doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.017

# 摩擦调节式小区小麦精密排种器设计与试验

谢建华[1,2]　张洪梁[1]　冯　浩[1]　黄伟荣[1]　金姣阳[1]　马卫彬[1,2]

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

**摘要**: 针对目前型孔轮式小麦排种器漏播率高等问题,设计了一种摩擦调节式小区小麦精密排种器。通过对单粒种子排种过程进行受力分析,确定排种器种沟夹角 $\beta>17.7°$。利用离散元仿真分析确定排种器关键部分结构尺寸以及摩擦盘较优的转速范围(种沟夹角 $\beta$ 为 30°、型孔轮摩擦角 $\gamma$ 为 14°,摩擦盘转速为 20 ~ 28 r/min 时漏播率最低)。通过受力分析、仿真分析以及实际作业情况确定排种器关键结构参数范围。以摩擦盘转速、型孔轮转速、拨片间隙为试验因素,以粒距合格率、漏播率、重播率为评价指标,进行三因素三水平的回归响应面试验,通过建立回归方程及响应面数学模型分析各工作参数对试验指标的影响。通过参数优化得到最佳工作参数为型孔轮转速 6 r/min、摩擦盘转速 24 r/min、拨片间隙 3.1 mm,并对该试验组合进行验证试验,得到粒距合格率为 89.13%、漏播率为 4.83%、重播率为 6.04%,试验结果与预测值差异约 1 个百分点,满足小麦精少量作业要求,研究结果可为小区小麦精密排种器研究提供技术支撑。

**关键词**: 小麦; 小区育种; 单粒点播; 排种器; 摩擦盘; 型孔轮

**中图分类号**: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0164-10　　**OSID**:

# Design and Experiment of Friction Adjustable Precision Seed Feeder Device for Wheat Experimental Sowing

XIE Jianhua[1,2]　ZHANG Hongliang[1]　FENG Hao[1]　HUANG Weirong[1]　JIN Jiaoyang[1]　MA Weibin[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment*, *Urumqi* 830052, *China*)

**Abstract**: Aiming at the high missing seed rate problem in the current hole-type wheel precision seed feeder, a friction adjustable precision seeder was designed for experimental sowing of wheat. Through the stress analysis of single seed seeding process, it was determined that the seed groove angle $\beta$ of the seeding device was greater than 17.7°. Discrete element simulations were employed to identify the structural dimensions of key components in the seeder and to determine the optimal rotational speed range for the friction plate (with a seed furrow angle $\beta$ of 30° and a hole wheel friction angle $\gamma$ of 14°, the missing seed rate was the lowest when the friction plate speed was ranged from 20 r/min to 28 r/min). Through force analysis, simulation analysis and actual operation, the size range of the key structure of the seed feeder was determined. The three factors and three levels of regression response surface tests were carried out with the friction plate speed, hole wheel speed and pick gap as the main working parameters, and the pass rate of grain spacing, the leakage rate and the replay rate as evaluation indexes. The effects of each working parameter on the test indexes were analyzed by establishing the regression equation and the response surface mathematical model. Through parameter optimization, the optimal working parameters were found to be a hole wheel rotational speed of 6 r/min, a friction plate rotational speed of 24 r/min, and the distance between the baffle and the mold hole was 3.1 mm. Validation tests on this experimental combination yielded a particle spacing qualification rate of 89.13%, a missing sowing rate of 4.83%, and a reseeding rate of 6.04%. The experimental results deviated from the predicted values by approximately 1 percentage points, meeting the operational requirements for precise and minimal wheat planting. The research findings can provide technical support for the development of precision seeders for wheat experimental sowing.

**Key words**: wheat; experimental sowing; single seed on-demand seeding; seed feeder; friction plate; hole-type wheel

收稿日期: 2024-07-25　修回日期: 2024-10-10

**基金项目**: 新疆小麦产业技术体系项目(XJARS-01-10)

**作者简介**: 谢建华(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: xjh199032@163.com

## 0　引言

小麦是新疆主要粮食作物之一，新疆小麦产业体系为国家粮食安全和社会稳定做出了重要贡献[1]。近年来新疆加快发展现代种业，不断提升育种创新能力，为保障全区粮食安全和重要农产品有效供给做出了积极贡献。小区田间试验是进行各品种育种试验的重要形式，其中播种作业是育种试验过程中的重要环节，育种专家为了观察小麦分蘖情况以及在不同阶段的生长特性，需要将每粒小麦种子按照间距 10 ~ 20 cm 进行播种[2]。传统的小区小麦播种机使用圆盘分配器，无法做到 10 ~ 20 cm 单粒点播。因此国内大多数育种团队普遍采用人工点播方式进行播种[3-4]，但由于人工播种工作量大，劳动强度高，且容易产生误差，因此亟待设计一款小区小麦单粒点播机。

国内外对于单粒点播技术装备研究大多围绕玉米、大豆等播种密度较小的作物[5]，而针对小麦等密植类作物研究极少，仅有部分关于小麦精密排种器方面研究[6-15]。可以看出对于小麦精量播种研究主要集中在小麦精量排种技术上[16-17]，均是从种群中直接提取小麦种子，无法对小麦充种姿态进行限制，导致型孔与种子姿态不一致，影响小麦在型孔轮里的充种率。

针对目前孔轮式小麦排种器漏播率高的问题，本文设计一种摩擦盘调节式小麦精密排种器。该排种器通过调节摩擦盘与种沟之间的摩擦力，确保小麦种子在进入型孔前的姿态，使种子长轴与种沟平行，并在种沟中有序排列进入型孔中。未进入型孔的种子将利用V形型孔轮摩擦面与摩擦盘的作用，使小麦长轴与型孔长轴平行，并在重力作用下进入没有种子型孔中，以实现单粒排种效果。通过受力分析、离散元仿真模拟和台架试验，确定排种器关键结构参数，通过响应面试验分析最佳结构参数，最后通过试验验证单粒播种作业效果。

## 1　摩擦排种器结构与工作原理

### 1.1　总体结构

带有摩擦盘的小麦排种器主要由挡种板、摩擦盘、种沟侧板、尼龙拨片、V形型孔轮、拨片固定架组成，装置结构如图 1 所示。V形型孔轮上紧密排列着椭球形状的型孔，型孔尺寸根据种子形状设计。摩擦盘嵌入在型孔轮和种沟侧板中，种沟侧板和拨片固定架通过螺栓与种箱连接。挡板分为纵向挡板和横向挡板，横向挡板固定在摩擦盘上方，防止种箱中的种群涌入种盒中，导致摩擦盘和型孔轮受种群的挤压力过大。种沟侧板与摩擦盘交接处有一定角度的种沟，在排种过程中修正种子进入型孔的姿势。

