

# 气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验

王伟<sup>1,2</sup> 宋岚洲<sup>1</sup> 石文兵<sup>1</sup> 魏德华<sup>1</sup> 陈永新<sup>1,2</sup> 陈黎卿<sup>1,2</sup>

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程研究中心, 合肥 230036)

**摘要:** 针对大豆-玉米复合密植播种模式下传统气吸式排种器单行种盘高速作业导致充种时间短、气流稳定性差,难以实现高速精量密植播种的问题,设计了一种气吸双行错置式玉米密植精量排种器,阐述了排种器结构与工作原理,对其工作过程及关键部件进行理论分析,构建充种和投种环节的种子力学模型,确定排种盘内外环型孔排布、投种轮、气室等关键结构参数,并开展单、双气道内负压分布、型孔内气流场特性分析,基于 DEM-CFD 耦合方法对排种器的排种过程进行仿真分析,以作业速度、气室结构和负压为试验因素,充种合格指数、重充指数和漏充指数为评价指标,优选出最优气室结构。通过台架试验开展不同气吸式排种器排种性能对比试验。试验结果表明,在作业速度为 5~10 km/h 的高速密植工况下,气吸双行错置式密植精量排种器排种合格指数均大于 88.7%,且作业速度为 10 km/h 时,相较于常用单圆环气吸式排种器合格指数提高 5.5 个百分点,漏播指数降低 5.6 个百分点;田间试验结果表明,在作业速度为 5 km/h 下,播种合格指数为 95.7%,重播指数为 1.6%,漏播指数为 2.8%。提出的气吸双行错置式玉米密植精量排种器在高速作业时拥有良好的排种性能,能够满足大豆-玉米高速精量密植播种要求。

**关键词:** 玉米; 双行错置式; 气吸式排种器; DEM-CFD; 气室结构

中图分类号: S224.29

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0053-11

OSID:



## Design and Experiment of Air-suction Double-row Staggered Precision Seed Metering Device for Maize Dense Planting

WANG Weiwei<sup>1,2</sup> SONG Lanzhou<sup>1</sup> SHI Wenbing<sup>1</sup> WEI Dehua<sup>1</sup> CHEN Yongxin<sup>1,2</sup> CHEN Liqing<sup>1,2</sup>

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Province Engineering Research Center of Intelligent Agricultural Machinery, Hefei 230036, China)

**Abstract:** A air-suction double-row staggered precision seed metering device was designed to address the problems of short filling time and poor airflow stability caused in the high-speed operation of the traditional air-suction seeder's single row seed tray, which made it difficult to achieve high-speed and precise seeding in the soybean corn compound dense planting mode. The structure and working principle of the seeder were explained, theoretical analysis of the seeding process and key components, construction of seed mechanics models for filling and seeding stages, determination of key structural parameters such as the arrangement of inner and outer ring holes in the seeding disc, seeding wheel, and air chamber, and analysis of negative pressure distribution and airflow characteristics inside single and double air passages were done. Based on the DEM-CFD coupling method, the seeding process of the seeder was simulated and analyzed with operating speed, air chamber structure and negative pressure as experimental factors, and filling qualification rate, refilling rate and leakage rate as evaluation indicators, the optimal chamber structure was selected. A comparative test was conducted on the seeding performance of different air-suction seeders through bench tests. The test results showed that the air-suction double-row staggered dense planting precision seeder had a seeding qualification index greater than 88.7% under high-speed dense seeding conditions with operating speeds of 5~10 km/h. Moreover, compared with the commonly used single ring air-suction seeder at operating speed of 10 km/h, the qualification index was

收稿日期: 2023-11-01 修回日期: 2024-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005008, 52275229)和安徽省农业物质技术装备揭榜挂帅项目(2022296906020007)

作者简介: 王伟(1989—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备研究, E-mail: wangww0618@163.com

通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究, E-mail: lqChen@ahau.edu.cn

increased by 5.5 percentage points and the missed seeding index was decreased by 5.6 percentage points. The field test results showed that under the working condition of 5 km/h, the qualified sowing index was 95.7%, the replanting index was 1.6%, and the missed sowing index was 2.8%. The proposed air-suction double-row staggered corn dense planting precision seeder had good seeding performance in high-speed operation and could meet the requirements of high-speed precision seeding of soybeans and maize.

**Key words:** maize; double-row misplacement; air-suction seed metering device; DEM – CFD; air chamber structure

0 引言

为了满足玉米等大粒径作物机械化播种高质高效和作物高产量要求,优化排种器性能至关重要,其中播种质量是评判排种器性能的重要指标之一<sup>[1-2]</sup>,排种器作为播种机的核心部件,排种器性能直接决定播种机播种质量<sup>[3-5]</sup>,影响玉米机械化高产技术的推广应用和经济效益。

农业生产中常用的精量排种器主要有机械式和气力式两大类<sup>[6]</sup>。其中,机械式排种器结构简单、加工制造成本低,在低速作业情况下排种器性能稳定可靠,播种质量高<sup>[7-12]</sup>,但由于其挖、勺、填充等机械式的充种方式,随着作业速度升高,排种器充种性能变差,播种质量降低,且种子机械破损率会随着排种器转速加快而增高<sup>[13]</sup>,因此难以在高速作业下实现精量播种。牛媛媛等<sup>[9]</sup>通过搅动杆随排种轴的转动提高排种器勺轮孔内的充种率,提高了大豆精量排种器充种性能。气力式排种器对种子的适应性强,且在高速作业时仍有良好的排种性能<sup>[14-18]</sup>。刘瑞等<sup>[14]</sup>设计了一种双重扰动辅助充种高速气吸式排种器,通过对种盘、种室进行优化设计,增大充种区域,加强种群离散度,减小吸附压力,解决了高速作业引起的种子漏吸等问题。大豆玉米复合种植模式下玉米种植密度较传统净作种植增大1倍以上,而高速作业条件下排种频率加快,排种盘转速更高,每个型孔经过充种区时间大幅缩短,种子在极短时间内难以完成充种,从而导致漏播现象发生。李东洋等<sup>[19]</sup>对国内气力式玉米精量排种器结构、原理、性能和优势进行研究,并指出国内玉米精量排种器存在充种效率低、清种效果差、高速工况下播种不稳定等问题。

针对大豆玉米复合密植播种模式下传统气吸式排种器充种性能下降,难以实现高速精量密植播种的问题,本文设计一种气吸双行错置式玉米密植精量排种器,两行型孔错置分布在排种盘,种子受重力、种群压力以及负气压作用下被吸附在排种盘型孔表面,从而实现两行型孔交替充种、排种。基于理论建模、DEM – CFD 耦合数值仿真分析方法对关

键参数进行优化设计,通过台架、田间试验对其工作性能加以验证。

1 结构与原理

1.1 整体结构

排种器结构如图 1 所示,主要由气室盖、投种轮、密封垫、排种盘、清种刀、排种器壳体等组成。排种盘通过中心设置的六棱槽与排种器壳体内一端设有六棱块的排种轴卡接,排种盘均匀分布扰齿的一侧紧贴在排种器壳体上,与排种器壳体围绕形成种室,排种器壳体含有扰齿通过的凹槽。清种刀片设置在排种器壳体上,两刀片分别对应排种盘上的两行型孔。投种轮设置在气室盖内通过滚动轴承连接,密封垫通过卡槽连接在气室盖上。气室盖背面有吸气口通过管路与风机相连接,气室盖紧贴排种盘形成负压气室。

