doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.003

稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器设计与试验

李晓冉[1,2]　霍佳琪[1,2]　廖庆喜[1,2]　水丽敏[1,2]　王培宇[1,2]　王明泽[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:针对稻麦油高速排种时种子易破损、传统离心式集排器兼用性不足等问题,本文设计了稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器。基于侧向供种方案设计了稻麦油兼用叶轮供种机构,开展种子损伤临界状态力学分析,阐述了高速供种工作原理。依据稻麦油种子物理特性及播量要求,设计了供种叶轮结构参数,并分析确定了影响高速供种性能的主要因素。通过 EDEM 仿真试验,探究了供种转速及叶轮结构参数对供种性能的影响规律,构建了供种速率回归模型。仿真试验结果表明,水稻、小麦、油菜种子当供种转速分别为 60~80 r/min、60~80 r/min 和 40~55 r/min,叶轮槽高度分别为 10~20 mm、15~25 mm 和 7~11 mm(弧长)时,供种性能较优。开展台架试验验证稻麦油供种速率回归模型准确性,结果表明,在较优参数组合下,水稻种子供种速率实际值与理论值误差不高于 4.85%,小麦相对误差不高于 4.08%,油菜相对误差不高于 1.91%。田间播种试验结果表明,当播种速度为 8~10 km/h 时,稻麦油出苗均匀性变异系数均低于 10%,满足高速播种标准要求。研究结果可为提高离心式集排器兼用性提供参考。

关键词:稻麦油;兼用;高速;叶轮离心式;集排器
中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0042-10　　**OSID**:

Design and Experiment of High-speed Impeller Centrifugal Centralized Metering Device for Rice, Wheat and Rapeseed

LI Xiaoran[1,2]　HUO Jiaqi[1,2]　LIAO Qingxi[1,2]　SHUI Limin[1,2]　WANG Peiyu[1,2]　WANG Mingze[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: Aiming to address the problems of seed damage during high-speed metering of rice, wheat, and rapeseed, as well as the limited versatility of traditional centrifugal centralized metering device, a high-speed impeller centrifugal centralized metering device for rice, wheat and rapeseed was designed to solve the problem. Based on the lateral seed supply solution, the impeller seed supply mechanism for rice, wheat, and rapeseed was intended, and the mechanical analysis of the critical state of seed damage was carried out to illustrate the working principle of the high-speed seed supply. According to the physical characteristics of seeds and sowing quantity requirements, the structural parameters of the seed supply impeller were designed, and the main factors affecting the performance of high-speed seed supply were analyzed and determined. Through the EDEM simulation test, the influence rules of seeding rotation speed and impeller structure parameters on seeding performance were investigated, and the regression model of seed feeding rate was constructed. The simulation results showed that the seed supply performance was better for rice seeds in the range of 60~80 r/min seed supply rotation speed and 10~20 mm impeller groove height, for wheat seeds in the range of 60~80 r/min seed supply rotation speed and 15~25 mm impeller groove height, and for rapeseed seeds in the range of 40~55 r/min seed supply rotation speed and 7~11 mm impeller groove arc length. The results of the bench validation test showed that the relative error rate between the actual seed supply rate and the model predicted value was no more than 4.85% for rice, no more than 4.08% for wheat seeds, and no more than 1.91% for rapeseed seeds

收稿日期:2025-06-17　修回日期:2025-07-23
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000401)
作者简介:李晓冉(1995—),女,博士生,主要从事稻麦油兼用播种技术与装备研究,E-mail:lixiaoran@webmail.hzau.edu.cn
通信作者:廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail:liaoqx@mail.hzau.edu.cn

under the better parameter combinations. The constructed regression model of seed supply rate can provide a reference for matching the parameters of high-speed operation of rice, wheat, and rapeseed centralized metering devices. The field seeding test showed that when the operating speed was 8 ~ 10 km/h, the coefficient of variation of seedling emergence uniformity of rice, wheat, and rapeseed was less than 10%, and the field operation performance met the standard requirements of high-speed seeding of rice, wheat, and rapeseed. The research result can provide a reference for the structural improvement of high-speed centrifugal centralized metering devices.

Key words: rice, wheat, and rapeseed; combined use; high-speed; impeller centrifugal; centralized seed metering deice

0　引言

水稻、小麦和油菜是我国主要的粮油作物，研制稻麦油兼用型集排器可有效提升播种机综合利用率，降低生产成本。目前稻麦油兼用型集排器多为气送式集排器，工作原理为兼用型供种装置配合高速气流实现种子定量输送与行间分配，气力系统布局及控制方式较为复杂，高速作业时，排种性能受气流压力稳定性影响较为显著[1-4]。

离心式集排器结构小巧、控制方式简单[5-8]且能够实现短程排种，近年来国内外学者对离心式集排器开展了深入研究。MALEKI 等[9]通过对机械离心式集排器不同形式供种装置排种性能的研究发现，螺旋式供种装置性能较优；廖庆喜等[10]设计了油菜离心式集排器，研究了工作转速与排种量及种子破损率的关系，通过离散元仿真，分析了排种过程中籽粒运动过程[11]；VILLETTE 等[12]建立了种子在集排器旋转盘上及飞出转盘后的轨迹方程；曹秀英等[13]分析了油菜离心式排种器型孔堵塞的影响因素，改进了型孔结构，并确定型孔直径为 3.8 mm 时排种性能最优。在此基础上设计了多阶分流装置，保证在机具倾斜状态下仍可均匀分配种子[14]；李沐桐等[15]提出了一种推送式充种方式，提高了离心式排种器排种性能；王都等[16]设计了一种行数可调的油菜离心式精量集排系统；朱龙图等[17]设计了一套适用于油菜离心式排种装置的控制系统，使排种系统排种量均匀稳定；姚露等[18]研制了油菜旋转盘式高速集排器，设计螺旋结构为供种装置，基于 Bezier 曲线优化了分种装置，进一步提高油菜高速作业排种均匀性[19]。廖庆喜等[20]针对高速作业时供种及投种能力不足的问题，设计了被动供种、“圆孔 + 渐变孔柱”组合式型孔投种的油菜高速机械离心式集排器。相关研究表明，离心式集排器对油菜等类球形籽粒播种具有良好应用效果，但相较油菜种子，水稻和小麦种子三轴尺寸较大，播种质量要求较高，离心式集排器对稻麦种子适应性和兼用性有待进一步提高；且高速排种过程中稻麦等形状不规则籽粒易损伤，目前罕见减少离心式集排器高速排种籽粒破损的相关研究。

