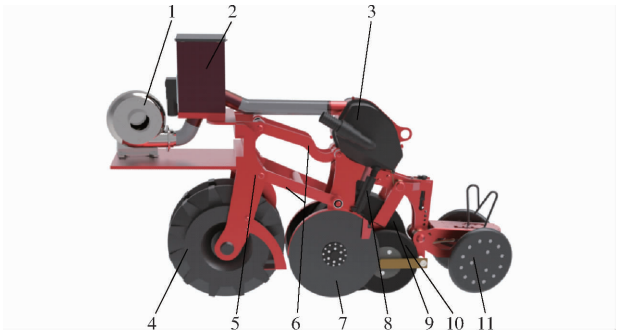


图 2 播种单体结构示意图

Fig. 2 Schematic of seeding monomer

1. 风机 2. 供种装置 3. 排种器 4. 灭茬轮 5. 机架 6. 四杆仿形机构 7. 开沟器 8. 导种管 9. 限位轮 10. 镇压轮 11. 覆土轮

压轮及其连接架、排种器壳体、连接板、密封圈、挡种板等部分组成,如图 3 所示,排种器关键部件如排种盘、清种装置、壳体呈对称布局,装配后组成 2 个对称腔室。2 个相同排种盘偏移一定角度固定安装,玉米种子被气流稳定压附在 2 个排种盘型孔上后,随排种盘回转至卸压点卸种,经出种管、导种管有序交错落在种床上形成窄行品字形的播种方式。

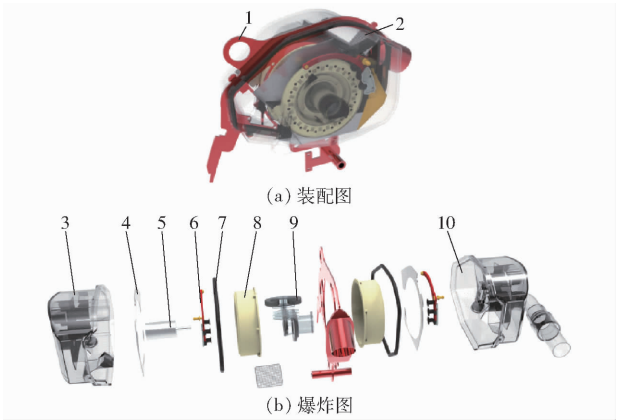


图 3 排种器结构图

Fig. 3 Structure diagrams of seed-metering device

1. 连接板 2. 挡种网 3. 壳体 I 4. 挡种板 5. 电机 6. 清种装置 7. 密封圈 8. 排种盘 9. 卸压轮及其连接架 10. 壳体 II

2.3 排种器工作原理

排种器工作原理如图 4 所示,以单侧为例,工作过程可分为充种、清种、携种、投种 4 个阶段。作业时,玉米种子靠自身重力以及气流作用从排种器进种(气)管经壳体导流板分流进入 2 个对称的腔室并滞留在待充种区,由供种装置配合传感器使种子群保持在一定充种高度。在正压气流及种盘凹槽作用下种子在待充种区处于扰动状态。种子被气流压附到型孔后,随排种盘回转经过清种区,清种装置是减少排种器产生重播现象的核心部件,通过单自由度杆件滑块机构调节递进性刮种刀使其围绕定位孔在一定角度范围内转动,以适应不同尺寸、形状种子

的清种要求,使型孔上仅保留单粒种子。当种子转至卸压点,卸压轮将卸压点对应的种盘型孔内侧堵塞,型孔内外压差消失,种子失去气流压附力,脱离排种盘进入出种管,一个排种过程结束。

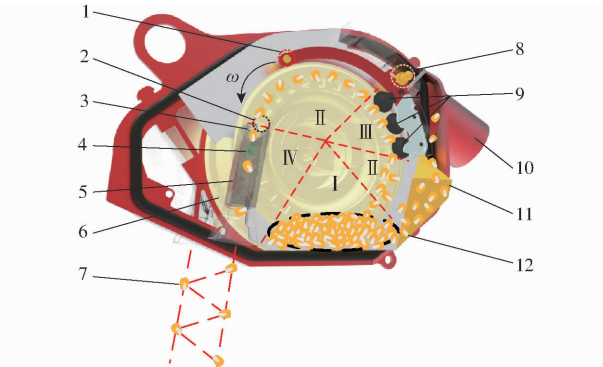


图 4 排种器工作原理图

Fig. 4 Working principle of seed-metering device

1. 定位孔 2. 凹槽 3. 卸压点 4. 型孔 5. 出种管 6. 排种盘 7. 种子 8. 调节机构 9. 递进性刮种刀 10. 进种(气)管 11. 导流板 12. 待充种区种子群 I. 充种区 II. 携种区 III. 清种区 IV. 投种区

3 排种盘设计与分析

玉米种子作为常用的农业物料,其物料特性是排种器关键部件设计的主要依据^[19]。本研究选用黑龙江省品字形密植典型的玉米种子品种“和育 187”、“迪卡 C2235”、“奥洋红 A9”、“法尔利 1439”,根据种子三轴尺寸的不同分别选取大扁形、大圆形、小扁形、小圆形种子^[20]对关键部件进行设计及后续试验,基本物料特性参数如表 1 所示,所选种子均经分级清选,结果为多次测量后的均值。

表 1 玉米种子基本物料特性参数

Tab. 1 Basic material characteristics of maize seed

参数	品种			
	和育 187	迪卡 C2235	奥洋红 A9	法尔利 1439
含水率/%	11. 8	12. 4	12. 2	12. 6
千粒质量/g	331. 4	342. 3	289. 2	296. 4
密度/(g·cm ⁻³)	1. 173	1. 198	1. 132	1. 122
堆积角/(°)	25. 13	22. 42	23. 73	20. 23
长度/mm	12. 10 ± 0. 41	10. 24 ± 0. 59	9. 94 ± 0. 71	8. 03 ± 0. 41
	9. 22 ± 0. 46	9. 74 ± 0. 54	7. 03 ± 0. 49	7. 12 ± 0. 46
厚度/mm	4. 73 ± 0. 53	7. 24 ± 0. 61	4. 06 ± 0. 37	6. 34 ± 0. 43