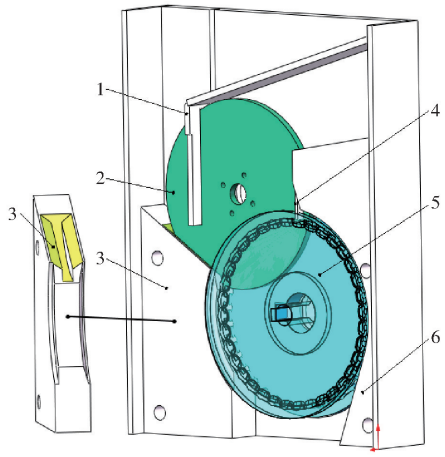



图 1　摩擦排种器结构轴测图

Fig. 1　Axonometric diagram of friction seed feeder structure

1. 挡种板　2. 摩擦盘　3. 种沟侧板　4. 尼龙拨片　5. V形型孔轮　6. 拨片固定架

### 1.2　工作原理

排种器工作过程如图 2 所示。根据种子状态，将排种器划分为 5 个区域，分别为落种区、种姿调整区、充种区、携种区、返回区。排种器工作时，型孔轮和摩擦盘开始转动。种子从排种器的上方进入，在重力作用下沿着挡板滑入落种区，经过落种区后种子进入种姿调整区，小麦种子在种沟和摩擦盘接触力的作用下其长轴沿着种沟方向排列并向下滑入型孔轮的型孔中，没有进入型孔的种子，在充种区内通过V形型孔轮与摩擦盘相互作用，使种子与型孔平行，提高种子进入型孔的概率。随后型孔轮带动种子转动，通过尼龙拨片排出型孔中多余的种子。经过尼龙拨片后种子进入携种区，在携种区内受到型孔轮的支持力、重力，以及旋转带来的离心力，在三力的作用下小麦种子匀速转动，随着型孔轮的转动，支持力变小，种子开始脱离型孔轮，离开排种口，完成播种。

## 2　播种过程种子受力分析

### 2.1　种姿调整区受力分析

小麦种子呈椭球形，充种前需要在种姿调整区调整小麦的充种姿态，使其长轴与种沟平行进入型孔中。在种姿调整区，种沟斜面与摩擦盘形成夹角 $\beta$，摩擦盘转动带动种子向下运动，在摩擦盘和种沟摩擦力的相互作用下使小麦种子长轴与种沟平行，种子顺着种沟进入型孔中。

由于排种过程中小麦种子接触碰撞频率较高，运动过程复杂，分析难度较大，因此本文只对单粒种

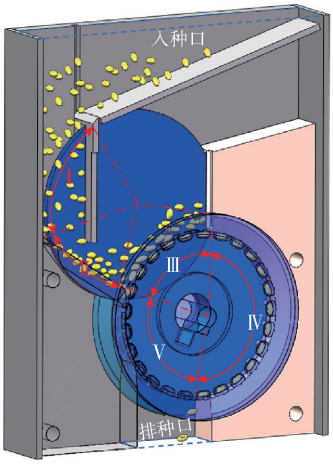



图 2 排种器作业过程示意图

Fig. 2 Schematic of operation process of friction seed dispenser

Ⅰ. 落种区 Ⅱ. 种姿调整区 Ⅲ. 充种区 Ⅳ. 携种区 Ⅴ. 返回区

子的特定位置进行受力分析,满足单粒排种是排种器能正常工作的前提。小麦种子在调整区的受力情况如图 3 所示。在受力平衡情况下应满足

$$\begin{cases} F_f = \mu_1 F_{n2} \\ F_1 = \mu_2 F_{n1} \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} F_{n2} = \dfrac{G\cos\alpha + F_f \sin\theta}{\tan\beta} \\ F_{n1} = \dfrac{G\cos\alpha + F_f \sin\theta}{\sin\beta} \end{cases} \tag{2}$$

式中 $F_f$——摩擦盘对种子的摩擦力,N

$F_1$——种沟侧板对种子的摩擦力,N

$G$——种子所受重力,N

$\theta$——摩擦盘对种子摩擦力与 $X$ 轴夹角,(°)

$\alpha$——种沟与水平方向夹角,(°)

$F_{n2}$——摩擦盘为种子提供的支持力,N

$F_{n1}$——种沟为种子提供的支持力,N

$\mu_1$——摩擦盘与小麦种子摩擦因数

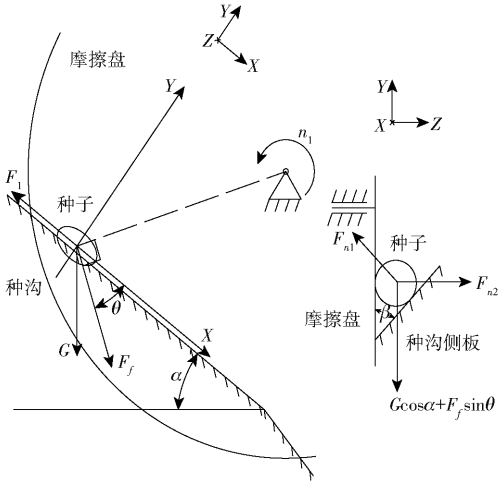



图 3 调整区的种子受力分析

Fig. 3 Stress situation of seeds

$\mu_2$——种沟侧板与小麦摩擦因数

根据小麦与摩擦盘和种沟侧板的摩擦因数,通过标定试验可以测出 $\mu_1 = 0.61$,$\mu_2 = 0.55$。将式(2)代入式(1)得

$$\begin{cases} F_f = \dfrac{\mu_1 G\cos\alpha}{\tan\beta - \mu_1 \sin\theta} \\ F_1 = \dfrac{\mu_2 G\cos\alpha}{\sin\beta} + \dfrac{\mu_2\mu_1 G\cos\alpha\sin\theta}{(\tan\beta - \mu_1\sin\theta)\sin\beta} \end{cases} \tag{3}$$

为了避免排种过程中种子卡死在种沟中,摩擦力 $F_f$需大于零,则由式(3)可知 $\tan\beta - \mu_1\sin\theta > 0$,$\theta$ 越大摩擦盘对种子沿着种沟方向上的分力越小,种子在沿着种沟下滑动过程中 $\theta$ 会越来越小,经过测量得最大值为 30°,最小值为 0°,为了防止种子在种沟的任何位置卡死,将最大的 $\theta$ 值代入不等式 $\tan\beta - \mu_1\sin\theta > 0$ 中得 $\beta > 17.7°$。

## 2.2 充种区种子受力分析

小麦种子经过种姿调整区,部分种子沿着种沟进入型孔中。随着型孔轮的转动排出,另一些种子仍然停留在充种区内,经过摩擦盘和 V 形型孔轮摩擦面搅动继续调整小麦充种姿态,通过摩擦力的作用使种子长轴与型孔长轴保持平行,提高小麦种子进入型孔的能力。

