doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.009

# 油麦兼用气力辅助导种集排器设计与试验

谭　钰[1]　张　翼[1]　金　颖[1]　廖庆喜[1,2]　李文成[1,2]　廖宜涛[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**: 针对油菜和小麦播期毗邻、播种工序相似,但种子形状、大小和播种量差异大,开发油麦兼用播种机缺乏适用兼用排种装置的问题,基于油菜和小麦的机械物理特性和播种农艺要求,设计了一种型孔轮式机械定量供种与气力辅助导种输送相结合的油麦兼用气力辅助导种集排器。构建了充种、携种、投种和导种环节中种子颗粒群的力学模型,确立了集排器最优结构参数;以排种器型孔前倾角、深度为试验因素,以各行平均排种量和各行排量一致性变异系数为试验指标开展性能验证,进行排种器性能两因素三水平正交试验。结果表明,油菜和小麦型孔前倾角分别为 70°和 90°、深度分别为 2 mm 和 5 mm 时,各行排量一致性变异系数平均值分别为 1.67% 和 1.48%,排种性能较优。DEM - CFD 耦合仿真试验和气力辅助导种装置台架试验结果表明,当入口气流速度为 8 m/s 时,油菜和小麦各行排量一致性变异系数分别降至 17.41% 和 9.14%,表明气流显著提高了小麦排种均匀性。田间试验结果表明,播种后油菜、小麦各行间出苗均匀性变异系数分别为 13.52%、9.65%,满足田间播种要求。

**关键词**: 油菜; 小麦; 兼用型; 气力辅助导种; DEM - CFD
**中图分类号**: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)09-0105-12　　**OSID**:

# Design and Experiment of Peumatic-assisted Seed Collector for Rapeseed and Wheat

TAN Yu[1]　ZHANG Yi[1]　JIN Ying[1]　LIAO Qingxi[1,2]　LI Wencheng[1,2]　LIAO Yitao[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**: The aim was to address the issue that, although rapeseed and wheat have adjacent sowing periods and similar sowing processes, their seed shapes, sizes and sowing quantities differ greatly. There was also a lack of suitable seed discharging devices for the development of oil-wheat dual-use seeders. An oil-wheat dual-use pneumatic-assisted seed-guiding collector combining the mechanical seed supply of perforated wheel machinery with pneumatic seed transport was designed based on the mechanical and physical characteristics, as well as the sowing agronomic requirements, of rapeseed and wheat. A mechanical model of the seed particle cluster during filling, carrying, casting and guiding was constructed and the optimal structural parameters of the seed collector were established. The front inclination angle and hole depth of the collector were used as test factors and the average seed discharge and consistency coefficient of variation in each row were used as test indexes to validate the performance. Two-factor, three-level orthogonal tests were performed to verify the performance of the seed collector. The results showed that for rapeseed and wheat, the average value of the coefficient of variation of row-by-row uniformity was 1.67% and 1.48%, respectively, when the front inclination angle of the hole was 70° and 90°, and the depth was 2 mm and 5 mm, respectively. The row-by-row performance was therefore better. Results from the DEM - CFD coupled simulation test and bench test of the pneumatic-assisted seed-guiding device indicated that, with an inlet airflow velocity of 8 m/s, the coefficient of variation for row-by-row uniformity was decreased to 17.41% and 9.14%. These decreases indicated that

收稿日期: 2025 - 04 - 15　修回日期: 2025 - 06 - 13
**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600503)、湖北省农机装备补短板项目(202310)、华中农业大学"要术开物计划"培育项目(2662025GXPY004)和国家现代油菜产业技术体系专项(CARS - 12 - 27)
**作者简介**: 谭钰(1997—),男,博士生,主要从事农机装备智能化研究, E-mail: TanYu19970530@163.com
**通信作者**: 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

airflow significantly improved uniformity. The field test showed that, after sowing, the coefficients of variation of seedling emergence uniformity between rows of rapeseed and wheat were 13.52% and 9.65%, respectively, meeting the requirements for field sowing.

**Key words**: rapeseed; wheat; multifunctional; peumatic-assisted seed-guiding; DEM – CFD

## 0 引言

油菜和小麦是我国长江流域的重要粮油作物，两者播期毗邻、机械化播种工序相似，开发油麦兼用播种机能有效降低机械化生产投入成本、提高机具利用率[1-3]。油麦兼用播种机核心装置是排种器，但由于油菜和小麦种子物理机械特性差异大，油菜种子球形度高达 0.95，粒径 1.5 ~ 2.5 mm，流动性好，千粒质量 3.5 ~ 6.5 g，播量 4.5 ~ 6.0 kg/hm$^2$；而小麦种子呈非规整的椭球形，表面粗糙、流动性差，千粒质量 25 ~ 50 g，播量 150 ~ 225 kg/hm$^2$，播量较大[4]，导致单一排种系统难以同时满足两种作物的播种需求。

随着现代农业在轮作、套种和多功能作业场景中对作物种植需求的日益复杂，兼用型排种器因其利用率高、适用性广等特点，已成为当前排种器发展趋势[5-7]。机械式排种器，如外槽轮式和窝眼轮式，结构简单，制造成本低。外槽轮式通过调节槽腔大小实现不同作物条播；窝眼轮式通过更换排种轮实现中小籽粒作物的单粒精播或多粒穴播。然而，这类排种器依赖重力充种和机械清种，易导致种子挤压破碎、重播和漏播[8]，为解决这些问题，邢鹤琛等[9]设计一种无需清种与护种装置的油麦兼用斜锥型孔轮式集排器，提出一种油菜双圈、小麦三圈型孔交错排布以及斜锥形型孔结构。气吸式排种技术通过负压吸附实现精确排种，对不规则种子适应性强，但对小籽粒单粒精播效果不佳。为此，学者采用正负气压组合原理，解决了小籽粒精密播种问题[10]。该技术可通过更换排种盘实现多作物兼用，但无法满足如小麦等作物的大播量需求。气送式排种技术因对种子外形尺寸适应性强、作业效率高，被广泛应用于兼用播种领域[11-13]。雷小龙等[13-15]研究了油麦兼用型气送式集排器，提出倾斜锥柱状型孔结构，优化了供料装置和分配器，并通过 DEM – CFD 方法分析了气流场和种子运动特性[16-17]。施彬彬等[4]设计了一种立槽式高通量油麦兼用供种装置，解决了大播量工况下供种量不足问题。然而，气送式排种器存在结构复杂、成本高、气压波动导致播量不一致等问题。

针对上述问题，基于油菜、小麦机械物理特性差异大的兼用难点以及播种农艺要求，结合现有机械式及气力式排种器兼用结构设计及排种原理研究，本文设计一种型孔轮式机械定量供种和气力辅助导种输送的油麦兼用气力辅助导种集排器。通过力学分析、仿真试验明确集排器最优工作参数范围，通过台架试验确定集排器最优工作参数，并结合田间试验验证集排器排种性能。

## 1 总体结构与工作原理

### 1.1 总体结构

油麦兼用气力辅助导种集排器主要包括集排器外壳组件、种箱组件、充种仓、种层调节装置、型孔轮组件、气力辅助导种装置等，如图 1a 所示，该集排器由 12 V 直流电机驱动，通过更换型孔轮组件（图 1b、1c）以实现油菜和小麦的兼用排种。其主要技术参数如表 1 所示。

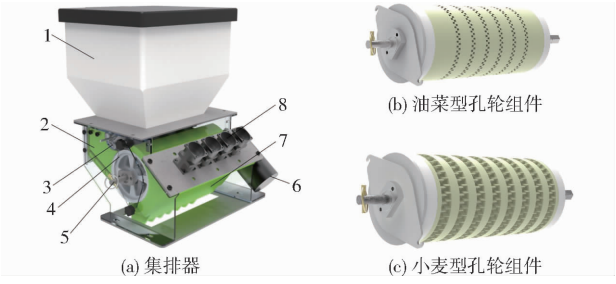



图 1 集排器结构示意图

Fig. 1 Schematics of collector-excluder structure

1. 种箱 2. 充种仓 3. 种层调节装置 4. 型孔轮 5. 六方通轴 6. 直流电机 7. 气力辅助导种装置 8. 风机组

**表 1 气力辅助导种集排器主要技术参数**

**Tab. 1 Main technical parameters of peumatic-assisted seed collector**

| 参数 | 数值/形式 |
|---|---|
| 外形尺寸（长 × 宽 × 高）/（mm × mm × mm） | 390 × 310 × 1 440 |
| 播种作物 | 油菜、小麦 |
| 播种行数 | 6 ~ 8 |
| 播种形式 | 条播 |
| 作业幅宽/mm | 2 000 ~ 2 300 |
| 行距/mm | 200 ~ 250 |
| 排种轮转速/（r·min$^{-1}$） | 10 ~ 30 |
| 播量/（kg·hm$^{-2}$） | 3 ~ 6（油菜）<br>120 ~ 225（小麦） |