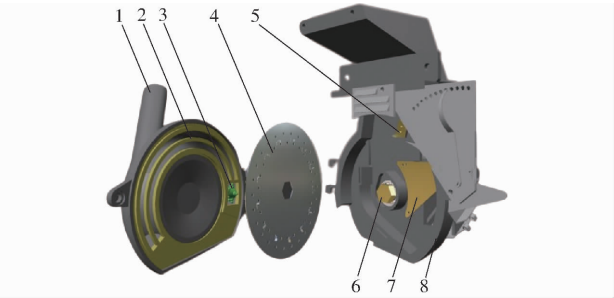


图 1 排种器结构图

Fig. 1 Schematic of seed-metering device's structure  
1. 气室盖 2. 密封垫 3. 投种轮 4. 排种盘 5. 清种刀  
6. 传动轴 7. 进种调节板 8. 排种器壳体

1.2 工作原理

排种器分为 5 个区域,分别为充种区、清种区、运种区、投种区和过渡区,如图 2 所示。排种器工作时,电机带动排种盘转动,种子在自身重力、种群压力以及负气压气流对种子的吸力的作用下实现两行型孔交替充种,随后种子跟随排种盘一起转动,运动到清种区域时,多余的种子被两行型孔两侧的清种刀清除并重新落回种群中,然后种子随排种盘转动通过运种区来到投种区完成投种,最后通过过渡区进入充种区开始下一轮充种。投种轮中心轴线与排种盘齐高,因而在同一水平高度处两行型孔被投种

轮堵住,负压消失,种子被投种轮从型孔中顶出并脱离排种盘,并在自身重力及所带初速度的作用下落在出料口,实现两行种子有序排出。完成排种后,排种盘进入过渡区,随后进入充种区进行下一轮充种。因此,相较于单行型孔排种盘,排种盘转一周可以实现双行排种,在作业速度和株距不变的情况下使排种盘达到稳定排种转速,型孔充种时间充足,排种器充种性能变优。

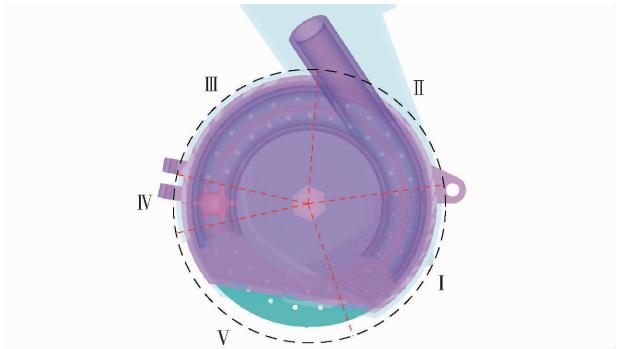


图 2 排种盘分区示意图

Fig. 2 Diagram of division of row seed plate

I. 充种区 II. 清种区 III. 运种区 IV. 投种区 V. 过渡区

## 2 关键部件设计与参数分析

### 2.1 双行错置式排种盘设计

排种盘是吸附、携带玉米种子并保证排种器实现精量排种的核心部件。双行错置式排种盘结构除了需要适应排种器其他部件设计外还需要满足内外行型孔之间的距离大于玉米种子的最大尺寸,防止充种过程中相邻型孔间的种子互相干涉,同时应保证内外行型孔的充种时间及充种角度相同,避免两行充种效果存在较大差异,并且两行型孔通过充种区的弧长越长,经过的种子越多,充种效果越好。在玉米种子脱离排种盘完成投种时,排种盘赋予种子一个初速度,内外行种子初速度差异尽可能小才能保证种子有序排出,均匀性好。

排种盘直径直接影响型孔数量和气室结构以及负压等参数<sup>[20]</sup>。根据排种器几何关系可得

$$\begin{cases} l_{\alpha 1} = vt_{\alpha} \\ v = \frac{n\pi r_1}{30} \\ l_{\alpha 1} = \alpha r_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $l_{\alpha 1}$ ——外行型孔充种区弧长,m

$v$ ——外行型孔线速度,m/s

$t_{\alpha}$ ——充种时间,s

$n$ ——排种盘转速,r/min

$r_1$ ——外行型孔中心到排种盘中心的距离,m

$\alpha$ ——充种角,rad

由式(1)可得

$$t_{\alpha} = \frac{30\alpha}{\pi n} \quad (2)$$

根据式(2)可知,充种时间  $t_{\alpha}$  只受充种角  $\alpha$  和排种盘角速度  $n$  的影响,且与充种角  $\alpha$  成正比,与排种盘角速度  $n$  成反比,而排种盘直径并不影响充种时间<sup>[20-22]</sup>。根据排种器整体结构以及玉米播种农艺要求,本文排种盘直径设为 220 mm。

排种盘型孔数量直接决定排种盘转速,是影响排种效率与排种质量的重要因素。在大豆玉米复合种植的情况下,玉米株距为 10 ~ 12 cm,可得型孔数量  $k$  的计算式为

$$\begin{cases} k = v_{\alpha} t / l_z \\ t = \frac{1}{n} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $l_z$ ——株距,m

$v_{\alpha}$ ——播种机作业速度,m/s

$t$ ——排种盘转一圈的时间,s

由式(3)可得

$$k = \frac{v_{\alpha}}{nl_z} \quad (4)$$

由式(4)可知,型孔数量受拖拉机作业速度以及排种盘转速影响,且与排种盘转速成反比,型孔数量越少,排种盘转速越高。排种盘转速直接影响排种器播种质量,为了使排种盘转速降低,应设计尽可能多的型孔数量,同时考虑到排种盘直径,一行存在较多型孔则种子之间存在相互干扰,因此设置两行型孔,每行型孔数为 26,等角度错置分布。错置分布的两行型孔到排种盘中心的距离不同,对排种器充种性能及播种均匀性有很大影响,计算式为

$$\begin{cases} (r_1 - r_2 \cos \eta)^2 + (r_2 \sin \eta)^2 = L_d^2 \\ L_{r1} = \frac{\theta \pi r_1}{180} \\ L_{r2} = \frac{\theta \pi r_2}{180} \\ \eta = \frac{360}{52} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $r_2$ ——内行型孔中心到排种盘中心距离,m

$L_d$ ——相邻内外行型孔中心距离,m

$L_{r1}$ ——外行型孔经过充种区弧长,m

$L_{r2}$ ——内行型孔经过充种区弧长,m

$\eta$ ——相邻两型孔之间的夹角,(°)

$\theta$ ——充种区角度,(°)

由式(5)可看出, $r_1$  与  $r_2$  相差越大,内外行型孔中心的距离越大,且型孔中心到排种盘中心的距离  $r_1$ 、 $r_2$  越远,型孔经过充种区的弧长也就越长。因此,为了得到更优良的充种性能,内外行型孔中心到排

