doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.010

螺旋引导调姿促充式小麦精量排种器设计与试验

郑智旗[1]　巨晓腾[1]　赵鹏飞[1]　董建鑫[1]　杨鹏琨[1]　冯　添[1]　黄玉祥[1,2]
(1.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;2.陕西省农业装备工程研究中心,陕西杨凌 712100)

摘要:为满足小麦机械式精量播种需求,针对小麦种子因卵形结构导致精量排种器易卡滞,堆积种群互相交叉、架空的问题,设计了一种螺旋引导调姿促充式小麦精量排种器。在侧置型孔种槽入口处设置倾斜导种板与螺旋引导槽,构成螺旋引导型孔单元,引导小麦种子以稳定平躺姿态充入型孔种槽,减少因竖立姿态种子堵塞型孔口的现象。通过理论分析确定型孔单元数量与结构特征等关键零部件结构参数,分析螺旋引导结构对小麦种子充种过程受力情况,明确影响排种器性能的关键参数范围。运用离散元仿真软件对排种器工作过程进行仿真,开展三因素五水平正交旋转组合试验获取精量排种器的关键参数最优组合,结果为:倾斜导种板水平长度为 17.5 mm,倾斜导种板倾角为 23°,螺旋引导槽高度为 5 mm。基于最优参数组合开展台架验证试验。结果表明,排种器工作转速为 30 ~ 70 r/min 时,仿真和台架试验合格率均高于 90%,漏播率,重播率均低于 5%。不同品种适应性试验的合格率均高于 85%,漏播率、重播率均低于 10%,满足小麦精量播种技术要求。

关键词:小麦排种器;螺旋引导;精量播种;离散元仿真
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0117-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Screw-guided Posture-adjusting and Filling-promoting Precision Seed Metering Device for Wheat

ZHENG Zhiqi[1]　JU Xiaoteng[1]　ZHAO Pengfei[1]　DONG Jianxin[1]　YANG Pengkun[1]
FENG Tian[1]　HUANG Yuxiang[1,2]
(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming to meet the demand of wheat mechanical precision seeding, solving the problem that the sowing and seeding of wheat seeds were easy to be stuck, and the accumulation populations were crossed and overhead due to the ovate structure of wheat seeds, a spiral-guided posture-adjusting and filling-promoting wheat precision metering device was designed. The inclined seed guide plate and spiral guide groove were set at the entrance of the side-type hole seed groove to form a spiral-guided hole unit, which guided the wheat seeds to fill the hole seed groove in a stable flat posture, and reduced the phenomenon that the seed was blocked by the vertical posture. Through theoretical analysis, the structural parameters of key components such as the number and structural characteristics of the hole unit were determined, and the stress of the spiral guide structure on the wheat seed filling process was analyzed, and the key parameter value range that affected the performance of the precision seed metering device was clarified. The discrete element simulation software EDEM was used to simulate the working process of the seed metering device, and the orthogonal rotation combination test of three factors and five levels was carried out to obtain the optimal combination of key parameters of the precision seed metering device. Specifically, the horizontal length of the inclined guide plate was 17.5 mm, the inclination angle of the inclined guide plate was 23°, and the height of the spiral guide groove was 5 mm. Based on the above optimal parameter combination, the bench verification test was carried out. The results showed that when the working speed of the seed metering device was 30 ~ 70 r/min, the qualified rate of simulation and bench test was higher than 90%, and the leakage rate and replay rate were lower than 5%. To

收稿日期:2025 - 07 - 01　修回日期:2025 - 07 - 14
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000404、2021YFD2000405)
作者简介:郑智旗(1985—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备研究,E-mail:zhiqizheng@nwsuaf.edu.cn
通信作者:黄玉祥(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备研究,E-mail:hyx@nwsuaf.edu.cn

further verify the adaptability of the seed metering device to different varieties of wheat, the adaptability test of different varieties was carried out. The qualified rate was higher than 85%, and the missed sowing rate and replay rate were lower than 10%, which met the technical requirements of wheat precision sowing.

Key words: wheat seed metering device; spiral guide; precision planting; discrete element simulation

0 引言

小麦为全世界最重要的粮食作物,我国种植面积和产量均为世界第一,也是我国三大主要粮食作物之一[1-2]。机械化播种是小麦生产过程的重要环节之一,目前,我国北方小麦种植主要以条带播种为主[3-5]。随着精量播种技术与小麦种植模式的发展,精量播种技术实现了种子资源的高效利用与作物群体结构的优化调控,有着节本增产的效果。合理的种植密度可使作物群体形成更优的空间布局,为个体生长提供充足资源,进而促进作物根系发育更健壮。精量播种技术在玉米、大豆等作物的机械化播种中已有广泛应用[6-8]。

近年来,针对小麦种子外形不规则导致充种性能不稳定的技术难题,国内外学者开展了大量研究[9-11]。在机械式排种器领域,以外槽轮式、垂直圆盘型孔轮式、水平锥面圆盘式为代表的结构优化研究,通过改进型孔形状、优化槽轮参数等,有效提升了种子充种效率与均匀性[12-13]。在气力式排种器方面,气吸式、正负气压组合式等技术的创新应用,借助气流动力学优化与负压精准调控,显著改善了种子吸附与分离性能[14]。张春岭等[15]在传统直齿外槽轮式排种器基础上,设计了交错凸齿式精量排种器,提高了小麦播种苗带内播量一致性和均匀性。王云霞等[16]通过充种过程小麦姿态分析,设计能够单粒囊括种子的勾齿状型孔结构,提高了排种均匀性。钟继宇[17]设计倒鳍状型孔轮式小麦变量排种器,通过引导充填和定向投种的原理,提高了播种合格率。侯加林等[18]利用气力充种和离心清种组合的方式,对充种过程小麦的姿态进行调整,引导充种状态到稳定加持状态,实现了种子流的定量、均匀、有序。但这两类排种技术仍存在应用局限性,其中机械式排种器受限于接触式充种原理,种子在型孔内的姿态稳定性差,导致排种均匀性波动幅度增大[19]。气力式排种器依赖稳定的负压环境,气路结构复杂,维护成本较高,在中小规模农户中推广受限[20]。

针对上述问题,本文设计一种螺旋引导调姿促充式小麦精量排种器结构,结合小麦物理特性和播种农艺要求,将螺旋引导结构与型孔种槽结合形成型孔单元,基于排种器的工作原理,完成关键零部件结构参数设计,开展性能仿真优化试验获得排种器最优参数组合,通过台架试验对排种性能和种子适应性进行验证,以期实现小麦精量排种作业。

1 排种器结构与工作原理

螺旋引导调姿促充式小麦精量排种器整体结构如图 1 所示,由传动轴、后壳体、螺旋引导型孔轮、护种板、前壳体等组成。其中螺旋引导型孔轮上错位分布着螺旋引导型孔单元,由型孔种槽投出的种子横向间距拉大,有助于单株小麦的分蘖和增产。其中单个螺旋引导型孔单元结构由螺旋引导槽、倾斜导种板、型孔种槽构成。螺旋引导型孔轮位于排种器前壳体、后壳体内部,排种轮通过内六方通孔与传动轴固定,可以在传动轴的带动下旋转。前壳体前侧设置有入种口,后壳体设置有安装支架以及投种口,安装支架用于将排种器固定在播种单体上,前壳体、后壳体通过螺栓连接。护种板位于排种轮内部,防止排种器内部堆积的种群颗粒从投种口直接滑出。