### 1.2 工作原理

播种前，调整种层调节板至适当角度，并在种箱内充入足量种子。排种器工作时，排种轴带动型孔轮单体同步转动，同时风机向气室输送气流至混种区。在充种区域，种子受型孔轮摩擦力影响开始移

动，随后在重力和摩擦力作用下进入型孔，并随型孔轮转动经过携种区至投种区。种子在重力作用下脱离型孔，沿导槽管道下落，被气流裹挟形成气固两相流，经混种管道流入导种管道后运移至种床，完成排种过程。风机气流能避免种子在导种管中堆积。

## 2　关键部件结构设计与排种过程分析

### 2.1　关键部件结构设计与参数

#### 2.1.1　型孔结构设计与参数

型孔是直接影响充种效果的核心结构，基于前人研究基础[18]，提出一种平底勺式型孔，从径向截面观察是由 3 段曲线、直线平滑连接而成，型孔截面结构如图 2 所示，以点 $O$ 为圆心建立平面直角坐标系。

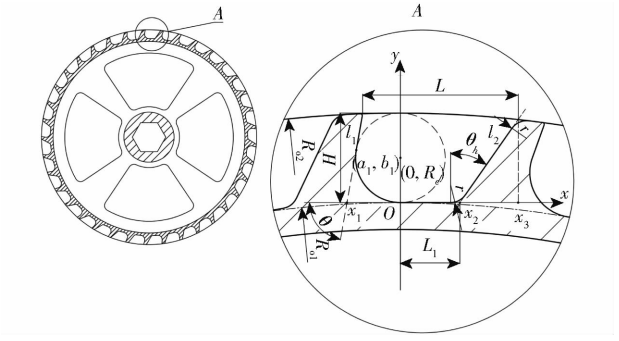



图 2　型孔截面结构放大图

Fig. 2　Amplification diagram of hole sectional structure

$Ox_1$ 曲线段满足

$$\begin{cases} x_1^2 + (y_1 + R_{o1})^2 = R_{o1}^2 \\ x_2^2 + (y_2 + R_{o1})^2 = R_{o2}^2 \\ x^2 + (y - R_c)^2 = 4R_c^2 \\ R_c = R_{o2} - R_{o1} \\ R_{o2} = \dfrac{1}{2}\phi \end{cases} \tag{1}$$

式中　$R_{o1}$——构造型孔小圆半径，mm

$R_{o2}$——构造型孔大圆半径，mm

$R_c$——$Ox_1$ 曲线段半径，mm

$\phi$——型孔轮直径，mm

其直径由 2 个圆直径决定，与型孔深度 $H$ 相等，直线与曲线切点为 $(a_1, b_1)$，故直线 $l_1$ 满足

$$y - b_1 = (x - a_1)\tan\theta \tag{2}$$

式中　$a_1$——型孔直线段与曲线段交点横坐标，mm

$b_1$——型孔直线段与曲线段交点纵坐标，mm

$\theta$——型孔前倾角，(°)

该段结构设计目的为增大充种角，提升种子充种效果，并且整体呈后倾趋势以利于稳定携种，后文将开展理论分析探究其影响规律；$Ox_2$ 段长度 $L_1$ 即为下底宽度，其会影响型孔总宽度；$x_2x_3$ 段直线 $l_2$ 满足

$$y = (x_2 - x)\tan\theta_h \tag{3}$$

式中　$\theta_h$——型孔后倾角，(°)

增设后倾角有利于种子投种，防止种子投种不及时导致堵塞型孔；两线段顶端之间的距离即为型孔总宽度 $L$，后文将根据平底勺式型孔形状进行型孔尺寸设计。

根据实际测量结果，综合考虑油菜和小麦种子三轴尺寸以及其“平躺”和“侧卧”2 种充种姿态，设定油菜、小麦单个型孔充种粒数分别为 1 ~ 2 粒和 2 ~ 3 粒，在设计型孔参数时，以油菜 2 粒、小麦 3 粒的充种粒数为依据。对于小麦，其充种姿态主要以“平躺”为主，故小麦单个型孔充种尺寸以径向平躺 2 粒、轴向侧卧 1 粒为基准；而油菜单个型孔充种尺寸则以径向排列 2 粒为基准。在此基础上，确定型孔长度、宽度和高度。参照《农业机械手册》相关公式，型孔长度 $L$、宽度 $W$、深度 $H$ 应满足

$$\begin{cases} L_{\max} + \Delta L \leqslant L \leqslant L_{\max} \\ W_{\max} + \Delta W \leqslant W \leqslant W_{\max} \\ 2.4H_{\min} \leqslant H \leqslant 0.5H_{\max} \end{cases} \tag{4}$$

式中　$L_{\max}$——种子最大长度，mm

$W_{\max}$——种子最大宽度，mm

$H_{\max}$——种子最大厚度，mm

$H_{\min}$——种子最小厚度，mm

$\Delta L$——长度调节量，取 1.5 mm

$\Delta W$——宽度调节量，取 1.3 mm

根据式(4)计算得，小麦型孔长度 $L$ 为 7.8 ~ 9.3 mm，型孔宽度 $W$ 为 6.62 ~ 7.92 mm，型孔深度 $H$ 为 1.66 ~ 7.73 mm；油菜型孔长度 $L$ 为 2.56 ~ 4.06 mm，型孔宽度 $W$ 为 2.07 ~ 4.14 mm，型孔深度 $H$ 为 1.01 ~ 4.82 mm。

#### 2.1.2　种层调节装置设计与参数

种层调节装置可防止拖带、降低漏充，并适应不同种子的种层高度需求，其结构示意图如图 3 所示。图中 $l$ 为种层调节板长度、$l_y$ 为种层调节板竖直高度、$l_x$ 为种层调节板水平间距、$\theta_t$ 为种层调节板调节角度。为确保种子顺利充入型孔，需保持适当的种层高度以保证良好的充种性能。若种层高度过高，未充入型孔的种子会落在型孔轮表面并被拖带至投种区；若种层高度过低，则会增加漏充率，无法满足播量要求。为使调节板正常转动并保持与集排器外壳间的间隙，种层调节板宽度设定为 274 mm。种层调节板到型孔轮距离和到充种仓底部距离均会影响初始充种高度，为探究种层调节板对充种性能的影响，后续将通过仿真试验来确定调节板结构参数。

#### 2.1.3　气力辅助导种装置设计

气力辅助导种装置以气流作为附加动力，在输种过程裹挟种子从导种管内顺利排出，减少种子与

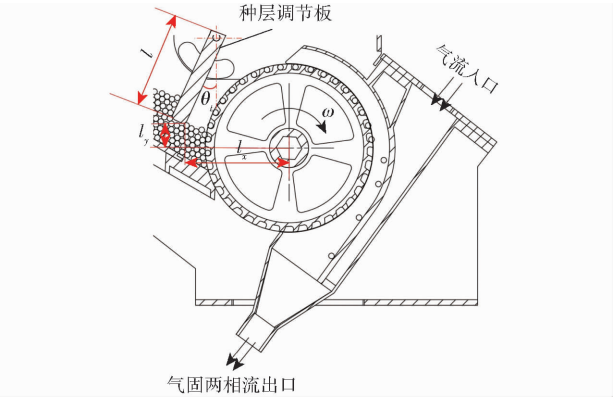



图 3 种层调节板结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of seed layer regulating plate

管壁碰撞导致运输速度降低,气流在该过程中与种子保持同向运动,对种子起到一定的冲击作用,有效避免种子滞留在管道内,同时提高排种均匀性。气力辅助导种装置整体结构示意图如图 4a 所示,侧面视图和 $A-A$ 剖视图如图 4b、4c 所示,主要由圆弧导槽、气室、混种管道和出口管道组成。