种盘都应尽可能大,并且为了让内外行型孔的线速度相差较小,减小投种时内外行初速度的差异,两行型孔中心到排种盘中心的距离差值应较小。同时为了防止内外行型孔充种时相互干扰,相邻内外行型孔的距离  $L_d$  应大于玉米种子最大尺寸,随机挑选 500 粒郑单 958 玉米种子测量其三轴尺寸,测量知玉米种子平均长度为 9.6 mm,宽度为 9.1 mm,厚度为 4.6 mm,因此设置两行型孔到排种盘中心的距离分别为 83、78 mm。

2.2 充种受力分析

在充种过程中,排种盘上的扰种齿扰动种群,增加种群间的空隙率,型孔附近的种子处在气流场中,距离型孔最近的种子在吸附力的作用下被吸附向型孔移动,此时可能存在几粒优势相同的种子同时靠近型孔,并且互相干扰,直到有一粒种子被吸附在型孔上。对种子充种过程进行受力分析,如图 3 所示。

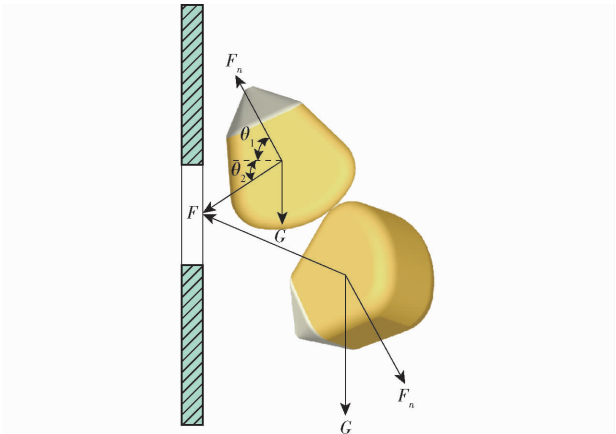


图 3 充种过程受力分析

Fig. 3 Force analysis of suction seed course

由图 3 可得

$$\begin{cases} F\cos\theta_1 + F_n\cos\theta_2 > 0 \\ F\sin\theta_1 + G > F_n\sin\theta_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $F$ ——气流场对种子的作用力, N  
 $F_n$ ——存在竞争关系的种子之间的阻力, N  
 $\theta_1$ —— $F_n$ 与水平面之间的夹角, (°)  
 $\theta_2$ —— $F$ 与水平面之间的夹角, (°)

由式(6)可得

$$\begin{cases} F > -\frac{F_n\cos\theta_2}{\cos\theta_1} \\ F > \frac{F_n\sin\theta_2 - G}{\sin\theta_1} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,存在竞争关系的种子之间的阻力  $F_n$ 和其与水平面之间的夹角越大,所需要的气流场对种子的作用力越大,气流场对种子的作用力与水平面之间的夹角  $\theta_2$ 越小,所需要的气流场对种子的作用力越大,当夹角  $\theta_2$ 小于一定角度或夹角  $\theta_1$ 大

于一定角度时,则其他种子率先完成该型孔的充种。另外利用恒定流能量方程对种子周围压强进行分析

$$\begin{cases} p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = C \\ F = ps \\ s = (k_2 - k_1)\frac{2Q}{\pi d} \\ Q = v_1 s \end{cases} \quad (8)$$

式中  $p$ ——压强, Pa       $v_1$ ——风速, m/s  
 $\rho$ ——空气密度, kg/m<sup>3</sup>  
 $g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>  
 $h$ ——垂直高度, m       $k_2$ ——常数, 取 0.2  
 $s$ ——气流对种子作用力的面积, m<sup>2</sup>  
 $k_1$ ——常数       $C$ ——常数  
 $Q$ ——空气流量, m<sup>3</sup>/s  
 $d$ ——型孔直径, m

由式(8)可得

$$F = (C - \rho gh)(k_2 - k_1)\frac{2Q}{\pi d} - \frac{\rho Q \pi d}{4(k_2 - k_1)} \quad (9)$$

由式(9)可知,气流场对种子的作用力  $F$ 与空气流量  $Q$ 成正比,与型孔直径  $d$ 成反比,可以通过增加空气流量或减小型孔直径来增加气流场对种子的吸附力。型孔直径越大需要的气流场的作用力就越小,并且种子凹陷进入型孔的部分越多,种子充种后越不易掉落,同时型孔直径不能大于种子最小直径,防止种子吸入气室,并且型孔过大容易吸附两粒以上的种子导致重播现象发生,结合测量的玉米种子参数,型孔直径取 4.5 mm。

充种完成后,种子附着在排种盘上跟随排种盘一起转动,如图 4 所示,在种子脱离种群离开充种区之后,种子仍然受到种子间的内摩擦力、向心力和种子与排种盘之间的摩擦力等作用,而两行型孔因为到排种盘中心的距离不同,所以吸附的种子受到的向心力和摩擦力有所差异。

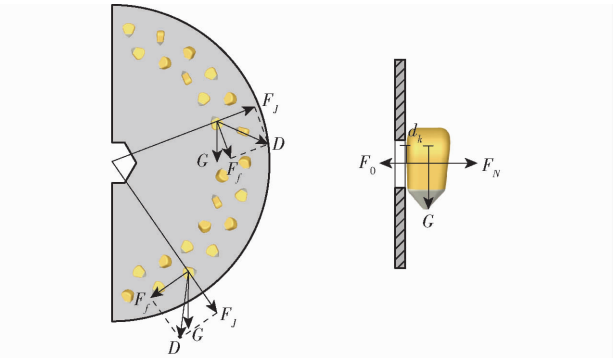


图 4 完成充种的种子受力图

Fig. 4 Completing full seed stress map

气室负压是保证排种器排种质量的重要因素,

为了保证种子能够克服阻力的干扰,气室提供的气压吸力能够使吸附在型孔上的种子稳定地离开充种区,内行充种后种子需要满足

$$\begin{cases} p_0 = \frac{F_0}{S} \\ S = \frac{\pi d^2}{4} \\ \frac{d}{2}(F_0 - F_N) = Ed_k \\ E = \sqrt{D^2 + G^2 + 2DG\cos\beta} \\ D = \sqrt{F_f^2 + F_j^2} \\ F_j = m\omega^2 r_2 \\ G = mg \end{cases} \quad (10)$$

式中  $p_0$ ——气室负压,Pa  
 $F_0$ ——单个吸孔吸力,N  
 $S$ ——单个吸孔横截面积,mm<sup>2</sup>  
 $d_k$ ——玉米种子中心到排种盘的距离,mm  
 $E$ —— $G$ 、 $F_f$ 、 $F_j$ 的合力,N  
 $D$ —— $F_f$ 、 $F_j$ 的合力,N  
 $F_f$ ——种子间的内摩擦力,N  
 $F_j$ ——种子受到的向心力,N  
 $\beta$ ——力  $D$  与  $G$  的夹角,(°)  
 $m$ ——单粒种子质量,kg  
 $\omega$ ——排种盘角速度,rad/s  
 $F_N$ ——排种盘对种子的支撑力,N