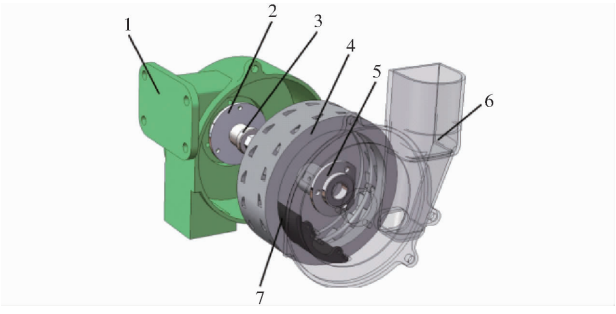


图 1 排种器结构示意图

Fig. 1 Structure models of seed metering device

1. 后壳体 2、5. 法兰轴承座 3. 传动轴 4. 螺旋引导型孔轮 6. 前壳体 7. 护种板

排种器的工作过程如图 2 所示,分为充种区、清种区、携种区、投种区。在充种区,小麦种子从前壳体的入种口充入螺旋引导型孔轮内部,进而堆积形成小麦种群,螺旋引导型孔轮在传动轴的带动下将种群中的小麦种子进行捕获、螺旋引导调姿、充入型孔种槽内部形成待投种子,螺旋引导槽上滞留待清种子;在清种区,待清小麦种子由于受到重力影响,开始下落,待投种子被限制在型孔种槽内部;在携种区,螺旋引导槽内待清种子落回到充种区的小麦种

群内，待投种子与后壳体内侧壁接触，携带至投种区；在投种区，型孔种槽内的待投种子，在后壳体内侧壁的缺口处掉落，由投种口投出，形成左右两行种带。

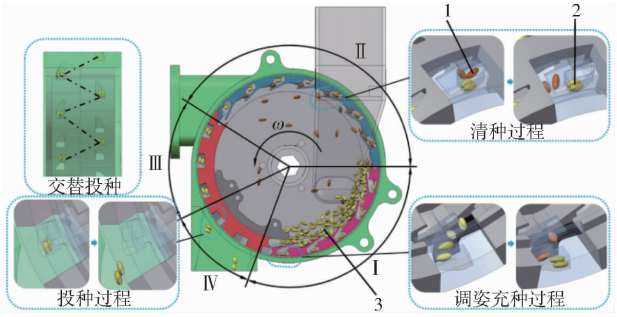


图 2　排种器工作原理图

Fig. 2　Schematic of seed metering device

1. 待清种子　2. 待投种子　3. 小麦种群　Ⅰ. 充种区　Ⅱ. 清种区　Ⅲ. 携种区　Ⅳ. 投种区

2　关键零部件结构设计

2.1　螺旋引导型孔轮设计

螺旋引导型孔轮由型孔单元组成，是精量排种器的核心部件，在传动轴驱动下完成排种作业中的取种、清种、携种等功能，传统内侧充种垂直圆盘型孔轮的充种方式如图 3a 所示，种子速度 v_{s_1} 方向与型孔转动方向垂直，充种时间短且受到小麦种子形状特征的影响，导致型孔轮的充种效果差[21-22]。螺旋引导型孔轮在传统垂直圆盘型孔轮基础上，在型孔种槽入口处设置螺旋引导结构，小麦种子先接触螺旋引导槽，小麦种子在引导槽上滑行，其速度方向与螺旋引导型孔轮的转动方向相反，如图 3b、3c 所示。种子朝着靠近型孔单元的方向移动；种子充入型孔种槽时，小麦种子运动速度方向为螺旋旋转方向，小麦种子与型孔单元同时绕传动轴旋转，因此可以视为种子与型孔单元相对静止；经过螺旋引导调姿，小麦种子以平躺姿态充入型孔种槽，减少卡种问题，提升排种器的充种性能。

由《农业机械设计手册》可知，型孔轮直径的大小直接影响型孔单元分布的数量，实现较高的播种频率就需要较大的工作转速，而排种轮直径增大就会导致其结构增大。播种机的播种量 Q、播种行距 c、粒距 a 之间的关系式为

$$N=\frac{10^6 Q}{q}=\frac{2\times 8\times 10^4 Z}{ac} \tag{1}$$

式中　N——待播种子数量，粒/hm^2

q——种子千粒质量，g

Z——每型孔内种子数量，粒

可得出粒距与播种量的关系式为

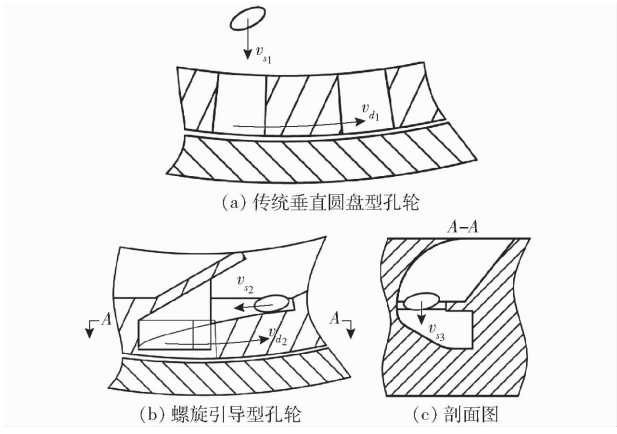


图 3　型孔轮充种方向示意图

Fig. 3　Schematic of seed filling direction of hole wheel

$$a=\frac{16Zq}{100Qc} \tag{2}$$

由式(2)可知，为满足 120 ~ 300 kg/hm^{2}播种量的设计要求，种子千粒质量约 45.00 g、每型孔单元内种子数量为 2 粒时，种子粒距范围在 24 ~ 60 mm。型孔轮数量、转速与播种机作业速度之间关系式为

$$v_m=\frac{3.6San}{6\times 10^4} \tag{3}$$

式中　v_m——播种机作业速度，km/h

n——排种轮转速，r/min

S——型孔单元数量，个

从式(3)中可得出，当作业速度、型孔单元数量一定时，排种轮转速与粒距为反比关系。当小麦播种机工作速度取 3.5 km/h，型孔单元数量选择 36 个，此时排种轴转速在 27.0 ~ 67.5 r/min。为减小型孔轮直径以排布更多的型孔单元，实现交替投种以提高种间间隙，型孔轮两侧交错分布两行螺旋引导型孔单元，每侧 18 个，交替投种口横向间隙为 4 mm，型孔轮直径取 140 mm。

2.2　型孔单元结构设计

选择陕西省常见的 4 种小麦种子进行三轴尺寸和千粒质量的测量，并统计种子外形差异离散程度，测量结果如表 1 所示。三轴尺寸分别指小麦种子的长度 l、宽度 w、厚度 t，测试选择不同品种的 100 粒

表 1　小麦种子基本参数测量结果

Tab. 1　Measurement results of basic parameters of wheat seed

品种	长度 l/mm	宽度 w/mm	厚度 t/mm	球度	几何平均粒径/mm	体积/mm^3	体积标准差/mm^3	千粒质量 q/g
国鑫 188 号	5.90	3.39	3.01	0.66	3.97	60.73	11.78	42.40
有孚 9 号	6.75	3.67	3.31	0.64	4.34	82.38	13.08	50.79
轮选 99 号	5.92	3.64	3.28	0.70	4.13	70.78	7.22	43.86
西农 9112 号	6.60	3.53	3.09	0.63	4.16	72.17	8.38	46.57

种子,通过平均值代替;使用公式计算球度、几何平均粒径、三维体积、体积标准差、千粒质量。

统计结果表明:种子三维尺寸均通过了正态性检验,小麦种子球度为 0.66 ~ 0.70,其厚度略小于宽度,可视为椭圆形结构,平均千粒质量为 45.90 g。根据姿态与截面积关系可知[7,23],小麦种子充种姿态主要包括如图 4 所示 3 种姿态,分别为平躺、竖立、侧躺姿态。机械式精量排种器充种过程中竖立姿态种子易卡在型孔口或窝眼孔入口处,是造成漏播的主要原因之一,而小麦种子竖立姿态的概率为 19.98% ~21.27%。