排种盘作为排种器核心部件,其主要结构参数包括排种盘直径 D_0 、型孔数 Z 、型孔尺寸、排种盘交错角 β_1 。

3.1 排种盘整体尺寸

排种盘直径会直接影响排种器尺寸,进而影响

风机功率消耗^[21]。为考察排种盘直径 D_0 对充种时间 t 的影响,建立排种盘尺寸与运动学关系式

$$\begin{cases} v_0 t = l \\ 30v_0 = n\pi r_0 \\ l = \alpha r_0 \\ r_0 = \frac{D_0}{2} - d_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_0 ——排种盘线速度, m/s
 l ——充种区弧长, m
 n ——排种盘转速, r/min
 α ——充种区弧度, rad
 d_0 ——型孔中心线到排种盘边缘的距离, m
 r_0 ——型孔中心线到排种盘中心线的距离, m
整理式(1)得

$$t = \frac{30\alpha}{n\pi}$$

式(2)表明,充种时间 t 与充种区弧度 α 和排种盘转速 n 有关。经查阅文献[22],气力式排种器排种盘直径一般在 140 ~ 260 mm,考虑排种器壳体尺寸结构限制,确定排种盘直径 D_0 为 176 mm,为防止玉米排种过程中与排种器壳体发生磕种,型孔中心线到排种盘边缘的距离 d_0 应大于玉米种子最大三轴尺寸,取 d_0 为 16 mm,型孔中心线到排种盘中心线的距离 r_0 为 72 mm。根据窄行品字形作业要求,播种窄行距 L_2 为 130 mm,考虑宽度方向出种管、导种管尺寸设计,两排种盘固定后宽度应小于 L_2 ,取单排种盘宽度为 55 mm。考虑排种盘加工要求与成本,确定排种盘厚度为 2.5 mm,材料为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料。

3.2 排种盘型孔数

排种盘型孔数是影响排种效率的重要因素。根据《农业机械设计手册》^[22]与播种机田间作业要求,播种机作业速度 $v_m \leq 16$ km/h,排种盘线速度 $v_0 \leq 0.41$ m/s,种盘转速与作业速度关系式为

$$\begin{cases} n = \frac{60v_m}{LZ} \\ 60v_0 = n\pi(D_0 - 2d_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 L ——窄单行株距,取 0.2 m

结合排种器尺寸公式

$$ZT = \pi(D_0 - 2d_0) \quad (4)$$

式中 T ——两型孔间弧长, m

计算得 $Z \geq 24.52$,由于排种盘直径以及型孔中心线到排种盘边缘的距离已经确定,为保证型孔上多余的种子被清除后顺利从型孔间滑落,两型孔间的弧长 T 应取较大值,排种盘型孔数应取较小值,从而确定型孔数为 25,相邻型孔对应的中心角 β 为

14.4°。

3.3 型孔形状及尺寸

排种盘型孔是种子整个排种过程的主要载体,其形状与尺寸是排种器设计的关键。本文型孔设计为圆锥台形,如图 5 所示。

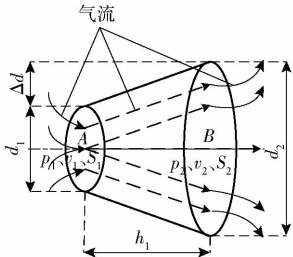


图 5 型孔结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of shaped hole

根据简化的伯努利方程对型孔定性分析得

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \gamma \quad (5)$$

式中 p ——压强, Pa
 v ——流速, m/s
 ρ ——气体密度, kg/m³
 g ——重力加速度, m/s²
 h ——高度, m
 γ ——常数

图 5 中,型孔 A 面连通腔室正压, B 面连通外界气压,压强 p_1 大于 p_2 ,在型孔内外产生压差,对于同一高度,根据伯努利方程,随着压力骤然减小,流速会突然增大,在型孔内易产生湍流现象,造成压力损耗。引入简化的流体连续性方程

$$Sv = q \quad (6)$$

式中 S ——截面面积, m²
 q ——流量, m³/s

如果型孔截面面积不发生变化,那么流体从 A 面到 B 面的过程中流速也不会产生变化。圆锥台型孔 A 面截面面积小, B 面截面面积大,气流从 A 面流向 B 面的过程中,截面积从 S_1 增加到 S_2 ,由于流量不变,流速在一定程度上会减小,缓冲了瞬间的压差变化造成的流速突变。当流速稳定后,气流从腔室流经型孔的过程中,截流面积由大变小再逐渐变大,对应流速 v 先增大后逐渐减小,可以降低湍流度,减少压力损耗。

为增强对待充种区种子群的扰动作用,辅助种子充种,在型孔间设计了均匀分布的凹槽(图 6)。在排种盘转动过程中,均布的凹槽对与其直接接触的种子施加作用力,使接触的种子与待充种区内部种子群产生碰撞作用,打破种子群堆积状态,促进种子流动,减少因种群堆积产生的种间摩擦,提高型孔从种子群中准确压附单粒种子的概率。

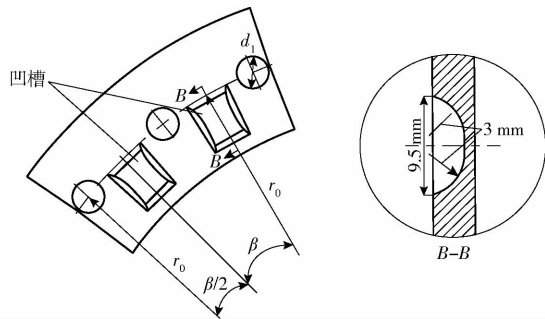


图 6 凹槽示意图

Fig. 6 Schematic of grooves

(1) 型孔外侧直径

为考察型孔外侧直径 d_1 对充种性能的影响,对气压式排种器充种过程进行分析。充种过程可分 2 个阶段^[23]:待充种子被压附向型孔;种子随种盘转离种群。种子被压附过程中,由于充种高度 H 的不同可能位于型孔轴向上侧(图 7a)、轴向重合(图 7b)、轴向下侧(图 7c)。以种子质心为坐标原点,水平方向为 x 轴方向,竖直方向为 y 轴方向建立直角坐标系,种子在该阶段(图 7a)力学方程为

$$\begin{cases} (F_y + ma) \cos \alpha_1 + N_1 \sin \alpha_2 - F_f \cos \alpha_2 = 0 \\ N_1 \cos \alpha_2 + F_f \sin \alpha_2 - (F_y + ma) \sin \alpha_1 - G = 0 \\ F_f = N_1 \tan \phi \end{cases} \quad (7)$$

式中 α_1 —— F_y 与水平方向间夹角, ($^\circ$)

α_2 —— F_f 与水平方向间夹角, ($^\circ$)

m ——种子质量, kg

a ——种子加速度, m/s^2

F_y ——种子所受压附力, N

N_1 ——种子所受种群的支持力, N

F_f ——种子所受种群的摩擦力, N

G ——种子所受重力, N

ϕ ——种子自然休止角, ($^\circ$)

式(7)整理得

$$F_y = \frac{\sqrt{2(\tan^2 \phi + 1)} N_1 \sin \left(\frac{\pi}{4} + \alpha_2 + \alpha_3 \right) - G}{\sqrt{2} \sin \left(\frac{\pi}{4} + \alpha_1 \right)} - ma \quad (8)$$

