doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.020

正负气压组合槽孔轮式小麦排种器设计与试验

廖宜涛[1,2]　张　翼[1]　蒋　杉[1]　李　甜[1]　廖庆喜[1,2]

（1. 华中农业大学工学院，武汉 430070；2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室，武汉 430070）

摘要：针对传统小麦排种器能耗高、卸种不畅及充种稳定性不足等问题，设计了一种正负气压组合槽孔轮式小麦排种器。该排种器以“负压吸种 + 槽轮辅助充种 + 正压卸种”为核心工作原理，通过在排种轮表面设置凸包槽孔结构以增强种群扰动，提高充种稳定性，并在投种区引入正压气流实现辅助卸种。通过理论分析构建了吸种、携种、投种阶段种子力学模型，明确了排种轮转速、负压、型孔尺寸等关键参数对排种性能的影响机制；基于 EDEM 软件分析了槽孔轮、凸包槽孔轮和窝眼轮对种群扰动的效果，确定凸包槽孔轮为最优选择，其种群平均动能达 6.6×10^{-9} J，较窝眼轮提升 4.4 倍；利用 CFD 软件优化型孔直径组合，当排种轮 1 型孔直径为 1.6 mm、排种轮 2 型孔直径为 1.8 mm 时，型孔气流速度变异系数最低（2.13%），气流分布最均匀。台架试验结果表明，在最优参数组合为转速 30 r/min、负压 2.5 kPa 时，平均排量为 157.47 g/min，各行排量一致性变异系数（RCV）为 2.46%，总排量稳定性变异系数（TCV）为 1.09%，满足精量播种标准。田间试验测得各行株数一致性变异系数为 11.22%，排种均匀性良好。研究结果可为小麦低能耗高稳定性精量排种装置设计提供参考。

关键词：小麦；精量排种器；正负气压；凸包槽孔轮；仿真试验

中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)18-0234-12　　**OSID**：

Design and Experiment of Positive and Negative Air Pressure Combined Grooved Hole Wheel Metering Device for Wheat

Liao Yitao[1,2]　Zhang Yi[1]　Jiang Shan[1]　Li Tian[1]　Liao Qingxi[1,2]

(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Aiming to address the problems of high energy consumption, poor seed discharge, and insufficient seed-filling stability in traditional wheat seed metering devices, a positive and negative air pressure combined grooved hole wheel metering device was designed. The device operated based on the principle of “negative-pressure seed suction + auxiliary seed filling by a slotted wheel + positive-pressure seed discharge”. A convex slotted-hole structure was arranged on the surface of the seed metering wheel to enhance seed group disturbance and improve seed-filling stability, while positive airflow was introduced in the seed release zone to assist seed discharge. A mechanical model of seed motion during the seed suction, seed carrying, and seed release stages was established through theoretical analysis, and the influence mechanisms of key parameters, including seed metering wheel rotational speed, negative pressure level, and hole size on seeding performance were clarified. Based on EDEM simulation, the disturbance effects of a slotted-hole wheel, convex slotted-hole wheel, and cell wheel on the seed population were compared. The results showed that the convex slotted-hole wheel was the optimal structure, with an average seed-group kinetic energy of 6.6×10^{-9} J, which was 4.4 times higher than that of the cell wheel. CFD simulation was used to optimize the hole diameter combination. When the diameter of type-Ⅰ holes on seed metering wheel 1 was 1.6 mm and that of type-Ⅱ holes on seed

收稿日期：2026-03-09　修回日期：2026-04-22

基金项目：国家自然科学基金项目（52575286）、华中农业大学“要术开物计划”培育项目（2662025GXPY004）、湖北省农机研发制造推广应用一体化试点项目（202501）、湖北数智农机产业技术体系岗位专家项目（2025HBSTX4-15）和国家现代油菜产业技术体系油菜耕种机械化岗位项目（CARS-12-27）

作者简介：廖宜涛（1982—），男，教授，博士生导师，主要从事现代农业装备设计与测控研究，E-mail：liaoetao@mail.hzau.edu.cn

metering wheel 2 was 1.8 mm, the airflow velocity coefficient of variation reached the minimum value of 2.13%, indicating the most uniform airflow distribution. Bench test results showed that under the optimal parameter combination of a rotational speed of 30 r/min and a negative pressure of 2.5 kPa, the average seeding rate was 157.47 g/min, the row coefficient of variation of seeding rate (RCV) was 2.46%, and the total coefficient of variation of seeding rate (TCV) was 1.09%, meeting the requirements of precision seeding standards. Field test results indicated that the consistency variation coefficients of the number of plants per row was 11.22%, demonstrating good seeding uniformity. The results can provide a reference for the design of low-energy-consumption and high-stability precision seed metering devices for wheat.

Key words: wheat; precision seed drill; positive and negative air pressure; convex slot wheel; simulation test

0　引言

小麦是我国主要粮食作物之一，种植面积常年稳定在 2.3×10^7 hm^2，在保障国家粮食安全中占据核心地位[1-3]。长江中下游地区作为冬小麦主产区，普遍采用稻麦一年多熟轮作模式，机械化播种是实现小麦高产高效的关键环节[4]。播种质量直接决定植株群体分布均匀性，均匀的种子分布能有效减少植株间光、水、养分的竞争，显著提升群体产量与抗逆性[5-7]。

在当前小麦播种技术体系中，外槽轮式排种器应用较广[8]。该排种器结构简单、成本低、易维护，常用于较大播量的条播作业，但存在脉动性，易导致缺苗断垄或种子密集分布，且存在卡种破种等现象[9]；相比之下，气吸式排种器利用负压吸附种子，吸种过程无剪切载荷，损伤率低，播量控制精度高，能够实现精量播种，但所需负压较大，难以满足低能耗等需求[10-11]。

近年来，国内外学者围绕小麦精量排种技术开展了大量研究。在结构优化方面，众多学者通过改进排种盘结构提升排种性能，如设计弓型、圆弧梯型等异形槽[5,12-13]，或通过增设刮种板、清种刷等辅助结构，有效提升充种稳定性[14]；在种群调控方面，隔种板、搅种装置的引入，有效增强种子离散度，缓解种群拖带问题[15-16]；在气力辅助方面，针孔管、导种条等部件的应用，通过改善气流场分布，提升了种子在排种过程中的运动稳定性与粒距一致性[17-19]。国外农业装备巨头如德国阿玛松、美国约翰迪尔等公司，推出了一系列先进小麦播种设备，但多为大体型机器，适用于宽幅高速作业场景，且价格昂贵、维护成本高，难以适配我国以小农户分散经营为主的农业生产模式[20-21]。国内研究多聚焦单一排种性能提升，仍存在单一负压吸种需较高真空度，能耗居高不下、投种区卸种不畅导致排种均匀性波动等问题。

本文设计一种正负气压组合槽孔轮式小麦排种器。通过负压实现稳定吸种，并在投种区引入正压气流实现辅助卸种；通过凸包槽孔轮结构增大种群扰动，在降低吸种风压的同时提升充种效率。基于排种过程建立种子力学模型，并结合 EDEM 离散元与 CFD 仿真方法对排种轮结构及型孔参数进行优化，通过台架试验与田间试验验证排种性能，以期为小麦精量排种装置结构优化提供理论依据。

1　总体结构及工作原理

正负气压组合槽孔轮式小麦排种器结构如图 1 所示，主要由气室体、槽孔轮、落种口、侧板、卸种板和轴承盖等部件组成。薄壁轴承、槽孔轮、内六角轴承、侧板依次安装到排种器一侧，其中薄壁轴承具有减小摩擦阻力和密封气室的作用，内六角轴承用于固定槽孔轮防止轴向移动，同时为转动轴旋转提供支撑、减小摩擦。