在实际作业时,排种器还会受到振动和冲击等外界环境因素的影响,因此还需考虑到吸种可靠性系数  $c_1$ 、工作可靠性系数  $c_2$  和环境可靠性系数  $c_3$ ,即

$$p_0 = \frac{8c_1c_2c_3d_k}{\pi d^3} \sqrt{F_f^2 + F_j^2 + G^2 + 2G\cos\beta} \sqrt{F_f^2 + F_j^2} \quad (11)$$

由式(11)可知,气室所需负压随着玉米种子中心到排种盘中心的距离增大而增大,因此只需气室负压能够满足外行种子需求,则能满足内行种子所需。在最大极限条件下, $\cos\beta = 1$ ,可得

$$p_0 = \frac{8c_1c_2c_3d_k}{\pi d^3} \left( 1 + \frac{r_1\omega^2}{g} + \lambda \right) \quad (12)$$

式中  $\lambda$ ——玉米种子摩擦阻力综合系数

由式(12)可知,气室所需负压还与种子物理机械特性、排种盘转速和型孔直径等密切相关,在相同农艺要求和作业速度下,型孔数量越少排种盘转速越慢,所需的气室负压越小。为了使玉米种子能够吸附在型孔上,不在外力作用下脱离种盘,在高速作业时播种机需要的气室负压应大于  $p_0$  的最大值。压强越大则对种子的吸附力越强,能够提供良好的充种和运种效果,减少漏播现象的发生,然而气室负

压过大可能导致型孔在充种区吸附多粒种子,在清种区清种刀又难以清除,使得重播现象发生。此外,还应考虑到密封垫磨损导致的气密性下降以及种子腐蚀性等自然条件和外界环境的影响,因此气室压强应比理论值略大一些,气吸式玉米排种器理想负压为 3 kPa,但该排种器所用排种盘上有两行型孔,负压需求更大,基于以上理论,本文设计气室负压为 3 ~ 5 kPa。

### 2.3 投种轮设计

在气室盖与排种盘形成的负压气室中,投种轮上两行轮齿分别与两行型孔啮合,如图 5 所示。由排种盘带动投种轮一起转动,投种轮的中心轴线与排种盘中心齐高,可以保证两行种子在同一水平高度处负压消失,种子被投种轮顶出,在垂直向下的初速度和自身重力的作用下均匀、有序地投种。

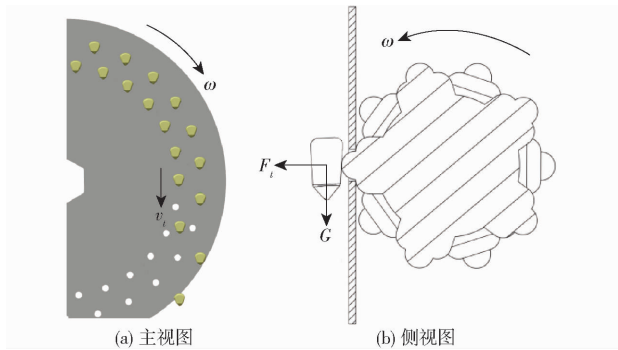


图 5 投种轮与排种盘啮合图

Fig. 5 Seeding wheel and seeding disc meshing diagrams

由排种盘直径、两行型孔到排种盘中心的距离和型孔直径可以确定两行轮齿之间的距离为 5 mm。为了使型孔负压消失,粗轮齿直径应略大于型孔直径,并且粗轮齿能够贴在排种盘上,因此粗轮齿直径设计为 6 mm。为了实现通过顶种使种子脱离排种盘,细轮齿直径应小于型孔直径,同时为了避免细轮齿卡在型孔中,其高度不易过高,因此细轮齿直径设计为 4 mm,高度设计为 2 mm。投种轮半径与齿数  $z$  的关系为

$$\begin{cases} l_1 = \frac{2\pi r_1}{26} \\ l_2 = \frac{2\pi r_2}{26} \\ l_1 \leq \frac{2\pi r}{z} \leq l_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中  $l_1$ ——外行两型孔之间的弧长,m

$l_2$ ——内行两型孔之间的弧长,m

$r$ ——粗轮齿表面到投种轮中心的距离,m

考虑到气室盖厚度有限,粗齿轮表面到投种轮中心的距离设为 13 mm,由式(13)得齿数可取 4 或 5,考虑到投种轮半径,同时齿数取 4 时两齿之间的

弧长与内行两型孔间的弧长相差较大,容易造成卡顿,因此单行齿数取 5,投种轮直径取 14 mm。为了避免排种轮与排种盘啮合运动过程中产生较大的震动,轮齿采用弹性较强的橡胶材料。

3 仿真试验

3.1 玉米种子颗粒模型建立

以郑单 958 玉米种子为模型,种子外形近似马蹄形,然后在 Solidworks 中对玉米种子外形进行三维模型建立,考虑到流固双向耦合中颗粒模型体积应小于流体模型所划分网格的 1/3,因此在 EDEM 中采用粘结颗粒模型填充玉米模型,得到仿真所需要的玉米颗粒模型,如图 6 所示。

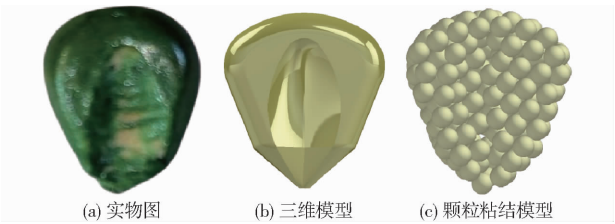


图 6 玉米种子仿真模型

Fig. 6 Simulation models of maize grains

3.2 排种器几何模型建立

为了减小仿真计算量和计算时间,提高计算效率,在 Solidworks 中对排种器结构进行简化,另存为 step 格式后分别导入到 EDEM 和 ANSYS,在 Space Claim 中进行流体区域生成并在 ANSYS Meshing 对其进行网格划分,随后导入 Fluent 中<sup>[24-26]</sup>,如图 7 所示。

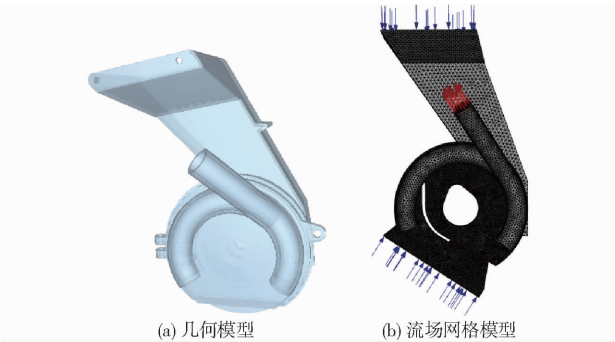


图 7 仿真几何模型

Fig. 7 Simulated geometric models

设计 3 种气盖与密封垫组合并形成不同气室,并通过仿真分析,选出双行错置式排种盘最优的排种器性能的气室结构。A 组合为气盖内设置有一列宽度为 15 mm 的环形凹槽作为气室,密封垫贴在气盖内壁的气室周围,两行型孔由同一气室提供负压吸力;B 组合为气盖内设置有两列宽度为 5 mm 的环形凹槽作为双行气室,密封垫贴在气盖内壁的双行气室周围,装配完成后两行气室分别与两行型孔旋