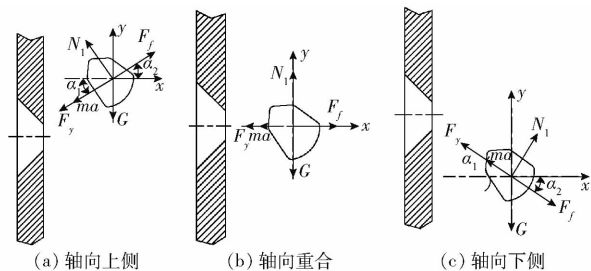


图 7 待充种子与型孔位置关系示意图

Fig. 7 Schematics of relationship between seed to be filled and hole position

其中

$$\alpha_3 = \arctan \frac{1}{\tan \phi} \quad (9)$$

由式(8)可知,充种第 1 阶段所需的压附力 F_y 与种子所受种群的支持力 N_1 、充种高度 H 、种子物料特性均有关。种子被压入型孔后,随种盘转动脱离种群作匀速圆周运动,为方便对第 2 阶段进行力学分析,以种子质心为原点,排种盘切向方向为 x 轴方向,径向方向为 y 轴方向,建立直角坐标系如图 8 所示。

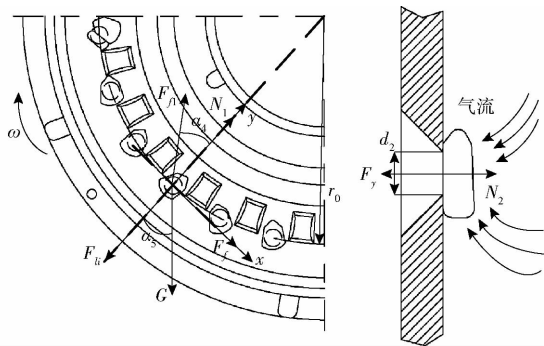


图 8 第 2 阶段受力分析示意图

Fig. 8 Schematic of force analysis in the second stage

种子在第 2 阶段力学平衡方程为

$$\begin{cases} F_{f1} \cos \alpha_4 + N_1 - G \cos \alpha_5 - F_{li} = 0 \\ F_{f1} \sin \alpha_4 - G \sin \alpha_5 - F_f = 0 \\ F_{li} = m \omega^2 r_0 \\ F_{f1} = N_2 \tan \phi_1 \\ N_2 = F_y = \Delta p S_1 \\ S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \end{cases} \quad (10)$$

式中 α_4 —— F_{f1} 与 y 轴间夹角, ($^\circ$)

α_5 —— G 与 y 轴间夹角, ($^\circ$)

F_{li} ——种子所受的离心力, N

F_{f1} ——种子所受的种盘摩擦力, N

N_2 ——种子所受的种盘支持力, N

ω ——排种盘角速度, rad/s

ϕ_1 ——种子与排种盘间摩擦角, ($^\circ$)

Δp ——型孔内外压差, Pa

整理式(10),考虑压种可靠性系数 K_1 取 1.8 ~ 2.0,以及外界条件系数 K_2 取 1.6 ~ 2.0,种子在第 2 充种阶段所需压强为

$$\Delta p = \frac{4K_1 K_2 \left[\sqrt{2} G \sin \left(\frac{\pi}{4} + \alpha_5 \right) + m \omega^2 r_0 + N_1 (\tan \phi - 1) \right]}{\sqrt{2} \pi \tan \phi_1 \sin \left(\frac{\pi}{4} + \alpha_4 \right) d_1^2} \quad (11)$$

由式(11)可知,所需压强 Δp 与排种盘角速度 ω 呈正相关,与型孔外侧直径 d_1 呈负相关,所以选用

大的型孔外侧直径 d_1 可降低对风压的需求。通过对排种器充种阶段的分析可知,充种高度、排种器工作转速、腔室正压对种子充种过程影响较大,后续将作为试验因素进行排种器性能试验。参考气吸式排种器设计^[22],结合玉米种子三轴尺寸,根据公式

$$d_1 = (0.64 \sim 0.66) d_2 \tag{12}$$

式中 d_2 ——玉米种子平均宽度,取 8.28 mm
计算得型孔外侧直径 d_1 为 5.5 mm。

(2) 型孔锥度及型孔内侧直径

型孔深度 h_1 为 2.5 mm,为加工型孔方便,圆锥台锥角 α_6 取 90° 。由计算式

$$\begin{cases} \tan \frac{\alpha_6}{2} = \frac{C}{2} \\ C = \frac{d_3 - d_1}{h_1} \end{cases} \tag{13}$$

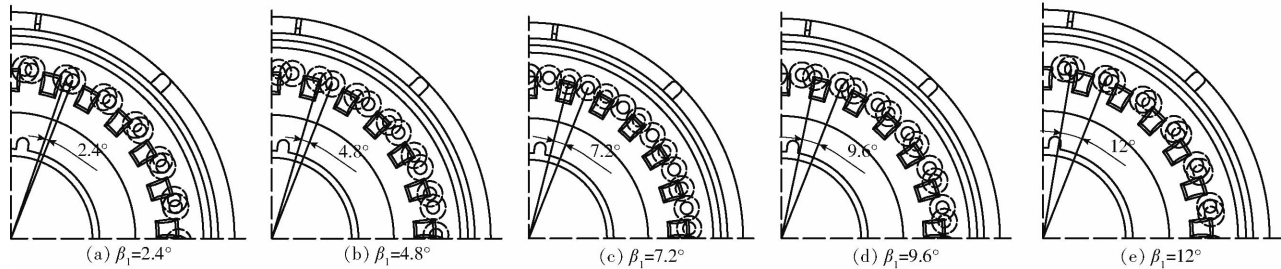


图 9 排种盘不同交错角示意图

Fig. 9 Schematics of different staggering angles of seed discs

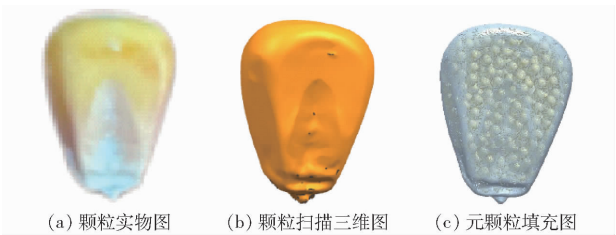


图 10 颗粒模型

Fig. 10 Particle modelings

每个玉米籽粒由 500 个半径为 0.4 mm、接触半径为 0.5 mm 的元颗粒组成,并配合 Bonding V2 键进行颗粒黏结。EDEM 仿真中与籽粒接触的壳体、排种盘材质分别为尼龙、ABS 塑料,相关仿真参数设置^[25]如表 2 所示。