在型孔轮和摩擦盘没有转动情况下,小麦在充种区的充种过程分为 2 种情况,如图 4a 所示。①小麦种子以初始 $A_1$ 状态,受到重力作用下落至 $A_2$ 状态,以 $A_3$ 状态进入型孔中。②种子由 $B_1$ 状态下落,以 $B_2$ 状态卡在摩擦盘和型孔轮之间,为解决小麦卡种问题,对 $B_2$ 处进行受力分析,受力方程为

$$\begin{cases} F_x = F_{n2} + F_f\cos\gamma - F_{n1}\sin\gamma \\ F_y = F_f + F_{n1}\cos\gamma + F_f\sin\gamma - G \end{cases} \tag{4}$$

式中 $F_x$——种子在 $X$ 轴方向所受合力,N

$F_y$——种子在 $Y$ 轴方向所受合力,N

$\gamma$——型孔轮摩擦角,(°)

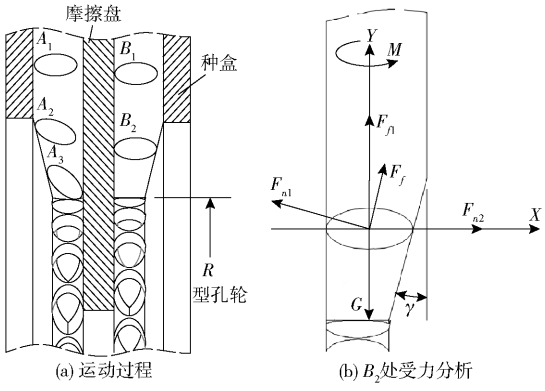



图 4 充种区种子运动过程与受力分析

Fig. 4 Analysis of the seed movement process and force in the seed filling area

当摩擦盘和型孔轮不转动时，种子在 $B_2$ 处所受合力为零，种子卡住无法下落，当排种器工作时，型孔轮和摩擦盘转动，在种子的两端产生摩擦力，使种子在 $Y$ 轴方向产生一个力矩，打破种子受力平衡使种子下落进入型孔中。

## 3　关键结构设计

### 3.1　种沟

种沟是充种前调整种子姿态的关键部件，种子从种箱中下落与种沟接触，通过种沟与摩擦盘的作用使小麦种子长轴与种沟平行，最后顺利进入型孔中。种沟侧板在排种器中有 2 个作用：承载种子和调整小麦种子充种姿势。影响小麦运动状态的主要参数是种沟与摩擦盘的角度 $\beta$，通过运动分析可以确定种沟夹角 $\beta$ 取值范围，但最终角度还需通过仿真试验确定。

### 3.2　V 形型孔轮设计

V 形型孔轮是排种器的主要部件，对排种性能有重要影响，V 形型孔轮主要结构如图 5 所示。

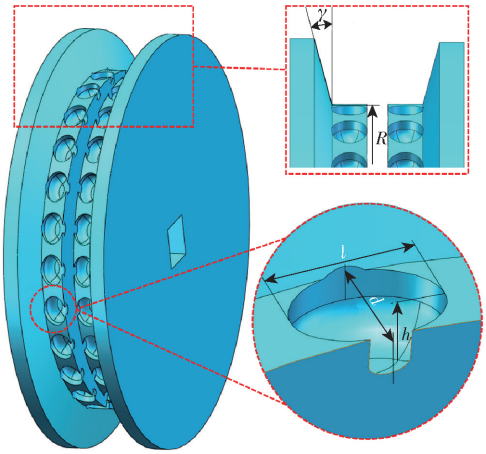



图 5　型孔结构示意图

Fig. 5　Schematic of type hole

#### 3.2.1　V 形型孔轮尺寸

由充种区受力分析看出，影响排种性能主要有型孔轮直径 $R$、摩擦角 $\gamma$。根据《农业机械设计手册》[18]，型孔轮直径越大，可布置的型孔越多，充种弧度也越大，充种效率也会随之变高。根据手册得知型孔轮直径一般为 80 ~ 200 mm，为了控制排种器体积，确定 $R$ 为 80 mm。摩擦面与摩擦盘共同作用能调整小麦姿态，在整个排种过程中种子受力复杂，摩擦角 $\gamma$ 需要通过离散元仿真确定。

#### 3.2.2　型孔设计

型孔尺寸直接影响小麦充种效果，研究表明类椭球形的型孔充种率最高[19]，型孔尺寸如图 5 所示。为了确保每个型孔只充种 1 粒小麦种子，型孔尺寸应满足条件[20]

$$\begin{cases} L_{\max} < l < L_{\min} + h_{\min} \\ d_{\max} < d < d_{\min} + h_{\min} \\ h_{\max} < h < 2h_{\min} \end{cases} \tag{5}$$

式中　$l$——型孔长度，mm

$d$——型孔宽度，mm

$h$——型孔高度，mm

$L_{\max}$、$L_{\min}$——小麦种子最大、最小长度，mm

$d_{\max}$、$d_{\min}$——小麦种子最大、最小宽度，mm

$h_{\max}$、$h_{\min}$——小麦种子最大、最小高度，mm

随机测量 400 粒新冬 60 品种小麦种子长、宽、高，测量值如表 1 所示。将数据代入式(5)确定型孔长度为 7.5 mm、宽度为 5 mm、深度为 5 mm。

表 1　小麦种子三维尺寸

Tab. 1　Three-dimensional dimensions of wheat seeds

| 参数 | 均值/mm | 最大值/mm | 最小值/mm | 变异系数 |
|---|---|---|---|---|
| 长度 $L$ | 6.30 | 7 | 5 | 0.09 |
| 高度 $h$ | 3.37 | 4 | 3 | 0.07 |
| 宽度 $d$ | 3.86 | 4.5 | 3.1 | 0.10 |

型孔轮分为左右型孔轮，型孔轮上分布的型孔越多，需要的转速越小，研究表明，型孔轮转速越大充种效果越差[21]，因此，型孔轮上需要尽可能多的布置型孔，而且型孔与型孔之间不能相互交叉，通过建模软件阵列发现每个型孔轮上最多排列 25 个型孔。左右型孔交替排列，提高了排种均匀性。

#### 3.2.3　型孔轮转速设计

型孔轮转速根据小麦粒距和行驶速度确定，设计的型孔有 2 排，共有 50 个。由于小麦精量播种往往适用于小区小麦播种作业[22]，作业范围小，作业速度比大田作业速度低，为了保证播种机的作业质量，作业速度设定为 7.2 km/h，粒距 $L_1$ 为 10 ~ 20 cm，可计算出型孔轮转速 $n$ 为 6 ~ 24 r/min，计算式为

$$n = \frac{V_w \times 100 \times 60}{3.6 L_1 Z} \tag{6}$$

式中　$Z$——型孔数量

$V_w$——播种机作业速度，km/h

## 4　排种器仿真分析

实际排种过程中，并不只有 1 粒种子，种子间相互作用力也会对排种性能产生很大影响，但大量种子受力情况难以通过理论分析得出。EDEM 仿真软件拥有优秀的离散元仿真性能，在农业机械设计中得到广泛应用[23]，采用 EDEM 软件可以很好地分析排种器排种过程。