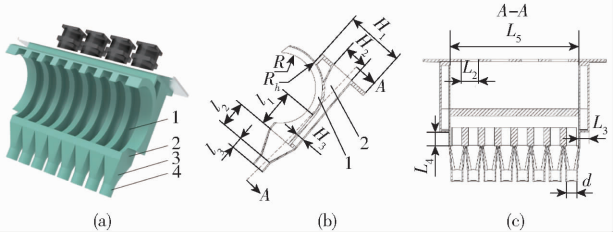



图 4 气力辅助导种装置结构图

Fig. 4 Structural diagrams of pneumatic-assisted seed guiding device

1. 圆弧导槽 2. 气室 3. 混种管道 4. 出口管道

圆弧导槽由圆弧段和直线段构成,两者相切且切线方向与种子下落方向一致,以减少碰撞阻力。导槽凹侧壁与型孔轮曲面吻合,种子存放区开放形成下落轨道,宽度大于种子最大尺寸 $R_h$(74 mm),圆心角分别为 190°、130°,直线段长度 $l_1$ 为 60 mm。气室为上宽下窄结构,气室入口长度 $L_5$ 为 236 mm,气室入口外侧高度 $H_1$ 为 100 mm,气室入口高度 $H_2$ 为 41 mm,气室内侧最低高度 $H_3$ 为 9 mm,以增强气流、降低能耗。导槽出口与气室出口同高,连接渐缩混种管长度 $l_2$ 为 45 mm。出口管内径 $d$ 为 18 mm,壁厚为 2 mm,气室外侧的两端宽度 $l_3$ 为 20 mm。风机固定板设 4 个进风口,单宽 $L_2$ 为 32 mm,气室两端扩展宽度 $L_3$ 为 17 mm 以适配集排器宽度 $L_4$(25 mm)。整体设计采用 3D 打印,集成 8 个相同管道对应型孔轮。

## 2.2 主要排种过程分析

### 2.2.1 充种环节

充种过程中种子受到自身重力和型孔扰动作用滚落到型孔附近,在型孔轮转动后,一部分种子由种群挤压力和摩擦力被带入型孔内,充入型孔的种子通过型孔轮转动运移至投种区被排出。以型孔轮轴心到种子质心的连线方向为横坐标轴、垂直于该连线且指向种子运动方向为纵坐标轴建立坐标系,单个型孔充种时种子力学分析如图 5 所示。

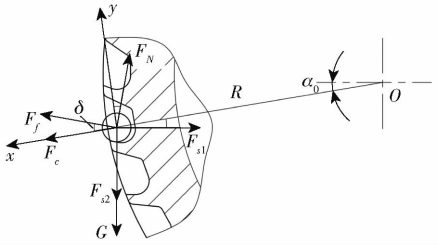



图 5 充种过程理论分析

Fig. 5 Theoretical analysis of seed group in seed filling process

根据充种过程种群受力情况建立平衡方程

$$\begin{cases} F_f\cos\delta+(F_{s2}+G)\sin\alpha_0-F_N\sin\delta-F_{s1}\cos\alpha_0+F_C=0 \\ F_f\sin\delta+F_N\cos\delta-F_{s1}\sin\alpha_0-(F_{s2}+G)\cos\alpha_0=0 \\ F_f=\mu F_N \\ F_C=m\omega^2R \\ G=mg \\ F_{s1}=S\dfrac{\rho R_{hs}}{f_s}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{Kf_sH_s}{R_h}}\right) \\ F_{s2}=S\dfrac{\rho R_{hs}}{Kf_s}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{Kf_sH_s}{R_h}}\right) \\ K=\tan^2\left(45°-\dfrac{\varphi_i}{2}\right) \end{cases} \tag{5}$$

式中 $\alpha_0$——初始充种角,(°)

$\delta$——型孔入口壁面切线角,(°)

$F_{s1}$——充入型孔种子受种群水平侧压力,N

$F_{s2}$——充入型孔种子受种群竖直压力,N

$F_N$——型孔入口壁面对种子支持力,N

$F_f$——型孔入口壁面与种子间摩擦力,N

$F_C$——惯性离心力,N

$R$——型孔轮半径,取 60 mm

$\mu$——种子与型孔间摩擦因数

$m$——种子质量,g

$G$——重力,N

$g$——重力加速度,取 9.81 m/s$^2$

$\omega$——型孔轮角速度,rad/s

$S$——充入型孔种子截面积,m$^2$

$K$——侧压系数

$H_s$——种面高度,mm

$R_{hs}$——液力半径,mm

$f_s$——种子与充种区静态滑动摩擦因数

$\rho$——物料重度，N/m$^3$

$\varphi_i$——物料内摩擦角，(°)

由式(5)可得

$$\begin{cases}(1+\mu^2)F_N^2+2F_C(\mu\cos\delta-\sin\delta)F_N+F_C^2-KF_{s2}^2-\\ \quad(F_{s2}+G)^2=0\\ \alpha_0=\arcsin\dfrac{F_N(\cos\delta+\mu\sin\delta)}{KF_{s2}}\end{cases}\tag{6}$$

由式(6)可知，初始充种角与充入型孔种子受种群竖直压力 $F_{s2}$、型孔入口壁面对种子的支持力 $F_N$、型孔入口壁面切线角 $\delta$、物料内摩擦角 $\varphi_i$、角速度 $\omega$ 和型孔轮半径 $R$ 有关。当其他因素一定时，初始充种角主要受型孔入口壁面切线角 $\delta$ 的影响，增大前倾角 $\theta$ 能增大型孔入口壁面切线角 $\delta$，有助于增加充种时间，提升充种性能。

### 2.2.2　携种环节

当种子顺利充入型孔后，型孔轮在外部驱动下继续转动，开始进入携种过程，此时充入型孔的种子从型孔入口壁面滑落至型孔底部平面处，其余种子均会落回充种仓，已在型孔内的种子被型孔携至携种区并维持平稳状态，携种过程分析如图 6 所示。

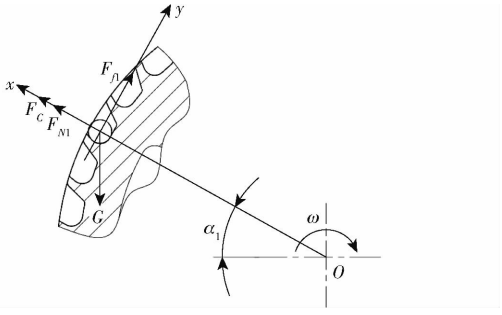



图 6　携种过程理论分析

Fig. 6　Theoretical analysis of seed group in seed moving process

根据携种过程种子受力建立平衡方程

$$\begin{cases}F_C+F_{N1}-G\sin\alpha_1=0\\ F_{f1}-G\cos\alpha_1=0\\ F_{f1}=\mu F_{N1}\end{cases}\tag{7}$$

式中　$F_{N1}$——携种过程型孔对种子支持力，N

$F_{f1}$——携种过程型孔与种子间摩擦力，N

$\alpha_1$——种子质心到型孔轮轴心连线与水平方向夹角，(°)

由式(7)可得

$$\omega=\sqrt{\frac{g\sin\alpha_1}{R}-\frac{g\cos\alpha_1}{\mu R}}\tag{8}$$

由式(8)可知，型孔轮转速不断加快，其角速度增大，到达一定值时处于临界状态，此时，种子只受重力和离心力作用，若转速超过相应临界值，种子会在未到达投种区就提前脱离型孔飞向其他非排种区域或落回充种仓。为使种子在型孔内平稳运移至投种区，型孔轮稳定携种极限角速度 $\omega_{1\max}$ 应为

$$\omega_{1\max}\leqslant\sqrt{\frac{g\sin\alpha}{R}}\tag{9}$$

### 2.2.3　投种环节

种子顺利度过携种过程后，到达投种区脱离型孔内壁落入圆弧导槽，沿圆弧导槽下落，均依靠种子自身重力进行，投种过程顺利完成。投种过程分析如图 7 所示。

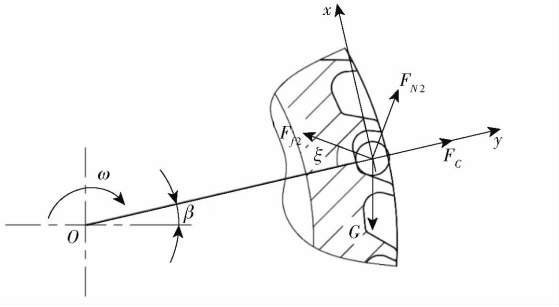



图 7　投种过程理论分析

Fig. 7　Theoretical analysis of seed group in seed falling process

种子被稳定运移至投种区，在种子即将脱离型孔壁面的瞬时临界投种状态时，建立受力平衡方程

$$\begin{cases}F_{N2}\cos\xi+F_{f2}\sin\xi-G\cos\beta=0\\ F_C+F_{f2}\sin\xi-F_{f2}\cos\xi-G\sin\beta=0\\ F_{f2}=\mu F_{N2}\\ F_C=m\omega^2R\end{cases}\tag{10}$$