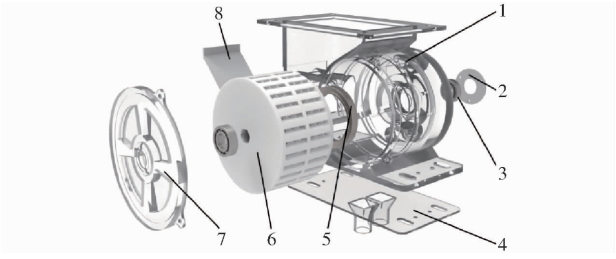


图 1　排种器结构示意图

Fig. 1　Schematic of seed metering device structure

1. 气室体　2. 轴承盖　3. 内六角轴承　4. 落种板　5. 薄壁轴承　6. 槽孔轮　7. 侧板　8. 卸种板

排种器工作时，排种轮由电机驱动，按指定方向转动，风机提供正负压并通过正负压进气管分别进入正负压气室区。种箱连续为充种室提供种子，处于吸种区内的种子依靠自身重力和负压气流被吸附至槽孔内，随槽孔平台旋转带动种子从吸种区至携种区，随后转入投种区，此时，气室隔板隔绝负压，槽孔底部型孔所对应的气流通道从负压气室区转变为正压气室区，型孔内种子所受的吸力转变为吹力，在自身重力及正压气流作用下种子从槽孔落下，沿落种口排出，完成排种作业。排种作业完成后，抽出卸

种板,卸出充种室内的剩余种子,清理排种器以便下次使用和维护,工作原理如图 2 所示。

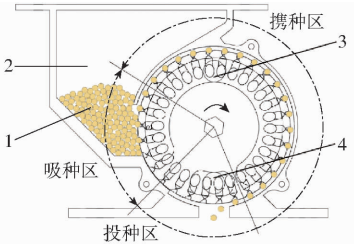


图 2 排种过程工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of seeding process

1. 种子 2. 充种室 3. 负压进气管 4. 正压进气管

将 2 个排种器合并为排种器组,排种器组整体为轴对称结构,主要由电机、2 个对称设计的排种器及对应种箱组成,采用对称设计使风机进气管、电机位于两排种器之间,将两侧留出以方便换轮操作,结构更紧凑,同时电机为两侧排种器旋转排种提供驱动力,实现 1 组 4 行精量排种,结构分布如图 3 所示。

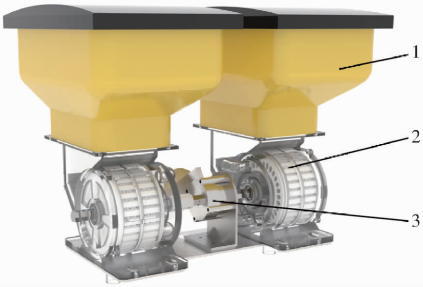


图 3 排种器组示意图

Fig. 3 Schematic of seed metering device group

1. 种箱 2. 排种器 3. 电机

2 关键结构设计

2.1 槽孔轮

槽孔轮主要参数有槽孔轮直径、形状以及型孔直径等。槽孔轮靠近气室一端采用薄壁轴承与气室体相连,固定在传动轴上,随传动轴旋转,从而实现小麦排种。

2.1.1 槽孔轮直径

槽孔轮直径决定排种器整体尺寸、槽孔间距及数量等。槽孔轮直径越大则壁面均布越多槽孔,可容纳更多种子,但过大的排种轮直径会导致排种器整体庞大,需较大负压运移种子,使负载增加。排种轮直径与充种性能相关,种子在排种器中经过充种区的时间(充种时间)为

$$t_1 = \frac{l_1}{v_1} \tag{1}$$

其中

$$l_1 = d_1\theta_4$$

$$v_1 = \pi n \frac{2d_1}{60}$$

式中 t_1——充种区充种时间,s

v_1——型孔线速度,m/s

l_1——充种区对应弧长,m

d_1——排种轮半径,m

θ_4——充种区对应角度,(°)

n——排种轮转速,r/min

计算得充种时间 t_1 为

$$t_1 = \frac{30\theta_4}{\pi n} \tag{2}$$

由式(2)可知,种子充种时间与充种区角度和排种轮转速有关,充种区弧长越长,转速越慢,排种轮与种子接触时间越长,使充种更充分。在转速不变条件下,排种轮直径是影响充种时间的主要因素。

根据设计经验,现有用于小麦播种外槽轮直径为 50 ~ 140 mm[22],并考虑到气流通道以及与排种轮配套的轴承,取排种轮直径为 133 mm,有利于延长充种时间、提高充种性能。

2.1.2 槽孔轮尺寸形状和数量

槽孔是排种轮关键参数之一,其尺寸与种子形状紧密相关,应保证恰好有 1 粒种子能顺利充满槽孔,槽孔单元长 l、宽 b、高 h 应满足[23]

$$\begin{cases} l_{\max} < l < 2l_{\min} \\ b_{\max} < b < l_{\min} \\ \dfrac{1}{2}h_{\max} < h < \dfrac{3}{2}h_{\min} \\ h < b < l \end{cases} \tag{3}$$

式中 $l_{\max}$——种子最大长度,mm

$l_{\min}$——种子最小长度,mm

$b_{\max}$——种子最大宽度,mm

$b_{\min}$——种子最小宽度,mm

$h_{\max}$——种子最大高度,mm

$h_{\min}$——种子最小高度,mm

采用小麦种子“郑麦 9023”为研究对象,物理机械特性参数如表 1 所示。由表 1 可知,小麦种子多为类椭球形,因腹面一面存在腹沟,使种子高度略小于宽度,导致进入槽孔的姿态以腹沟“平躺”为主[5,22]。将小麦种子长、宽、高代入式(3),选择小麦排种轮槽孔单元长 l_j、宽 b_j、高 h_j 为 8.0、5.2、3.2 mm。

槽孔横截面形状可分为弓形、圆弧梯形和直槽形等,其中弓形槽孔相对其他形状更具有将种子充入槽孔的趋势[24]。根据小麦自然休止角,采用具有倾斜角大于种子自然休止角的弓形槽孔结构,有利于种子填充和排出,同时在棱角处进行倒角设计,以减少转动过程中排种轮对种子的损伤。将小麦排种轮槽孔设计为长槽,长槽内设置 3 个型孔,以便吸附 3 ~ 4 粒小麦种子,通过仿真试验发现,凸包结构能

表 1　小麦种子机械物理特性

Tab. 1　Physical and mechanical parameters of wheat seeds

参数	数值
长度/mm	6.4
宽度/mm	3.0
高度/mm	2.7
千粒质量/g	44.7
自然休止角/(°)	28.9
滑动摩擦角(ABS)/(°)	23.5

增大排种轮扰动性且能减小长槽重吸率，故采用凸包结构将长槽分为多个短槽。槽孔结构如图 4 所示。

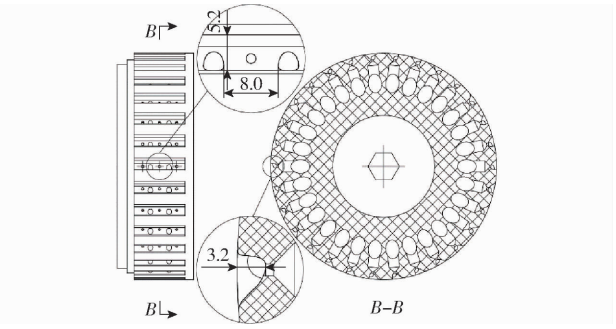


图 4　槽孔结构示意图

Fig. 4　Structure diagram of groove hole

槽孔数量受排种轮直径影响，在排种轮直径、转速相同的条件下，槽孔数量越多，相应充种量越多，一定程度上有助于更均匀、稳定地排种。但槽孔数量过多易伤种，过密的槽孔数量也会对相邻气流通道内气流造成影响。同时槽孔数量应与播种粒距要求相结合，因此按照小麦播种农艺要求进行计算，株距计算式为

$$X_r = \frac{S_1 M_1}{W m_1} \times 10^3 \tag{4}$$

式中　X_r——株距，mm

S_1——面积，m^2

W——播种行距，mm

m_1——播量，kg/hm^2

M_1——种子千粒质量，kg

结合小麦机械化播种技术要求，小麦播种理论播量为 120 ~ 150 kg/hm^2，播种行距取 220 mm，千粒质量取 0.045 kg，经计算小麦株距为 13.64 ~ 17.05 mm。