### 4.1 模型建立

#### 4.1.1 小麦种子三维尺寸

以新冬 60 品种小麦为研究对象。由表 1 可知，小麦长度和宽度变异系数最大，说明小麦长和宽区分度最高，且小麦宽度和高度相近，后续将小麦种子长和宽作为离散元颗粒模型长和宽进行建模。

小麦种子个体形状差异较大，为了更好地反映排种过程中小麦种群整体形状，按照种子不同长度和宽度将小麦种子分为 4 类。长度 5 ~ 6 mm、宽度 3.1 ~ 3.8 mm 时为 A 类；长度 6 ~ 7 mm、宽度 3.8 ~ 4.5 mm 时为 B 类；长度 5 ~ 6 mm、宽度 3.8 ~ 4.5 mm 时为 C 类；长度 6 ~ 7 mm、宽度 3.8 ~ 4.5 mm 时为 D 类。各类种子平均尺寸以及在种群中所占的数量比例如表 2 所示。在离散元仿真过程中以此比例为依据建立颗粒数量，更符合实际排种过程。

**表 2 4 类种子三维平均尺寸及比例**

**Tab. 2 Three-dimensional average size and proportion of four types of seeds**

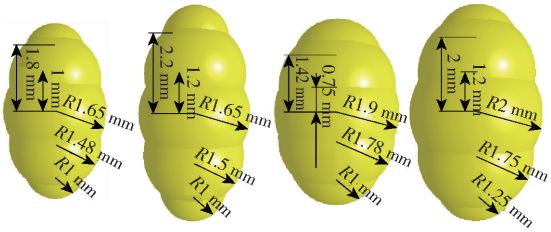
| 参数 | | 种类 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D |
| 均值 | 长度/mm | 5.6 | 6.4 | 5.7 | 6.5 |
| | 宽度/mm | 3.3 | 3.3 | 3.8 | 4.0 |
| | 高度/mm | 3.0 | 3.0 | 3.2 | 3.5 |
| 比例/% | | 12.9 | 11.3 | 1.6 | 74.2 |

#### 4.1.2 模型建立

目前已有研究[24]小麦种子离散元三维颗粒模型主要使用类似椭球形的五球模型[25]，椭球形的长和宽取种群中各类种子长和宽平均值，具体尺寸如表 3 所示。

**表 3 小麦种子模型及实物图**

**Tab. 3 Physical maps of wheat seeds**

| 项目 | 种类 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D |
| 实物 |  | | | |
| 模型 |  | | | |

在 Solidworks 中建立排种器的三维实体模型，导入到 EDEM 中建立与种子接触的仿真模型，4 类种子分别用 4 种颜色区分。如图 6 所示。为了后期试验中便于观察种子在排种器中的运动情况，排种器中摩擦盘、挡种板和种盒采用有机玻璃材料制造，型孔轮、种沟侧板和拨片固定架采用 PLA 塑料 3D 打印制造而成。其仿真相关参数[26-27]如表 4 所示。

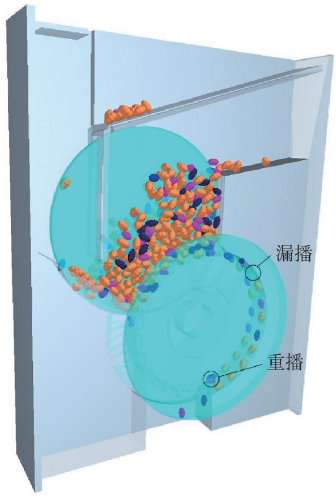



图 6 排种器仿真模型

Fig. 6 Simulation model of seed feeder

**表 4 仿真参数**

**Tab. 4 Simulation parameters**

| 参数 | 小麦 | PLA 塑料 | 有机玻璃 |
|---|---|---|---|
| 泊松比 | 0.4 | 0.4 | 0.35 |
| 剪切模量/Pa | $8.68\times10^{6}$ | $1.02\times10^{8}$ | $1.60\times10^{8}$ |
| 密度/(kg·m$^{-3}$) | 810 | 1 150 | 1 385 |
| 恢复系数(与小麦) | 0.50 | 0.50 | 0.55 |
| 静摩擦因数(与小麦) | 0.58 | 0.55 | 0.61 |
| 滚动摩擦因数(与小麦) | 0.01 | 0.01 | 0.02 |

### 4.2 仿真试验设计

通过受力分析部分得到型孔轮摩擦角 $\gamma$、种沟夹角 $\beta$ 以及摩擦盘的转速 $n_1$ 对漏播率、重播率有重要影响，为了得到最优型孔轮摩擦角 $\gamma$、种沟夹角 $\beta$ 以及摩擦盘转速 $n_1$，利用离散元仿真试验探究其对漏播率以及重播率的影响。根据型孔轮转速设计部分得知型孔轮工作转速为 6 ~ 24 r/min，而转速越大充种效果差异越大。因此试验在型孔轮转速为 24 r/min 情况下进行。

通过预试验得知，当摩擦盘转速大于 36 r/min 时，漏播率变大且变化不明显；而转速低于 16 r/min，种子难以从种姿调整区进入充种区，导致充种区的种子较少，漏播率较高，因此，仿真试验中摩擦盘转速设置为 16、20、24、28、32、36 r/min。仿真结果如图 6 所示。通过摩擦盘转速单因素仿真试验确定摩擦盘转速为 24 r/min，因此，对种沟夹角 $\beta$ 以及型孔轮摩擦角 $\gamma$ 仿真试验在摩擦盘转速为 24 r/min 的情况下进行。

由公式(3)得出种沟夹角 $\beta > 17.7°$，通过预试验得知，当种沟夹角大于 45°时，种沟调整小麦姿态

能力降低，因此，种沟夹角 $\beta$ 的取值范围初步设置为 18°～44°。

型孔轮摩擦角 $\gamma$ 与摩擦盘对种子有调整姿态的作用，通过试验发现如果型孔轮摩擦角 $\gamma$ 小于 10° 时会导致小麦种子下落缓慢使排种器的漏播率较高，摩擦角大于 22°时，小麦种子杂乱排列在充种区，并没有起到修正种子姿态作用，降低充种率。因此摩擦角试验范围为 10°～22°。