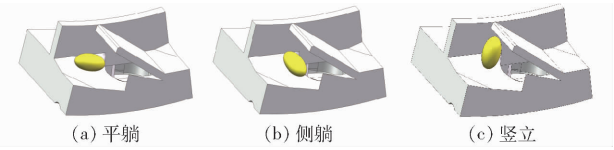


图 4 小麦种子充种姿态

Fig. 4 Wheat seed postures at seed-filling mouth

为防止竖立姿态小麦种子堵塞型孔导致漏播,同时使型孔轮在充种区破坏小麦种群的力链网络,促使种子以平躺姿态充入型孔,在型孔外侧布置倾斜导种板与螺旋引导槽构成促充引导结构,型孔单元参数设计如图 5 所示。

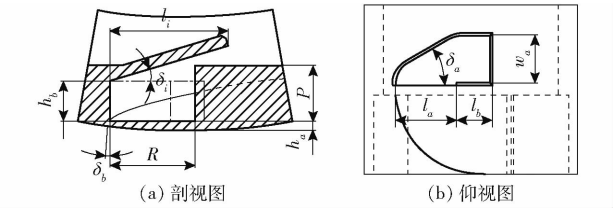


图 5 型孔单元结构参数示意图

Fig. 5 Schematics of die hole unit structure

型孔单元结构应满足

$$\begin{cases} l_{\min} + \min(w_{\min} + t_{\min}) l_i \csc\delta_i > l_{\max} \\ l_{\min} + w_{\min} > P > l_{\max} \\ l_{\max} < l_a \\ R < 1.5 l_{\min} \\ 2w_{\max} < w_a < 1.5 l_{\min} \\ \delta_b < 0.5\pi \\ w_{\max} < h_b < 2w_{\min} \\ t_{\max} < l_b < 1.5 l_{\min} \\ 0 < h_a < t_{\min} \end{cases} \tag{4}$$

式中 $l_{\max}$——小麦种子长度最大值,mm

$l_{\min}$——小麦种子长度最小值,mm

$w_{\max}$——小麦种子宽度最大值,mm

$w_{\min}$——小麦种子宽度最小值,mm

$t_{\max}$——小麦种子厚度最大值,mm

$t_{\min}$——小麦种子厚度最小值,mm

l_i——倾斜导种板水平长度,mm

δ_i——倾斜导种板倾角,(°)

P——螺旋引导槽高度,mm

R——螺旋引导槽回转半径,mm

w_a——型孔种槽宽度,mm

l_a——型孔入口长度,mm

h_a——型孔入口相对高度,mm

δ_b——型孔外拔模角度,(°)

h_b——型孔入口高度,mm

l_b——型孔种槽长度,mm

根据表 1、式(4)确定型孔入口高度为 4 mm,型孔入口长度为 7.8 mm,型孔入口相对高度为 1.5 mm,型孔种槽长度为 3 mm,型孔种槽宽度为 7 mm,型孔侧倾角为 35°,型孔外拔模角度为 5°。

2.3 充种过程分析

种子由种群充入型孔的过程中,倾斜导种板、螺旋引导槽、型孔种槽先后与种子接触。以竖立姿态种子为例,单粒种子充种过程的运动轨迹图如图 6a 所示,充种过程如图 6b ~6e 所示,分为捕获阶段Ⅰ、调姿阶段Ⅱ、稳定滑行阶段Ⅲ、回弹收集阶段Ⅳ。

捕获阶段Ⅰ:如图 6b 所示,忽略种子间相互作用力,当种子与倾斜引导板接触时,种子受到倾斜引导板对种子的支持力 T_1、自身重力 G,以倾斜引导板倾角方向为 x 轴,型孔轮轴向为 z 轴方向,y 轴垂直于 x 轴、z 轴建立坐标系,种子在 xOy 平面内所受合力 F_x、F_y以及绕着 z 轴旋转的合力矩 M_z满足公式

$$\begin{cases} \sum M_z = T_1 \Delta d_1 - f_1 \Delta d_2 \\ \sum F_x = G\sin\delta_i - T_1 = 0 \\ \sum F_y = f_1 - G\cos\delta_i = m a_y \end{cases} \tag{5}$$

$$f_1 = \mu T_1 \tag{6}$$

式中 M_z——种子绕 z 轴旋转的合力矩,N·m

f_1——倾斜引导板对种子的支持力,N

μ——滑动摩擦因数

Δd_1——f_1与种子质心 O 点的距离,mm

Δd_2——T_1与种子质心 O 点的距离,mm

F_x——种子在 x 轴方向的合力,N

F_y——种子在 y 轴方向的合力,N

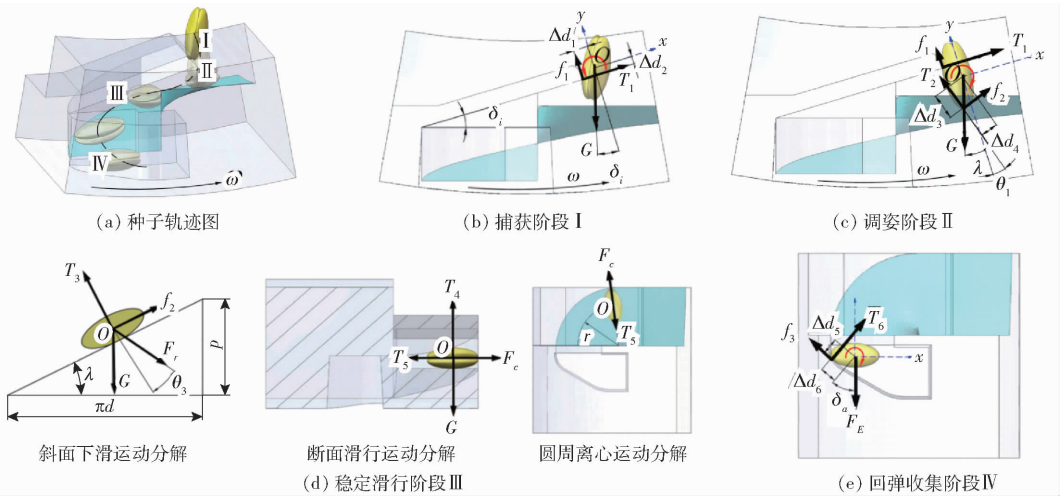
m——种子质量,kg

a_y——种子沿 y 轴方向加速度,mm^2/s

其约束条件为

$$\begin{cases} \sum M_z = (\Delta d_1 - \mu \Delta d_2) G\sin\delta_i > 0 \\ a_y = G(\mu\sin\delta_i - \cos\delta_i) < 0 \end{cases} \tag{7}$$

从式(7)中可知,在 xOy 平面内,种子发生逆时针旋转贴向倾斜引导板,同时沿 y 轴负方向做加速运动,加速度大小、旋转力矩大小与倾角呈正相关。



(a) 种子轨迹图　(b) 捕获阶段Ⅰ　(c) 调姿阶段Ⅱ　(d) 稳定滑行阶段Ⅲ　(e) 回弹收集阶段Ⅳ

图 6　单粒竖立姿态种子充种过程受力分析

Fig. 6　Force analysis of single upright seed during seed filling

调姿阶段Ⅱ：如图 6c 所示，种子刚接触螺旋引导槽，此时种子合外力为 0，受到倾斜引导板对种子的支持力 T_1、螺旋引导槽对种子的支持力 T_2 以及自身重力 G，分析种子受到的合力（力矩）可得

$$\begin{cases} \sum M_z = f_2\Delta d_4 - T_1\Delta d_1 - T_2\Delta d_3 - f_1\Delta d_2 \\ \sum F_x = T_1 + f_2\cos\theta_1 - G\sin\delta_i - T_2\sin\theta_1 = 0 \\ \sum F_y = T_2\cos\theta_1 + f_1 + f_2\sin\theta_1 - G\cos\delta_i = 0 \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} f_2 = \mu T_2 \\ \theta_1 = \lambda - \delta_i \end{cases} \tag{9}$$