排种器型孔数量计算式为

$$N_i = V_a \frac{60}{n} \frac{1}{X_r} \times 10^3 \tag{5}$$

式中　N_i——排种器型孔数量，个

V_a——播种机前进速度，m/s

当拖拉机行进速度为 2 ~ 3 km/h，排种轮转速取 20 ~ 30 r/min，经计算播种小麦时型孔数量为 70 ~ 122 个。考虑到 2 个气流通道之间的间隙以及排种轮直径等因素，将小麦排种轮槽孔设计为长槽，1 个长槽对应 3 个型孔，型孔总数为 90。

型孔直径与吸种效果紧密相关。型孔内外由于压强作用形成压力差，进而将种子吸附在型孔上，较小尺寸型孔在压力差一定时单位面积吸附效果较好，但通常需要加大真空度以减小漏吸现象；而较大尺寸型孔吸力较大，易造成重吸现象，且可能将种子窄端吸进型孔，出现卡种甚至破坏排种器结构等极端情况；因此型孔直径计算式为

$$D_1 = cb_3 \tag{6}$$

式中　D_1——型孔直径，mm

c——系数，取 0.62 ~ 0.64

b_3——种子窄端长度，mm

根据对小麦机械物理特性参数测量数据，小麦窄端长度为 2.4 ~ 2.8 mm，代入式(6)计算并取整可获得小麦排种轮型孔直径为 1.5 ~ 1.8 mm。通过仿真试验确定小麦 2 个排种轮型孔直径分别为 1.6、1.8 mm。

2.2　种子填充力学分析

为明确影响排种性能的主要因素，对排种过程中种子受力情况进行分析，进而为排种器结构参数提供理论依据。运用理论力学相关知识，对正负气压组合式小麦排种器工作过程进行阐述，主要包括吸种环节、携种环节和投种环节 3 个部分。

2.2.1　吸种过程力学分析

吸种环节是排种过程的起始阶段，决定槽孔轮抓取种子能力，直接关系到排种器作业成效[25]。在吸种区，种子处在多重作用力交互的复杂状态[26]，利用风机为气室提供的负压，在型孔两侧形成压力差，排种轮转动，进行扰种运动，种群呈离散化趋势，种子脱离种群，同时在重力辅助作用下被吸附至排种轮的槽孔中，随之转动，相较于纯负压吸种能耗降低。种子被吸附至槽孔的受力情况如图 5 所示，作用在种子的合力作用点位于种子质心，假定排种轮给种子的支持力沿槽轮法线方向，负压气流为长定流。

沿槽孔轮法向、切向方向建立 XY 轴直角坐标系，由达朗贝尔原理，受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_X = F_d + F_{N2}\sin\alpha_1 + F_{S2}\cos\alpha_1 + G\sin\theta_1 - F_{N1} - F_C \\ F_Y = F_l + F_{S1} + F_{N2}\cos\alpha_1 - G\cos\theta_1 - F_{S2}\sin\alpha_1 \\ F_X = F_Y = 0 \end{cases} \tag{7}$$

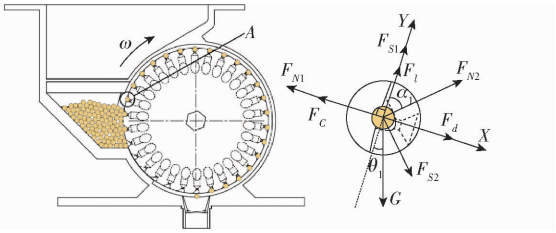


图 5 吸种过程受力分析

Fig. 5 Force analysis of sucking process

其中

$$\begin{cases} F_{S1} = F_{N1}\tan\varphi_1 \\ F_{S2} = F_{N2}\tan\varphi_2 \\ F_C = m\omega^2 R \\ \omega = \dfrac{\pi n}{30} \\ G = mg \\ F_l = \dfrac{1}{2}C_l\rho V_a^2 S_D \\ F_d = \dfrac{1}{2}C_d\rho V_a^2 S_D \\ V_a = \sqrt{\dfrac{2\Delta P}{\rho\xi}} \\ S_D = \dfrac{\pi d^2}{4} \end{cases} \tag{8}$$

式中 m——种子质量,g

G——种子重力,N

F_l——绕流升力,N

F_d——绕流阻力,N

F_C——惯性离心力,N

F_{N1}——排种轮给种子的支持力,N

F_{N2}——种子与种子的挤压力,N

F_{S1}——排种轮给种子的摩擦力,N

F_{S2}——种子与种子的摩擦力,N

ω——排种器角速度,rad/s

R——排种轮半径,mm

α_1——F_{S1}与 F_{N2}之间的夹角,(°)

θ_1——吸种角,(°)

φ_1——种子与槽轮间摩擦角,(°)

φ_2——种子自然休止角,(°)

g——重力加速度,m/s^2

C_l——绕流升力系数,取 0.32

C_d——绕流阻力系数,取 0.48[27]

ρ——空气密度,kg/m^3

S_D——种子绕流阻力特征面积,m^2

ΔP——型孔内真空度,Pa

d——种子算术平均直径,mm

ξ——型孔阻力系数

整理可得型孔内真空度 ΔP 为

$$\Delta P = \frac{4\xi}{\pi d^2[C_d - C_l\tan(\alpha_1+\varphi_2)]} \cdot \left\{ m\frac{\pi^2 n^2 R}{900} + F_{N1}[1+\tan\varphi_1\tan(\alpha_1+\varphi_2)] - mg[\sin\theta_1 + \cos\theta_1\tan(\alpha_1+\varphi_2)] \right\} \tag{9}$$

在其他条件不变时,种子吸附过程中真空度受到种子质量 m、种子与槽轮间摩擦角 φ_1、种子自然休止角 φ_2、排种器转速 n、排种轮半径 R、吸种角 θ_1 等因素的影响。当种子被吸附时,减小吸种角则需增大真空度,即增大吸种负压;同时排种轮半径越大,所需真空度也越大。并且当种子被顺利吸附时,槽孔轮旋转速度越快,对真空度要求越高。在实际播种环节中,作业条件较为复杂,受环境因素影响较大,实际所需真空度应由排种器性能试验得出。

2.2.2 携种过程力学分析

携种环节是种子从吸种区到投种区的过渡阶段,是顺利运输所吸附种子的关键一环。在携种区域,种群之间的挤压力以及排种轮给种子的扰动消失,负压气流为定常流,以保证种子无滑动或滚动,保持原姿态,此时种子受力较为均匀,运动平缓,是观察种子吸附状态的最佳时期,假设各槽孔中有且仅有 1 粒种子的情况下,对携种区内种子进行受力分析,如图 6 所示。