### 4.3　仿真结果分析

仿真结果如图 7 所示，漏播率随着摩擦盘转速增加呈先降低后增加趋势。当摩擦盘转速增加给种子提供的摩擦力会增大，会从种姿调整区携带更多的种子进入充种区，随着充种区种子增多，充种概率也随之增大。由图 8 可知，当型孔轮摩擦角不变时，随着种沟夹角增大，漏播率呈先降低后增加趋势。因为当种沟夹角变小时，种子在种沟中卡住的概率越大，当种沟夹角变大时，种子在调整区不能有效地调整小麦姿态，难以充入型孔中导致漏播率增加。型孔轮摩擦角主要在充种区对种子产生影响，型孔轮摩擦角过小充种区种子下落缓慢，导致漏播率增加；型孔轮摩擦角过大不能进一步调整种子姿态，导致种子杂乱无章的排列在充种区内，难以充入型孔中。根据图 8 确定种沟夹角为 30°、型孔轮摩擦角为 14°，摩擦盘转速为 20～28 r/min 合适，为排种器加工制造及台架试验提供理论依据。

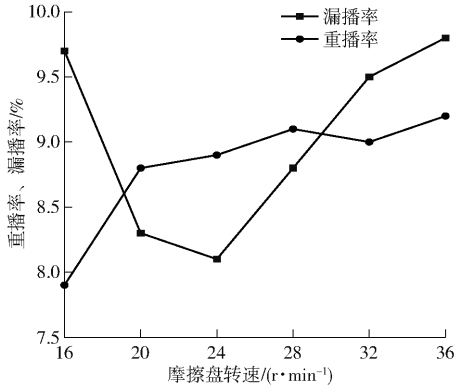



图 7　摩擦盘转速性能曲线

Fig. 7　Speed performance curves of friction disk

## 5　排种器性能台架试验

### 5.1　试验材料

试验小麦种子品种为新冬 60，装置为排种器试验台，主要包括步进电机、排种器、直流电源、电机驱动器、Arduino 控制器、计算机和输送带。排种器的种盒由亚克力板拼接而成，型孔轮、种沟侧板以及拨片固定架由 3D 打印制作；型孔轮和摩擦盘使用步进电机驱动，步进电机型号为 J－5718HB6401，扭矩

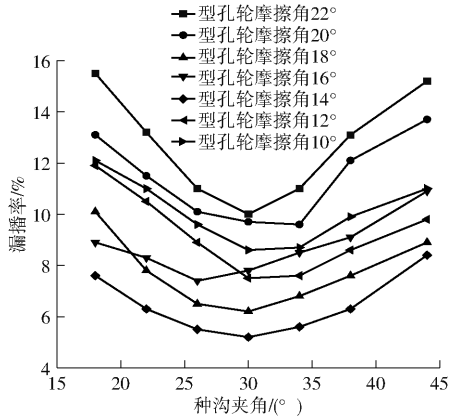



图 8　型孔轮摩擦角和种沟夹角对漏播率的影响曲线

Fig. 8　Influence curves of friction angle and seed groove angle on leakage rate

3.6 N·m，步距角 1.8°，转速 0～300 r/min 可调。使用 DM542 型步进电机驱动器驱动电机，利用 ArduinoUNO 板给驱动提供脉冲信号，从而控制电机转速。输送带全长 3 m，行驶速度可在 0～10 km/h 调节。台架试验装置如图 9 所示。

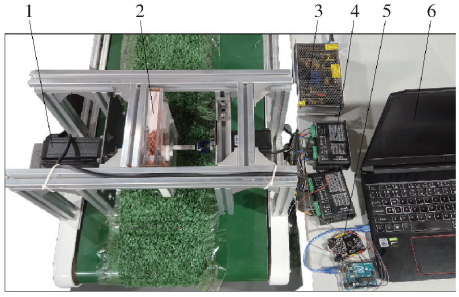



图 9　排种器试验台

Fig. 9　Test bed of seed tester

1. 步进电机　2. 排种器　3. 直流电源　4. 电机驱动器　5. Arduino 控制器　6. 计算机

### 5.2　试验方法

参考 NY/T 1996—2006《小麦精少量播种机作业质量》的测试方法，以充种粒距合格率 $Y_1$、漏播率 $Y_2$ 和重播率 $Y_3$ 作为排种器性能评价指标。根据播种机作业质量标准，种子间粒距在设定值 ±1.5 cm 范围内为合格，各指标计算公式为

$$\begin{cases} Y_1 = \dfrac{D_1}{D_0} \times 100\% \\ Y_2 = \dfrac{B_1}{B_0} \times 100\% \\ Y_3 = \dfrac{C_1}{B_0} \times 100\% \end{cases} \tag{7}$$

式中　$D_1$——合格粒距数

$D_0$——2.5 m 输送带上总粒距数

$B_1$——空穴数

$B_0$——2.5 m 输送带上总穴数

$C_1$——大于 1 粒种子穴数

试验时在输送带上铺设仿真草,防止种子在输送带上滚动。在输送带上连续取 2.5 m 种带作为测试样本,每组试验重复 3 次,取每组试验结果平均值作为试验数据。

### 5.2.1 试验因素设置

根据理论分析以及仿真分析发现型孔轮转速、摩擦盘转速对排种器的性能有重要影响。通过粒距分析得出型孔轮转速应当设置为 6 ~ 24 r/min。仿真分析发现摩擦盘转速为 20 ~ 28 r/min 时,排种器漏播率较低。在实际台架测试中发现,拨片固定架与型孔轮需要一定的间隙才能使种子正常排出,间隙过大会使重播率增加,间隙过小会使型孔轮无法正常转动。通过测试发现,间隙取 0.5 ~ 1.5 倍种子宽度比较合适,因此将拨片间隙作为影响排种器性能的一个重要因素,拨片间隙设置为 1.5 ~ 4.5 mm,根据分析确定出各个因素最佳参数值,因素编码如表 5 所示。

**表 5 因素编码**

**Tab. 5 Factors coding**

| 编码 | 因素 | | |
|---|---|---|---|
| | 型孔轮转速 $X_1$/(r·min$^{-1}$) | 摩擦盘转速 $X_2$/(r·min$^{-1}$) | 拨片间隙 $X_3$/mm |
| -1 | 6 | 20 | 1.5 |
| 0 | 15 | 24 | 3.0 |
| 1 | 24 | 28 | 4.5 |

### 5.2.2 试验设计

利用软件 Design-Expert 8.0.6 对试验进行编码设计,以 Box-Behnken 响应面优化方法进行试验分析,试验结果如表 6 所示。

## 5.3 方差分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行方差分析[28],如表 7 所示,从而确定各个试验因素对指标的影响。

构建粒距合格率 $Y_1$、漏播率 $Y_2$、重播率 $Y_3$ 二次回归模型,均表现极显著($P<0.01$),且失拟不显著($P>0.05$)。将模型中影响不显著的因素剔除,得到二次回归方程为

$$Y_1 = -91.3956 + 1.11273X_1 + 13.4939X_2 + 5.0284X_3 - 0.0534X_1X_2 + 0.0737X_1X_3 - 0.01102X_1^2 - 0.2634X_2^2 - 1.12678X_3^2 \quad (8)$$

$$Y_2 = 47.5458 + 0.5633X_1 - 3.6015X_2 - 0.8606X_3 - 0.01176X_1^2 + 0.0758X_2^2 - 0.1078X_3^2 \quad (9)$$

$$Y_3 = 143.8498 - 1.6761X_1 - 9.8925X_2 - 4.1679X_3 - 0.0537X_1X_2 - 0.0774X_1X_3 - 0.0525X_2X_3 + 0.0228X_1^2 + 0.1875X_2^2 + 1.2456X_3^2 \quad (10)$$