使用 UG 软件建立简化后的排种器三维模型并导入 EDEM 中,如图 11a 所示。气压式排种器内部结构较为复杂,腔室流场域不规则,本研究将流场域简化为型孔、充气室、出气室 3 部分(图 11b)。在 UG 软件中绘制流场域模型并在 Space Claim 软件中进行模型修正,将修正后的流场域模型导入与 Fluent 契合度较高的 Fluent Meshing 模块进行网格划分,面网格最小及最大值分别设置为 0.5、5 mm,

计算得锥度 C 为 2,型孔内侧直径 d_3 为 10.5 mm。

4 排种盘交错角仿真试验

为探究排种盘交错角 β_1 对排种器品字形作业效果的影响,确定合理的排种盘交错角 β_1 ,分别建立种盘交错角 β_1 为 2.4° 、 4.8° 、 7.2° 、 9.6° 、 12° 的排种器模型(图 9),以双行株距变异系数 W_1 为指标进行单因素仿真试验。利用离散元 DEM 与计算流体力学 CFD 耦合仿真的方法模拟排种器的排种过程,通过求解器 Fluent 与 EDEM 软件进行流场与颗粒场动量、质量、能量的信息传递,并在 EDEM 中观察排种器品字形播种效果^[24]。

4.1 仿真模型建立

由于气固两相耦合仿真中颗粒体积需小于流场单元网格的体积,本研究通过粘结颗粒的方法按照预先得到的坐标将元颗粒填充成玉米籽粒(图 10),

表 2 仿真参数

Tab. 2 Parameters of simulation

项目	参数	数值
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
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
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
元颗粒-元颗粒	法向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	7×10^9
	切向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	6×10^8
	粘结半径/mm	1.5
种子-种子	碰撞恢复系数	0.182
	静摩擦因数	0.2
	动摩擦因数	0.078 2
种子-壳体	碰撞恢复系数	0.3
	静摩擦因数	0.5
	动摩擦因数	0.3
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

面网格生成后计算流体域,采用多面体网格填充体网格。

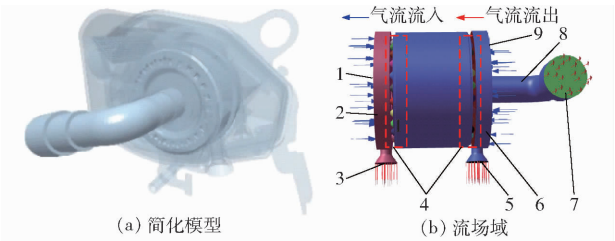


图 11 排种器仿真模型

Fig. 11 Simulation models of seed-metering device
1, 9. 压力入口 2, 6. 充气室 3, 5. 出种管出口 4. 型孔 7. 出气室出口 8. 出气室

在 Fluent 求解模块中,由于要考虑颗粒体积分数计算,采用欧拉模型中的稠密离散相模型(Dense discrete phase model,DDPM)作为气固两相流的耦合接口。采用滑移网格的方法处理流体域型孔转动的问题,型孔与充气室、出气室的接触面均设置为交界面,型孔转速与 EDEM 中排种盘的转速大小(40 r/min)、方向设置一致,流场入口压力设置为 3 500 Pa,出种管出口压力设置为 600 Pa(模拟导种管入口压力),出气室出口压力设置为 0 Pa。EDEM 与 Fluent 的时步成整数倍,分别为 8×10^{-7} 、 1×10^{-4} s,耦合仿真时长为 2 s。

耦合仿真计算量较大,为节省计算时间并达到本仿真的研究目的,同时保证排种器排种的连续性,避免重播、漏播对仿真结果的影响,在两个排种盘的型孔上分别连续建立 19 个颗粒工厂,每个颗粒工厂仅生成 1 个玉米籽粒,流场引入后籽粒迅速以平躺姿态被压附在型孔表面(图 12)。为了更加直观、量化地评价排种器品字形播种效果,在排种器下方建立一个长方体模型充当土壤,将其本征参数及与玉米籽粒间的接触参数设置为合适值,避免排出籽粒与“土壤”接触后发生弹跳、滚动影响仿真结果。排种结束后,测量“土壤”上玉米籽粒的株距并计算双行株距变异系数,每组仿真重复 3 次结果取平均值。

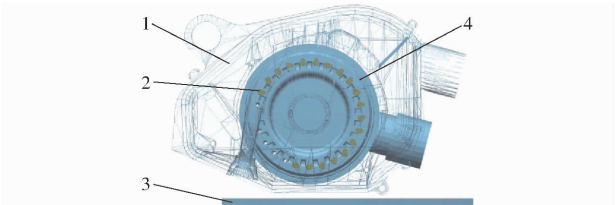


图 12 排种器仿真试验

Fig. 12 Simulation test of seed-metering device
1. 壳体 2. 籽粒 3. 土壤 4. 排种盘

4.2 仿真结果与分析

仿真结果如图 13 所示。取相邻 3 颗种子为一组,每隔一组组成一个三角形,设三角形右侧角度为

ψ ,由图可知,随着排种盘交错角的增加, ψ 逐渐增大,对应的双行株距变异系数先减小后增大。当排种盘交错角为 2.4° 、 4.8° 、 7.2° 、 9.6° 、 12° 时,对应双行株距变异系数分别为 66.38%、36.73%、4.87%、36.45%、64.68%。其中,当交错角为 7.2° 时,籽粒组成的三角形最接近等腰三角形且双行株距变异系数最小,品字形种植效果最优。综上,两排种盘交错角 β_1 取 7.2° 。

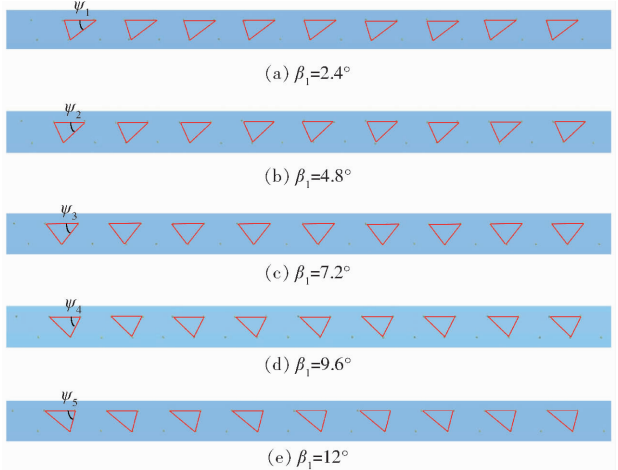


图 13 仿真结果

Fig. 13 Results of simulation

5 排种器台架性能试验

5.1 试验条件

为探究气压式高速精量排种器的最优排种性能,在黑龙江八一农垦大学高速精量播种实验室进行排种器台架性能试验。试验装置如图 14 所示,主要试验设备有气压式高速精量排种器、HTB-多段式鼓风机、JPS-16 型排种器检测试验台、导种管、供种装置、变频器、DP2000 智能压力风速风量仪。试验所用玉米品种为“和育 187”,相关物料特性如表 1 所示,排种效果如图 15 所示。