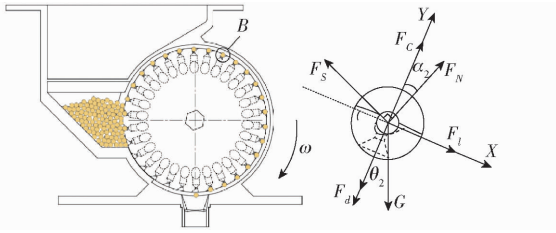


图 6 携种过程受力分析

Fig. 6 Force analysis of carrying process

沿槽孔轮法向、切向方向建立 XY 坐标系,受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_X = G\sin\theta_2 + F_l - F_N\sin\alpha_2 - F_S\cos\alpha_2 \\ F_Y = G\cos\theta_2 + F_d + F_S\sin\alpha_2 - F_C - F_N\cos\alpha_2 \\ F_X = F_Y = 0 \end{cases} \tag{10}$$

其中

$$\begin{cases} F_S = F_N\tan\varphi_1 \\ F_C = m\omega^2 R \\ \omega = \dfrac{\pi n}{30} \end{cases}$$

式中 θ_2——重力与法向方向夹角,(°)

α_2——F_N 与 F_C 之间的夹角,(°)

整理可得在携种过程中真空度 ΔP 为

$$\Delta P = \frac{4\xi}{\pi d^2 [C_d(\sin\alpha_2 - \tan\varphi_1\cos\alpha_2) + C_l(\tan\varphi_1\sin\alpha_2 - \cos\alpha_2)]} \cdot \left[m\frac{\pi^2 n^2 R}{900}(\sin\alpha_2 - \tan\varphi_1\cos\alpha_2) + mg\sin(\theta_2 - \alpha_2) + mg\tan\alpha_2\cos(\theta_2 + \alpha_2) \right] \tag{11}$$

其他条件不变时，携种过程中真空度受种子质量 m、种子与槽轮间摩擦角 φ_1、排种器转速 n、排种轮半径 R、排种轮转动角度等因素的影响。携种环节负压为保持种子克服转动产生的离心力而不从槽孔掉落，无种群间作用力，所需真空度小于吸种环节，故满足吸种所需负压即满足携种所需负压，最小负压应为满足吸种所需负压。

2.2.3　投种过程力学分析与运动轨迹分析

投种环节是排种过程的最后一环，是保证种子顺利排下的重要一步。当种子从携种区到达投种区时，气室内隔板阻断负压，槽孔轮对种子的吸附力消失，种子在离心力和自身重力作用下脱离槽孔轮。因种子不具备光滑表面，且种子之间球度差异大，为避免种子卡在槽孔间造成不落种的现象，在投种区连通正压，将种子吹离槽孔，提高卸种能力，其受力分析如图 7 所示。

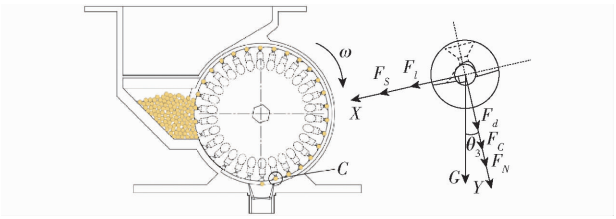


图 7　投种过程受力分析

Fig. 7　Force analysis of dropping process

沿槽孔轮法向、切向方向建立 XY 坐标系，受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_X = G\sin\theta_3 + F_l + F_S = ma_x \\ F_Y = G\cos\theta_3 + F_d + F_C + F_N = ma_y \end{cases} \tag{12}$$

其中

$$\begin{cases} F_S = F_N\tan\varphi_1 \\ F_C = m\omega^2 R \\ \omega = \dfrac{\pi n}{30} \end{cases}$$

式中　θ_3——重力与 Y 轴方向夹角，(°)

a_x、a_y——种子切向、法向加速度，m/s^2

整理可得真空度 ΔP 为

$$\Delta P = \frac{4\xi}{\pi d^2(C_d\tan\varphi_1 + C_l)}\left[ma_x + ma_y\tan\varphi_1 - mg(\sin\theta_3 + \cos\theta_3\tan\varphi_1) - m\frac{\pi^2 n^2 R}{900}\tan\varphi_1 \right] \tag{13}$$

气流真空度能对种子加速度产生影响，进而影响种子投种轨迹。在投种环节，投种轨迹大致可分为 3 种：第 1 种为提前投种，当转动至投种区时，排种轮转动速度较慢，正压较大，种子受气压影响、提前脱离槽孔，以滑动或滚动姿态拖带到达落种口，形成提前投种，如图 8 中轨迹 a 所示；第 2 种为正常投种，当排种轮转速以及正压合理时，种子在投种区以无接触式从落种口排出，是理想投种状态，如图 8 中轨迹 b 所示；第 3 种为滞后投种，当转速较大或正压相对值较小时，种子由于惯性被槽轮携带，在远离投种口端脱离槽轮，形成滞后投种，如图 8 中轨迹 c 所示。提前投种和滞后投种都会导致种子在投种区产生碰撞，影响投种轨迹。

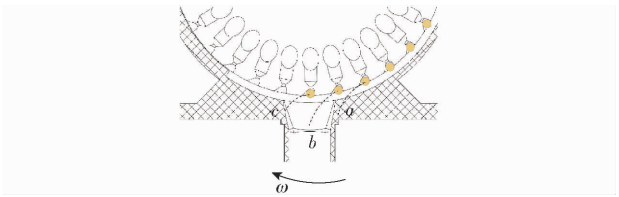


图 8　不同投种轨迹

Fig. 8　Different seeding trajectories

假设投种瞬间种子沿排种轮法向速度为 v_0，由运动方程可得

$$\begin{cases} v_{x0} = \omega R\cos\theta_3 - v_0\sin\theta_3 \\ v_{y0} = \omega R\sin\theta_3 + v_0\cos\theta_3 \end{cases} \tag{14}$$

式中　v_{x0}——水平方向速度，m/s

v_{y0}——竖直方向速度，m/s

对投种过程受力情况进行简化分析，投种瞬时种子脱离槽孔，其他作用力消失，在竖直向下的重力作用下做抛体运动，种子在投种过程中位移表达式为

$$\begin{cases} S_{x0} = v_{x0}t_2 \\ S_{y0} = v_{y0}t_2 + \dfrac{1}{2}gt_2^2 \end{cases} \tag{15}$$

式中　S_{x0}——水平方向运动距离，m

S_{y0}——竖直方向运动距离，m

t_2——投种时间，s

联立式(14)、(15)可得

$$S_{x0} = \left[\sqrt{(\omega R\sin\theta_3 + v_0\cos\theta_3)^2 + 2gS_{y0}} - \omega R\sin\theta_3 - v_0\cos\theta_3 \right]\frac{\omega R\cos\theta_3 + v_0\sin\theta_3}{g} \tag{16}$$

种子运动轨迹与排种器角速度 ω、排种轮半径 R、种子速度与 Y 轴方向的夹角 θ_3 等因素有关。其中种子速度与 Y 轴方向的夹角 θ_3 和投种位置有关，而投种位置受真空度 ΔP、转速 n 以及种子质量 m 影响。所以在排种轮半径 R 确定的情况下，投种轨迹与种子质量 m、排种轮转速 n 和气室真空度 ΔP 有关。

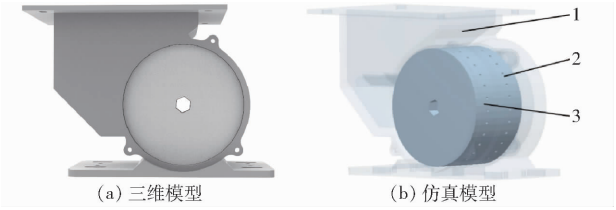
3 仿真试验

3.1 基于 EDEM 的排种轮选型设计

EDEM 以动态松弛法和牛顿定律为理论基础，将连续介质离散为小颗粒，计算颗粒间的力分析连续介质的运动和形变，近年来在排种器结构和工作参数对籽粒运动特性影响分析中应用较多。