**表 6 正交试验结果**

**Tab. 6 Results of orthogonal test**

| 序号 | 因素 | | | 粒距合格率 $Y_1$/% | 漏播率 $Y_2$/% | 重播率 $Y_3$/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 型孔轮转速 $X_1$/(r·min$^{-1}$) | 摩擦盘转速 $X_2$/(r·min$^{-1}$) | 拨片间隙 $X_3$/mm | | | |
| 1 | 24 | 24 | 4.5 | 83.16 | 6.38 | 10.46 |
| 2 | 15 | 28 | 4.5 | 82.06 | 7.14 | 10.80 |
| 3 | 15 | 24 | 3.0 | 87.25 | 7.43 | 5.32 |
| 4 | 6 | 20 | 3.0 | 81.95 | 5.79 | 12.26 |
| 5 | 15 | 28 | 1.5 | 80.51 | 10.58 | 8.91 |
| 6 | 15 | 24 | 3.0 | 87.24 | 7.66 | 5.10 |
| 7 | 6 | 28 | 3.0 | 87.34 | 6.14 | 6.52 |
| 8 | 15 | 20 | 4.5 | 80.03 | 6.51 | 13.46 |
| 9 | 24 | 20 | 3.0 | 80.87 | 9.64 | 9.49 |
| 10 | 24 | 28 | 3.0 | 78.57 | 9.95 | 11.48 |
| 11 | 15 | 24 | 3.0 | 87.32 | 7.94 | 4.74 |
| 12 | 15 | 24 | 3.0 | 87.01 | 7.56 | 5.43 |
| 13 | 15 | 20 | 1.5 | 79.56 | 10.13 | 10.31 |
| 14 | 24 | 24 | 1.5 | 79.46 | 10.38 | 10.16 |
| 15 | 6 | 24 | 4.5 | 86.27 | 2.37 | 11.36 |
| 16 | 6 | 24 | 1.5 | 86.55 | 6.57 | 6.88 |
| 17 | 15 | 24 | 3.0 | 87.62 | 7.51 | 4.87 |

通过方差分析可得,影响粒距合格率主次因素顺序为:型孔轮转速、摩擦盘转速、拨片间隙,且所有因素都对粒距合格率表现出极其显著影响($P<0.01$)。影响漏播率主次因素顺序为:型孔轮转速、拨片间隙、摩擦盘转速。其中拨片间隙和型孔轮转速表现出极其显著影响($P<0.01$)。摩擦轮转速对漏播率产生显著影响($P<0.05$)。影响重播率主次因素顺序为:拨片间隙、摩擦盘转速、型孔轮转速。所有因素对重播率产生了极其显著影响。

## 5.4 交互作用对指标的影响

通过方差分析可得,各个因素交互作用对漏播率影响并不显著。只有摩擦盘转速和拨片间隙之间的交互作用对粒距合格率影响不显著,各因素交互作用对重播率都表现出显著的影响。

由图 10a 可知,当拨片间隙一定时,粒距合格率随着摩擦盘转速增加,呈先升高后降低趋势,当摩擦盘转速设置为 22 ~ 24 r/min 时,粒距合格率最高。由图 10b 可知,当摩擦盘转速一定时,随着拨片间隙增加,粒距合格率呈先逐步增加后逐步降低趋势。拨片间隙设置在 3 mm 合适。

由图 11a 可知,当拨片间隙一定时,重播率随着摩擦盘转速增加呈先降低后升高趋势,当摩擦盘转速设置在 22 ~ 24 r/min 时,重播率最低。由图 11b 可知,当摩擦盘转速一定时,随着拨片间隙增加,重