式中　$F_{N2}$——型孔出口壁面对种子的支持力，N

$F_{f2}$——型孔出口壁面与种子间摩擦力，N

$\beta$——种子质心到型孔轮中心连线与水平面夹角，即投种角，(°)

$\xi$——型孔出口壁面与 $y$ 轴夹角，即型孔倾斜角，(°)

由式(10)得

$$\omega=\sqrt{\frac{\sin(\beta-\xi)+\mu\cos(\beta-\xi)}{R(\cos\xi+\mu\sin\xi)}g}\tag{11}$$

且

$$\omega=2\pi n_0\tag{12}$$

式中　$n_0$——型孔轮排种轴转速，r/min

由式(11)可知，角速度 $\omega$ 受型孔投种角 $\beta$、倾斜角 $\xi$ 等因素影响，在倾斜角 $\xi$ 不变的情况下，投种角 $\beta$ 与角速度 $\omega$ 保持正相关，投种总时间增加。由式(12)可知，角速度 $\omega$ 与转速 $n_0$ 呈正比例函数关系，因而需通过调节转速 $n_0$ 控制投种角 $\beta$，若投种角 $\beta$ 过小，种子无法及时投种，进而堵塞型孔，影响下一次充种；若投种角 $\beta$ 过大，型孔结构设计无法成

立,投种效果大幅减弱,故转速 $n_0$需适当增大,且在一定范围内。

由充种过程、携种过程和投种过程力学分析可知,型孔前倾角 $\theta$、型孔深度 $H$、排种轴转速 $n_0$为影响排种性能的重要因素,后文将通过仿真和台架试验探究各因素影响规律并确定较优值。

### 2.2.4 导种环节

气力辅助导种装置出口管道下接导种管,气固两相流从出口流出后无缝衔接进入导种管,对输种过程导种管内的种子进行理论分析,以种子速度方向和垂直于速度方向为原点建立坐标系,构建如图 8 所示受力图。

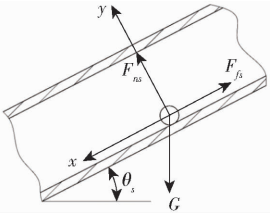



图 8 导种过程理论分析

Fig. 8 Theoretical analysis of seed group in seed conveying process

构建受力平衡方程

$$\begin{cases} F_{ns} - G\cos\theta_s = 0 \\ G\sin\theta_s - F_{fs} = 0 \\ F_{fs} = \mu_s F_{ns} \\ G = mg \end{cases} \tag{13}$$

式中 $F_{ns}$——输种过程种子所受支持力,N

$F_{fs}$——输种过程种子所受摩擦力,N

$\mu_s$——种子与导种管间摩擦因数

$\theta_s$——导种管与水平面夹角,(°)

为保证种子在导种管内顺畅运行,结合式(13)可得 $\theta_s > \arctan\mu_s$,油菜、小麦种子与导种管的滑动摩擦因数分别为 0.01、0.67,故导种管与水平面夹角 $\theta_s$应大于 34°。

输种过程中,种子受气流裹挟同步运动,输送效果主要取决于输送气流速度与风量,而输送气流速度与气室入口气流速度有关,入口气流速度应小于输送气流速度,经过渐缩段结构的加速作用,以满足输送气流速度要求,达到稳定运输的效果,输送气流速度与风机流量满足

$$\begin{cases} v_g < 1.5v_0 \\ Q_g = \dfrac{N\pi d_1^2 v_g}{4} \end{cases} \tag{14}$$

式中 $v_g$——输送气流速度,m/s

$v_0$——种子悬浮速度,m/s

$Q_g$——风机流量,$m^3$/h

$d_1$——导种管内径,取 22 mm

$N$——气力输送气流速度经验系数

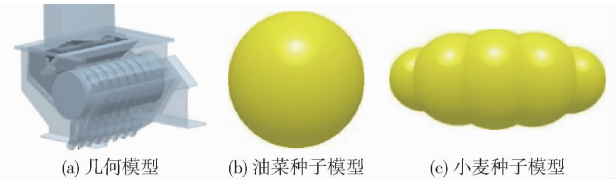
根据文献[16],油菜、小麦种子悬浮速度分别为 6.90、9.16 m/s,代入式(14)计算可得输送气流速度不超过 10.50 m/s,对应风机流量为 150.42 $m^3$/h。考虑到本装置中气流仅作辅助且阻力小,入口风速小于等于 10 m/s 即可,下文将依此开展气流场虚拟仿真试验。

## 3 仿真设计与试验

采用 EDEM 和 Fluent 软件进行仿真分析。首先,通过 EDEM 对油麦兼用气流辅助导种装置的供种过程进行离散元仿真,优化种层调节板和型孔参数,分析其对排种性能的影响,并确定种子在充种和供种环节的运动状态。随后建立 DEM - CFD 耦合模型,对比在有无气流条件下的种子运动情况,分析入口气流速度对种子受力和速度的影响,揭示气流与种子的相互作用规律。

### 3.1 仿真模型

为探究种层调节板对充种性能影响,采用 Solidworks 软件构建集排器三维结构模型,并将其导入 EDEM 2018 进行仿真。为减少计算量,仿真过程去除螺栓等固定零件,保留集排器外壳、种层调节装置、充种仓、型孔轮等关键部件,仿真模型如图 9 所示。基于油菜和小麦种子本征参数和种间无表面粘附力等因素,选用 Hertz - Mindlin(no slip)接触力学模型[19],仿真与接触参数见表 2[4,20]。根据油菜和小麦种子实际三轴尺寸测定结果,种子颗粒模型三轴尺寸分别设置为 2 mm × 2 mm × 2 mm 和 6.4 mm × 3.0 mm × 3.0 mm,仿真总时间设定为 10 s。



(a) 几何模型 (b) 油菜种子模型 (c) 小麦种子模型

图 9 仿真模型

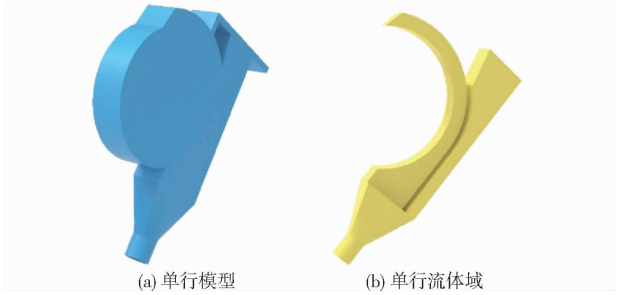
Fig. 9 Simulation model

**表 2 仿真与接触参数**

**Tab. 2 Simulation and contact parameters**

| 项目 | 参数 | 油菜种子 | 小麦种子 |
|---|---|---|---|
| 种子 | 密度/(kg·$m^{-3}$) | 1 060 | 1 350 |
| | 泊松比 | 0.30 | 0.42 |
| | 剪切模量/Pa | $1.1\times10^7$ | $5.1\times10^7$ |
| 种子-种子 | 碰撞恢复系数 | 0.60 | 0.42 |
| | 静摩擦因数 | 0.50 | 0.35 |
| | 动摩擦因数 | 0.01 | 0.015 |
| 种子- ABS 塑料 | 碰撞恢复系数 | 0.75 | 0.60 |
| | 静摩擦因数 | 0.30 | 0.40 |
| | 动摩擦因数 | 0.01 | 0.05 |

为得到入口气流速度较优值，采用 CFD－DEM 耦合模型开展入口气流速度对种子运动轨迹影响试验分析[21]。为简化气固耦合计算过程，将气力辅助导种装置多行模型简化为单行模型（图 10a），并抽取单行模型流体域（图 10b）。选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Ergun and Wen&Yu 曳力模型[22]，时间步长为 $5\times10^{-4}$ s，迭代次数为 $1\times10^{4}$，总仿真时长为 5 s。