转的轨迹对应,分别为两行型孔提供负压吸力;C 组合的气盖与 A 组合气盖设置相同,有一列宽度为 15 mm 的环形凹槽,密封垫同样贴在气盖内壁的气室周围,不同的是密封垫环形孔内设有一列向气室凹槽内突起的部分,将靠近排种盘部分的气室分为内外两行气室,而气室远离排种盘的部分未被分流,两行气流被分流之前能够进行气流交换,保证分流后为两行型孔提供的负压相差较小。图 8 为 3 种气盖与密封垫组合示意图,其中左侧图为三维模型图,右侧图为气室截面图。

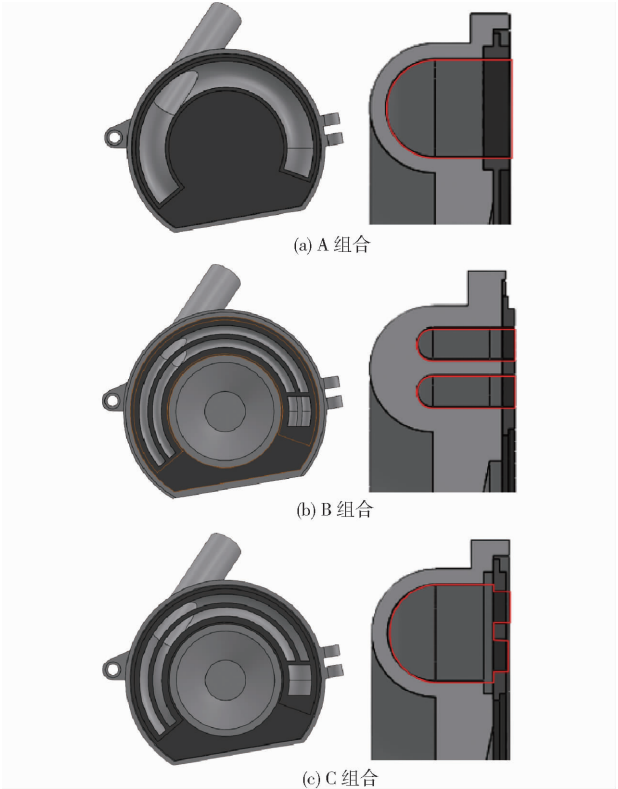


图 8 气室结构

Fig. 8 Air chamber structure diagrams

3.3 仿真参数

根据排种器加工所用材料,排种盘为激光切割的铝合金,排种器壳体为铸铁,气盖等为 3D 打印树脂材料。玉米种子、铸铁和不锈钢的力学特性和相互之间的物理特性如表 1 所示<sup>[23]</sup>。

表 1 模拟所需物理和力学特性参数

Tab. 1 Physical and mechanical characteristics required for simulation

| 参数                                     | 玉米种子                | 壳体                     | 排种盘                    |
|----------------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| 泊松比                                    | 0. 4                | 0. 3                   | 0. 3                   |
| 剪切模量/Pa                                | $1. 10 \times 10^7$ | $7. 00 \times 10^{10}$ | $2. 06 \times 10^{11}$ |
| 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 1 053               | 7 800                  | 7 900                  |
| 碰撞恢复系数(与种子)                            | 0. 6                | 0. 6                   | 0. 6                   |
| 静摩擦因数(与种子)                             | 0. 5                | 0. 3                   | 0. 3                   |
| 动摩擦因数(与种子)                             | 0. 01               | 0. 01                  | 0. 01                  |

3.4 仿真结果及分析

3.4.1 气室气压

通过 Fluent 对 3 种不同的气盖和密封垫的组合进行仿真试验,在给气室提供负压为 3 kPa 的情况下,分析 3 个不同气室内压强分布情况,如图 9 所示。

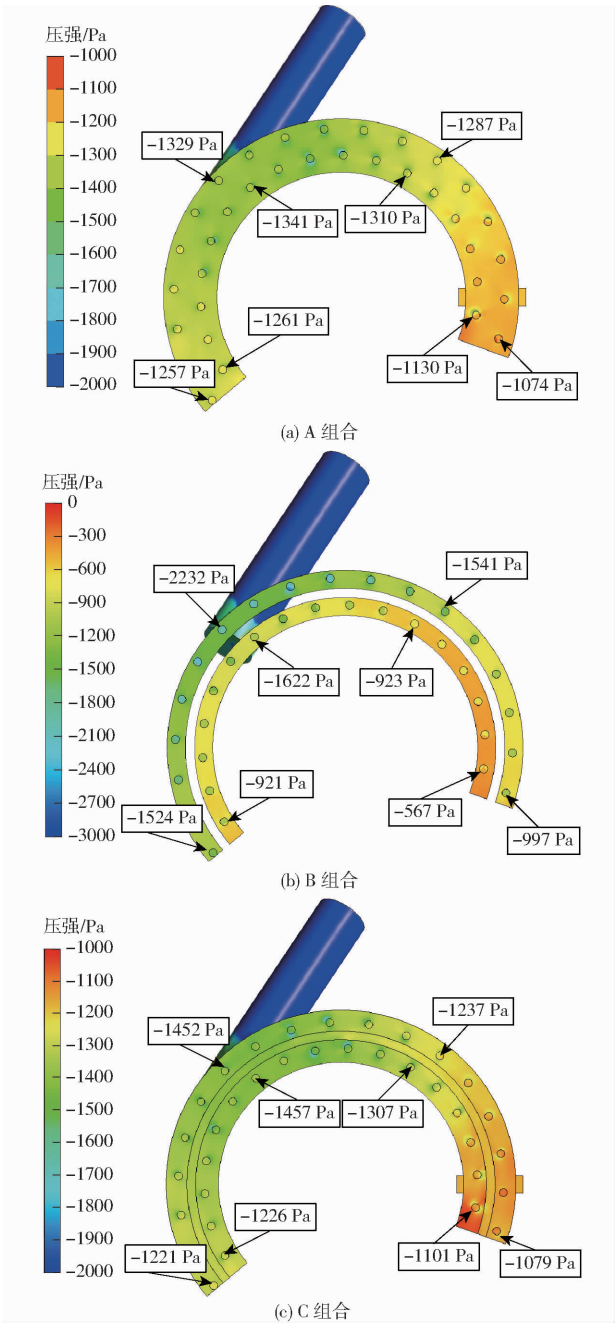


图 9 3 个不同气室内压强分布

Fig. 9 Pressure distributions in three different gas chambers

从图 9 可以看出,A、B 组合内外行型孔压强云图差异较明显,最大压差达 618 Pa,C 组合内外行型孔压强云图差异较小,平均最大压差达 44 Pa。气室最多分布有 35 个型孔,图中外行分布有 18 个,内行分布有 17 个,设置 A、B、C 组合的外行型孔从左到右依次为 a1 ~ a17,内行型孔从左到右依次为 b1 ~