3.1.1 仿真模型建立

为提高 EDEM 离散元软件的运算速度，需要对排种器三维结构进行简化。将模型简化为气室体、排种轮 1、排种轮 2，如图 9 所示。长江中下游常用小麦品种与排种器材料间力学参数如表 2 所示。



(a) 三维模型 (b) 仿真模型

图 9 排种器仿真试验模型

Fig. 9 Simulation test models of seed-metering device

1. 气室体 2. 排种轮 1 3. 排种轮 2

表 2 仿真模型材料参数与接触模型参数

Tab. 2 Parameters of simulation model material and contact model

类型	参数	数值
颗粒	小麦泊松比	0.420
	小麦密度/(kg·m^{-3})	1 350
	小麦剪切模量/Pa	5.10×10^{7}
ABS 工程塑料	ABS 工程塑料泊松比	0.394
	ABS 工程塑料密度/(kg·m^{-3})	1 060
	ABS 工程塑料剪切模量/Pa	8.96×10^{8}
颗粒间接触	小麦与小麦静摩擦因数	0.35
	小麦与小麦动摩擦因数	0.05
	小麦与小麦碰撞恢复系数	0.42
颗粒与材料间接触	小麦与 ABS 工程塑料静摩擦因数	0.40
	小麦与 ABS 工程塑料动摩擦因数	0.05
	小麦与 ABS 工程塑料碰撞恢复系数	0.60

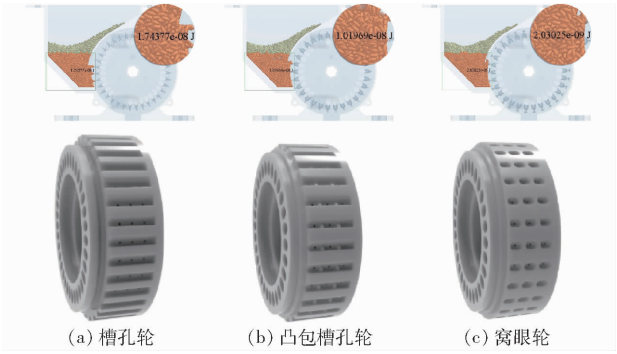
通过对小麦种子物料特性及排种器材料资料查阅，种子模型与材料特性参数及接触模型参数如表 2 所示。

3.1.2 排种轮对种群离散度的影响

排种过程充种性能受充种室种群离散程度影响。排种器工作时，种群受扰动不够，种子则长期处于静止状态，长时间堆积不动，易造成卡种、漏吸等问题；扰动种群能力较大时，种子与种子间的碰撞增加，种群之间作用力增大，使种子更容易进入排种轮。

由于受排种器结构体积参数影响，未安装扰种装置，因此排种轮扰动强弱对种群离散程度造成主要影响。而种群动能可较好反映种群离散程度，动能越大，离散度越高。选取槽孔轮、凸包槽孔轮以及常用的窝眼轮进行仿真试验，以种子平均动能为评价指标，探究其对小麦种群离散程度的影响。

导入排种器三维模型，参考表 2 定义颗粒与边界材料接触参数和物理属性，设置排种轮 1、排种轮 2 同时转动，转速皆为 30 r/min，为提高仿真计算运行速度，采用 static 方式生成 40 000 粒小麦种子，保证小麦种群高度高于充种区及隔种板结构，并设置种子生成初始速度为 2 m/s。配置仿真运行参数，调节时间步长为 20%，总仿真时长为 1 s，仿真过程如图 10 所示。



(a) 槽孔轮 (b) 凸包槽孔轮 (c) 窝眼轮

图 10 不同类型排种轮

Fig. 10 Different types of seeding wheels

时间步长 1 ~ 8 s 下不同排种轮种群平均动能如图 11 所示。由图 11 可知，在 1 s 时排种轮开始转动，动能波动较大，当转动平稳后，整体动能波动较小，出现脉冲趋势不断变化，种群不断运动。在槽孔轮转动扰种下，种群平均动能约为 9.0×10^{-9} J，使用凸包槽孔轮时种子平均动能约为 6.6×10^{-9} J，使用窝眼轮时种子平均动能约为 1.5×10^{-9} J。

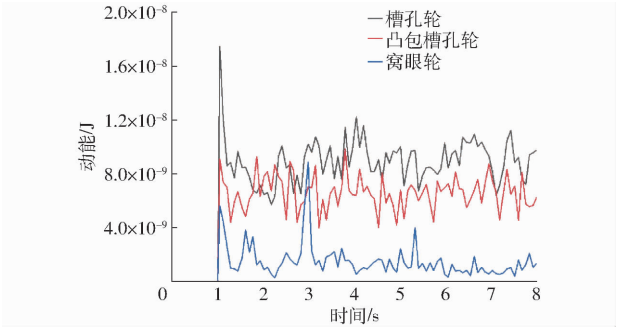


图 11 不同排种轮对种群扰动情况

Fig. 11 Population disturbance of different seeding wheels

分析结果可得槽孔轮及凸包槽孔轮对种群扰动效果较窝眼轮优，凸包槽孔轮扰动效果略低于槽孔轮。主要原因是槽孔较窝眼增大了排种轮与种群接触面积，使扰动更充分。因此，若采用扰动效果较差的窝眼轮以达到相同的吸种效果，需风机提供更大

的负压以克服种群之间的作用力，增加能耗。后续试验发现，槽孔轮每槽充种小麦粒数远大于设定的每长槽 3 ~4 粒，多余种子未被吸附而携带排出，导致排量太大；故最终选用扰种性能较优且符合充种量的凸包槽孔轮作为排种轮。

3.2　基于 CFD 的排种轮型孔直径确定

3.2.1　仿真模型及设置

将排种器三维模型导入 ANSYS 中进行气流场抽取和简化，分别对气室流域、型孔流域、排种轮流域进行网格划分，将网格模型导入 Fluent 软件中进行求解，为节约仿真时间选择单精度并行运算，采用 Transient 瞬态计算方法，流体为空气且不可压缩，并设置气流状态为湍流模型，选择 $k-\varepsilon$ 粘性模型，设置排种轮流域运动类型为滑移网格，并添加转速为 30 r/min。在前期预试验中，测试所用风机（最大输出压力 -5 kPa）输出特性曲线，2.5 kPa 位于其稳定工作区内。将边界条件设置为负压进气口 -2.5 kPa，出气口压力与大气压一致。计算时间步长为 2×10^{-4} s，共迭代 10 000 次，总计算时间为 2 s，排种轮恰好转动 1 圈，迭代计算达到收敛。

3.2.2　型孔直径

排种轮型孔直径直接影响排种器工作状态，孔径空隙太大会将种子吸附至气室内部，对排种器结构造成影响，空隙太小导致吸力过小，需要更大气压吸附种子。为确定排种轮型孔直径，进行了 Fluent 仿真试验。将型孔分别设置为 6 个型孔末端种子接触面，模拟压力面为外界大气压，按远离气室方向对流域通道中型孔分别命名为型孔 1 至型孔 6，即排种轮 1 对应型孔 1 至型孔 3，排种轮 2 对应型孔 4 至型孔 6，如图 12 所示。

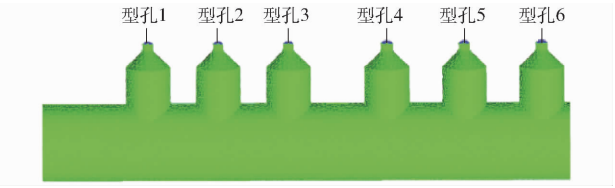


图 12　型孔编号处理

Fig. 12　Hole number processing

受排种器结构影响，气室设置于排种器一侧，单边通气会导致靠近气室一侧的型孔吸力较大，远离气室一侧的型孔吸力较小，所以需调整 2 个排种轮型孔直径以减小吸力差异。并通过确定的型孔最优直径范围，选取 1.4、1.6、1.8 mm 3 种不同型孔直径进行组合对比仿真试验，确定最优孔径参数组合。由流体力学可知，气流速度与压力呈反比关系，即型孔表面流速越大，对种子吸附效果越好，以 2 个排种轮同一行所对应 6 个型孔吸附面流速变异系数为评价指标，验证不同型孔直径组合下各个型孔气流分配均匀性。以 46 为例，表示该组合下排种轮 1 所对应型孔 1 ~3 直径为 1.4 mm，排种轮 2 所对应型孔 4 ~6 直径为 1.6 mm，仿真计算流速云图如图 13 所示。