式中　θ_1——支持力 T_2 与 y 方向的夹角，(°)

Δd_3——f_2 与种子质心 O 点的距离，mm

Δd_4——T_2 与种子质心 O 点的距离，mm

λ——螺旋引导槽的螺旋升角，(°)

联立式(7)、(8)可得

$$\begin{cases} T_1 = \dfrac{G(\cos\delta_i - \mu\sin\delta_i)}{(1-\mu^2)\cos\theta_1 + 2\mu\sin\theta_1} \\ T_2 = G\left[\sin\delta_i + \dfrac{(\cos\delta_i - \mu\sin\delta_i)(\sin\theta_1 - \mu\cos\theta_1)}{\cos\theta_1 + 2\mu\sin\theta_1 - \mu^2\cos\theta_1}\right] \end{cases} \tag{10}$$

由公式(10)可知，种子在合力矩的作用下，绕着 z 轴顺时针旋转，形成螺旋引导槽上的稳定滑行姿态。当倾角、回转半径一定时，螺旋升角增大时，种子受到的支持力 T_1、T_2 和合力矩均增大。

稳定滑行阶段Ⅲ：如图 6d 所示，小麦种子沿着螺旋引导方向稳定滑行，种子姿态始终为最小势能方向。种子在螺旋引导槽上的受力可以视为 3 种独立的运动，如图 6d 所示，沿着倾斜角为螺旋升角的斜面下滑运动绕着回转中心的圆周离心运动，在螺旋断面处的滑行运动。通过受力分析，有以下公式

$$\begin{cases} F_r\cos\theta_3 + G\cos\lambda = T_3 \\ F_r\sin\theta_3 + f_2 = G\sin\lambda \\ F_c = T_5 \\ G = T_4 \end{cases} \tag{11}$$

其中

$$\begin{cases} F_r = m\omega^2 r_1 \\ F_c = \dfrac{mv_c^2}{r} \\ v_c = v\cos\lambda \\ r = R - 0.5l \end{cases} \tag{12}$$

式中　F_r——种子受型孔轮旋转的离心力，N

θ_3——离心力 F_r 与斜面支持力 T_3 的夹角，(°)

T_3——斜面对种子的支持力，N

F_c——螺旋运动产生的离心力，N

T_4——断面对种子的支持力，N

T_5——螺旋引导槽侧壁对种子支持力，N

r_1——转轴原点至种子质心的距离，mm

v_c——种子离心运动速度，m/s

r——螺旋轴线至种子质心的距离，mm

v——种子下滑总速度，m/s

螺旋升角 λ、螺旋引导槽高度 P、螺旋引导槽回转半径 R 如图 6d 所示，存在关系式

$$\lambda = \arctan\frac{P}{\pi R} \tag{13}$$

螺旋引导槽与倾斜导种板之间共同构成充种引导通道，由式(13)可知，回转半径与螺旋引导槽高度均影响螺旋升角，种子的引导槽滑行速度与螺旋引导槽高度呈正相关，但当螺旋引导槽高度过大时，导致引导通道狭窄容易堵塞。

回弹收集阶段Ⅳ：如图 6e 所示，该阶段种子在惯性力的作用下与型孔侧壁碰撞，种子受到种槽侧

壁的支持力 T_6，产生旋转力矩，通过受力分析可得

$$\begin{cases} \sum M_z = f_3\Delta d_5 - T_6\Delta d_6 < 0 \\ \sum F_x = T_6\sin\delta_a - f_3\cos\delta_a = ma_x \\ \sum F_y = T_6\cos\delta_a + f_3\sin\delta_a - F_\varepsilon = 0 \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} f_3 = \mu T_3 \\ F_\varepsilon = -ma_c \end{cases} \tag{15}$$

式中 Δd_5——f_3 与种子质心 O 点的距离，mm

Δd_6——T_6 与种子质心 O 点的距离，mm

a_c——种子进入型孔口时的加速度，m^2/s

由式(14)可知，在 xOy 平面内种子经过螺旋引导槽的离心运动，其加速度 a_c 方向为离心力 F_c 方向，即 y 轴正方向，种子合力矩小于零，种子绕着 z 轴顺时针方向旋转，贴向倾斜引导板；型孔种槽侧倾角的取值为关键参数，种子贴向种槽侧边后，朝着型孔种槽的方向运动，随后种子充入型孔种槽中。

通过对种子充种过程的分析，螺旋回转半径 R 取 10 mm，型孔侧倾角 δ_a 取 30°，倾斜导种板水平长度 l_i 为 10 ~ 20 mm、倾斜导种板倾角 δ_i 为 15° ~ 25°，螺旋引导槽高度为 3.6 ~ 10.4 mm，其具体参数需要通过仿真试验进一步确认。

3 排种器性能仿真

3.1 仿真参数设定

排种器装配体模型由 Solidworks 软件创建，将排种器三维几何体模型导入 EDEM 软件。由于种子与种子间，种子与排种器间均无粘附力，所以选择接触模型为 Hertz - Mindlin(no slip)无滑动接触模型。小麦籽粒外形为类椭球体，结合上文对多品种的种子尺寸测量以及尺寸差异分布规律，将小麦种子简化为长半轴长度 6.6 mm、短半轴长度 3.4 mm 的椭球体，几何体仿真模型以及播种质量评价标准如图 7 所示。

在颗粒属性中设置小麦种子粒径分布为正态分布规律，并根据测量的频率分布、最大值、最小值设置参数，模拟真实种子粒径的差异性。为了保证仿真试验不失真，每组仿真输出时间步长设定为 5 × 10^{-6} s，由颗粒工厂在排种器对应位置生成小麦种子完成填充，静止 0.5 s 后，螺旋引导型孔轮旋转，每隔 10 s 采集一次数据，重复 5 次。小麦种子、排种器的材料特性参数及其相互作用如表 2 所示[24]。