针对稻麦油高速排种时种子易破损、传统离心式集排器兼用性不足等问题，本文设计稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器。基于侧向供种方案设计稻麦油兼用叶轮供种装置，以减轻对稻麦等不规则种子的损伤；通过调节供种叶轮结构参数以满足不同作物播量调节需求；通过调节供种转速以满足同种作物不同播量调节需求；开展 EDEM 仿真试验，构建稻麦油供种速率回归模型，通过台架试验以验证模型准确性，进行田间播种试验，以检验集排器实际高速排种性能。

1　总体结构与工作过程

1.1　总体结构

稻麦油兼用高速联合直播机主要由稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器、开沟器、排肥装置和肥箱等结构组成，直播机结构如图 1 所示。集排器是直播机实现高速兼用排种的核心部件，主要由种箱、叶轮供种装置、分种锥盘和导种部件等组成，集排器结构如图 2 所示。

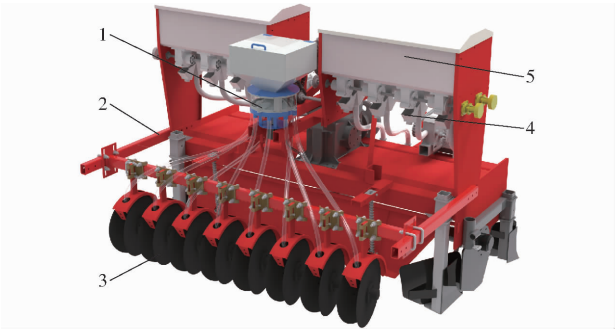


图 1　稻麦油兼用高速直播机结构示意图

Fig. 1　Schematic of high-speed direct seeder for rice, wheat and rapeseed

1. 稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器　2. 机架　3. 开沟器　4. 排肥装置　5. 肥箱

1.2　工作过程

高速叶轮离心式集排器排种过程需经供种、分种和导种 3 个环节。供种装置将种子均匀排出种箱

掉落在分种锥盘上,分种锥盘由驱动电机带动随供种机构同步旋转,旋转过程中,分种锥盘上的种子在离心力和锥盘上导种条共同作用下均匀分配到各行导种部件,而后经导种管落入种沟,完成排种过程。

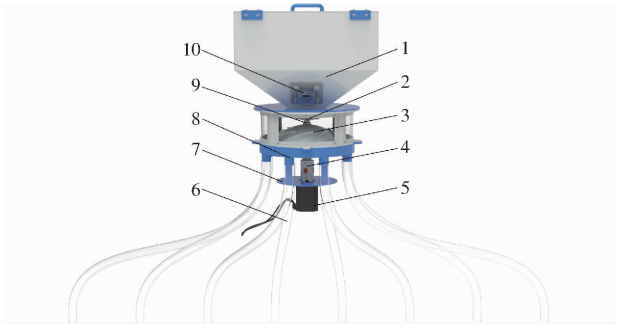


图 2 稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of high-speed impeller centrifugal centralized metering device for rice, wheat and rapeseed

1. 种箱 2. 叶轮供种机构 3. 分种锥盘 4. 联轴器 5. 电机 6. 导种管 7. 电机支架 8. 导种部件 9. 主轴 10. 卸种口

2 关键部件设计

稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器采用“叶轮供种机构兼用供种 + 穹顶锥盘均匀分种 + 定向导种”的集中排种方案,其中叶轮供种机构是集排器实现水稻、小麦和油菜兼用排种的关键部件[21]。

2.1 高速供种工作原理

叶轮供种机构位于种箱底部种层下方,其结构如图 3 所示,主要由供种叶轮、种层调节盖及外壳组成,供种叶轮上方结构为搅种锥,下方圆周均布多个叶片形成槽体。工作时,供种叶轮由电机驱动旋转,旋转的搅种锥和叶片扰动种群,提高充种区种子流动性,并带动种群定向流动,种子在种层调节盖和外壳约束下由侧面进种口流入叶轮槽,完成充种的种子在叶片推动下经携种区到达出种口,完成均匀供种。工作时,通过调节供种叶轮结构参数改变槽体高度和弧长,满足不同作物供种量需求;通过调整供种转速满足同种作物不同播量调节需求。

高速供种时,油菜种子球形度较高且播量小,性能较为稳定,稻麦种子相较油菜种子播量增加,需提高叶轮转速,高速旋转的叶轮可进一步增加充种区种群离散度,改善种箱内种群连续供种性能,进而提高稻麦等不规则种子高速供种均匀性。为减轻高速供种过程中种子损伤,采取侧向供种方案,侧向供种示意图如图 4 所示,进种口位于供种装置侧壁,种箱内种子在搅种锥扰动作用下沿搅种锥面流入叶轮槽。

由图 4 可知,当搅种锥绕驱动主轴旋转时,种子可沿锥面流动经进种口完成充种,油菜种子呈类球形,其流动性良好,排种过程中不易受损。但稻麦种子呈纺锤形,形状不规则且三轴尺寸较大,若高速排种过程中种子损伤会影响出苗率。

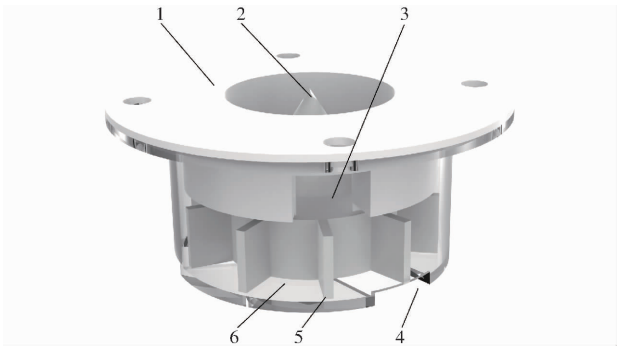


图 3 叶轮供种机构结构示意图

Fig. 3 Schematic of impeller seed supply device

1. 种层调节盖 2. 搅种锥 3. 进种口 4. 出种口 5. 叶片 6. 外壳

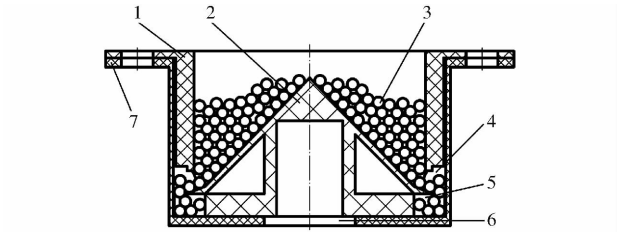
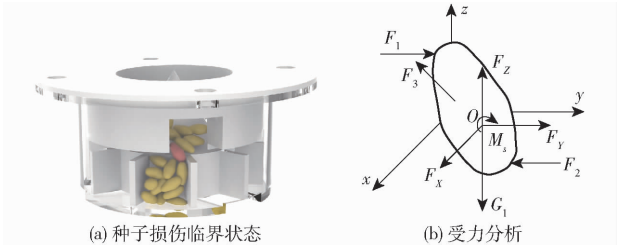