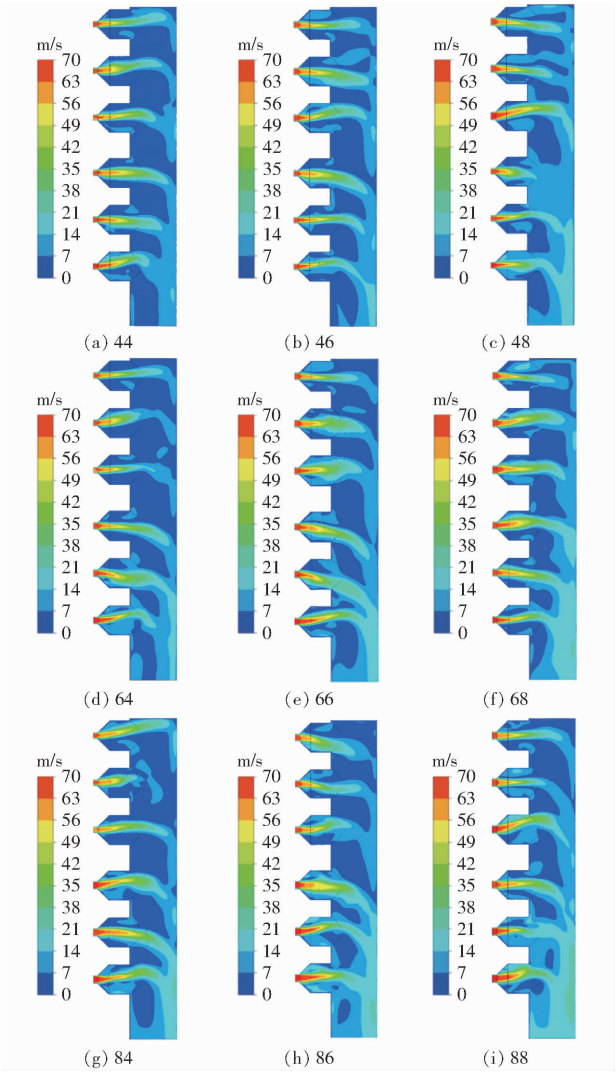


图 13　不同型孔直径组合下气流场速度云图

Fig. 13　Velocity cloud diagrams of airflow field under different hole diameter combinations

由图 13 可知，从气流通道到型孔直径逐渐减小，流速逐渐增大，至型孔吸附处孔径最小，气流流速达到最大值。在气流通道内气流流速较为稳定，与型孔连接处气流变化较为剧烈。靠近气室一侧型孔气流速度大、流动性好，而远离气室一侧型孔流速较慢，导致气流通道内气流流动性差、不均匀。统计各型孔表面流速，如表 3 所示。

由表 3 可知，在不同的组合条件下，从型孔 1 到型孔 6 流速呈下降趋势，总体上排种轮 1 吸力较排种轮 2 大。当远离气室一侧型孔直径小于靠近气室一侧孔径时，流速变异系数较高，最高达到 7.25%，2 个排种轮吸力差异明显；当 2 个排种轮型孔直径一致时，流速变异系数有所降低，但流速突变仍较

表 3 不同孔径组合下各型孔流速

Tab. 3 Flow rate of each type of hole under different pore size combinations

组合	流速/(m·s^{-1})							变异系数/%
	型孔 1	型孔 2	型孔 3	型孔 4	型孔 5	型孔 6	平均值	
44	68.79	66.40	62.32	61.98	64.23	64.66	64.73	3.62
46	67.50	63.92	64.48	68.05	64.92	64.47	65.56	2.45
48	70.23	66.58	67.35	72.55	67.22	66.16	68.35	3.35
64	71.71	66.44	64.54	61.29	64.73	62.69	65.23	5.09
66	70.65	68.44	67.36	68.40	64.33	64.60	67.30	3.31
68	69.94	66.55	66.74	68.73	66.96	65.72	67.44	2.13
84	73.29	65.68	71.64	60.17	62.61	63.30	66.12	7.25
86	73.50	72.22	70.28	65.71	65.89	63.81	68.57	5.28
88	73.55	70.97	66.03	73.17	67.56	63.23	69.09	5.48

大,并且平均流速较低,即吸种能力较弱;而当远离气室一侧型孔直径大于靠近气室一侧型孔直径时,流速变异系数有显著降低,例如当排种轮 1 型孔直径为 1.6 mm,排种轮 2 型孔直径为 1.8 mm 时变异系数最低,为 2.13%,气流分配均匀性较好,为较优参数组合。适当增大远离气室一侧型孔直径能有效降低流速变异系数,有助于平衡 2 个排种轮吸种能力。

4 排种器排种性能试验

4.1 试验材料

采用 JPZS-16 型计算机视觉排种器试验台对正负气压组合槽孔轮式小麦排种器进行排种性能试验研究,试验装置如图 14 所示。试验所用小麦品种为长江中下游地区常用的郑麦 9023,试验台架油带工作速度为 1.5 ~ 16.0 km/h,风机输出压力为 -20 ~ 20 kPa,质量测量范围为 0 ~ 3 000 g。

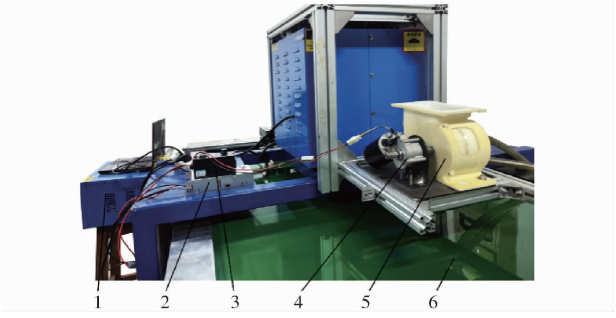


图 14 台架试验装置

Fig. 14 Bench device

1. 振动台控制器 2. 12 V 开关电源 3. 电机驱动器 4. 12 V 直流电机 5. 正负气压组合槽孔轮式小麦排种器 6. JPZS-16 型试验台

参照 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》,以各行排量一致性变异系数(RCV)、总排量稳定性变异系数(TCV)为评价指标,变异系数越小、表明排种均匀性与稳定性越好,各项指标计算式为

$$K_1 = \frac{S_i}{\bar{x}_1} \times 100\% \tag{17}$$

其中

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{i=1}^{p} x_{ij}$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{j=1}^{n_1} \left(\sum_{i=1}^{p} x_{ij} - \bar{x}_1 \right)^2}$$

式中 K_1——总排量稳定性变异系数,%

$\bar{x}_1$——单次排量平均值,g/min

p——试验次数,次

S_i——总排量标准差,g/min

x_{ij}——第 i 行第 j 次排种量,g/min

$$K_2 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} \frac{S_j}{\bar{x}_j} \times 100\% \tag{18}$$

其中

$$\bar{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} x_{ij}$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{k - 1} \sum_{i=1}^{k} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}$$