(a) 单行模型　　(b) 单行流体域

图 10　气力辅助导种装置仿真模型

Fig. 10　Simulation model of pneumatic-assisted seed guiding device

## 3.2　试验结果与分析

### 3.2.1　种层调节板对充种性能的影响

根据已有研究和前文设计基础，在型孔轮转速为 20 r/min 下，基于种层调节板长度和种层调节板调节角度开展对充种性能影响的虚拟仿真预试验，油菜、小麦采用型孔前倾角均为 90°、深度范围内中间值分别为 2、5 mm 的平底勺式型孔轮，根据预试验结果分析，调节板长度为 75～95 mm，调节角度为 10°～50°。

根据油菜、小麦的自然休止角，取调节角度为 30°，油菜和小麦种子种层调节板长度分别设置为 80～95 mm 和 75～90 mm，增量为 5 mm，各设 4 个水平，进行虚拟仿真分析。不同种层调节板长度下试验结果见表 3，仿真结果见图 11。仿真结果显示，缩短种层调节板长度可增加种群竖直高度，提升平均充种数量、种群压力和充种角，从而提高充种性能。油菜和小麦调节板长度分别为 80～85 mm 和 75 mm 时，充种角过大，导致种子堆积和重复充种，合格率低；长度分别为 90、80 mm 时，平均充种数量为 1.78、2.56 粒，合格率达 93.33% 和 92.50%，漏充率低；长度分别为 95 mm 和 85、90 mm 时，起始种层高度低，漏充率高，合格率分别为 58.00%、81.25% 和 47.50%。综合分析表明，油菜和小麦的调节板长度分别为 90、80 mm 时，充种性能最优。

**表 3　不同种层调节板长度下试验结果**

**Tab. 3　Experiment results under different seed layer regulating plate's length**

| 品种 | 长度/mm | 竖直高度/mm | 平均充种数量/粒 | 充种角/(°) | 种群压力/N | 充种合格率/% | 漏充率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 华油杂 62 | 95 | 10 | 0.98 | 38.09 | 46.36 | 58.00 | 42.00 |
| | 90 | 15 | 1.78 | 50.38 | 75.80 | 93.33 | 1.33 |
| | 85 | 20 | 2.24 | 60.44 | 96.38 | 73.33 | 0 |
| | 80 | 25 | 2.60 | 63.94 | 121.81 | 34.67 | 0 |
| 郑麦 9023 | 90 | 15 | 1.08 | 32.92 | 6.84 | 47.50 | 52.50 |
| | 85 | 20 | 1.67 | 41.90 | 10.43 | 81.25 | 15.00 |
| | 80 | 25 | 2.56 | 47.65 | 12.75 | 92.50 | 0.04 |
| | 75 | 30 | 3.47 | 56.63 | 16.87 | 63.13 | 0 |

当油菜、小麦调节板长度分别为 90、80 mm 时，同样在转速为 20 r/min 条件下，设油菜、小麦调节板调节角度为 10°～50°，增量为 20°，共 3 个水平。各调节角度试验结果见表 4，仿真结果如图 12 所示。仿真结果表明，种层调节板调节角度增大，对应水平距离增大，种群压力呈先减小后增大趋势，该过程充种角呈增大趋势。当调节角度为 30°时，油菜、小麦充种合格率最高，漏充率最低。综合分析，油菜、小麦种层调节板调节角度较优值均为 30°。

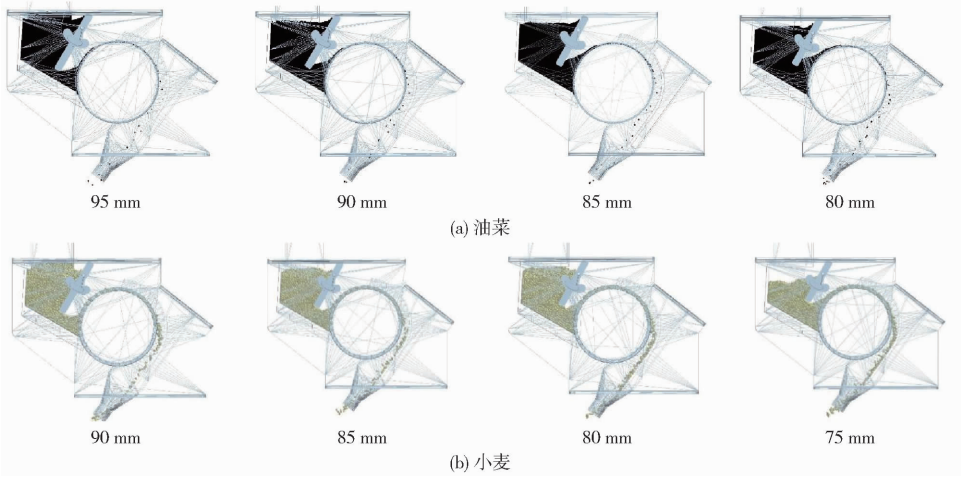



图 11　不同种层调节板长度下油菜和小麦仿真结果

Fig. 11　Simulation results of length of different seed layer regulating plates of rapeseed and wheat

**表 4 不同种层调节板调节角度下试验结果**

**Tab. 4 Filling performance of different seed layers of regulating plate's angles**

| 品种 | 调节角度/(°) | 平均充种数量/粒 | 充种角/(°) | 种群压力/N | 充种合格率/% | 漏充率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 华油杂 62 | 10 | 1.82 | 48.61 | 269.33 | 90.00 | 1.33 |
| | 30 | 1.67 | 47.05 | 75.80 | 96.00 | 0.67 |
| | 50 | 0.82 | 50.38 | 105.92 | 68.67 | 29.33 |
| 郑麦 9023 | 10 | 2.83 | 45.24 | 27.68 | 89.38 | 1.88 |
| | 30 | 2.46 | 44.19 | 12.75 | 94.37 | 0.63 |
| | 50 | 1.13 | 47.65 | 16.67 | 71.25 | 26.88 |

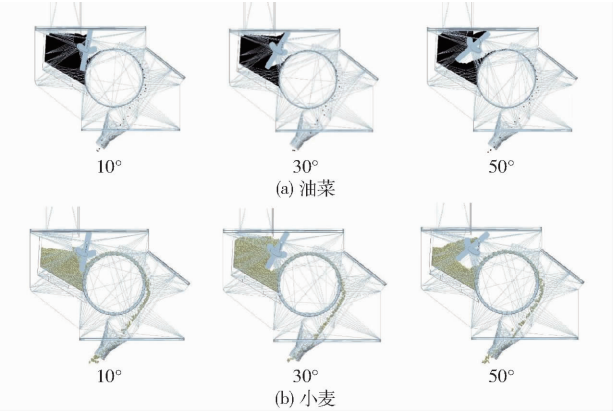



图 12 不同种层调节板调节角度下油菜和小麦仿真结果

Fig. 12 Simulation results of angle of different seed layer regulating plates of rapeseed and wheat

### 3.2.2 入口气流速度对种子运动轨迹的影响

为探究气流分配过程中输送气流分布,采用 CFD－DEM 气固耦合方法分析入口气流速度对种子运动的影响。基于理论分析,设置入口气流速度为 6、8、10 m/s。通过 EDEM 后处理模块统计气固混合区域内种子合作用力和总速度,取 5 个时刻数据平均值作为参考指标,并观察输送气流速度变化。得到气固混合区域内种子受气流的影响情况,不同入口气流速度条件下油菜、小麦种子合作用力和总速度如表 5 所示。结果表明,无气流时种子仅受重力作用,速度较慢;有气流辅助时,种子速度显著提升,种子的合力与合速度均随入口气流速度增大而增大,加速效果显著,当入口气流速度为 10 m/s 时,油菜和小麦种子速度分别为 3.544、3.776 m/s。气流辅助导种不仅缩短了种子在管道内的停留时间,还有效增加了单位时间内排种量稳定性。

**表 5 混合段内种子受气流的影响**

**Tab. 5 Influence of air flow on seeds in mixing zone**

| 入口气流速度/(m·s$^{-1}$) | 油菜种子合作用力/N | 油菜种子总速度/(m·s$^{-1}$) | 小麦种子合作用力/N | 小麦种子总速度/(m·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| 0 | $1.03\times10^{-4}$ | 2.135 | $3.84\times10^{-4}$ | 1.683 |
| 6 | $1.15\times10^{-3}$ | 2.797 | $3.61\times10^{-3}$ | 2.327 |
| 8 | $2.19\times10^{-3}$ | 3.256 | $6.23\times10^{-3}$ | 3.030 |
| 10 | $3.37\times10^{-3}$ | 3.544 | $1.04\times10^{-3}$ | 3.776 |