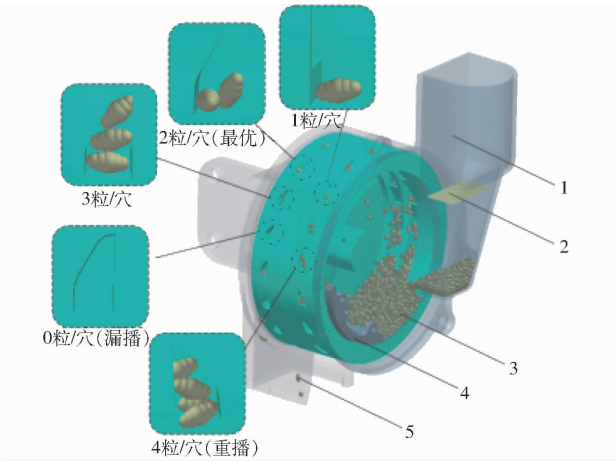


图 7 EDEM 仿真模型

Fig. 7 Model diagram of EDEM simulation

1. 入种口 2. 颗粒工厂 3. 种群 4. 排种轮 5. 投种口

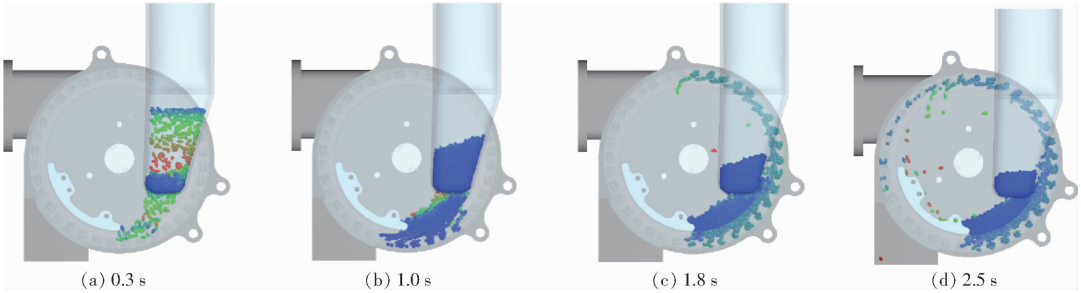
表 2 仿真模型材料参数与接触模型参数

Tab. 2 Parameters of simulation model material and contact model

参数	数值
小麦三轴尺寸(长 × 宽 × 厚)/(mm × mm × mm)	6.6 × 3.4 × 3.4
小麦密度/(kg·m^{-3})	1 350
小麦泊松比	0.42
小麦剪切模量/Pa	8.68 × 10^6
尼龙密度/(kg·m^{-3})	1 150
尼龙泊松比	0.4
尼龙剪切模量/Pa	1.02 × 10^8
尼龙-小麦碰撞恢复系数	0.5
尼龙-小麦静摩擦因数	0.2
尼龙-小麦动摩擦因数	0.01

3.2 排种器充种过程仿真

为验证螺旋引导型孔单元对种子的调姿促充作用，对排种器充种过程开展仿真试验。以种子速度进行染色，截取不同时间段的仿真运动动画，排种器仿真过程如图 8 所示。如图 8a 所示，0 ~ 0.5 s 时，由颗粒工厂生成小麦种子颗粒 1 500 粒，



(a) 0.3 s (b) 1.0 s (c) 1.8 s (d) 2.5 s

图 8 排种器离散元分析仿真过程

Fig. 8 DEM simulation process of seed metering device

生成速度为 3 000 粒/s，种子颗粒由前壳体逐渐进入螺旋引导型孔轮内部；如图 8b 所示，0.5 ~ 1.0 s 时，种子颗粒在螺旋引导型孔轮内部静置，形成静态小麦种群；如图 8c、图 8d 所示，1 s 后，螺旋引导型孔轮以转速30 r/min 做匀速圆周运动，种子在螺旋引导型孔单元经过引导调姿后，充入型孔种槽中形成待投种子，并最终从后壳体投种口投出，在螺旋引导槽滞留的待清种子回落到种群里。由排种过程仿真分析可知，排种器可以完成充种、清种、携种、投种的过程。

为较好地观察充种过程中种子在螺旋引导结构中运动过程的仿真效果，选取单粒竖立姿态小麦种子，截取 5 个时刻的小麦种子充种过程正视图、俯视图的仿真运动情况，如图 9 所示。设置螺旋引导型孔轮透明，其他零件不可见，设置观察截面重合与型孔种槽入口截面，以得到垂直于旋转轴径向的观察平面，即螺旋引导型孔单元正视图，如图 9a 所示；设置观察截面水平居中，得到螺线引导型孔单元的俯视图，观察竖立姿态小麦种子充种过程运动位移情况，如图 9b 所示。从图中可以看出，随着螺旋引导型孔轮的旋转，竖立姿态小麦种子先后与倾斜导种板、螺旋引导槽、型孔种槽接触并发生位移和旋转，与前文对竖立姿态小麦种子充种过程各阶段种子运行轨迹相契合：t_1 ~ t_2时刻竖立姿态小麦种子由于受到旋转力矩发生倾倒，由竖立姿态调整为平躺姿态；t_3 ~ t_4时刻种子沿螺旋引导槽稳定滑行至型孔种槽入口处；t_5时刻种子以稳定平躺姿态进入型孔种槽，种子沿种槽侧壁进入型孔种槽内部。上述各时刻反映了竖立小麦种子在螺旋引导型孔单元充种的仿真过程，进一步表明螺旋引导结构对小麦种子的调姿促充作用。

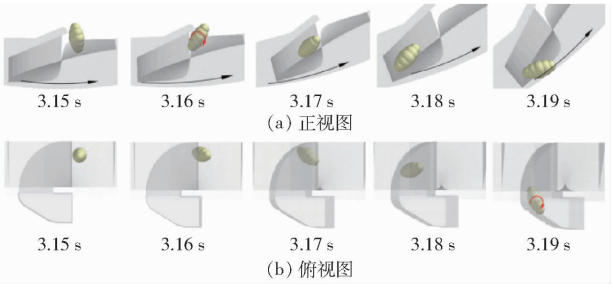


图 9　单粒竖立姿态种子充种过程仿真分析

Fig. 9　Simulation analysis of single upright seed during seed filling

3.3　参数优化仿真试验

3.3.1　试验方案设计

为得出螺旋引导结构最佳参数组合，根据上文分析，选取 3 个关键参数：倾斜导种板水平长度、倾斜导种板倾角、螺旋引导槽高度，开展三因素五水平二次正交旋转回归组合仿真试验，分别以倾斜导种板水平长度 15 mm、倾斜导种板倾角 20°、螺旋引导槽高度 7 mm 为试验水平中心，试验因素编码如表 3 所示。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Experimental factors and codes

编码	因素		
	倾斜导种板水平长度 l_a/mm	倾斜导种板倾角 δ_a/(°)	螺旋引导槽高度 P/mm
-1.682	10	15	3.64
-1	12	17	5.00
0	15	20	7.00
1	18	23	9.00
1.682	20	25	10.36

3.3.2　试验结果与分析

使用 Design-Expert 13 软件对试验组以及试验结果数据进行处理，X_1、X_2、X_3分别为试验因素倾斜导种板水平长度 l_i、倾斜导种板倾角 δ_i、螺旋引导槽高度 P 编码值。排种器最优粒数应为 2 粒/穴，2 粒/穴出现频率越集中，则排种量越精确，排种器性能越好。以最优率 Y_1（2 粒/穴）、合格率 Y_2（(2 ± 1)粒/穴）、重播率 Y_3（ > 3 粒/穴）、漏播率 Y_4（0 粒/穴）为试验指标，共 20 组试验，每组试验重复 3 次，观察其交互作用对试验指标的影响规律，试验方案与结果如表 4 所示。

表 4　试验方案与结果

Tab. 4　Experimental scheme and results

编号	因素			最优率	合格率	重播率	漏播率
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%	Y_4/%
1	-1	-1	-1	61.9	91.8	5.7	2.5
2	1	-1	-1	58.0	84.7	7.3	8.0
3	-1	1	-1	58.5	95.6	2.2	2.2
4	1	1	-1	63.0	94.0	3.2	2.8
5	-1	-1	1	64.8	95.0	3.0	2.0
6	1	-1	1	52.8	87.0	6.0	7.0
7	-1	1	1	52.0	84.3	7.7	8.0
8	1	1	1	50.1	83.5	10.5	6.0
9	-1.682	0	0	56.0	89.7	5.3	5.0
10	1.682	0	0	50.0	85.1	8.9	6.0
11	0	-1.682	0	63.4	97.9	0.9	1.2
12	0	1.682	0	59.5	95.0	2.5	2.5
13	0	0	-1.682	68.5	95.4	2.5	2.1
14	0	0	1.682	53.0	87.0	7.0	6.0
15	0	0	0	51.9	88.4	4.6	7.0
16	0	0	0	58.0	83.4	8.0	8.5
17	0	0	0	53.8	85.8	7.7	6.5
18	0	0	0	54.4	84.3	8.1	7.6
19	0	0	0	58.4	85.6	7.4	7.0
20	0	0	0	52.0	90.0	3.5	6.5