5.2 试验因素与指标

为对排种器品字形播种作业效果给出更贴近“品”字特点的评价方法,本研究以单行相邻的两颗种子及两颗种子间对行种子构成的三角形状为一组,评价示意如图 16 所示。

记随机选取播种均匀段相邻连续的总组数为 N_3 ,合格组单行相邻的两颗种子对行应仅有一粒种子,且需满足条件

$$\begin{cases} x \in (0.8 \sim 1.2)L \\ x' \in (0.2 \sim 0.8)x \end{cases} \quad (14)$$

式中 x ——该组单行实际株距,m

x' ——该组两行相邻种子实际株距,m

假设合格组数为 n_1 ,定义品字合格指数 W 为

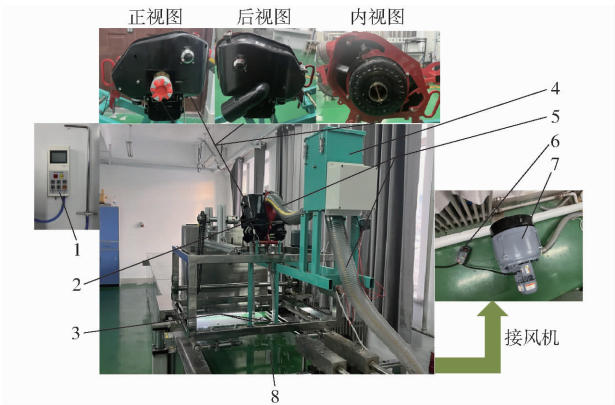


图 14 排种器台架试验

Fig. 14 Bench test of seed-metering device

1. DP2000 智能压力风速风量仪 2. 气压式高速精量排种器 3. 导种管 4. 供种装置 5. 波纹管 6. 变频器 7. HTB-多段式鼓风机 8. JPS-16 型排种器检测试验台



图 15 排种效果

Fig. 15 Seeding effect

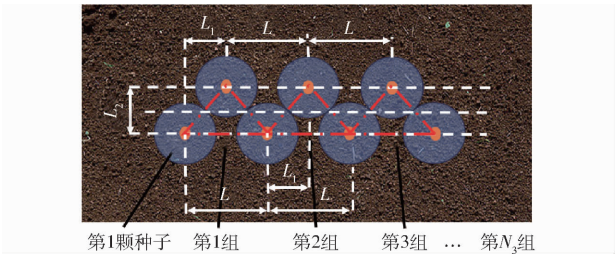


图 16 评价方式示意图

Fig. 16 Schematic of evaluation approach

$$W = \frac{n_1}{N_3} \times 100\% \quad (15)$$

本研究连续选取的总组数 N_3 为 250, 单行理论株距 L 为 20 cm。通过前文对排种器充种过程理论分析可知, 充种高度、作业速度、气腔正压是影响排种器充种性能的主要因素, 以品字合格指数 W 、双行株距变异系数 W_1 为指标进行试验。每组试验重复 3 次取平均值作为试验结果。

5.3 对比试验

为验证排种盘型孔间设有凹槽的辅助充种效果, 利用 3D 打印制作有凹槽及无凹槽排种盘进行台架对比试验, 两种排种盘如图 17 所示。设置充种高度为 50 mm、气腔正压为 4.0 kPa, 作业速度为 10、11、12、13、14、15、16 km/h 进行试验, 得到试验结果如图 18 所示。图中, 有凹槽排种盘品字合格指数均高于无凹槽排种盘, 双行株距变异系数均低于无凹

槽排种盘, 说明型孔间设计凹槽能够通过增强对待充种区种子群的扰动作用减少种间的摩擦, 提高种子充种效率, 有助于排种器播种的成“品”效果与均匀性。其中, 在作业速度为 10 ~ 13 km/h 时, 有无凹槽品字合格指数相差不超过 4.5 个百分点, 当作业速度高于 14 km/h 时, 有无凹槽品字合格指数、双行株距变异系数相差逐渐增大, 说明伴随排种盘转速的增加凹槽提升排种器作业效果越加明显。

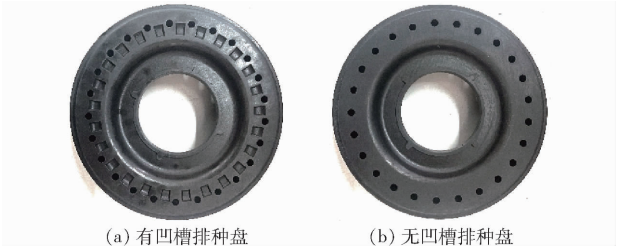


图 17 排种盘实物图

Fig. 17 Physical pictures of seed disc

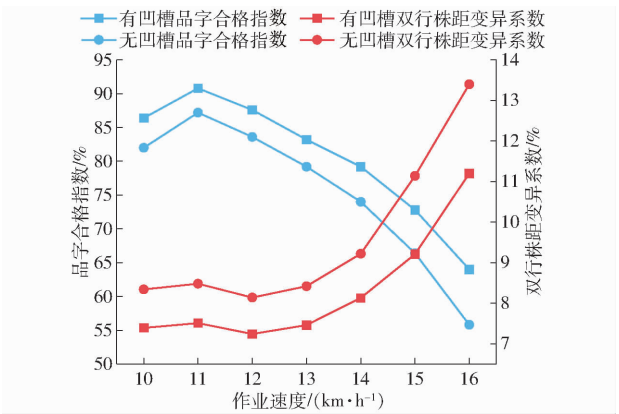


图 18 排种性能变化曲线

Fig. 18 Variation curves of seed discharge performance

5.4 多因素试验

5.4.1 试验方法

基于前期预试验确定充种高度 x_1 为 30 ~ 50 mm, 作业速度 x_2 为 10 ~ 14 km/h, 气腔正压 x_3 为 3.0 ~ 4.0 kPa, 以品字合格指数 W 、双行株距变异系数 W_1 作为试验指标进行三因素五水平 Central Composite 试验设计, 试验因素编码如表 3 所示, 表中部分取值按括号内数据进行了取整处理。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Test factors and codes