图 4 侧向供种示意图

Fig. 4 Schematic of lateral feeding

1. 种层调节盖 2. 搅种锥 3. 种子 4. 进种口 5. 叶轮槽体 6. 驱动主轴 7. 外壳

为探究侧向供种方案合理性,开展供种环节力学分析。稻麦种子损伤临界状态示意图如图 5a 所示,受力分析如图 5b 所示。



(a) 种子损伤临界状态 (b) 受力分析

图 5 供种环节力学分析

Fig. 5 Mechanical analysis of seed supply process

以种子质心为原点建立空间坐标系 $Oxyz$,依据种子损伤临界状态受力情况建立力平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_X + F_3\cos\alpha = 0 \\ \sum F_y = F_1 + F_Y - F_2 - F_3\cos\beta = 0 \\ \sum F_z = F_Z - G_1 + F_3\cos\gamma = 0 \\ \sum M_x(F) = F_1 d_1 + F_2 d_2 - F_3 d_3\cos\beta + M_{s1} = 0 \\ \sum M_y(F) = F_3 d''_3\cos\alpha + M_{s2} = 0 \\ \sum M_z(F) = F_1 d'_1 + F_2 d'_2 - F_3 d'_3 + M_{s3} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中 F_X、F_Y、F_Z——种群在 x、y、z 轴上作用力,N

F_1——进种口侧壁支持力，N

F_2——叶轮叶片支持力，N

F_3——槽体内种子支持力，N

G_1——种子自身重力，N

M_{s1}、M_{s2}、M_{s3}——种群作用力向点 O 简化的合力偶，N·mm

α、β、γ——F_3 与 x、y、z 轴夹角，(°)

d_1、d_2、d_3——F_1、F_2、F_3 到种子质心投影到 x 轴垂直距离，mm

d_1'、d_2'、d_3'——F_1、F_2、F_3 到种子质心投影到 y 轴垂直距离，mm

d_3''——F_3 到种子质心投影到 z 轴垂直距离，mm

由式(1)可得

$$\sum M_x(F) = F_2(d_1+d_2) + F_X\frac{\cos\beta(d_3-d_1)}{\cos\alpha} - F_Y d_1 + M_{s1} \quad (2)$$

供种时，叶轮叶片由电机驱动旋转，因此叶片对种子的作用力 F_2 远大于种子受到的其他作用力，由式(2)可知 $\sum M(F)=0$ 不成立，即空间力系难以保持平衡而是产生转动力偶。因此，损伤临界状态时，种子在转动力偶作用下发生旋转落入叶轮槽，侧向供种方案有利于减轻种子损伤。

2.2　供种叶轮设计

供种叶轮将种箱内种子均匀排出供种装置，结构如图 6 所示，其中叶轮结构参数是影响供种量和供种稳定性的重要因素。

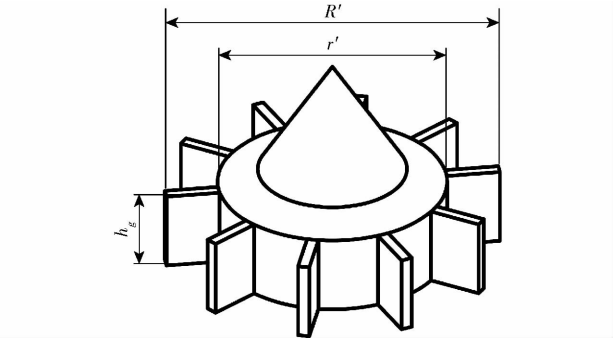


图 6　叶轮结构示意图

Fig. 6　Schematic of impeller structure

田间作业时，集排器排种量应满足农艺要求的播种量，理论供种速率为

$$Q = \frac{5Q_m B_m v_m}{3} \quad (3)$$

式中　Q——理论供种速率，g/min

Q_m——农艺要求的播量，kg/hm^2

B_m——播种机工作幅宽，m

v_m——播种作业速度，km/h

当播种作业速度为 8 ~ 10 km/h、作业幅宽为 2 m 时，依据长江中下游地区播量要求，水稻、小麦和油菜播种量分别为 75、90、6 kg/hm^2，由式(3)计算得稻麦油供种速率分别为 2 000 ~ 2 500 g/min、2 400 ~ 3 000 g/min、160 ~ 200 g/min。

集排器工作时，供种机构为排种系统提供稳定种子流，叶轮供种机构实际供种速率应满足式(3)所求得的理论供种速率，即

$$Q = \frac{1}{2}\times 10^{-6}\pi h_g(R'^2 - r'^2)n\kappa\rho \quad (4)$$

式中　n——供种转速，r/min

κ——种子填充系数，取 0.75(水稻)、0.6(小麦)、0.95(油菜)[22]

ρ——种子容重(经测定，水稻为 567.89 g/L，小麦为 778.23 g/L，油菜为 632.41 g/L)

R'——叶轮槽外径，mm

r——叶轮槽内径，mm

h_g——叶轮槽高度，mm

由式(4)可知，供种速率主要与叶轮槽外径 R'、叶轮槽内径 r'、叶轮槽高度 h_g 及供种转速 n 相关。

根据稻麦油种植农艺要求，单个槽体充种水稻和小麦种子数量为 3 ~ 8 粒，单个槽体充种油菜种子数量为 1 ~ 3 粒。为保证种子能够顺利充入槽体，叶轮槽高度应大于种子三轴尺寸最大值。对于稻麦等椭球性颗粒，充种姿态以“平躺 + 侧卧”为主。结合种植农艺要求与充种姿态分析，叶轮槽高度应满足[21]

$$\begin{cases} L_{\max} < h_x \leqslant 8W_{\max} \\ L_{\max} < h_y \leqslant 1.5L_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中　h_x——稻麦叶轮槽高度，mm

h_y——油菜叶轮槽高度，mm

$L_{\max}$——种子三轴尺寸最大值，稻麦种子为 9.8 mm，油菜种子为 2.3 mm

$W_{\max}$——稻麦种子厚度最大值，取 3.8 mm

将稻麦种子三轴尺寸最大值代入式(5)，播种水稻和小麦时，叶轮槽高度为 10 ~ 30 mm，由于水稻和小麦种子三轴尺寸和供种量调节范围大，通过调整叶轮槽高度调节供种速率；由于油菜种子颗粒小且供种速率变化范围小，通过调整叶轮槽弧长实现油菜播量调节，将油菜种子最大直径代入式(5)，播种油菜种子时，叶轮槽高度为 3 mm。