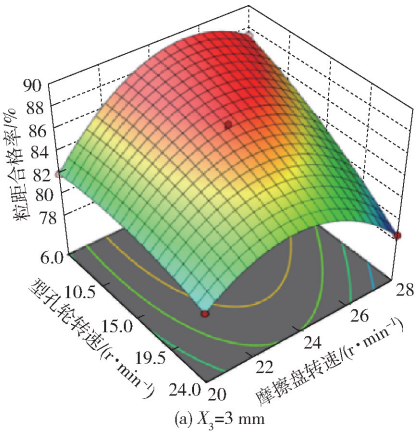
**表 7　方差分析**

**Tab. 7　Analysis of variance**

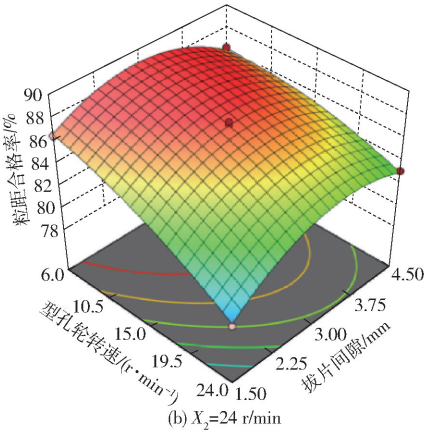
| 评价指标 | 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 粒距合格率 | 模型 | 191.21 | 9 | 21.25 | 327.51 | <0.000 1 ** |
| | $X_1$ | 50.25 | 1 | 50.25 | 774.61 | <0.000 1 ** |
| | $X_2$ | 4.61 | 1 | 4.61 | 71.00 | <0.000 1 ** |
| | $X_3$ | 3.70 | 1 | 3.70 | 57.02 | 0.000 1 ** |
| | $X_1X_2$ | 14.78 | 1 | 14.78 | 227.89 | <0.000 1 ** |
| | $X_1X_3$ | 3.96 | 1 | 3.96 | 61.04 | 0.000 1 ** |
| | $X_2X_3$ | 0.219 6 | 1 | 0.291 6 | 4.49 | 0.071 7 |
| | $X_1^2$ | 3.36 | 1 | 3.36 | 51.73 | 0.000 2 ** |
| | $X_2^2$ | 74.73 | 1 | 74.73 | 1 151.89 | <0.000 1 ** |
| | $X_3^2$ | 27.06 | 1 | 27.06 | 417.18 | <0.000 1 ** |
| | 残差 | 0.454 1 | 7 | 0.064 9 | | |
| | 失拟 | 0.261 8 | 3 | 0.087 3 | 1.82 | 0.284 1 |
| | 误差 | 0.192 3 | 4 | 0.048 1 | | |
| | 总和 | 191.67 | 16 | | | |
| 漏播率 | 模型 | 69.20 | 9 | 7.69 | 156.70 | <0.000 1 ** |
| | $X_1$ | 29.95 | 1 | 29.95 | 610.41 | <0.000 1 ** |
| | $X_2$ | 0.378 5 | 1 | 0.378 5 | 7.71 | 0.027 4 * |
| | $X_3$ | 29.11 | 1 | 29.11 | 593.19 | <0.000 1 ** |
| | $X_1X_2$ | 0.000 4 | 1 | 0.000 4 | 0.008 2 | 0.930 6 |
| | $X_1X_3$ | 0.010 0 | 1 | 0.010 0 | 0.203 8 | 0.665 3 |
| | $X_2X_3$ | 0.008 1 | 1 | 0.008 1 | 0.165 1 | 0.696 7 |
| | $X_1^2$ | 3.82 | 1 | 3.82 | 77.85 | <0.000 1 ** |
| | $X_2^2$ | 6.19 | 1 | 6.19 | 126.15 | <0.000 1 ** |
| | $X_3^2$ | 0.247 6 | 1 | 0.247 6 | 5.05 | 0.059 5 |
| | 残差 | 0.343 5 | 7 | 0.049 1 | | |
| | 失拟 | 0.187 7 | 3 | 0.062 6 | 1.61 | 0.321 3 |
| | 误差 | 0.155 8 | 4 | 0.039 0 | | |
| | 总和 | 69.55 | 16 | | | |
| 重播率 | 模型 | 136.16 | 9 | 15.13 | 290.57 | <0.000 1 ** |
| | $X_1$ | 2.61 | 1 | 2.61 | 50.14 | 0.000 2 ** |
| | $X_2$ | 7.62 | 1 | 7.62 | 146.44 | <0.000 1 ** |
| | $X_3$ | 12.05 | 1 | 12.05 | 231.52 | <0.000 1 ** |
| | $X_1X_2$ | 14.94 | 1 | 14.94 | 286.91 | <0.000 1 ** |
| | $X_1X_3$ | 4.37 | 1 | 4.37 | 83.90 | <0.000 1 ** |
| | $X_2X_3$ | 0.396 9 | 1 | 0.396 9 | 7.62 | 0.028 1 * |
| | $X_1^2$ | 14.34 | 1 | 14.34 | 275.36 | <0.000 1 ** |
| | $X_2^2$ | 37.90 | 1 | 37.90 | 727.96 | <0.000 1 ** |
| | $X_3^2$ | 32.49 | 1 | 32.49 | 623.99 | <0.000 1 ** |
| | 残差 | 0.364 5 | 7 | 0.052 1 | | |
| | 失拟 | 0.025 0 | 3 | 0.008 3 | 0.098 1 | 0.957 0 |
| | 误差 | 0.339 5 | 4 | 0.084 9 | | |
| | 总和 | 136.52 | 16 | | | |

注：* 表示差异显著（$0.01 \leq P < 0.05$），** 表示差异极显著（$P < 0.01$）。

播率呈先逐步降低后逐步增加趋势。拨片间隙设置在 3 mm 左右合适。由图 11c 可知，当型孔轮转速一定时，重播率随着摩擦轮转速、拨片间隙增加，均呈先降低后增加趋势。当摩擦盘转速为 24 r/min、拨片间隙为 3 mm 时，重播率较低。




(a) $X_3$=3 mm




(b) $X_2$=24 r/min

图 10　交互作用对粒距合格率影响的响应曲面

Fig. 10　Response surfaces of interaction effect on pass rate of grain spacing

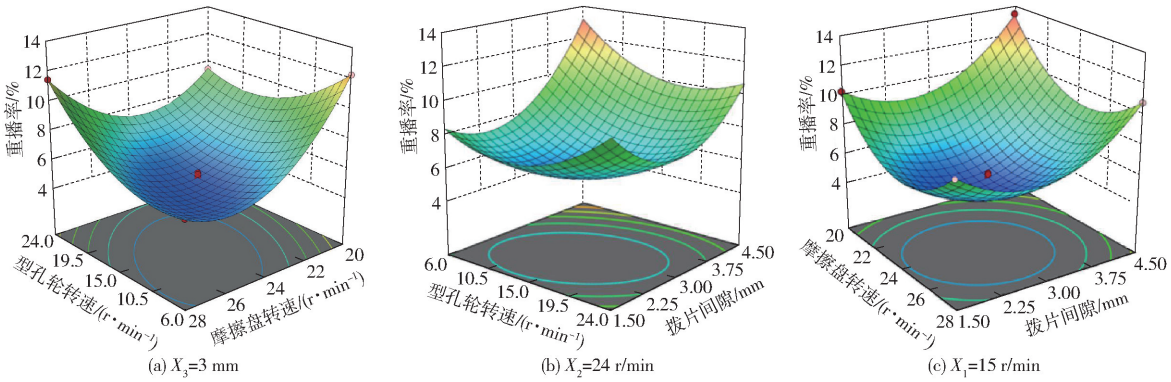
### 5.5　参数优化及验证试验

为了得到最优试验因素组合，通过软件中参数优化模块，设置边界条件，即

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 6\ \text{r/min} \leqslant X_1 \leqslant 24\ \text{r/min} \\ 20\ \text{r/min} \leqslant X_2 \leqslant 28\ \text{r/min} \\ 1.5\ \text{mm} \leqslant X_3 \leqslant 4.5\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

通过参数优化得到，型孔轮最优转速 6 r/min、摩擦盘转速 24 r/min、拨片间隙 3.1 mm。此时粒距合格率为 89.30%、漏播率为 4.77%、重播率为 4.94%。

为了验证优化结果的可靠程度，在型孔轮转速为 6 r/min、摩擦盘转速为 24 r/min、拨片间隙为 3.1 mm 的情况下进行 6 次重复试验，试验结果如表 8 所示。取平均值后得到粒距合格率为 89.13%、漏播率为 4.83%、重播率为 6.04%。试验结果与预测值差异较小，且符合 NY/T 1996—2006《小麦精少量播种机作业质量》作业标准。




(a) $X_3$=3 mm (b) $X_2$=24 r/min (c) $X_1$=15 r/min

图 11 交互作用对重播率影响的响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of interaction effect on replay rate

**表 8 验证试验结果**

**Tab. 8 Verification test results** %

| 试验序号 | 粒距合格率 | 漏播率 | 重播率 |
|---|---|---|---|
| 1 | 88.1 | 5.2 | 6.7 |
| 2 | 87.4 | 5.3 | 7.3 |
| 3 | 90.5 | 4.1 | 5.4 |
| 4 | 89.7 | 5.4 | 4.9 |
| 5 | 88.3 | 4.9 | 6.8 |
| 6 | 90.8 | 4.1 | 5.1 |
| 均值 | 89.13 | 4.83 | 6.04 |