编码	因素		
	x_1/mm	$x_2/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	x_3/kPa
-1.682	30	10.0	3.0
-1	34(34.054)	10.8(10.8108)	3.2(3.2027)
0	40	12.0	3.5
1	46(45.946)	13.2(13.1892)	3.8(3.7973)
1.682	50	14.0	4.0

5.4.2 试验结果与分析

试验方案与结果如表 4 所示。

表 4 试验方案与结果
Tab.4 Test scheme and results

编号	因素			W/%	W ₁ /%
	x ₁ /mm	x ₂ /(km·h ⁻¹)	x ₃ /kPa		
1	34	10.8	3.2	86.0	8.84
2	46	10.8	3.2	88.0	9.22
3	34	13.2	3.2	80.8	9.01
4	46	13.2	3.2	84.4	9.79
5	34	10.8	3.8	92.0	7.36
6	46	10.8	3.8	92.4	6.96
7	34	13.2	3.8	88.4	8.01
8	46	13.2	3.8	90.8	8.43
9	30	12.0	3.5	87.2	8.67
10	50	12.0	3.5	89.2	8.82
11	40	10.0	3.5	91.6	7.22
12	40	14.0	3.5	84.8	8.88
13	40	12.0	3.0	82.4	9.04
14	40	12.0	4.0	92.4	6.55
15	40	12.0	3.5	92.0	7.01
16	40	12.0	3.5	92.8	6.57
17	40	12.0	3.5	92.4	6.68
18	40	12.0	3.5	92.0	6.94
19	40	12.0	3.5	92.0	6.66
20	40	12.0	3.5	91.6	6.85
21	40	12.0	3.5	92.0	6.88
22	40	12.0	3.5	92.4	6.94
23	40	12.0	3.5	92.4	6.71

通过 Design-Expert 12 软件对试验数据进行处理,品字合格指数 W、双行株距变异系数 W₁的二次方程方差分析如表 5 所示。品字合格指数、双行株距变异系数的回归模型 P 值均小于 0.01,说明回归模型极显著,失拟性检验 P 值均大于 0.05,为不显著,说明回归模型拟合性好。在品字合格指数的方差分析中,x₁、x₂、x₃、x₁x₂、x₂x₃、x₁²、x₂²、x₃²影响极显著,x₁x₃为影响显著。各因素对合格指数的影响由大到小为:x₃、x₂、x₁。品字合格指数 W 回归方程为

$$W = -304.71 + 3.17x_1 + 14.69x_2 + 133.72x_3 + 0.06x_1x_2 - 0.2x_1x_3 + 1.27x_2x_3 - 0.04x_1^2 - 0.97x_2^2 - 18.7x_3^2$$

(16)

在双行株距变异系数的方差分析中,x₂、x₃、x₁²、x₂²、x₃²影响极显著,x₁、x₁x₂、x₁x₃、x₂x₃影响显著。各因素对合格指数的影响由大到小为:x₃、x₂、x₁。双行株距变异系数 W₁回归方程为

$$W_1 = 164.92 - 1.59x_1 - 10.3x_2 - 35.71x_3 + 0.02x_1x_2 - 0.08x_1x_3 + 0.49x_2x_3 + 0.02x_1^2 + 0.34x_2^2 + 4.36x_3^2$$

(17)

为探究交互项对品字合格指数、双行株距变异系数的影响趋势,绘制等高线图如图 19、20 所示。

表 5 方差分析
Tab.5 Analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
品字合格指数	模型	287.83	9	31.98	201.44	<0.000 1 **
	x ₁	10.13	1	10.13	63.83	<0.000 1 **
	x ₂	47.38	1	47.38	298.41	<0.000 1 **
	x ₃	124.4	1	124.40	783.59	<0.000 1 **
	x ₁ x ₂	1.62	1	1.62	10.20	0.007 **
	x ₁ x ₃	0.98	1	0.98	6.17	0.027 4 *
	x ₂ x ₃	1.62	1	1.62	10.20	0.007 **
	x ₁ ²	29.83	1	29.83	187.92	<0.000 1 **
	x ₂ ²	29.83	1	29.83	187.92	<0.000 1 **
	x ₃ ²	43.42	1	43.42	273.51	<0.000 1 **
	残差	2.06	13	0.158 8		
	失拟	1.07	5	0.213 7	1.72	0.236 5
双行株距变异系数	净误差	0.995 6	8	0.124 4		
	总变异	289.89	22			
	模型	24.89	9	2.77	89.66	<0.000 1 **
	x ₁	0.150 2	1	0.150 2	4.87	0.045 9 *
	x ₂	2.34	1	2.34	75.83	<0.000 1 **
	x ₃	7.75	1	7.75	251.25	<0.000 1 **
	x ₁ x ₂	0.186 1	1	0.186 1	6.03	0.028 9 *
	x ₁ x ₃	0.162 4	1	0.162 4	5.27	0.039 0 *
	x ₂ x ₃	0.238 1	1	0.238 1	7.72	0.015 7 *
	x ₁ ²	8.27	1	8.27	268.26	<0.000 1 **
	x ₂ ²	3.60	1	3.60	116.68	<0.000 1 **
	x ₃ ²	2.36	1	2.36	76.66	<0.000 1 **
	残差	0.401 0	13	0.030 8		
	失拟	0.214 0	5	0.042 8	1.83	0.213 1
	净误差	0.187 0	8	0.023 4		
	总变异	25.29	22			

注:*表示影响显著(0.01≤P<0.05),**表示影响极显著(P<0.01)。

图 19a 中,当充种高度一定时,品字合格指数随着作业速度的增加大体上呈现降低趋势,作业速度快时,排种盘充种时间相对减少,漏播现象增加,排种器呈“品”合格率下降,当作业速度一定时,品字合格指数随着充种高度的增加先增加后减少,充种高度过低时由于种群量不足导致漏播率较高,充种高度过高时会使得种子群对充种区型孔上已压附的种子产生阻碍作用,同时增加了多粒玉米种子出现在一个型孔的概率,从而使漏播指数、重播指数均有增加,充种高度过高、过低都不利于排种器呈现“品”字效果,当充种高度为 38~44 mm、作业速度为 10~12 km/h 时,品字合格指数较高。

图 19b 中,当充种高度一定时,品字合格指数随着气腔正压的增加大体呈增大趋势,腔室内压力越大,种子被压附在型孔越稳定,越有利于排种器播种呈现“品”字,当气腔正压一定时,品字合格指数随着充种高度的增加先增加后减少,当充种高度为 38~44 mm、气腔正压为 3.6~4.0 kPa 时,品字合格指数较高。