叶轮供种机构工作时包括充种、携种和投种 3 个阶段，各区域分布示意图如图 7 所示。当叶片旋转经过充种区时，种子由种箱落入槽体完成充种，叶片带动充入槽体种子转动，经携种区最终到达投种区完成供种。

由图 7 可知，各区域应满足

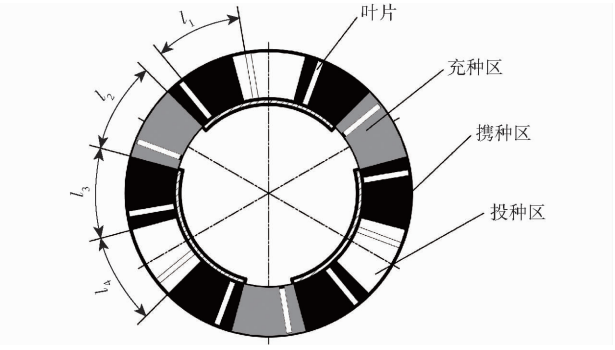


图 7 供种环节区域分布示意图

Fig. 7 Schematic of regional distribution in seed supply process

$$\begin{cases} L_{\max} < l_1 \leqslant l_2 \\ l_2 + l_4 + 2l_3 = \dfrac{2\pi R'}{3} \\ R' = R_c - \sigma \end{cases} \tag{6}$$

式中 R_c——外壳半径,mm

σ——外壳壁厚,mm

l_1——叶轮槽弧长,mm

l_2——充种区弧长,mm

l_3——携种区弧长,mm

l_4——投种区弧长,mm

根据集排器总体结构及种箱尺寸,确定供种机构外壳半径为 63 mm,为保证供种机构强度,外壳壁厚为 3 mm,因此叶轮槽外径 R'为 60 mm。为确保叶轮供种机构稳定运行,设置各工作区域弧度一致,由式(6)求得 $l_2 = l_3 = l_4 = 31.4$ mm,因此播种油菜时叶轮槽弧长为 2.3 mm $< l_1 \leqslant 31.4$ mm;播种水稻和小麦时叶轮槽弧长为 9.8 mm $< l_1 \leqslant 31.4$ mm,取中间值 20 mm。

为提高高速充种稳定性,种子由叶片顶部下落至底部时间应小于叶轮槽旋转经过充种区时间[23],即

$$\begin{cases} t = \sqrt{\dfrac{2h_g}{g}} \\ n > \dfrac{30\alpha}{\pi t} \\ \alpha = \dfrac{l_1}{R'} \end{cases} \tag{7}$$

式中 t——种子下落时间,s

α——叶轮槽弧度,rad

对于稻麦种子,经前文计算,已确定叶轮槽弧长为 20 mm,叶轮槽外径为 60 mm,将叶轮槽高度取最大值 30 mm 代入式(7)得供种转速应大于 41.3 r/min,将此转速代入式(4),播种水稻小麦时,叶轮槽内径取 32 mm 即可满足稻麦供种速率 8 ~ 10 km/h 要求。

对于油菜种子,经前文计算,已确定叶片槽高度为 3 mm,且由于油菜供种量小于稻麦种子,因此油菜格盘槽弧长小于 20 mm 即可满足供种量要求,取弧长为 20 mm 代入式(7)求得供种转速应小于 131.4 r/min,将此转速代入式(4)求得,播种油菜时,叶轮槽内径取 56 mm、叶轮槽弧长为 3 ~ 11 mm 可满足油菜供种速率 8 ~ 10 km/h 要求。

在此基础上,叶轮供种机构播种水稻、小麦的供种速率与叶轮槽高度 h_g 和供种转速 n 相关;播种油菜时,供种速率与叶轮槽弧长 l_1 和供种转速 n 相关。

3 排种性能仿真试验

为确定高速排种性能较优的叶轮结构参数和供种转速范围,借助 EDEM 离散元仿真开展供种转速、叶轮槽高度、叶轮槽弧长单因素试验。通过开展双因素三水平试验,构建稻麦油供种速率回归模型,为集排器工作参数匹配提供依据。

3.1 EDEM 仿真模型建立与试验方法

在 Solidworks 中构建稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器模型并将文件导入 EDEM 软件 Geometries 模块中。为降低仿真计算量,在保证仿真试验准确性基础上简化集排器模型,简化后仿真模型如图 8a 所示。依据种子三轴尺寸测定结果,构建稻麦油仿真颗粒模型三轴尺寸分别为 9.5 mm × 3 mm × 2 mm、8 mm × 3.5 mm × 3 mm、2 mm × 2 mm × 2 mm,种子模型尺寸呈正态分布,标准差设置为 0.05 mm,种子颗粒模型如图 8b、8c、8d 所示。

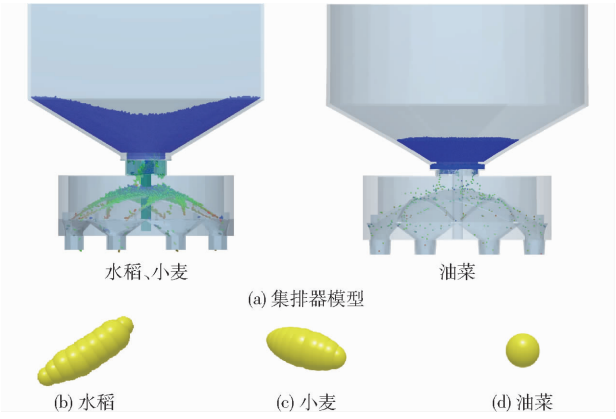


图 8 EDEM 仿真模型

Fig. 8 EDEM simulation models

在 Bulk Material、Equipment Material 模块中添加种子、集排器材料特性参数,设定种箱、穹顶锥盘、主轴材料为铝合金,叶轮供种机构材料为 ABS 工程塑料,材料特性参数见表 1[24-25],种子与供种机构、种子与种子间接触模型采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触,接触模型参数见表 2[26-27]。

在种箱上方创建颗粒工厂,设置工厂类型为动态生成,生成种子数量为 5×10^4 颗,速度为 1 ×

表 1　材料特性参数

Tab. 1　Characteristic parameters

项目	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	剪切模量/Pa
水稻	1 125	0.30	1.01×10^{8}
小麦	1 350	0.42	5.10×10^{7}
油菜	1 060	0.25	1.10×10^{7}
铝合金	2 700	0.30	2.70×10^{10}
ABS	1 060	0.394	8.96×10^{8}