如图 13 所示,油菜和小麦气固耦合仿真试验表明,当入口气流速度为 6～10 m/s 时,气力辅助导种装置气流场在不同作物间差异较小,但混合区域内的输送气流速度显著不同。随着入口气流速度增加,输送气流速度也随之上升。低流速时,种子加速作用较弱,气流曳力影响有限,种子在管道内停留时间缩短不明显,加速效果不显著;而高流速下,加速作用显著增强。因此,为平衡效果与功耗,后续试验入口气流速度用 8 m/s。

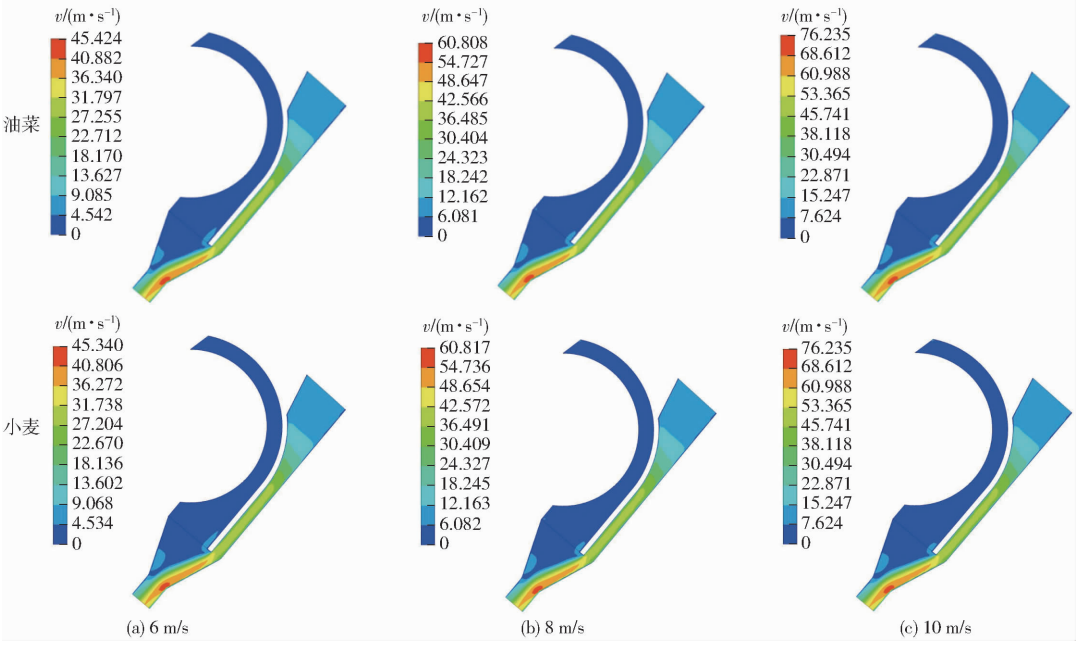



图 13 气固耦合仿真输送气流速度云图

Fig. 13 Velocity cloud diagrams of rapeseed and wheat gas-solid coupling simulation conveying airflow

## 4　台架试验

### 4.1　试验材料

为验证仿真准确性及台架试验条件下实际充种效果，以华油杂 62 和郑麦 9023 为试验材料，千粒质量分别为 4.9 g 和 51.1 g。主要试验装置包括油麦兼用气力辅助导种集排器、12 V 开关电源、电机风机驱动控制装置、游标卡尺、电子秤、定时器等，试验装置如图 14 所示。




图 14　台架试验装置

Fig. 14　Bench test device

1. 种箱　2. 供种装置　3. 导种管　4. 接种盒　5. 风机组　6. 控制箱　7. 直流电机

### 4.2　集排器型孔较优结构参数验证试验

#### 4.2.1　试验设计与评价指标

为探究最优型孔结构参数，并验证理论分析的合理性，开展了型孔前倾角 $\theta$ 和型孔深度 $H$ 两因素三水平正交试验，试验中油菜、小麦型孔前倾角 $\theta$ 均设 50°、70°、90°共 3 个水平，型孔深度 $H$ 分别设 1、2、3 mm 和 4、5、6 mm 共 3 个水平，试验因素编码如表 6 所示。

**表 6　试验因素编码**

**Tab. 6　Test factors and codes**

| 编码 | 因素 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 油菜 | | 小麦 | |
| | 型孔前倾角/(°) | 型孔深度/mm | 型孔前倾角/(°) | 型孔深度/mm |
| -1 | 50 | 1 | 50 | 4 |
| 0 | 70 | 2 | 70 | 5 |
| 1 | 90 | 3 | 90 | 6 |

每种作物进行 9 组试验，设置固定转速为 20 r/min，计算出单位时间内每组试验所得种子质量平均值和变异系数，即为平均排种量和各行排量一致性变异系数。

台架试验设计与结果如表 7 所示，表中 $A$、$B$ 分别表示型孔前倾角、型孔深度编码值，$X_1$ 和 $X_2$ 分别为评价指标各行平均排种量和各行排量一致性变异系数。

**表 7　台架试验设计与结果**

**Tab. 7　Test design and result**

| 作物 | 试验号 | 因素 | | 评价指标 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $A$ | $B$ | $X_1$/g | $X_2$/% |
| 油菜 | 1 | -1 | -1 | 2.59 | 3.11 |
| | 2 | 0 | -1 | 3.12 | 2.04 |
| | 3 | 1 | -1 | 3.64 | 2.19 |
| | 4 | -1 | 0 | 4.43 | 2.73 |
| | 5 | 0 | 0 | 5.51 | 1.69 |
| | 6 | 1 | 0 | 6.90 | 1.91 |
| | 7 | -1 | 1 | 5.68 | 3.25 |
| | 8 | 0 | 1 | 7.06 | 2.21 |
| | 9 | 1 | 1 | 8.70 | 2.83 |
| 小麦 | 1 | -1 | -1 | 27.60 | 6.36 |
| | 2 | 0 | -1 | 31.55 | 3.56 |
| | 3 | 1 | -1 | 36.74 | 2.09 |
| | 4 | -1 | 0 | 46.48 | 4.70 |
| | 5 | 0 | 0 | 51.43 | 2.28 |
| | 6 | 1 | 0 | 60.21 | 1.52 |
| | 7 | -1 | 1 | 77.82 | 6.91 |
| | 8 | 0 | 1 | 81.82 | 4.54 |
| | 9 | 1 | 1 | 97.39 | 3.25 |

运用 Design-Expert 8.0 软件对试验结果进行回归拟合分析，建立油菜和小麦平均排种量 $X_1$ 及各行排量一致性变异系数 $X_2$ 的回归方程为

$$\begin{cases} X_1 = 5.55 + 1.09A + 2.01B + 0.49AB + 0.093A^2 - 0.48B^2 \\ X_2 = 1.65 - 0.36A + 0.16B + 0.13AB + 0.69A^2 - 0.50B^2 \end{cases} \quad \text{(油菜)} \tag{15}$$

$$\begin{cases} X_1 = 50.86 + 7.07A + 26.86B + 2.61AB + 2.77A^2 - 6.11B^2 \\ X_2 = 2.38 - 1.85A + 0.45B + 0.15AB + 0.68A^2 + 1.62B^2 \end{cases} \quad \text{(小麦)} \tag{16}$$

#### 4.2.2　方差分析

对影响试验指标的因素进行显著性检验，结果如表 8 所示。油菜和小麦回归模型决定系数、调整决定系数分别为 0.997 8、0.988 9 和 0.997 9、0.991 7，表明模型预测值与实际值高度相关。方差分析表明，前倾角和深度一次项对油菜和小麦平均排种量影响极显著（$P < 0.01$），影响由大到小依次为型孔深度、前倾角；对各行间排量一致性变异系数影响显著（$P < 0.05$），影响由大到小依次为型孔前倾角、深度。

#### 4.2.3　参数优化与验证

以各行排量一致性变异系数区间内最低值为基准，确保平均排种量在规定范围内，对回归模型进行多目标优化求解，其目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} f_1 = \max(X_1) \\ f_2 = \min(X_2) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