式中 K_2——各行排量一致性变异系数,%

$\bar{x}_j$——第 j 次排量平均值,g/min

k——排种行数,行

S_j——第 j 次试验排种标准差,g/min

$$K_3 = \frac{Q_1}{Q} \times 100\% \tag{19}$$

式中 K_3——种子破损率,%

Q_1——破损种子质量,g

Q——每次供种总质量,g

4.2 试验方案

由前期预试验可知,小麦排种作业时,转速与负压增大都会导致播量增加,但过大转速和过大负压使增加的多余种子在跟随排种轮转动过程没有被型孔吸附,未约束其自由度,造成随机排种,故小麦排种过程排种轮转动速度不应大于 40 r/min,负压不应高于 3.0 kPa。

选取工作转速为 20 ~ 30 r/min,以 5 r/min 为梯度取 3 个水平,选取吸种负压为 2.0 ~ 3.0 kPa,以 0.5 kPa 为梯度取 3 个水平开展工作参数对排种量的影响试验,以上述排种性能指标为试验指标,考虑两因素之间的交互关系,进行双因素三水平正交试验,试验因素水平如表 4 所示。

表 4 因素水平

Tab. 4 Test factors and levels

水平	因素	
	转速/(r·min^{-1})	负压/kPa
1	25	2.0
2	30	2.5
3	35	3.0

4.3　试验结果与分析

工作转速和吸种负压正交试验设计、极差分析及方差分析如表 5～7 所示，趋势曲线如图 15 所示，X、Y 为因素水平值。由图 15 及表 7 可知，转速和负压是影响小麦排种器排种性能的主要因素，且二者均存在显著非线性效应，但交互作用不显著；在试验水平范围内各行排量一致性变异系数均低于 3%，满足精量条播标准；当工作转速为 30 r/min、吸种负压为 2.5 kPa 时，平均排量与总排量稳定性变异系数均较优。综合考虑选择转速 30 r/min、负压 2.5 kPa 为最优工作参数组合。并在该组合参数下进行 3 次台架试验，取平均值为最终结果，测得平均排量为 157.47 g/min，RCV 为 2.46%，TCV 为 1.09%，满足谷物条播机试验方法标准。

表 5　小麦排种试验正交试验结果

Tab.5　Wheat seeding orthogonal test

试验号	因素 X	Y	$(X\times Y)_1$	$(X\times Y)_2$	平均排量/(g·min^{-1})	RCV/%	TCV/%
1	1	1	1	1	115.03	1.74	1.51
2	1	2	2	2	127.37	1.88	1.25
3	1	3	3	3	142.98	2.43	1.09
4	2	1	2	3	141.56	2.36	1.36
5	2	2	3	1	154.29	2.57	1.03
6	2	3	1	2	172.05	2.96	0.96
7	3	1	3	2	175.83	2.05	1.84
8	3	2	1	3	188.19	2.23	1.53
9	3	3	2	1	206.53	2.56	1.52

表 6　小麦排种试验极差分析

Tab.6　Range analysis of wheat seeding test

评价指标		X	Y	$(X\times Y)_1$	$(X\times Y)_2$
平均排量	k_1	128.46	144.14	158.42	158.62
	k_2	155.97	156.62	158.49	158.42
	k_3	190.18	173.85	157.70	157.58
	R	61.72	29.71	0.79	1.04
RCV	k_1	2.02	2.05	2.31	2.29
	k_2	2.63	2.23	2.27	2.30
	k_3	2.28	2.65	2.35	2.34
	R	0.61	0.6	0.08	0.05
TCV	k_1	1.28	1.57	1.33	1.35
	k_2	1.12	1.27	1.38	1.35
	k_3	1.63	1.19	1.32	1.33
	R	0.51	0.38	0.06	0.03

表 7　小麦排种器试验方差分析

Tab.7　Variance analysis of wheat seeding test

方差来源	平均排量 平方和	自由度	均方差	F	P	RCV 平方和	自由度	均方差	F	P	TCV 平方和	自由度	均方差	F	P
模型	7 074.71	5	1 414.94	3 920.80	<0.000 1 **	1.15	5	0.229 3	102.00	0.001 5 **	0.654 8	5	0.131 0	97.40	0.001 6 **
X_1	5 714.65	1	5 714.65	15 835.31	<0.000 1 **	0.104 0	1	0.104 0	46.27	0.006 5 **	0.180 3	1	0.180 3	134.08	0.001 4 **
X_2	1 324.32	1	1 324.32	3 669.70	<0.000 1 **	0.540 0	1	0.540 0	240.20	0.000 6 **	0.216 6	1	0.216 6	161.11	0.001 1 **
X_1X_2	1.89	1	1.89	5.24	0.106 1	0.008 1	1	0.008 1	3.60	0.153 9	0.002 5	1	0.002 5	1.86	0.266 0
X_1^2	22.51	1	22.51	62.38	0.004 2 **	0.464 0	1	0.464 0	206.39	0.000 7 **	0.231 2	1	0.231 2	171.97	0.001 0 **
X_2^2	11.33	1	11.33	31.39	0.011 2	0.030 4	1	0.030 4	13.53	0.034 8 *	0.024 2	1	0.024 2	18.00	0.024 0 *
残差	1.08	3	0.360 9			0.006 7	3	0.002 2			0.004 0	3	0.001 3		
总和	7 075.79	8				1.15	8				0.658 8	8			
R^2	0.999 8					0.994 2					0.993 9				
R^2_{Adj}	0.998 1					0.984 4					0.983 7				

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

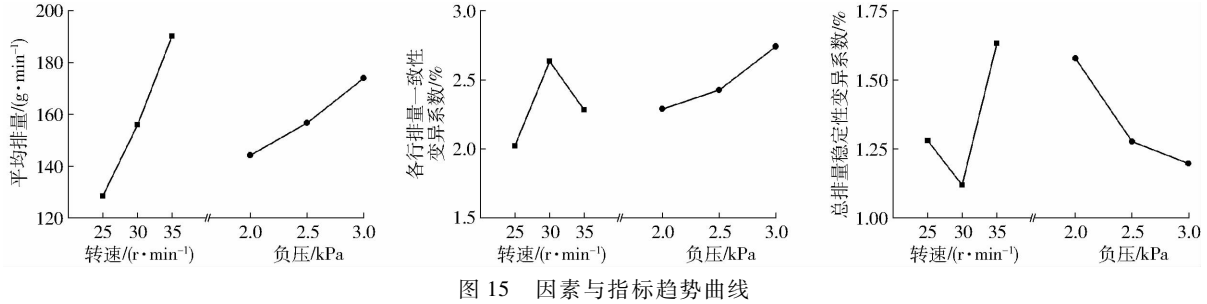


图 15　因素与指标趋势曲线

Fig. 15　Factors and index trend curves

5　田间试验

为验证排种器田间作业情况，并测定正负气压组合槽孔轮式小麦排种器播种小麦实际作业性能，于 2023 年 11 月开展田间播种试验（图 16），选取“郑麦 9023”为试验材料，约翰迪尔 1054 型拖拉机

为动力,机具前进速度约为 2.25 km/h,工作幅宽 2.3 m,播种行数为 4 行,调整种沟行间距为220 mm,采用电机提供排种轮旋转动力,取转速为 30 r/min,采用外接风机提供压强,固定负压为 2.5 kPa,正压为 0.6 kPa。小麦田间试验株数测量结果如表 8 所示。



(a) 小麦播种 (b) 出苗效果

图 16 小麦田间试验

Fig. 16 Field experiment for wheat

表 8 小麦田间试验株数测量结果

Tab. 8 Wheat field test plant number measurement result

行数	取样区域				
	A1	A2	A3	A4	A5
1	51	50	44	63	51
2	64	46	62	55	53
3	54	65	58	53	66
4	52	56	52	47	61
各行株数一致性变异系数/%	9.35	13.19	12.56	10.50	10.49