表 2　接触模型参数

Tab. 2　Contact model parameters

项目		水稻	小麦	油菜
种子-种子	碰撞恢复因数	0.50	0.42	0.60
	静摩擦因数	0.50	0.35	0.50
	动摩擦因数	0.01	0.05	0.01
种子-铝合金	碰撞恢复因数	0.58	0.50	0.60
	静摩擦因数	0.43	0.40	0.30
	动摩擦因数	0.01	0.05	0.01
种子- ABS	碰撞恢复因数	0.45	0.60	0.75
	静摩擦因数	0.57	0.40	0.30
	动摩擦因数	0.01	0.05	0.01

10^5颗/s。仿真总时间设置为 10 s，在 Motion 中设置主轴为线性旋转运动，开始旋转时间为 0.5 s。仿真完成后提取 1 ~ 10 s 内运行数据并分析排种性能。

3.2　单因素仿真试验与结果分析

叶轮槽结构参数及供种转速是影响集排器高速供种性能的主要因素，为进一步探明各因素对供种性能的影响规律，确定性能较优的工作及结构参数范围，分别开展供种转速和叶轮槽结构参数单因素仿真试验，其中，水稻、小麦种子的试验因素为供种转速和叶轮槽高度，油菜种子的试验因素为供种转速和叶轮槽弧长。试验以供种速率和供种稳定性变异系数为供种性能评价指标。

3.2.1　供种转速对供种性能的影响规律

试验时，水稻、小麦供种转速单因素试验转速为 40 ~ 130 r/min，相邻水平间隔 10 r/min，油菜供种单因素试验转速为 30 ~ 75 r/min，间隔 5 r/min 为一个水平，稻麦油供种转速单因素试验统计结果如图 9 所示。

由图 9a 可知，对于水稻种子，当转速为 40 ~ 100 r/min 时，随着转速的增加，供种速率随之增加，当转速超过 100 r/min 时，由于转速过高，充种时间缩短，单个槽体充种不足现象增加，供种速率逐渐降低；当转速为 40 ~ 80 r/min 时，供种性能较为稳定，当转速超过 80 r/min 时，随转速增加，供种速率稳定性变异系数增加。因此，当转速 60 ~ 80 r/min 时，水稻种子供种性能较优，此时供种速率为 2 037.72 ~ 2 537.02 g/min，供种稳定性变异系数小于 1.06%。

由图 9b 可知，对于小麦种子，当转速为 40 ~ 110 r/min 时，供种速率随着转速的增加而增加，当转速超过 110 r/min 时，由于转速过高，叶轮槽体难以完全填充，供种速率逐渐下降。当转速为 40 ~ 80 r/min 时，随着转速的增加，叶轮对种子的扰动性增加，种子流动性增强，供种稳定性变异系数逐渐降低，在 80 r/min 时达到最优。当转速超过 80 r/min 时，种子在叶轮高速旋转作用下，种子间的相互碰撞频率显著上升，充种稳定性降低，供种速率稳定性变异系数随转速的增加而增大。因此，小麦种子在转速 60 ~ 80 r/min 内性能较优，供种速率为 2 337.15 ~ 2 789.83 g/min，供种速率稳定性变异系数小于 0.56%。

由图 9c 可知，对于油菜种子，当转速为 30 ~ 75 r/min 时，转速增加，供种速率随之增加，且由于油菜种子流动性较好，供种稳定，供种速率稳定性变异系数较低。由于油菜种子相较水稻和小麦种子的供种需求量较低，综合考虑供种速率和供种稳定性，油菜种子性能较优的转速为 40 ~ 55 r/min，供种速率为 126.34 ~ 156.43 g/min，供种稳定性变异系数小于 0.58%。

3.2.2　叶轮结构参数对供种性能的影响规律

为探究叶轮结构参数对稻麦油供种性能的影响规律，确定性能较优的结构参数，开展叶轮槽体结构参数单因素试验。

由于水稻和小麦种子播量较大，供种需求量和调节范围较大，通过调整叶轮高度可调整供种机构容积进而大范围调整供种速率，因此对水稻和小麦开展叶轮槽体高度单因素试验，依据前文理论分析，

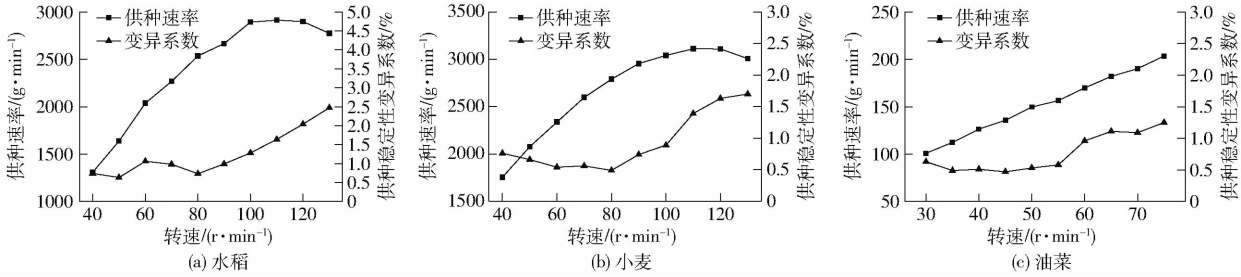


图 9　供种转速单因素仿真试验结果

Fig. 9　Single-factor simulation test results of seed feeding rotation speed

水稻、小麦叶轮槽体高度为 10 ~ 30 mm,相邻水平间隔 5 mm。油菜种子播量较小,供种量调节范围较小,通过弧长调节即可满足播量调节需求,因此对油菜开展叶轮弧长单因素试验,确定性能较优的结构参数,依据前文理论分析,油菜叶轮槽弧长为 3 ~ 11 mm,相邻水平间隔 2 mm。叶轮槽体结构参数单因素试验结果如图 10 所示。

由图 10a 可知,对于水稻种子,供种速率随着叶轮槽高度的增加呈增加趋势,但受充种时间限制,当叶轮槽高度大于 25 mm 时,充种不足造成供种速率有所下降。供种速率随着叶轮槽高度的增加呈先增加后下降的趋势,综合考虑供种速率和供种稳定性变异系数,当叶轮槽高度为 10 ~ 20 mm 时,水稻供种性能较优,供种速率为 1 636.28 ~ 2 037.72 g/min,供种稳定性变异系数小于 1.04%。

由图 10b 可知,对于小麦种子,随着叶轮槽高度的增加,供种速率逐渐增加,供种速率稳定性变异系数呈先降低后增加的趋势,综合考虑供种速率和供种稳定性变异系数,供种小麦种子时,叶轮槽高度为 15 ~ 25 mm 时较优,此时供种速率为 2 014.67 ~ 2 510.91 g/min,供种速率稳定性变异系数小于 0.82%。