b17,将内外行型孔的压强和流速导入到 Origin 处理并分析,如图 10 所示。

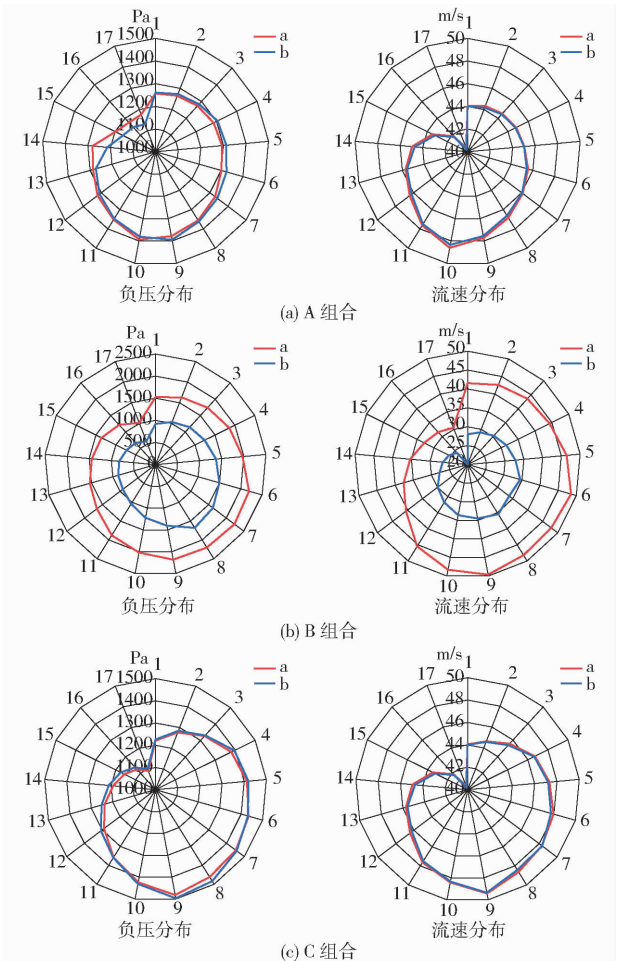


图 10 内外行型孔负压和风速

Fig. 10 Negative pressure and wind speed of inside and outside hole

从图 10 可以看出,由于 a9、b9 位于风口处,负压及风速最大,并且随着到风口距离越远,负压和风速递减,而 a17、b17 距离风口最远,负压及风速最小。图 10 中,B 组合内外行负压和流速差异很大,压差为 500 ~ 800 Pa,风速差为 10 ~ 15 m/s,考虑其原因可能是两行气室的风口面积不同导致给两行气室提供的负压存在很大的差异。而 A 组合和 B 组合两气室连通可以交换气流,负压在两行气室分布较为均匀,内外行压差和风速差较小,但与 C 组合相比,B 组合中风口附近的负压下降较快,风速快速降低,且 B 组合的气室与排种盘接触面积大,能量损耗较大。与 A、B 组合相比,C 组合不仅内外行压差及风速差较小,并且其气室与排种盘接触面积较小,能量损耗小,随着距离风口越远,负压下降较慢。因此,该排种器选用 C 组合时,风压分布最均匀,稳定性最好。

3.4.2 排种性能

EDEM 软件中设置接触模型为 Hertz - Mindlin,

仿真环境重力加速度为  $9.81\text{ m/s}^2$ , 颗粒工厂  $1\text{ s}$  生成 500 颗玉米种子, 一共生成 2 000 颗种子, 种子数量过少将无法充满种腔, 影响仿真效果, 排种器材料及接触参数如表 1 所示。根据大豆玉米复合种植的农艺要求, 玉米株距为  $10\sim12\text{ cm}$ , 在高速作业情况下播种机速度为  $5\sim10\text{ km/h}$ , 不同作业速度下对应的排种盘角速度为

$$\omega=\frac{v_{\alpha}}{3.6kl_z}$$

(14)

排种盘与投种轮转速比为 26:5, 时间步长设置为  $5\times10^{-6}$ 。Fluent 软件中设置  $k-\varepsilon$  模型, 在气室出口处设置负压 3~5 kPa, 排种盘型孔中的气体网格设置和 EDEM 中排种盘相同转速与转向, 由于投种轮通过堵住气孔使负压消失, 因此在抽取体积时设置投种轮位置为堵住气孔时所在位置, 从而实现在投种处负压消失, 同时便于仿真计算, Fluent 时间步长应是 EDEM 时间步长的整数倍, Fluent 时间步

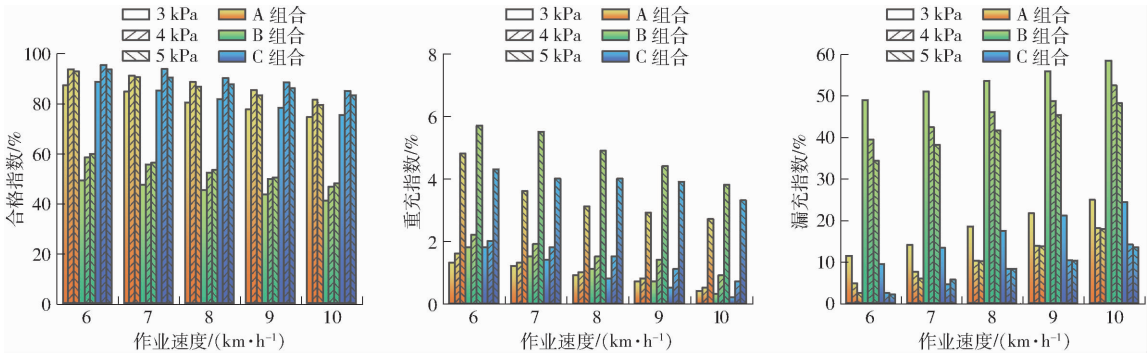


图 11 仿真试验结果  
Fig. 11 Simulation test results

从图 11 可看出, 随着作业速度升高, 排种盘转速变快充种时间变短, 因此漏充率随之增大, 但 A 组合损耗更多导致分布在每个型孔的负压比 C 组合较小, 因此其漏充率也较高, 随着负压增大, 型孔负压变大, 重充率随之增大, 而 A 组合损耗较低, 因此其重充率较低于 C 组合。B 组合气压分布不均匀, 内行负压较小外行负压较大, 在低气压时外行型孔可以较好地充种投种, 而当气压升高后, 内行的气压随之升高可以减少漏播发生, 但外行气压过高将导致外行型孔重充率增大。因此, 在低损耗下 C 组合能够最好的满足播种要求, 并且在播种机作业速度为  $7\text{ km/h}$ , 气室负压为  $4\text{ kPa}$  时, 合格率最高为  $97.2\%$ , 漏充率为  $2.1\%$ , 重充率为  $0.7\%$ 。

4 台架试验

为了验证气吸双行错置式玉米密植精量排种器的性能, 并与常用的玉米气吸式排种器进行排种效果对比, 于 2023 年 5 月 15 日, 在安徽省智能农机装备工程实验室的 JPS-12 型试验台进行台