表 8 回归模型方差分析

Tab. 8 Variance analysis of regression model

| 作物 | 方差来源 | $X_1$ | | | | $X_2$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 平方和 | 自由度 | $F$ | $P$ | 平方和 | 自由度 | $F$ | $P$ |
| 油菜 | 回归模型 | 32.94 | 5 | 270.93 | 0.000 4 ** | 2.42 | 5 | 53.12 | 0.004 0 ** |
| | $A$ | 7.13 | 1 | 293.15 | 0.000 4 ** | 1.03 | 1 | 112.43 | 0.001 8 ** |
| | $B$ | 24.36 | 1 | 1 001.80 | <0.000 1 ** | 0.45 | 1 | 49.77 | 0.005 9 ** |
| | $AB$ | 0.97 | 1 | 39.90 | 0.008 0 ** | 0.03 | 1 | 3.75 | 0.148 1 |
| | $A^2$ | 0.02 | 1 | 0.72 | 0.459 5 | 0.79 | 1 | 86.14 | 0.002 6 ** |
| | $B^2$ | 0.46 | 1 | 19.08 | 0.022 2 * | 0.12 | 1 | 13.53 | 0.034 8 * |
| | 残差 | 0.07 | 3 | | | 0.03 | 3 | | |
| | 总和 | 33.01 | 8 | | | 2.45 | 8 | | |
| 小麦 | 回归模型 | 4 745.20 | 5 | 291.73 | 0.000 3 ** | 2.43 | 5 | 53.60 | 0.003 9 ** |
| | $A$ | 300.19 | 1 | 92.28 | 0.002 4 ** | 0.78 | 1 | 83.66 | 0.002 7 ** |
| | $B$ | 4 327.68 | 1 | 1 330.32 | <0.000 1 ** | 0.15 | 1 | 16.57 | 0.026 8 * |
| | $AB$ | 27.20 | 1 | 8.36 | 0.062 9 | 0.06 | 1 | 6.88 | 0.078 7 |
| | $A^2$ | 15.38 | 1 | 4.73 | 0.118 0 | 0.95 | 1 | 104.89 | 0.002 0 ** |
| | $B^2$ | 74.75 | 1 | 22.98 | 0.017 3 * | 0.49 | 1 | 53.98 | 0.005 2 ** |
| | 残差 | 9.76 | 3 | | | 0.03 | 3 | | |
| | 总和 | 4 754.96 | 8 | | | 2.46 | 8 | | |

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

代入数据求解得到油菜型孔较优参数组合为前倾角 70.3°、深度 2.09 mm，小麦前倾角 90.0°、深度 5.30 mm。在此组合下，油菜平均排种量为 5.74 g、各行排量一致性变异系数为 1.66%，小麦平均排种量为 70.01 g、各行排量一致性变异系数为 1.52%。取整后，油菜和小麦型孔前倾角分别为 70°和 90°，深度分别为 2 mm 和 5 mm。通过 3D 打印技术制作型孔轮并装配组件进行试验，每组试验重复 3 次，测得油菜和小麦平均排种量分别为 5.65 g 和 71.05 g，各行排量一致性变异系数平均值分别为 1.67% 和 1.48%。试验结果与模型预测值高度一致，验证了型孔结构参数模型的有效性和预测值的高可靠性。

### 4.3 转速对排种性能影响

为获得集排器较优工作转速，选取转速为试验指标，以各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数为评价指标，统计 30 s 内各行种子数量，重复 3 次，通过单因素台架试验探讨转速对排种性能的影响，试验结果如图 15 所示。

试验结果表明，各行平均排种量和总排量平均值均随转速增加而增加。当转速为 10 ~ 30 r/min，油菜和小麦各行排量一致性变异系数分别保持在 3% 和 3.8% 以下，总排量稳定性变异系数分别低于 1.3% 和 1%。小麦在转速为 20 r/min 时各行排量一致性变异系数达到最小值(2.94%)后继续增大，其原因在于转速加快，单个型孔充种时间缩短，部分型孔不能保证每孔 2 ~ 3 粒小麦种子的设计要求，而这部分型孔出现概率具有随机性。综合考虑，10 ~ 30 r/min 范围内可为两作物共用适宜区间，小麦 20 r/min 时相对较优。

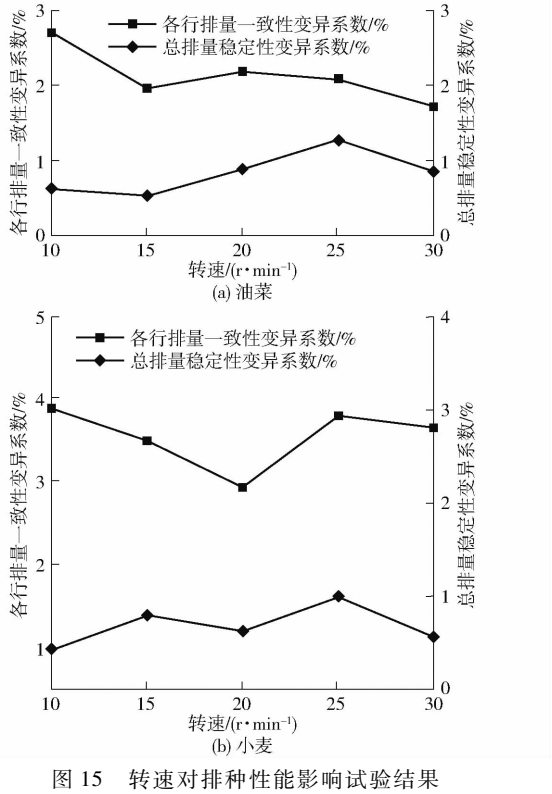



图 15 转速对排种性能影响试验结果

Fig. 15 Experiment results of effect of rotational speed on seed discharge performance

### 4.4 气力辅助导种装置性能试验

为验证气力辅助导种对排种均匀性的影响，构建 3 000 mm × 400 mm 土槽试验平台模拟田间播种

过程，如图 16 所示。试验将土槽带等分为 10 段，排除首尾两段，每 0.3 m 设为一个区段并标记。统计每个区段的种子粒数，每组试验收集 3 m 内的数据，重复 3 次以确保结果准确性。



图 16　气力辅助导种土槽测定试验

Fig. 16　Pneumatic-assisted seed guiding soil bin measurement test

表 9 对比了有无气流条件下的排种效果，无气流时，油菜和小麦平均排种粒数分别为 15.46、26.13 粒，变异系数为 18.97% 和 18.78%；有气流时（入口气流速度为 8 m/s），两者分别增至 15.92、28.42 粒，变异系数降至 17.41% 和 9.14%。结果表明，气流显著提高了小麦排种均匀性，有效防止了不规则形状种子堆积；而球形度高、流动性好的油菜种子受气流影响较小。

**表 9　气力辅助导种对排种均匀性影响试验结果**

**Tab. 9　Experiment results of influence of pneumatic-assisted seed guiding on seeding uniformity**

| 有无气流 | 参数 | 油菜 | | | | 小麦 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 试验 1 | 试验 2 | 试验 3 | 平均值 | 试验 1 | 试验 2 | 试验 3 | 平均值 |
| 无气流 | 平均排种粒数/粒 | 15.75 | 13.25 | 17.38 | 15.46 | 25.75 | 29.25 | 23.38 | 26.13 |
| | 变异系数/% | 20.02 | 17.19 | 19.72 | 18.97 | 21.95 | 16.01 | 18.39 | 18.78 |
| 有气流 | 平均排种粒数/粒 | 14.63 | 15.75 | 17.38 | 15.92 | 26.63 | 33.75 | 24.88 | 28.42 |
| | 变异系数/% | 18.39 | 17.32 | 16.52 | 17.41 | 9.93 | 9.10 | 8.39 | 9.14 |

## 5　田间试验

为进一步验证油麦兼用气力辅助导种集排器排种性能，于 2023 年 9 月 17 日在湖北省武汉市华中农业大学现代农业科学试验基地不同田块进行油菜、小麦田间播种试验。

油菜播种以东方红 LX954 型拖拉机为配套动力，将油麦兼用气力辅助导种集排器搭载于油菜深施肥精量联合播种机，以云油杂 28 油菜种子为对象。试验根据油菜播种农艺要求设置 6 行播种，工作幅宽 2 m，播种面积 0.066 7 $hm^2$，作业速度 1.92 km/h。根据农艺要求，调节电机转速使播量为 180 kg/$hm^2$，集排器转速为 20 r/min。播后 30 d 出苗效果如图 17a 所示。