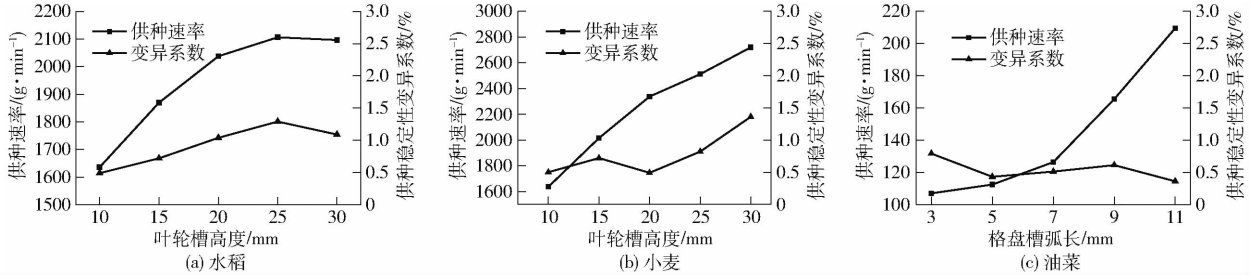


图 10 叶轮槽结构参数单因素仿真试验结果

Fig. 10 Single-factor simulation test results of structure parameters for grid plate groove

由图 10c 可知,对于油菜种子,当叶轮弧长为 3 ~ 7 mm 时,随弧长增加,供种速率缓慢增加,当叶轮弧长为 7 ~ 11 mm 时,随着弧长增加,供种速率显著增加,且在此范围内,供种速率稳定性变异系数较低。因此油菜种子供种较为稳定的叶轮槽体弧长为 7 ~ 11 mm,此时,供种速率为 126.34 ~ 209.37 g/min,供种稳定性变异系数小于 0.61%。

3.3 稻麦油供种速率回归模型建立

依据单因素试验结果,在供种性能较优的供种转速和叶轮结构参数范围内开展双因素三水平试验,分别建立稻麦油供种速率回归模型,为集排器高速(8 ~ 10 km/h)播种时满足不同作物和不同播量要求的参数匹配提供理论依据。试验因素水平设置及试验结果见表 3,方差分析结果见表 4。

根据双因素三水平试验结果,分别建立稻麦油种子供种速率回归模型为

$$\begin{cases} y_1 = 1\,316.488 - 10.234x_1 + 3.959x_2 + 1.004x_1x_2 + \\ \quad 0.107x_1^2 - 0.838x_2^2 \\ y_2 = -337.661 + 14.344x_1 + 95.470x_2 + 0.359x_1x_2 + \\ \quad 0.032x_1^2 - 1.661x_2^2 \\ y_3 = 407.932 - 16.960x_1 - 9.125x_2 + 0.673x_1x_2 + \\ \quad 0.615x_1^2 + 0.163x_2^2 \end{cases} \tag{8}$$

式中 y_1——水稻供种速率,g/min

表 3 稻麦油双因素三水平试验结果

Tab. 3 Results of two-factor three-level test for rice, wheat, and rapeseed

作物	试验编号	供种转速 x_1/(r·min⁻¹)	叶轮槽高度(弧长)x_2/mm	供种速率 y/(g·min⁻¹)
水稻	1	60	10	1 636.28
	2	70	10	1 798.36
	3	80	10	1 934.80
	4	60	15	1 869.64
	5	70	15	2 039.46
	6	80	15	2 259.65
	7	60	20	2 037.72
	8	70	20	2 267.65
	9	80	20	2 537.02
小麦	1	60	15	2 014.67
	2	70	15	2 238.12
	3	80	15	2 533.69
	4	60	20	2 337.15
	5	70	20	2 596.88
	6	80	20	2 789.83
	7	60	25	2 510.90
	8	70	25	2 799.36
	9	80	25	3 101.81
油菜	1	40	7	126.34
	2	45	7	135.80
	3	50	7	149.72
	4	40	9	165.40
	5	45	9	179.69
	6	50	9	209.48
	7	40	11	209.37
	8	45	11	232.15
	9	50	11	259.68

y_2——小麦供种速率，g/min

y_3——油菜供种速率，g/min

表 4　稻麦油双因素三水平试验方差分析结果

Tab. 4　Variance analysis of two-factor three-level test for rice, wheat, and rapeseed

评价指标	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2
y_1	<0.000 1 **	<0.000 1 **	0.005 6 **	0.359 5	0.125 0
y_2	0.000 6 **	0.000 5 **	0.447 9	0.919 1	0.249 9
y_3	0.000 6 **	<0.000 1 **	0.024 4 *	0.165 9	0.791 3

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

由表 4 可知，x_1、x_2、x_1x_2 对 y_1 影响极显著，其余因素影响不显著；x_1、x_2 对 y_2 影响极显著，其余因素影响不显著；x_1、x_2 对 y_3 影响极显著，x_1x_2 对 y_3 影响显著，其余因素影响不显著。剔除影响不显著因素后稻麦油供种速率回归模型为

$$\begin{cases} y_1 = 974.105 + 4.739x_1 - 21.175x_2 + 1.004x_1x_2 \\ y_2 = -359.837 + 26.044x_1 + 54.186x_2 \\ y_3 = 64.298 - 2.134x_1 - 6.185x_2 + 0.673x_1x_2 \end{cases} \tag{9}$$

水稻、小麦和油菜供种速率回归模型决定系数分别为 0.99、0.98 和 0.99，表明该回归模型能够较好的预测供种速率，可为集排器工作参数匹配及结构参数确定提供依据。

4　排种性能台架与田间验证试验

4.1　供种速率回归模型台架验证试验

为检验稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器实际排种性能，验证供种速率回归模型的准确性，开展台架验证试验，台架如图 11 所示。试验时，通过更换供种叶轮和调整供种转速调节作业参数。叶轮供种机构采用 3D 打印加工，加工高度分别为 10、15、20、25 mm 的叶轮用于水稻、小麦试验，分别加工弧长为 7、9、11 mm 的叶轮用于油菜试验。

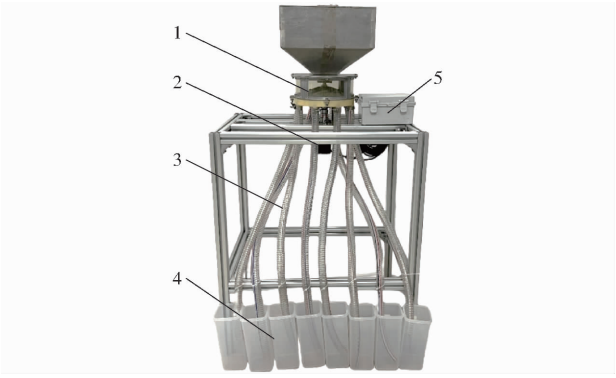


图 11　供种性能试验台

Fig. 11　Seed supply performance test bench

1. 集排器　2. 驱动电机　3. 导种管　4. 种子收集盒　5. 电控箱

验证试验以作业速度 8、9、10 km/h 为例展开，结合前文求得供种速率，依据式（9）求解较优参数组合，在较优参数组合下开展台架验证试验，并统计实际供种速率、种子破损率及相对误差作为评价指标。较优参数组合及验证试验结果如表 5 所示，由表 5 可知，当排种运行参数为较优参数组合时，种子破损率均小于稻麦油高速排种标准要求[28-30]，水稻供种速率实际值与理论值相对误差不高于 4.85%，小麦相对误差不高于 4.08%，油菜相对误差不高于 1.91%。