由表 8 可知,在取样区域内幼苗平均株数为 55.15,播种各行株数一致性变异系数平均值为 11.22%。田间株距较均匀,符合小麦播种要求。

6 结论

(1)设计了一种正负气压组合槽孔轮式小麦排种器,阐明了排种器工作原理,构建了吸种、携种、投种阶段中种子力学模型;提出一种凸包槽孔轮式结构,根据最小势能原理确定槽孔形状为倾斜的弓形槽孔。

(2)应用 EDEM 软件构建仿真几何模型,对比不同排种轮对种群扰动的影响,结果表明凸包槽孔轮保证充种质量的同时对种群扰动效果较好。利用 Fluent 软件对气流场流域进行仿真试验,通过图形化分析得出气室各区域内气流较稳定,流速变化小。对比分析转速对气流场流速的影响,结果表明:转速越快,气流场流速越大,气流越不稳定,即较慢转速有利于提高吸种性能。对圆形吸孔计算公式得出的型孔尺寸进行气流仿真试验,对比 1.4、1.6、1.8 mm 吸孔不同排列组合下型孔流速的变异系数,取排种轮 1、2 型孔直径分别为 1.6、1.8 mm 时,气流分布均匀性较优。

(3)JPZS-16 型排种器性能检测试验台排种器性能试验结果表明,影响小麦排种性能的主要因素为转速、负压,并得到较优工作参数组合。取较优参数组合转速为 30 r/min、负压为 2.5 kPa 进行小麦排种验证试验,测得平均排量为 157.47 g/min,RCV 为 2.46%,TCV 为 1.09%,满足小麦播种要求。

(4)田间试验结果表明,播种各行株数一致性变异系数平均值为 11.22%,满足小麦精量播种要求。

参 考 文 献

[1] 王一杰,辛岭,胡志全, 等. 我国小麦生产、消费和贸易的现状分析[J]. 中国农业资源与区划,2018,39(5):36-45.
Wang Yijie, Xin Ling, Hu Zhiquan, et al. Current situation of production, consumption and trade of wheat in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(5): 36-45. (in Chinese)

[2] Sun Y C, Hu S Y, Li Z R, et al. Study on the influencing factors of wheat import trade in China[J]. Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2022, 23(2): 608-620.

[3] 代瑞熙,许世卫. 中国小麦绿色全要素生产率时空特征及影响因素[J]. 农业工程学报,2022,38(8):304-314.
Dai Ruixi, Xu Shiwei. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of the green total factor productivity of wheat in China[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(8): 304-314. (in Chinese)

[4] 廖宜涛,谭钰,廖庆喜,等. 主要粮油作物精量播种技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2025,56(9):1-19.
Liao Yitao, Tan Yu, Liao Qingxi, et al. Research progress and development trends in precision seeding technologies for major grain and oil crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 1-19. (in Chinese)

[5] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):75-84.
Liu Cailing, Wei Dan, Du Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75-84. (in Chinese)

[6] 郑娟,赖虹宇,李甜,等. 小麦宽苗带气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1):165-176,335.
Zheng Juan, Lai Hongyu, Li Tian, et al. Design and test of precision seed metering device for wheat wide seedling belt with air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 165-176, 335. (in Chinese)

[7] 姜萌,刘彩玲,魏丹,等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(11):53-62.
Jiang Meng, Liu Cailing, Wei Dan, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 53-62. (in Chinese)

[8] 施彬彬,郑娟,王磊,等. 小粒径种子气力自适应排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):30-41.
Shi Binbin, Zheng Juan, Wang Lei, et al. Design and experiment of pneumatic adaptive seeding system for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 30-41. (in Chinese)

[9] 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.
Gao Xiaojun, Xu Yang, Zhang Dongxing, et al. Design and experiment of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23): 9 - 20. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 赵晓顺,张晋国,马立. 圆管直缝式小麦气吸排种器性能的试验研究[J]. 河北农业大学学报,2013,36(1):105 - 108.
Zhao Xiaoshun, Zhang Jinguo, Ma Li. Experimentation research on performance of circular tube slit pneumatic precise wheat seed-metering device[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2013, 36(1): 105 - 108. (in Chinese)

[12] Choi I S, Kang N R, Kim Y K, et al. The study on the design factors of the groove-roller seed metering device for seeder of foxtail millet & sorghum[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2018, 43(4): 303 - 310.

[13] 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)

[14] 丁力,郭海钦,王万章,等. 油莎豆窝眼排种轮低位集穴排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):86 - 97.
Ding Li, Guo Haiqin, Wang Wanzhang, et al. Design and test of *Cyperus esculentus* cell-wheel seed-metering device with low-position seeding and cavitation function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 86 - 97. (in Chinese)

[15] 何瑞银,王建林,徐高明,等. 限制充种姿态-正负压式小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):39 - 49,167.
He Ruiyin, Wang Jianlin, Xu Gaoming, et al. Design and experiment of wheat precise seed metering apparatus with positive and negative pressure with function of limiting seed filling posture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 39 - 49, 167. (in Chinese)

[16] 廖宜涛,刘嘉诚,廖庆喜,等. 正负气压组合滚轮式油菜精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):63 - 76.
Liao Yitao, Liu Jiacheng, Liao Qingxi, et al. Design and test of positive and negative pressure combination roller type precision seed-metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 63 - 76. (in Chinese)

[17] 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报,2014,30(8):30 - 39.
Cong Jinling, Liao Qingxi, Cao Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed & wheat seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 30 - 39. (in Chinese)

[18] 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报,2014,45(1):46 - 52.
Cong Jinling, Yu Jiajia, Cao Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46 - 52. (in Chinese)

[19] 董建鑫,高筱钧,张仕林,等. 玉米姿控驱导式排种器导向投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):25 - 34.
Dong Jianxin, Gao Xiaojun, Zhang Shilin, et al. Design and test of guiding seed throwing mechanism for maize posture control and driving metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 25 - 34. (in Chinese)

[20] 王英博,李洪文,何进,等. 机械式小麦射播排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(21):1 - 10.
Wang Yingbo, Li Hongwen, He Jin, et al. Parameters optimization and experiment of mechanical wheat shooting seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 1 - 10. (in Chinese)

[21] 张春岭,刘涛,郑子浩,等. 交错凸齿式宽苗带小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(5):47 - 59.
Zhang Chunling, Liu Tao, Zheng Zihao, et al. Design and test of the precision seeding dispenser with the staggered convex teeth for wheat sowing with wide seedling belt[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(5): 47 - 59. (in Chinese)

[22] 席日晶. 小麦气送式集排器关键部件设计与仿真试验[D]. 武汉:华中农业大学,2021.
Xi Rijing. Design and simulation experiment of key parts of air-assisted centralized metering device for wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[23] 程修沛,卢彩云,孟志军,等. 气吸型孔组合式小麦精密排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报,2018,34(24):1 - 9.
Cheng Xiupei, Lu Caiyun, Meng Zhijun, et al. Design and parameter optimization on wheat precision seed meter with combination of pneumatic and type hole[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 1 - 9. (in Chinese)

[24] 邢鹤琛,廖庆喜,王磊,等. 油麦兼用斜锥型孔轮式集排器设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2019,38(5):143 - 151.
Xing Hechen, Liao Qingxi, Wang Lei, et al. Design and test of oblique taper hole-type wheel centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 143 - 151. (in Chinese)

[25] 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)

[26] 李耀明,赵湛,陈进,等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析[J]. 农业机械学报,2009,40(3):56 - 59,76.
Li Yaoming, Zhao Zhan, Chen Jin, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 56 - 59, 76. (in Chinese)

[27] 李卿. 基于图像处理的小麦精密排种器实验研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2010.
Li Qing. The experimentation research of wheat precision seeding mechanism based on image processing[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2010. (in Chinese)