小麦播种试验采用约翰迪尔 1054 型拖拉机为动力，集排器装配于 2BFQ－6 型油菜精量联合直播机，以郑麦 9023 小麦种子为对象。试验根据小麦播种农艺要求设置 8 行播种，工作幅宽 2.3 m，播种面积 0.026 7 kg/$hm^2$。根据农艺要求，调节电机转速使播量为 4.5 kg/$hm^2$，作业速度 1.81 km/h，集排器转速 30 r/min。播后 60 d 出苗效果如图 17b 所示。

在播种后 20～25 d，分别在油菜、小麦已播种地各自随机选取 5 厢出苗田块区域（A1～A5），每厢测量小区面积为 1 m×1 m，记录每厢小区内各行出苗数，根据所得数据计算各行平均株数及其变异系数，计算结果如表 10 所示。由表 10 可知，油菜、小麦播种各行间均匀性变异系数分别为13.52%、9.65%，平均株距分别为 82.65、16.37 mm，满足油菜、小麦田间种植要求。



(a) 油菜

(b) 小麦

图 17　播种作业过程及田间出苗效果

Fig. 17　Sowing operation process and field emergence effect

**表 10　出苗数据**

**Tab. 10　Analysis of seedling emergence data**

| 作物 | 参数 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | 平均值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 油菜 | 总株数 | 65 | 77 | 74 | 74 | 72 | 72.4 |
| | 各行平均株数 | 10.8 | 12.8 | 12.3 | 12.3 | 12.0 | 12.1 |
| | 变异系数/% | 12.52 | 13.41 | 18.20 | 11.00 | 12.47 | 13.52 |
| 小麦 | 总株数 | 243 | 239 | 244 | 246 | 249 | 244.2 |
| | 各行平均株数 | 60.8 | 59.8 | 61.0 | 61.5 | 62.3 | 61.1 |
| | 变异系数/% | 9.19 | 12.55 | 9.49 | 8.94 | 8.06 | 9.65 |

## 6 结论

(1)设计了一种基于“型孔轮式机械定量供种 + 气力辅助导种”的油麦兼用气力辅助导种集排器,该集排器针对油菜和小麦机械物理特性差异大的兼用难点,通过“平底勺式”型孔结构扰动种群,保证充种效果,气送导种保证导种顺畅,可实现油菜和小麦精量播种。

(2)应用 DEM - CED 耦合仿真试验和气力辅助导种装置台架试验得出,无气流时,油菜和小麦各行排量一致性变异系数为 18.97% 和 18.78%;当入口气流速度为 8 m/s 时,两者变异系数降至 17.41% 和 9.14%。结果表明,气流显著提高了小麦排种均匀性,有效防止了不规则形状种子堆积;而球形度高、流动性好的油菜种子受气流影响较小。

(3)台架试验及田间试验结果表明,在最佳工作参数下,油菜、小麦各行排量一致性变异系数分别低于 3%、3.8%,总排量稳定性变异系数低于 1.3%、1%。播种后测得各行间出苗均匀性变异系数分别为 13.52%、9.65%,平均株距分别为 82.65、16.37 mm,满足油菜、小麦田间种植要求。

## 参 考 文 献


[1] 廖宜涛,施彬彬,王传奇,等. 南方丘陵山地油菜和小麦播种机械化发展现状与趋势[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 12 - 26.
LIAO Yitao, SHI Binbin, WANG Chuanqi, et al. Development status and trend of mechanization of rapeseed and wheat sowing in hilly and mountainous region of southern China[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 12 - 26. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 11 - 19.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11 - 19. (in Chinese)

[4] 施彬彬,王传奇,陈雪儿,等. 油麦兼用气送式集排器立槽式供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9):102 - 115.
SHI Binbin, WANG Chuanqi, CHEN Xueer, et al. Design and experiment of vertical groove seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 102 - 115. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 黄小毛,刘宇,朱耀宗,等. 稻油兼用型成条飞播装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 111 - 121.
HUANG Xiaomao, LIU Yu, ZHU Yaozong, et al. Design and experiment of striped aerial seeding device for rice and oil rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 111 - 121. (in Chinese)

[7] 杜俊,夏俊芳,张居敏,等. 稻麦兼用型气力滚筒式精量排种器设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(3): 127 - 134.
DU Jun, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of pneumatic drum type metering device for rice and wheat[J]. Jorunal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(3): 127 - 134. (in Chinese)

[8] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等. 播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J]. 农业工程学报,2022,38(24):1 - 13.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Trend analysis and prospects of seed metering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 1 - 13. (in Chinese)

[9] 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]. Jorunal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 143 - 151. (in Chinese)

[10] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等. 基于 TRIZ - AD 的集成式油菜气力精量排种装置设计[J]. 农业工程学报,2023,39(14):49 - 59.
ZHENG Juan, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design of the integrated precision pneumatic seed metering device for rapeseed using TRIZ - AD[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 49 - 59. (in Chinese)

[11] HE Siyu, QIAN Cheng, JIANG Youcong, et al. Design and optimization of the seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rice and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108814.

[12] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2017,48(9):1 - 16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1 - 16. (in Chinese)

[13] 雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
LEI Xiaolong. Design and working mechanism of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultrual University,2017. (in Chinese)


(下转第 187 页)

AN Xiaxia, XU Yuanhong. Precision evaluation of soil nutrients in kiwifruit planting areas based on spatial interpolation technology[J]. South China Agriculture, 2025, 19(7): 28 – 33. (in Chinese)

[22] 徐丹, 刘昌华, 蔡太义, 等. 农田 SOM 和全氮三维空间分布特征研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 157 – 163.
XU Dan, LIU Changhua, CAI Taiyi, et al. 3D spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 157 – 163. (in Chinese)

[23] OLIVER M A, WEBSTER R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging[J]. Catena, 2014, 113: 56 – 69.

[24] QU L, LU H, TIAN Z, et al. Spatial prediction of soil sand content at various sampling density based on geostatistical and machine learning algorithms in plain areas[J]. Catena, 2024, 234: 107572.

[25] ERDOGAN E G, YAVUZ M, DEUTSCH C V. Combination of machine learning and Kriging for spatial estimation of geological attributes[J]. Natural Resources Research, 2022, 31(1): 191 – 213.

[26] 咸阳,宋江辉,王金刚,等. 基于环境变量筛选与机器学习的土壤养分含量空间插值研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 379 – 391.
XIAN Yang, SONG Jiahui, WANG Jin'gang, et al. Spatial interpolation of soil nutrients content based on environment variables screening and machine learing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 379 – 391. (in Chinese)

[27] 马利, 刘新宇, 李皓宇, 等. 应用空洞卷积的神经网络轻量化方法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(5): 85 – 93.
MA Li, LIU Xinyu, LI Haoyu, et al. Neural network lightweight method with dilated convolution[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(5): 85 – 93. (in Chinese)

[28] HE K, CHEN X, XIE S, et al. Masked autoencoders are scalable vision learners[C]// 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),2022: 15979 – 15988.

(上接第 116 页)

[14] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(20):10 – 18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10 – 18. (in Chinese)

[15] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18): 26 – 34.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26 – 34. (in Chinese)

[16] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. 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.

[17] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J]. 农业机械学报,2017, 48(3):57 – 68.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Wenyu, et al. Simulation and experiment of gas – solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 57 – 68. (in Chinese)

[18] 王宝山,王磊,廖宜涛,等. 小粒径种子精量穴播集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):64 – 75,119.
WANG Baoshan, WANG Lei, LIAO Yitao, et al. Design and test of seeding wheels of precision hole-seeding centralized metering device for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 64 – 75, 119. (in Chinese)

[19] 刘宏新,徐晓萌,郭丽峰,等. 具有复合充填力的立式浅盆型排种器充种机理[J]. 农业工程学报,2014,30(21):9 – 16.
LIU Hongxin, XU Xiaomeng, GUO Lifeng, et al. Research on seed-filling mechanism of vertical shallow basin type seed-metering device with composite filling force[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 9 – 16. (in Chinese)

[20] 廖宜涛,王传奇,施彬彬,等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12): 134 – 146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and test of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12):134 – 146. (in Chinese)

[21] WANG Yingbo, LI Hongwen, HU Hongnan, et al. DEM – CFD coupling simulation and optimization of a self-suction wheat shooting device[J]. Powder Technology, 2021, 393: 494 – 509.

[22] 苏微,赵庆辉,赖庆辉,等. 辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7):144 – 155.
SU Wei, ZHAO Qinghui, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of air-suction broad bean seed metering device with flat belt auxiliary seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7):144 – 155. (in Chinese)