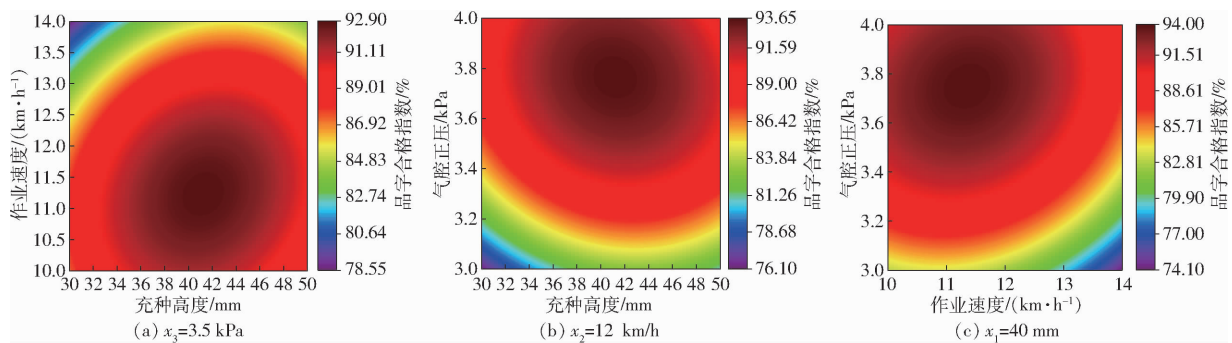


图 19 交互项对品字合格指数影响等高线图

Fig. 19 Effects of interaction terms on contour plots of delta-row qualified index

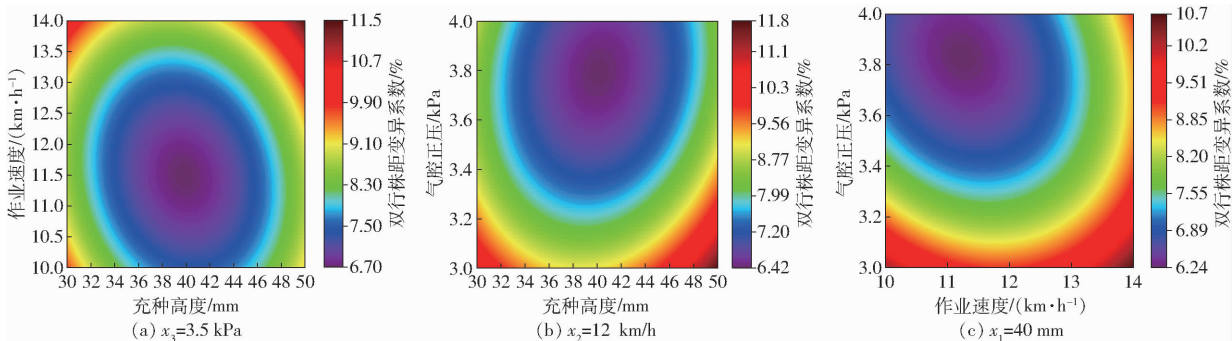


图 20 交互项对双行株距变异系数影响等高线图

Fig. 20 Effects of interaction terms on contour plots of coefficient of variation of two-row spacing

图 19c 中,品字合格指数在作业速度一定时与腔室正压大致呈正相关,在腔室正压一定时与作业速度大致呈负相关,当气腔正压为 3.6 ~ 4.0 kPa、作业速度为 10 ~ 12 km/h 时,品字合格指数较高。

图 20a 中,当作业速度一定时双行株距变异系数随着充种高度的增加先减少后增加,当充种高度为 38 ~ 42 mm 时,充种效果较优,排种器排种效果较为稳定,当充种高度一定时双行株距变异系数随着作业速度的增加先减少后增加,作业速度慢时,排种盘转动慢,充种时间相对增加容易重播,作业速度快时,充种时间相对减小容易漏播,作业速度过快均不利于排种器排种的均匀性,当作业速度为 11 ~ 12 km/h 时,双行株距变异系数可达最低,为 6.70%。

图 20b 中,充种高度一定时,双行株距变异系数随气腔正压的增大呈先减小后增大的趋势,这是因为气腔正压越大,型孔尺寸一定时种子所受压力越大,种子压附越稳定,但压力过大时,由于种子未完全占据型孔表面,正压气流会夹带多余的种子压附在型孔空隙上,出现“一孔多种”的现象,当气腔正压为 3.7 ~ 3.9 kPa,双行株距变异系数最小,可达 6.42%,气腔正压一定时,双行株距变异系数随充种高度的增加基本呈先减小后增大趋势,当充种高度为 38 ~ 42 mm、气腔正压为 3.7 ~ 3.9 kPa 时排种均匀性更优。

图 20c 中,当作业速度一定时双行株距变异系数随气腔正压的增大呈先减小后增大的趋势,当气腔正压一定时双行株距变异系数随作业速度的增加先减小后增大,当气腔正压为 3.7 ~ 3.9 kPa、作业速度为 11 ~ 12 km/h 时,双行株距变异系数均低于 6.89%。

5.4.3 参数优化与试验验证

为获得排种器作业性能最优参数组合,在因素范围内寻找最高品字合格指数以及最低双行株距变异系数,建立优化方程

$$\begin{cases} \max W \\ \min W_1 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 30 \text{ mm} \leq x_1 \leq 50 \text{ mm} \\ 10 \text{ km/h} \leq x_2 \leq 14 \text{ km/h} \\ 3.0 \text{ kPa} \leq x_3 \leq 4.0 \text{ kPa} \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

得到气压式排种器最优参数组合:充种高度为 40.598 mm、气腔正压为 3.763 kPa、作业速度为 11.358 km/h,该参数组合下品字合格指数 W 为 93.959%、双行株距变异系数 W_1 为 6.266%。为验证参数优化结果,在 JPS-16 型排种器检测试验台上进行验证试验,结合实际试验条件按充种高度 41 mm、气腔正压 3.76 kPa、作业速度 11.4 km/h 设置试验参数,得到实际结果与参数优化对比如表 6 所示。优化后组合参数在试验中取得了更优的试验结果,说明参数优化有效,且偏差在 0.2% 以内。

表 6 实际值与优化值对比

Tab.6 Comparison of actual and optimized values

项目	品字合格指数	双行株距变异系数%
实际值	94.00	6.110
优化值	93.959	6.266

5.4.4 适播试验

为探究排种器在最优参数组合下对不同类型玉米的适播情况,将“和育 187”(大扁形)、“迪卡 C2235”(大圆形)、“奥洋红 A9”(小扁形)、“法尔利 1439”(小圆形)4 种玉米作为物料试验对象,按照最优参数组合在 JPS-16 型排种器检测试验台上进行试验,得到试验结果如表 7 所示。