架试验。  
设置作业速度为  $6\sim10\text{ km/h}$ , 每隔  $2\text{ km/h}$  设一个水平, 负压为  $3\sim5\text{ kPa}$ , 每隔  $1\text{ kPa}$  设置一个水平, 结构为 3 种不同的气室组合结构, 因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码  
Tab. 2 Coding of test factors

| 编码 | 因素   |        |                            |
|----|------|--------|----------------------------|
|    | 气室结构 | 负压/kPa | 作业速度/(km·h <sup>-1</sup> ) |
| -1 | A 组合 | 3      | 6                          |
| 0  | B 组合 | 4      | 8                          |
| 1  | C 组合 | 5      | 10                         |

仿真试验以充种合格指数、重充指数和漏充指数作为试验指标, 每组进行多次试验取平均值减小误差, 最后将试验数据导入到 Origin 中进行处理, 试验结果如图 11 所示。

架试验。

4.1 材料与方法

加工试制仿真优化后排种盘和气室盖与密封垫组合, 排种盘采用激光切割的铝合金, 气盖和密封垫等为树脂材料 3D 打印, 选用仿真模型所用的郑单 958 玉米种子, 与常见的玉米气吸式排种器(选用农哈哈 2BYQF-4 型免耕气吸精播机所用排种器)进行对比试验。试验装置如图 12 所示。

根据 GB/T 6979—2005《单粒(精密)播种机试验方法》, 对两种排种器在负压为  $4\text{ kPa}$  时进行作业速度为  $5\sim10\text{ km/h}$  的单因素试验, 每组试验重复 3 次, 每次试验采集 301 粒种子统计数据, 对 3 次试验结果取平均值进行分析, 以合格指数、重播指数和漏播指数为排种性能评价指标进行台架试验, 排种效果如图 13 所示。

4.2 试验结果分析

试验结果如图 14 所示, 从图 14 可以看出, 随着作业速度的增大, 合格指数和重播指数呈下降趋势,

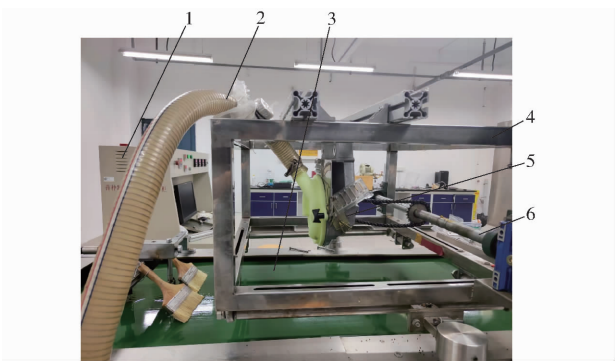


图 12 排种试验台

Fig. 12 Seeding test bench

1. 操作台 2. 负压气管 3. 种床带 4. 安装支架 5. 排种器  
6. 传动轴

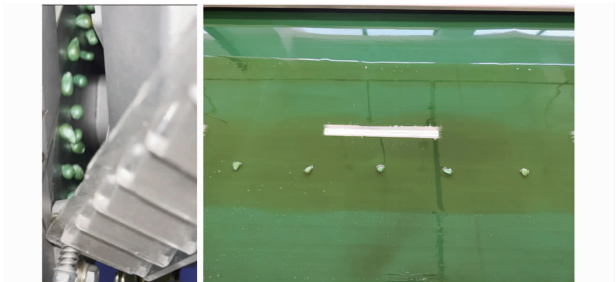


图 13 排种效果图

Fig. 13 Planting effect drawing

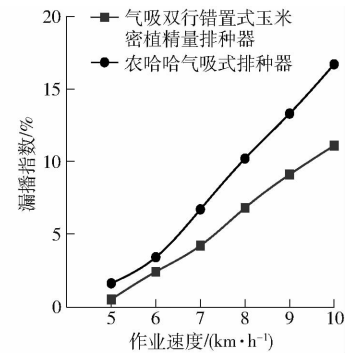
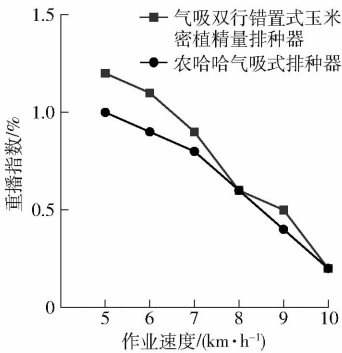
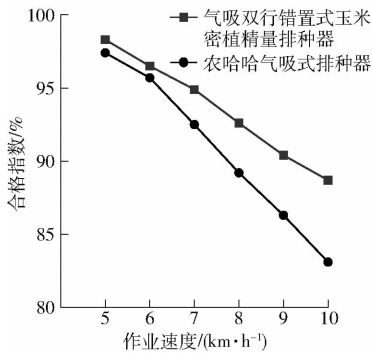


图 14 试验结果

Fig. 14 Test results

时,气吸双行错置式玉米密植精量排种器合格指数大于 88.7%,重播指数小于 1.2%,漏播指数小于 11.1%,满足播种质量要求。因此该排种器在高速播种作业情况下能够满足大豆玉米复合种植下玉米农艺要求,具有良好的排种性能。

5 田间试验

为进一步验证气吸双行错置式玉米密植精量排种器的实际田间播种作业性能,于 2023 年 6 月 25 日在宿州萧县丁里镇浮绥山开展玉豆复合种植田间播种试验,如图 15 所示。播种的玉米种子品种为郑单 958 玉米种子,田间试验的配套动力为东方红 LN2004 型拖拉机,播种完成后将上层土壤慢慢拨开

而漏播指数为上升趋势。气吸双行错置式玉米密植精量排种器合格率始终高于常用玉米气吸式排种器,合格指数在作业速度不大于 6 km/h 时相差较小,在作业速度达到 7 ~ 10 km/h 时,常用气吸式排种器合格指数下降趋势变快,漏播指数上升趋势也变快,而气吸双行错置式玉米密植精量排种器的合格指数和漏播指数变化趋势较小。在作业速度为 10 km/h 时,气吸双行错置式玉米密植精量排种器的合格指数相较于常用玉米气吸式排种器高 5.5 个百分点,漏播指数降低 5.6 个百分点,两者的重播指数相差较小,气吸双行错置式玉米密植精量排种器相较于常用的玉米气吸式排种器的重播指数平均低 0.1 个百分点。

由图 14 可得,在排种盘单行型孔数相同的情况下,气吸双行错置式玉米密植精量排种器转一周所排出的种子是常用玉米气吸式排种的两倍,在相同的作业条件下,双行错置式排种器的排种盘转速只有常用排种器的一半,充种时间也更长,排种性能更稳定,因此其在高速作业的情况下漏播指数更低,合格指数更高。

从图 14 可看出,播种作业速度为 5 ~ 10 km/h



图 15 田间播种试验

Fig. 15 Field seeding test

寻找玉米种子入土后的位置,测量玉米种子粒距,获得播种指标。

参照台架试验的最优作业参数,在作业速度为 5 km/h 的情况下进行田间试验,对应的排种盘转速

为 16.03 r/min,播种深度 3 ~ 5 cm。取播种机匀速前进 2.5 m 为一组取样长度,取样 5 组,求平均值为最终结果。田间试验结果为:播种合格指数 95.7%、重播指数 1.6%、漏播指数 2.8%。