试验结果方差分析如表 5 所示，回归模型中，最优率 Y_1、合格率 Y_2、漏播率 Y_4的模型均为极显著

($P<0.01$),重播率 Y_3 的模型为显著($0.01<P<0.05$),失拟项检验结果均为不显著,表明二次回归模型拟合程度良好,能较好地反映各因素对指标的交互作用影响规律。

表 5 回归方程方差分析

Tab. 5 Variance analysis of regressions equation

方差来源	最优率 Y_1		合格率 Y_2		重播率 Y_3		漏播率 Y_4	
	F	P	F	P	F	P	F	P
模型	9.19	0.000 9 **	7.50	0.002 1 **	4.76	0.011 4 *	9.79	0.000 7 **
X_1	6.98	0.024 6 *	8.23	0.016 7 *	6.05	0.033 7 *	7.53	0.020 7 *
X_2	5.33	0.043 6 *	0.46	0.512 2	0.55	0.476 4	0.16	0.697 5
X_3	29.1	0.000 3 **	11.97	0.006 1 **	7.75	0.019 3 *	12.39	0.005 5 **
X_1X_2	7.46	0.021 2 *	3.56	0.088 5	0.04	0.849 6	15.63	0.002 7 **
X_1X_3	4.58	0.058 0	0.01	0.988 4	0.48	0.505 9	1.11	0.316 5
X_2X_3	6.36	0.030 3 *	16.45	0.002 3 **	13.67	0.004 1 **	12.20	0.005 8 **
X_1^2	1.64	0.229 2	0.04	0.844 3	1.23	0.294 0	1.40	0.264 9
X_2^2	11.92	0.006 2 **	24.04	0.000 6 **	11.74	0.006 5 **	33.03	0.000 2 **
X_3^2	9.36	0.012 *	3.77	0.080 9	0.75	0.407 1	8.97	0.013 5 *
失拟项	0.40	0.828 7	0.81	0.587 0	0.29	0.897 3	2.99	0.127 2

注:* 表示影响显著($0.01<P<0.05$);** 表示影响极显著($P\leqslant0.01$)。

最优率 Y_1 模型,X_3、X_2^2 的影响为极显著($P<0.01$),X_1、X_2、X_1X_2、X_2X_3、X_3^2 的影响为显著($0.01<P<0.05$),其余为不显著($P>0.05$);合格率 Y_2 模型,X_3、X_2X_3、X_2^2 的影响为极显著,X_1 的影响为显著,其余为不显著;重播率 Y_3 模型,X_2X_3、X_2^2 的影响为极显著,X_1、X_3 的影响为显著,其余为不显著;漏播率 Y_4 模型,X_3、X_1X_2、X_2X_3、X_2^2 的影响为极显著,X_1、X_3^2 影响为显著,其余为不显著。剔除不显著交互因素后,建立显著项影响规律二次方程

$$\begin{cases} Y_1 = 54.73 - 1.71X_1 - 1.5X_2 - 3.5X_3 + 2.31X_1X_2 - \\ \quad 2.14X_2X_3 + 2.18X_2^2 + 1.93X_3^2 \\ Y_2 = 86.33 - 1.85X_1 - 0.44X_2 - 2.33X_3 - 3.41X_2X_3 + \\ \quad 3.07X_2^2 \\ Y_3 = 6.51 - 1.06X_1 + 0.32X_2 - 1.2X_3 - 2.09X_2X_3 - \\ \quad 1.44X_2^2 \\ Y_4 = 7.14 + 0.80X_1 + 0.12X_2 + 1.02X_3 - 1.5X_1X_2 + \\ \quad 1.32X_2X_3 - 1.62X_2^2 - 0.85X_3^2 \end{cases} \tag{16}$$

3.3.3 显著性交互作用对指标影响响应面分析

为进一步分析各因素显著性交互作用对排种器性能试验评价指标的影响规律,对试验数据进一步处理,得到试验因素:倾斜导种板水平长度、倾斜导种板倾角、螺旋引导槽高度交互作用对性能评价各指标的响应曲面,如图 10 所示。

图 10a 为螺旋引导槽高度一定时,倾斜导种板倾角与倾斜导种板水平长度交互作用对最优率 Y_1 的影响。倾斜导种板倾角一定时,随着倾斜导种板水平长度增大,最优率 Y_1 先增大后减小。当倾斜导种板倾角增大时,会加快由倾斜导种板水平长度增大导致最优率 Y_1 增大后减小的趋势。倾斜导种板水平长度一定时,随着倾斜导种板倾角增大,最优率 Y_1 先减小后增大。当倾斜导种板水平长度增大时,会加快由倾斜导种板倾角减小导致最优率 Y_2 先减小后增大的趋势。

图 10b 为倾斜导种板水平长度一定时,螺旋引导槽高度与倾斜导种板倾角交互作用对最优率 Y_1 的影响。螺旋引导槽高度一定时,随着倾斜导种板倾角增大,最优率 Y_1 减小。当螺旋引导槽高度增大时,会加快由倾斜导种板倾角增大导致最优率 Y_1 减小的趋势。倾斜导种板倾角一定时,随着螺旋引导槽高度增大,最优率 Y_1 减小。当倾斜导种板倾角增大时,会加快由螺旋引导槽高度增大导致最优率 Y_1 减小的趋势。

图 10c 为倾斜导种板水平长度一定时,螺旋引导槽高度与倾斜导种板倾角交互作用对合格率 Y_2 的影响。螺旋引导槽高度一定时,随着倾斜导种板倾角增大,合格率 Y_2 先减小后增大。当螺旋引导槽高度增大时,会加快由倾斜导种板倾角增大导致合格率 Y_2 先减小后增大的趋势。倾斜导种板倾角一定时,随着螺旋引导槽高度增大,合格率 Y_2 减小。当倾斜导种板倾角增大时,会加快由螺旋引导槽高度增大导致合格率 Y_2 减小的趋势。

图 10d 为倾斜导种板水平长度一定时,螺旋引导槽高度与倾斜导种板倾角交互作用对重播率 Y_3 的影响。螺旋引导槽高度一定时,随着倾斜导种板倾角增大,重播率 Y_3 先增大后减小。当螺旋引导槽