表 7 适播试验结果

Tab.7 Results of suitability trials

%

种子类型	品字合格指数	双行株距变异系数
和育 187	94.0	6.11
迪卡 C2235	92.0	6.72
奥洋红 A9	92.8	6.21
法尔利 1439	91.2	6.97

4 种类型种子品字合格指数、双行株距变异系数极差分别为 2.8%、0.86%,品字合格指数均大于 91%,双行株距变异系数均小于 7%,在可接受范围内,说明排种器在该参数组合下对 4 种类型种子适播性较好。

6 结论

(1)针对目前玉米宽窄行品字形密植模式精量排种器高速作业时排种均匀性差的问题,设计了一种双腔双排种盘交错同步回转的气压式高速精量排种器,阐述了排种器的基本结构与工作过程,确定了排种盘的关键结构参数,对排种器充种过程进行了理论分析,得到了影响排种器性能的主要因素:充种高度、气腔正压以及作业速度。

(2)通过 DEM-CFD 耦合的数值模拟方法探究了排种盘在交错角 2.4°、4.8°、7.2°、9.6°、12°下排种器品字形的播种作业情况,结果表明在排种盘交错角为 7.2°时双行株距变异系数最小,为 4.87%。

(3)针对品字形播种效果缺乏针对性评价指标的问题,提出了品字合格指数对排种效果进行评价。通过多因素试验建立了品字合格指数、双行株距变异系数与影响因素之间的回归模型,确定了最优参数组合为:充种高度 40.598 mm、气腔正压 3.763 kPa、作业速度 11.358 km/h,该参数组合下品字合格指数为 93.959%、双行株距变异系数为 6.266%。通过试验对优化结果进行了验证,偏差在 0.2% 以内。在最优参数组合下进行了 4 种类型玉米的适播试验,品字合格指数均大于 91%。所设计的气压式排种器可满足玉米品字形窄行密植的高速精量播种作业要求。

参 考 文 献

[1] 潘海福,戴飞,史瑞杰,等.基于 AquaCrop 模型的玉米全膜双垄沟播技术研究[J].农业机械学报,2022,53(增刊 1):78-86.
PAN Haifu,DAI Fei,SHI Ruijie,et al. Soil moisture modeling of corn full-film double ridge ditch sowing based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 1):78-86. (in Chinese)

[2] 刘瑞,刘云强,刘忠军,等.玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J].农业机械学报,2023,54(7):156-166.
LIU Rui,LIU Yunqiang,LIU Zhongjun,et al. Research on positive pressure airflow assisted blowing and seed guiding device of corn high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):156-166. (in Chinese)

[3] 王克如,李璐璐,鲁镇胜,等.黄淮海夏玉米机械化粒收质量及其主要影响因素[J].农业工程学报,2021,37(7):1-7.
WANG Keru,LI Lulu,LU Zhensheng,et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai region of China[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(7):1-7. (in Chinese)

[4] 张元红,王瑞,徐宗贵,等.不同降水年型下旱地玉米产量性状对种植密度和品种响应[J].农业工程学报,2021,37(22):136-144.
ZHANG Yuanhong,WANG Rui,XU Zonggui,et al. Responses of yield traits to planting density and cultivar of spring maize in drylands under different rainfall types[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(22):136-144. (in Chinese)

[5] LI Y, BAI Y, ZHANG X, et al. Structural design and simulation analysis of a dual-row pneumatic vegetable precision planter[J]. Processes, 2023, 11(6): 1803.

[6] LI Q, FENG J, JIANG W. Design and experiment on precision seed metering device for narrow-row and dense planting of soybean[J]. INMATEH—Agricultural Engineering, 2022, 67(2):353-363.

[7] SINGH V, MOSES S C, AALAM R N, et al. Field testing and evaluation of a seven-row inclined plate planter for mustard cultivation[J]. International Journal of Plant & Soil Science, 2023, 35(21): 863-868.

[8] BAKHTIARI M R, LOGHAVI M. Development and evaluation of an innovative garlic clove precision planter[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2009, 11(2): 125-136.

[9] 康建明,陈学庚,王士国,等.超窄行棉花精量排种器设计与性能试验[J].甘肃农业大学学报,2016,51(2):134-139.

- KANG Jianming, CHEN Xuegeng, WANG Shiguo, et al. Design and experiment of precise metering device for cotton ultra narrow [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2016, 51(2): 134 – 139. (in Chinese)
- [10] GAUTAM A, KHURANA R, MISHRA P K, et al. Development and evaluation of inclined plate precision planter for pelleted vegetable seed[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2023, 60(1): 24 – 37.
- [11] 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. LIAO Yitao, ZHANG Baixiang, ZHENG Juan, et al. Design and experiment of pneumatic needle planetary gear narrow-row close planting precision seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 86 – 99. (in Chinese)
- [12] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 窄行密植西洋参精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 92 – 103. LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of narrow-row-dense-planting precision planter for American ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 92 – 103. (in Chinese)
- [13] 贾洪雷, 郑健, 赵佳乐, 等. 2BDB-6(110)型大豆仿生智能耕播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 93 – 107. JIA Honglei, ZHENG Jian, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of 2BDB-6(110) soybean bionic intelligent till-sowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 93 – 107. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 陈美舟, 刁培松, 张银平, 等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 8 – 16. CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of pneumatic seed-metering device with single seed-metering plate for double-row in soybean narrow-row-dense-planting seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 8 – 16. (in Chinese)
- [16] 初金星, 陈维刚, 姜明海, 等. 双腔双盘双种带气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(10): 108 – 117. CHU Jinxing, CHEN Weigang, JIANG Minghai, et al. Design and experiment of double cavity, double disc and double seeding rows pneumatic precision seed-metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(10): 108 – 117. (in Chinese)
- [17] GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.
- [18] 孙良, 刘兵, 陈旋, 等. 差速水稻钵苗 Z 字形宽窄行移栽机构设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 18 – 27. SUN Liang, LIU Bing, CHEN Xuan, et al. Design of differential transplanting mechanism for zigzag wide-narrow row rice pot seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 18 – 27. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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. TANG Han. Design and mechanism analysis of ripple surface pickup finger maize precision seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [21] 赵晓顺, 于华丽, 马跃进, 等. 负压式小麦精量排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 11 – 18. ZHAO Xiaoshun, YU Huali, MA Yuejin, et al. Parameter optimization and experiment of negative pressure precision seed-metering device for wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 11 – 18. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] XU J, SUN S, HE Z, et al. Design and optimisation of seed-metering plate of air-suction vegetable seed-metering device based on DEM – CFD[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 277 – 300.
- [24] 苏微, 赵庆辉, 赖庆辉, 等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 144 – 155. SU Wei, ZHAO Qinghui, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 144 – 155. (in Chinese)
- [25] 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)