田间试验结果与台架试验结果存在差异,原因主要是田间播种作业时播种机存在震动等外界影响,并且拖拉机前进速度发生变化,导致与拖拉机 PTO 连接的风机风压不稳定,对充种率、运种稳定性和投种轨迹存在一定影响。

## 6 结论

(1) 针对大豆-玉米复合密植模式下气吸式排种器传统单圆环种盘高速导致充种性能差、气流稳定性差的问题,设计了一款气吸双行错置式玉米密植精量排种器,阐述了其整体结构和工作原理,并确定关键结构参数。

(2) 对不同的气盖和密封垫组合成的气室结构进行了仿真,分析负压的分布情况,并对播种过程进行仿真,确定最优气室结构,仿真结果表明 C 组合的气室中气压分布最均匀,需要风机提供的风压最小,耗费最少。

(3) 对比试验结果表明,相较于常用玉米气吸式排种器,气吸双行错置式玉米密植精量排种器随着作业速度的提高,合格指数下降缓慢,并且在作业速度为 10 km/h 时,合格指数高 5.5 个百分点,漏播指数降低 5.6 个百分点。

(4) 田间试验结果表明,气吸双行错置式玉米密植精量排种器在高速作业的情况下仍能满足大豆玉米复合种植条件下玉米的播种要求,具有良好的播种性能,在作业速度为 5 km/h、气室负压为 4 kPa 时,播种效果最优,合格指数为 95.7%,重播指数为 1.6%,漏播指数为 2.8%。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] GAO X, XIE G, LI J, et al. Design and validation of a centrifugal variable-diameter pneumatic high-speed precision seed-metering device for maize[J]. Biosystems Engineering, 2023, 227: 161 - 181.
- [3] HU H J, ZHOU Z L, WU W C, et al. Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralised seed-metering device for rapeseed using a CFD - DEM coupled simulation[J]. Biosystems Engineering, 2021, 208: 246 - 259.
- [4] 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.
- [5] TANG H, XU F D, GUAN T Y, et al. Design and test of a pneumatic type of high-speed maize precision seed metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107997.
- [6] LI C, CUI T, ZHANG D X, et al. Design and experiment of a centrifugal filling and cleaning high-speed precision seed metering device for maize[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139083.
- [7] 李玉环, 魏亚男, 杨丽, 等. 扰动促充机械式绿豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 43 - 53.  
LI Yuhuan, WEI Ya'nan, YANG Li, et al. Design and experiment of mung bean precision seed-metering device with disturbance for promoting seed filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup. 1): 43 - 53. (in Chinese)
- [8] 侯守印, 邹震, 魏志鹏, 等. 柔性机械式大豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 77 - 86, 108.  
HOU Shouyin, ZOU Zhen, WEI Zhipeng, et al. Design and experiment of flexible mechanical soybean precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 77 - 86, 108. (in Chinese)
- [9] 牛媛媛, 徐铭辰, 屈哲, 等. 基于 EDEM 的自扰动内勺式大豆精密排种器的设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(11): 202 - 207.  
NIU Yuanyuan, XU Mingchen, QU Zhe, et al. Design and test of self-disturbing inner spoon type soybean precision metering device based on EDEM[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(11): 202 - 207. (in Chinese)
- [10] 曾心玥, 赖庆辉, 赵瑾汶, 等. 内充式三七精密排种器的设计[J]. 西北农林科技大学学报, 2022, 50(6): 139 - 154.  
ZENG Xinyue, LAI Qinghui, ZHAO Jinwen, et al. Design of internal filling precise seed metering device for *Panax notoginseng* [J]. Journal of Northwest A&F University, 2022, 50(6): 139 - 154. (in Chinese)
- [11] 王业成, 高云鹏, 台文硕, 等. 指夹式马铃薯精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 49 - 58.  
WANG Yecheng, GAO Yunpeng, TAI Wenshuo, et al. Design and test of pickup finger potato precision seed metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 49 - 58. (in Chinese)
- [12] XU J, SUN S L, HE Z K, 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.
- [13] 贾洪雷, 陈玉龙, 赵佳乐, 等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 75 - 86.  
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75 - 86. (in Chinese)

[14] 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)

[15] 史嵩,刘虎,位国建,等.基于 DEM–CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(5):54–66.  
SHI Song,LIU Hu,WEI Guojian,et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM–CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):54–66. (in Chinese)

[16] 杨文彩,阚成龙,张效伟,等.气吸式三七育苗播种精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(6):95–105.  
YANG Wencai,KAN Chenglong,ZHANG Xiaowei,et al. Design and test of precision seed metering device for *Panax notoginseng* seedling and seeding by air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):95–105. (in Chinese)

[17] 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.  
ZHANG Xuejun,CHENG Jinpeng,SHI Zenglu,et al. Simulation and experiment of seed taking performance of swing-clamp type maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):38–50. (in Chinese)

[18] 王国伟,夏晓蒙,朱庆辉,等.基于 DEM–CFD 耦合的辅助充种气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[J].吉林大学学报,2022,52(5):1208–1221.  
WANG Guowei,XIA Xiaomeng,ZHU Qinghui,et al. Design and experiment of soybean high-speed precision vacuum seed metering with auxiliary filling structure based on DEM–CFD[J]. Journal of Jilin University,2022,52(5):1208–1221. (in Chinese)

[19] 李东洋,金厚熙,雷德超,等.国内气力式玉米精量排种器研究进展[J].现代农业科技,2023(16):136–138.  
LI Dongyang,JIN Houxi,LEI Dechao,et al. Research progress on pneumatic corn precision seed-metering device in China[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2023(16):136–138. (in Chinese)

[20] 谢东波,张春岭,吴晓庆,等.扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(2):47–57.  
XIE Dongbo,ZHANG Chunling,WU Xiaoqing,et al. Design and test of garlic seed placer with seed disturbing tooth assisted air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):47–57. (in Chinese)

[21] 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)

[22] 刘海,廖宜涛,王磊,等.小白菜正负气压组合式精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(10):54–65.  
LIU Hai,LIAO Yitao,WANG Lei,et al. Design and experiment of positive and negative pressure combination precision metering device for Pakchoi[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):54–65. (in Chinese)

[23] 陈玉龙,贾洪雷,王佳旭,等.大豆高速精密播种机凸勺排种器设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(8):95–104.  
CHEN Yulong,JIA Honglei,WANG Jiaxu,et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8):95–104. (in Chinese)

[24] WANG Y B,HE M Z,YAN Q H,et al. DEM–CFD simulation and seed orientation evaluation of a self-suction wheat shooting device[J]. Powder Technology,2023,427:118746.

[25] HAN D D,ZHANG D X,JING H R,et al. DEM–CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air-blowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2018,150:426–438.

[26] 孙征宇,孟文俊,康凯,等.螺旋输送机卸料口流量脉动影响因素研究[J].包装与食品机械,2022,40(6):59–64.  
SUN Zhengyu,MENG Wenjun,KANG Kai,et al. Study on the influencing factors of flow pulsation at the outlet of screw conveyor[J]. Packaging and Food Machinery,2022,40(6):59–64. (in Chinese)