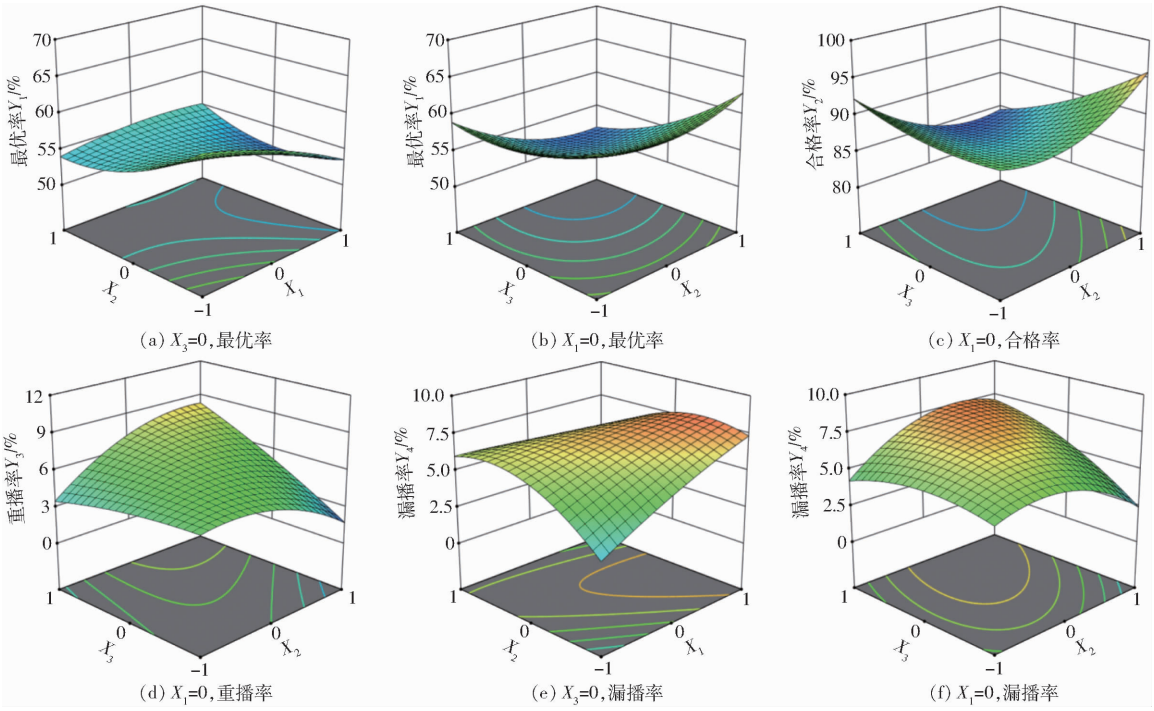


图 10　各因素显著影响交互项对性能指标的响应曲面

Fig. 10　Response surfaces of effect of experimental factor interaction on performance index

高度增大时，会减弱由倾斜导种板倾角增大导致重播率 Y_3 先增大后减小的趋势。倾斜导种板倾角一定时，随着螺旋引导槽高度增大，重播率 Y_3 增大。当倾斜导种板倾角增大时，会加快由螺旋引导槽高度增大导致重播率 Y_3 增大的趋势。

图 10e 为螺旋引导槽高度一定时倾斜导种板水平长度与倾斜导种板倾角交互作用对漏播率 Y_4 的影响。倾斜导种板倾角一定时，随着倾斜导种板水平长度增大，漏播率 Y_4 减小。当倾斜导种板倾角增大时，会减缓由倾斜导种板水平长度增大导致漏播率 Y_4 下降的趋势。倾斜导种板水平长度一定时，随着倾斜导种板倾角增大，漏播率 Y_4 先增大后减小。当倾斜导种板水平长度增大时，会减缓由倾斜导种板倾角增大导致最优率先下降后增大的趋势。

图 10f 为倾斜导种板水平长度一定时，螺旋引导槽高度与倾斜导种板倾角交互作用对漏播率 Y_4 的影响。螺旋引导槽高度一定时，随着倾斜导种板倾角增大，漏播率 Y_4 先增大后减小。当螺旋引导槽高度增大时，会加快由倾斜导种板倾角增大导致漏播率 Y_4 先增大后减小的趋势。倾斜导种板倾角一定时，随着螺旋引导槽高度增大，漏播率 Y_4 增大。当倾斜导种板倾角增大时，会加快由螺旋引导槽高度增大导致漏播率 Y_4 增大的趋势。

为获取螺旋引导结构关键参数最优组合，通过 Design-Expert 13 软件的寻优预测功能，将最优率 Y_1 和合格率 Y_2 最高、重播率 Y_3 和漏播率 Y_4 最低为目标约束条件，对约束条件内的各因素最优组合进行多目标求解。目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \max Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_3(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_4(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

依据式(17)求解得出螺旋引导结构关键参数最优组合：倾斜导种板水平长度为 17.5 mm，倾斜导种板倾角为 23°，螺旋引导槽高度为 5 mm。最优参数组合下预测最优率为 64.42%，合格率为 95.53%，重播率为 2.52%，漏播率为 1.96%，满足排种器设计要求。

4　验证试验与适应性试验

4.1　最优参数结果验证试验

根据参数优化结果，开展验证试验。将最优参数组合下的模型实物加工装配，在西北农林科技大学 JPS－12 型多功能排种性能试验台开展小麦排种验证试验，试验台架如图 11 所示。为满足 120 ~ 300 kg/hm^2 播种量设计要求，将最优参数组合进行不同转速条件下的仿真试验，以最优率、合格率、重播率、漏播率为指标表征排种性能，各转速与播种量、粒距对应关系如表 6 所示。

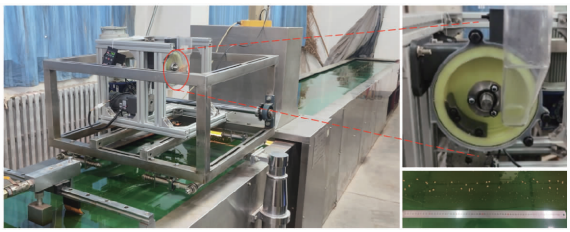


图 11 排种器性能试验平台及试验结果

Fig. 11 JSP－12 multifunctional seed metering device performance test platform

表 6 排种器转速与播种量对应值

Tab. 6 Value of seed metering device rotation speed corresponding to sowing amount

转速 n/(r·min^{-1})	粒距 a/mm	播种量 Q/(kg·hm^{-2})
30	54	133.33
40	41	177.73
50	32	222.17
60	27	266.67
70	23	313.04

参照 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》对粒距小于等于 10 cm 的播种机相关规定,每组试验统计 251 粒种子的每穴种子数量以及粒距,每组重复 3 次取平均值,仿真与台架试验结果如图 12 所示。

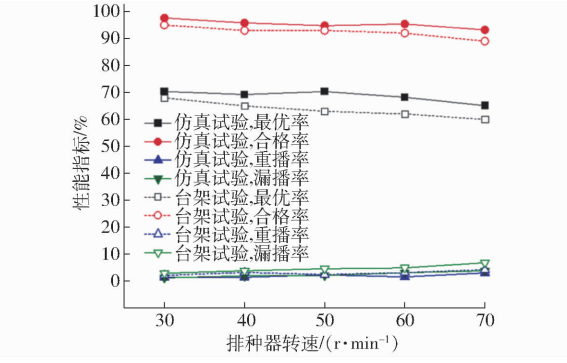


图 12 验证试验结果

Fig. 12 Verification test results

由最优参数结果分析可知,台架与仿真试验排种器性能指标变化规律相同,误差最大值小于 10%,随排种器转速的提升,排种性能指标略有下降。在转速 30～70 r/min 条件下,排种性能可以适应 120～300 kg/hm^{2}播种量要求。

4.2 品种适应性播种验证试验

为探究排种器对不同品种小麦种子的适应性,在 JSP－12 型排种器性能试验台上,将表 1 中测量的 4 个品种小麦种子进行适应性播种试验,得到试验结果如表 7 所示。

表 7 不同品种适应性播种试验结果

Tab. 7 Results of adaptive sowing test of different varieties %

小麦品种	最优率	合格率	重播率	漏播率
国鑫 188 号	65.42	94.80	2.00	3.20
有孚 9 号	58.70	87.93	5.7	6.37
轮选 99 号	63.71	93.41	2.35	4.24
西农 9112 号	60.38	90.42	4.13	5.45

试验选择的 4 种品种的小麦排种试验指标整体性能指标趋于稳定,其中有孚 9 号小麦品种合格率偏低,推测其原因是该品种的小麦种子尺寸偏差较大,而导致漏播、重播的发生。4 个品种小麦排种试验合格率、重播率、漏播率均满足相关要求。