## 6 结论

(1)设计了一种带有摩擦盘的排种器,通过种沟和摩擦盘转动调整小麦充种姿态,使得小麦进入型孔前种子长轴与种沟平行,设计了 V 形型孔轮,通过型孔轮的摩擦面与摩擦盘作用,使小麦长轴与型孔轮长轴平行,提高了排种器单粒充种能力。

(2)通过对单粒种子的充种过程进行分析,构建了排种过程中小麦种子受力模型,确定排种器关键结构参数范围,通过 EDEM 仿真试验确定当种沟夹角为 30°、型孔轮摩擦角为 14°,摩擦盘转速为 20 ~ 28 r/min 时,排种器漏播率较低。

(3)通过三因素三水平正交回归试验,得到排种器最佳参数组合为型孔轮转速 6 r/min、摩擦盘转速 24 r/min、拨片间隙 3.1 mm,并对该试验组合进行验证,得到粒距合格率为 89.13%、漏播率为 4.83%、重播率为 6.04%。试验结果与预测值差异约 1 个百分点,符合 NY/T 996—2006《小麦精少量播种机作业质量》作业标准,研究结果可为小区小麦精密排种器研究提供技术支撑。

## 参 考 文 献


[1] 徐冬. 小麦精密播种机械的研究与应用[J]. 农业科技与装备,2015(6):79 - 80.
XU Dong. Research and application of wheat precision seeding machinery[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment,2015(6):79 - 80. (in Chinese)

[2] 张婧,曲继鹏,万洪深. 2 个小麦种质材料育种相关性状的初步分析[J]. 中国农学通报,2023,39(35):1 - 8.
ZHANG Jing, QU Jipeng, WAN Hongshen. Breeding-related traits of two wheat germplasms: preliminary analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023,39(35):1 - 8. (in Chinese)

[3] ZHAO P, LIU Z, SHI X, et al. Modern wheat breeding selection synergistically improves above-and below-ground traits[J]. bioRxiv: 2023.10. 27.564104, 2023.

[4] 曾明昊,吕振豪,郑明远,等. 新疆伊犁地区小麦条锈菌群体遗传结构分析[J]. 麦类作物学报,2024,44(1):127 - 133.
ZENG Minghao, LÜ Zhenhao, ZHENG Mingyuan, et al. Analysis of population genetic structure of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici in Yili Prefecture,Xinjiang[J]. Journal of Triticum Crop Sciences,2024,44(1):127 - 133. (in Chinese)

[5] 王金武,唐汉,周文琪,等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(9):68 - 76.
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pick up finger precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):68 - 76. (in Chinese)

[6] SATTI Y H, LIAO Q. Simulation of negative pressure behavior using different shapes and positions of pressure inlet and seed hole diameters using ANSYS - CFX to optimize the structure of a pneumatic metering device designed for wheat[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2014, 16(4): 122 - 134.

[7] LEI X, LIAO Y,LIAO Q. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29 - 39.

[8] LEI X,LIAO Y, ZHANG Q S, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 98 - 109.

[9] 刘俊孝,王庆杰,李洪文,等. 针孔管式小麦精准点播装置设计与吸种性能研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 10 - 18.
LIU Junxiao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and seed absorption performance of pinhole tube precision on-demand sowing device for wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 10 - 18. (in Chinese)

[10] 张力友. 基于 PLC 控制的小麦小区试验点播机的设计[D]. 泰安:山东农业大学, 2012.
ZHANG Liyou. Design on wheat hill-drop planter baseed on PLC controlled used for experimental plot[D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2012. (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] 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)
[13] 朱承天,刘彩玲,李方林,等. 分体组合振动式超级稻精量播种匀种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 27 - 36.
ZHU Chengtian, LIU Cailing, LI Fanglin, et al. Simulation and experiment of piezoelectric vibration super rice precision seeding and unifying device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (12): 27 - 36. (in Chinese)
[14] 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)
[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] 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. Design and experiment of combined pneumatic centrifugal precision seeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 35 - 45. (in Chinese)
[17] 贺可涛. 减震型气吸小麦精量排种器的设计与试验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2023.
HE Ketao. Design and experimental study of a shock absorbing air suction wheat precision seeding device[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2023. (in Chinese)
[18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[19] 衣淑娟,陈涛,李衣菲,等. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 83 - 94.
YI Shujuan, CHEN Tao, LI Yifei, et al. Design and test of millet hill-drop seed-metering device with combination of positive-negative pressure and hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 83 - 94. (in Chinese)
[20] 吕玉春. 搅种梯形型孔轮式小麦排种器设计与试验[D]. 淄博:山东理工大学, 2023.
LÜ Yuchun. Design and experiment of wheat seed-metering device with stirred trapezoidal hole wheel[D]. Zibo:Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)
[21] 陶珍,董慧峰,许洋洋,等. 型孔可变凸轮式大豆精量排种器的设计与试验[J]. 江苏农业科学,2024,52(7):192 - 197.
TAO Zhen, DONG Huifeng, XU Yangyang, et al. Design and test of shaped hole variable cam type soybean precision seeder [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2024,52(7):192 - 197. (in Chinese)
[22] 冯锐,雷雪梅,李林鑫,等. 勺轮式蚕豆排种器设计与排种性能研究[J]. 中国农机化学报,2024,45(7):15 - 21.
FENG Rui, LEI Xuemei, LI Linxin, et al. Research on design and performance of spoon-wheel type broad bean seed metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024,45(7): 15 - 21. (in Chinese)
[23] 蔡东明,邵会侠,雷和涛,等. 我国自走式数控单粒播种机的发展状况[J]. 农业机械,2020(2):104 - 106.
[24] 孙延新,王明旭,张超. 小麦与输送机皮带接触参数的试验标定[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42 (6): 113 - 120.
SUN Yanxin, WANG Mingxu, ZHANG Chao. Experimental calibration of contact parameters between wheat and conveyor belt [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 113 - 120. (in Chinese)
[25] 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247 - 253.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247 - 253. (in Chinese)
[26] TURNER A P, MONTOROSS M D, MCNEILL S G, et al. Modeling the compressibility behavior of hard red wheat varieties [J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(3): 1029 - 1038.
[27] 刘凡一,张舰,陈军. 小麦籽粒振动筛分黏弹塑性接触模型构建及其参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 37 - 43.
LIU Fanyi, ZHANG Jian, CHEN Jun. Construction of visco-elasto-plasticity contact model of vibratory screening and its parameters calibration for wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 37 - 43. (in Chinese)
[28] 史嵩,周纪磊,刘虎,等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):61 - 70.
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):61 - 70. (in Chinese)