表 5　供种速率模型台架验证试验结果

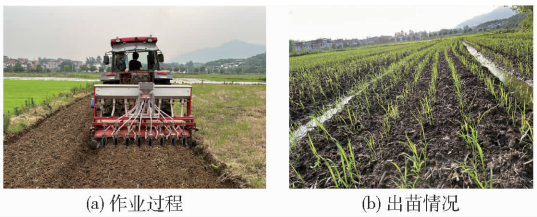
Tab. 5　Results of test verified by seed rate model bench

作物	作业速度/（km·h^{-1}）	理论供种速率/（g·min^{-1}）	转速/（r·min^{-1}）	叶轮槽高度（弧长）/mm	实际供种速率/（g·min^{-1}）	相对误差/%	破损率/%
水稻	8	2 000	67.9	15	1 964.32	1.78	<0.8
	9	2 250	68.5	20	2 359.16	4.85	
	10	2 500	78.6	20	2 587.92	3.48	
小麦	8	2 400	64.4	20	2 498.12	4.08	<0.5
	9	2 700	75.9	20	2 782.39	3.05	
	10	3 000	77.0	25	3 034.23	1.14	
油菜	8	160	40.0	9	162.79	1.74	<0.5
	9	180	43.7	9	181.47	0.82	
	10	200	48.7	9	203.81	1.91	

4.2　稻麦油田间播种试验

为检验稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器田间作业时高速排种性能，于 2024 年 6 月 7 日、10 月 22 日、11 月 19 日开展了水稻、油菜和小麦田间播种试验，集排器工作参数参照表 5 中较优参数组合设置，试验情况及出苗效果如图 12～14 所示。

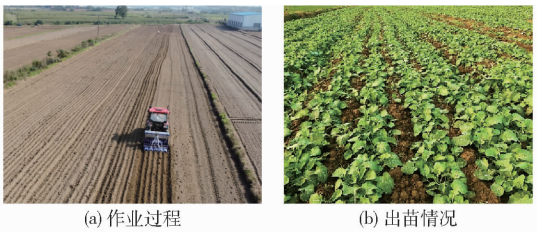
水稻旱直播试验于 2024 年 6 月 7 日在湖北省黄石市阳新县（29°56′N，115°14′E）进行，试验面积为 0.2 hm^2，试验时以东方红 LX954 型拖拉机为牵引动力，平均前进速度为 9 km/h，播种品种为“V 两



(a) 作业过程 (b) 出苗情况

图 12 水稻田间试验与出苗情况

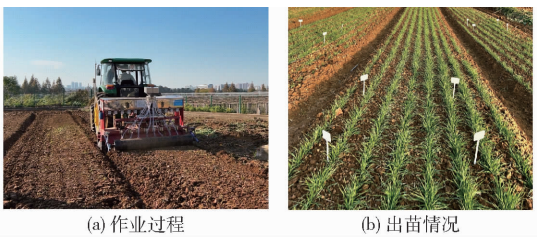
Fig. 12 Field test and seedling emergence of rice



(a) 作业过程 (b) 出苗情况

图 13 油菜田间试验与出苗情况

Fig. 13 Field test and seedling emergence of rapeseed



(a) 作业过程 (b) 出苗情况

图 14 小麦田间试验与出苗情况

Fig. 14 Field test and seedling emergence of wheat

优 336”,播种量设定为 75 kg/hm^2,播种行数为 8 行。播种 16 d 后,水稻出苗情况如图 12b 所示,随机取 5 处统计 1 m^{2}内出苗株数并计算其变异系数,经计算平均密度为 189 株/m^2,出苗均匀性变异系数低于 6%。

油菜田间播种试验于 2024 年 10 月 22 日在湖北省荆门市屈家岭(30°89′N,112°88′E)进行,试验时以油菜高速微垄直播机为作业平台,试验面积为 0.2 hm^2,平均作业速度为 10 km/h,油菜播种品种为“中双 18”,播量设定为 6.3 kg/hm^2。播种 40 d 后,出苗情况如图 13b 所示。经统计,油菜平均密度为 79 株/m^2,出苗均匀性变异系数低于 6%。

小麦田间播种试验于 2024 年 11 月 19 日在华中农业大学科技试验田(30°47′N,114°35′E)开展,试验时以约翰迪尔 1004 型拖拉机为牵引动力,机组平均作业速度为 8 km/h,播种品种为“郑麦 9023”,播种量为 90.6 kg/hm^2。播种 20 d 后,统计小麦平均密度为 229 株/m^2,出苗均匀性变异系数低于 10%。

田间试验表明,在作业速度 8 ~ 10 km/h 范围内,集排器运行参数为较优参数组合时,叶轮离心式集排器可实现水稻、小麦和油菜兼用播种,作业性能满足高速播种标准要求。

5 结论

(1)设计了稻麦油兼用高速叶轮离心式集排器,基于侧向供种方案设计了叶轮供种机构,开展种子损伤临界状态力学分析,阐述了高速供种工作原理。依据稻麦油播量要求及种子物理特性确定了叶轮结构参数:叶轮槽外径为 60 mm;播种水稻、小麦的叶轮槽内径为 32 mm,弧长为 20 mm,高度为 10 ~ 30 mm;播种油菜的叶轮槽内径为 56 mm,高度为 3 mm,弧长为 3 ~ 11 mm。

(2)开展 EDEM 单因素仿真试验,探究了供种转速及叶轮结构参数对供种性能的影响规律。结果表明:水稻、小麦、油菜种子当供种转速分别为 60 ~ 80 r/min、60 ~ 80 r/min 和 40 ~ 55 r/min,叶轮槽高度分别为 10 ~ 20 mm、15 ~ 25 mm 和 7 ~ 11 mm(弧长)时,供种性能较优。

(3)通过双因素三水平仿真试验,构建了水稻、小麦和油菜供种速率回归模型,经台架试验验证,水稻供种速率实际值与理论值误差不高于 4.85%,小麦相对误差不高于 4.08%,油菜相对误差不高于 1.91%,所建立的供种速率回归模型可为稻麦油兼用集排器高速作业参数匹配提供依据。