5 结论

(1)为满足小麦机械式精量播种的不同播种量需求,针对种子外形不规则导致精量排种器易卡种的问题,设计了一种螺旋引导调姿促充式小麦精量排种器,阐述了排种器工作原理以及关键零部件设计,明确了小麦在型孔单元内的运动方程与排种器关键参数的关系,得到影响排种性能的 3 个关键参数:倾斜导种板水平长度、倾斜导种板倾角、螺旋引导槽高度。

(2)通过离散元仿真分析软件 EDEM 对排种器进行仿真分析,以最优率、合格率、漏播率和重播率为试验指标,探究关键参数对排种性能的交互影响规律,最终确定最优参数组合:倾斜导种板水平长度为 17.5 mm、倾斜导种板倾角为 23°、螺旋引导槽高度为 5 mm,该参数组合下,漏播率为 1.96%、最优率为 64.42%、合格率为 95.53%,重播率为 2.52%。

(3)进行了不同播种量的台架与仿真验证试验,台架试验与仿真试验的试验指标基本一致,台架试验合格率大于 85%,满足相关要求。进行了不同品种的适应性台架试验,在当前最优参数下,合格率大于 85%,对于该试验中 4 个品种小麦种子有较好的适应性。

参 考 文 献

[1] 宋莉莉, 张瑞涛. 我国粮食生产变化趋势及风险研判[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(2): 1－9.
SONG Lili, ZHANG Ruitao. Research on change trend and risk of China's food production[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(2): 1－9. (in Chinese)

[2] KUMAR A, SAINI K S, DASILA H, et al. Sustainable intensification of cropping systems under conservation agriculture practices: impact on yield, productivity and profitability of wheat[J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7468.

[3] 张仕林，黄玉祥，赵宏波，等. 切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(5)：40－52.
ZHANG Shilin，HUANG Yuxiang，ZHAO Hongbo，et al. Design and experiment of cutting and throwing combined anti-blocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(5)：40－52.(in Chinese)

[4] 夏俊芳，魏有帅，郑侃，等. 宽苗带小麦播种机多行匀播分控系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(5)：40－52.
XIA Junfang，WEI Youshuai，ZHENG Kan，et al. Design and experiment of a multi-row uniform seeding control system for wide-row wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(5)：40－52.(in Chinese)

[5] KOROHOU T，OKINDA C，LI H，et al. Effect of no-till precise seeding on wheat(*Triticum aestivum* L.)population quality at the emergence stage[J]. Journal of Animal，Plant Sciences，2022，32(1)：186－198.

[6] 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)

[7] 董建鑫，高筱钧，张仕林，等. 高速播种机玉米姿控驱导式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(11)：108－119.
DONG Jianxin，GAO Xiaojun，ZHANG Shilin，et al. Design and test of maize posture control and driving precision metering device for high-speed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(11)：108－119.(in Chinese)

[8] 黄玉祥，李鹏，董建鑫，等. 大豆高速播种机侧置导引式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(10)：44－53，75.
HUANG Yuxiang，LI Peng，DONG Jianxin，et al. Design and experiment of side-mounted guided high speed precision seed metering device for soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(10)：44－53，75.(in Chinese)

[9] WANG L，LIAO Q，XI R，et al. Influence of an equal width polygon groove-tooth wheel on feeding performance of the seed feeding device for wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2024，217：108565.

[10] 王英博，李洪文，王庆杰，等. 机械式小麦射播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(S1)：73－84.
WANG Yingbo，LI Hongwen，WANG Qingjie，et al. Design and experiment of wheat mechanical shooting seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(S1)：73－84.(in Chinese)

[11] 赵金，郑超，张晋国，等. 差速充种沟式小麦单粒排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(12)：65－74.
ZHAO Jin，ZHENG Chao，ZHANG Jinguo，et al. Parameter optimization and experiment of differential filling groove single grain seed-metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(12)：65－74.(in Chinese)

[12] 刘彩玲，都鑫，张福印，等. 锥面导流水平盘式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(12)：56－65.
LIU Cailing，DU Xin，ZHANG Fuyin，et al. Design and test of cone diversion type horizontal plate wheat precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(12)：56－65.(in Chinese)

[13] 张恒榜，赵健，胡广锐，等. 窝眼轮式小麦排种器参数优化试验研究[J]. 农机化研究，2020，42(9)：139－144.
ZHANG Hengbang，ZHAO Jian，HU Guangrui，et al. Parameter optimization of wheat seeding device with nest round wheel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2020，42(9)：139－144.(in Chinese)

[14] 李洪昌，高芳. 搅种托种型小麦气吸式精量排种器参数化设计与试验[J]. 中国农机化学报，2023，44(7)：9－15，32.
LI Hongchang，GAO Fang. Parametric design and experiment of air suction precision metering device for wheat[J]. Journal of China Agricultural Mechanization，2023，44(7)：9－15，32.(in Chinese)

[15] 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)

[16] 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)

[17] 钟继宇. 倒鳍状型孔轮式麦油兼用变量排种器设计与试验[D]. 合肥：安徽农业大学，2022.
ZHONG Jiyu. Design and experiment of inverted-fin shaped model-hole wheel variable seed metering device for both wheat and rapeseed[D]. Hefei：Anhui Agricultural University，2022.(in Chinese)

[18] 侯加林，马端旭，李慧，等. 气力离心组合式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(10)：35－45.
HOU Jialin，MA Duanxu，LI Hui，et al. Metering device for wheat design and experiment of pneumatic centrifugal combined precision seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(10)：35－45.(in Chinese)

[19] LI Z，ZHONG J，GU X，et al. DEM study of seed motion model-hole-wheel variable seed metering device for wheat[J].

Agriculture, 2022, 13(1): 23.
[20] 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)
[21] 马连元, 刘俊峰, 王廷双, 等. 内侧充种垂直圆盘排种器精播分蘖作物的探讨[J]. 农业机械学报, 1998, 29(3): 38-43.
MA Lianyuan, LIU Junfeng, WANG Tingshuang, et al. Discussion on precision sowing tiller crops with vertical disc seed metering device filled with seeds inside[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 38-43. (in Chinese)
[22] 刘俊峰, 王廷双, 冯晓静, 等. 内充种垂直轮式新型小麦精量排种器的研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(4): 91-94.
LIU Junfeng, WANG Tingshuang, FENG Xiaojing, et al. Research on a new type of wheat precision metering device with vertical wheel filled with seeds[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(4): 91-94. (in Chinese)
[23] 李晓冉, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 稻麦油兼用高速气送集排器螺旋斜置式搅种装置研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 51-61.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Development of the spiral-inclined seed stirring equipment in high-speed air-assisted centralized metering for rice, wheat, and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(4): 51-61. (in Chinese)
[24] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68-79, 97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68-79, 97. (in Chinese)

(上接第 72 页)

[27] 宋庆斌, 毕于彬, 赵鹏飞, 等. 玉米小区播种机阻断型气吸式排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 1-9.
SONG Qingbin, BI Yubin, ZHAO Pengfei, et al. Design and test of the blocking type air-suction seed metering device for maize plot seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(4): 1-9. (in Chinese)
[28] 和贤桃. 处方图式变量播种控制系统研究与试验[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
HE Xiantao. Research and experiment on map-based control system of variable rate seeding[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[29] DU Z, YANG L, ZHANG D, et al. Design and experiment of a soil organic matter sensor-based variable-rate seeding control system for maize[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109752.
[30] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[31] 李玉环. 高速玉米精量排种器清种和投种机构优化设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学, 2021.
LI Yuhuan. Optimal design and experimental study of cleaning and linear throwing mechanism of the high speed maize precision seed-metering device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[32] 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 19-27.
HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seed meter's performance detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 19-27. (in Chinese)
[33] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 42-49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42-49. (in Chinese)
[34] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 26-35.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 26-35. (in Chinese)