(4)稻麦油田间高速播种试验结果表明,当作业速度为 8 ~ 10 km/h 时,在较优参数组合下水稻、小麦和油菜出苗均匀性变异系数低于 10%,作业性能满足高速作业标准要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 高筱钧,于涞源,吴晓鹏,等. 气送式玉米高速精量排种器供种系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):66 - 75.
GAO Xiaojun, YU Laiyuan, WU Xiaopeng, et al. Design and experiment of intelligent seed supply system of air-assisted high speed precision maize seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1):66 - 75. (in Chinese)

[3] 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 pneumatic centrifugal combined precision seed metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10):35 - 45. (in Chinese)

[4] 高筱钧,王世同,吴晓鹏,等. 播种机气送式集排器增压管内种子流运移特性研究[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):47 – 56,75.
GAO Xiaojun, WANG Shitong, WU Xiaopeng, et al. Seed flow migration characteristics in booster tube of gas-fed collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 1):47 – 56,75. (in Chinese)

[5] 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2014.
CONG Jinling. Study on seeding system and mechanism of pneumatic precision metering device for wheat&rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2014. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 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)

[8] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1 – 11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1 – 11. (in Chinese)

[9] MALEKI M, MOUAZEN A, KETELAERE B, et al. A new index for seed distribution uniformity evaluation of grain drills[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(3): 471 – 475.

[10] 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(2):48 – 51,95.
LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):48 – 51,95. (in Chinese)

[11] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报,2014,45(2):109 – 114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):109 – 114. (in Chinese)

[12] VILLETTE S, PIRON E, MARTIN R, et al. Estimation of two-dimensional fertilizer mass flow distributions by recording granule impacts[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(4): 463 – 473.

[13] 曹秀英,廖庆喜,丛锦玲,等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊 1):40 – 46.
CAO Xiuying, LIAO Qingxi, CONG Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(Supp. 1):40 – 46. (in Chinese)

[14] 曹秀英,廖宜涛,廖庆喜,等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(9):77 – 84.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):77 – 84. (in Chinese)

[15] 李沐桐,李天宇,官晓东,等. 锥盘排种器离心推送结构设计与充种机理分析[J]. 农业机械学报,2018,49(3):77 – 85.
LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design on push structure of centrifugal cone seed-metering device and its filling mechanism analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3):77 – 85. (in Chinese)

[16] 王都,舒彩霞,廖宜涛,等. 集排离心式油菜精量排种器充种控制方法与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(6): 182 – 189.
WANG Du, SHU Caixia, LIAO Yitao, et al. Control method and test of seed-filling of centralized centrifugal precision seed-metering device for rapeseed[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(6): 182 – 189. (in Chinese)

[17] 朱龙图, 廖庆喜, 刘海, 等. 油菜机械离心式集排器排种量控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 19 – 29.
ZHU Longtu, LIAO Qingxi, LIU Hai, et al. Design and test of the seeding amount control system for the rape mechanical metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 19 – 29. (in Chinese)

[18] 姚露,廖庆喜,王磊,等. 油菜旋转盘式高速集排器螺旋供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(6):78 – 88.
YAO Lu, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiment of spiral seed feeding device in spinning disc high-speed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):78 – 88. (in Chinese)

[19] 姚露,廖庆喜,沈文惠,等. 基于 Bezier 曲线的油菜旋转盘式精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(7):56 – 66,83.
YAO Lu, LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, et al. Design and experiment of spinning disc precision centralized metering device for rapeseed based on Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):56 – 66,83. (in Chinese)

[20] 廖庆喜,沈文惠,王磊,等. 油菜高速机械离心式集排器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(7):154 – 167.
LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, WANG Lei, et al. Design and experiment of high-speed mechanical centrifugal centralized seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):154 – 167. (in Chinese)

(下转第 211 页)

Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 58 - 67. (in Chinese)
[23] 张青松,郑中原,廖庆喜,等. 农业工程领域耦合仿真技术应用现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(7):20 - 37,149.
ZHANG Qingsong, ZHENG Zhongyuan, LIAO Qingxi, et al. Application status and prospect of coupled simulation in agricultural engineering research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):20 - 37,149. (in Chinese)
[24] CHENG J, XIA J F, ZHENG K, et al. Construction and analysis of a discrete element model for calculating friction resistance of the typical rotary blades[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108303.
[25] 林建新, 廖庆喜, 康艳, 等. 油菜机械直播铲锹式种床整备机往复滑切刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 75 - 86.
LIN Jianxin, LIAO Qingxi, KANG Yan, et al. Oscillating slide-cutting blade in shovel-type seedbed preparation machinefor rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 75 - 86. (in Chinese)
[26] DU J, HENG Y, ZHENG K, et al. Investigation of the burialand mixing performance of a rotary tiller using discreteelement method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105349.
[27] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 99 - 110,195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 99 - 110,195. (in Chinese)
[28] 李蒙良, 廖庆喜, 裴立民, 等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 47 - 58,90.
LI Mengliang, LIAO Qingxi, PEI Limin, et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 47 - 58,90. (in Chinese)
[29] 杜文斌, 周国威, 张青松, 等. 油菜直播组合式埋茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 60 - 70.
DU Wenbin, ZHOU Guowei, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of the anti-blocking device combined stubble burying for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(5): 60 - 70. (in Chinese)

(上接第 51 页)

[21] 李晓冉,廖庆喜,王磊,等. 稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(14):35 - 48.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralized metering device for rice, wheat and rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 35 - 48. (in Chinese)
[22] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982:67 - 313.
[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] 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)
[25] WU Zhijun, LI Mengliang, LEI Xiaolong, et al. Simulation and parameter optimisation of a centrifugal rice seeding spreader for a UAV[J]. Biosystems Engineering,2020,192:275 - 293.
[26] 雷小龙,杨文浩,刘礼阳,等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 58 - 67.
LEI Xiaolong, YANG Wenhao, LIU Liyang, et al. Design and experiment of seed hill feeding device in pneumatic centralized metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11): 58 - 67. (in Chinese)
[27] 王磊,席日晶,廖宜涛,等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 62 - 72, 97.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62 - 72, 97. (in Chinese)
[28] 全国农业机械标准化技术委员会. 水稻直播机:GB/T 25418—2022[S]. 北京:中国农业出版社,2022.
[29] 全国农业机械标准化技术委员会. 播种机质量评价技术规范:NY/T 1143—2006[S]. 北京:中国农业出版社,2006.
[30] 全国农业机械标准化技术委员会. 油菜播种机作业质量:NY/T 2709—2015[S]. 北京:中国农业出版社,2015.