

丘陵山区油菜捡拾收获机双风道清选装置设计与试验

孙晓晓¹, 宗望远^{1,2*}, 马丽娜^{1,2}, 万星宇^{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: 针对丘陵山区油菜捡拾收获机清选系统存在脱出物堵塞、籽粒含杂率和损失率偏高等问题, 该研究设计了一种双风道清选装置, 主要由刮板输送机、加速辊、正压风机、旋风分离筒及负压风机等组成。基于清选过程脱出物动力学和运动学分析, 得到影响该装置工作性能的主要因素为加速辊转速、正压风机气流方向角及正压风机转速。采用 Fluent-EDM 气固耦合技术仿真模拟油菜脱出物清选过程, 探究清选过程脱出物各组分的运动轨迹, 验证清选装置作业性能。以加速辊转速、正压风机气流方向角及正压风机转速为影响因素, 含杂率和损失率为评价指标, 在自制清选装置台架上开展正交试验, 通过综合分析法得出最优参数组合为加速辊转速 1 100 r/min, 正压风机气流方向角 20°, 正压风机转速 1 400 r/min, 双风道清选装置籽粒含杂率为 2.35%, 籽粒损失率为 2.75%。以最优参数进行田间试验, 双风道清选装置籽粒含杂率为 3.05%, 籽粒损失率为 3.47%, 研究结果可为丘陵山区油菜机械化收获过程中清选装置的改进优化提供理论支撑。

关键词: 丘陵山区; 清选装置; 油菜捡拾收获机; 双风道; CFD-DEM 耦合

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410204

中图分类号: S225.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-10-0427-11

孙晓晓, 宗望远, 马丽娜, 等. 丘陵山区油菜捡拾收获机双风道清选装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(10): 427-437. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410204 <http://www.tcsae.org>

SUN Xiaoxiao, ZONG Wangyuan, MA Lina, et al. Design and testing of a dual-airduct cleaning device for oilseed rape harvesters in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(10): 427-437. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410204 <http://www.tcsae.org>

0 引言

油菜是国内第一大油料作物, 2023 年其种植面积占全国油料作物种植面积的 50% 以上^[1-2], 国内油菜种植期主要为冬播期, 其种植面积占全国的 88%, 主要种植在长江流域的多熟制的丘陵山区^[3-4]。目前, 国内油菜机械收获方式分为联合收获和分段收获, 相比较于联合收获, 分段收获更适合丘陵山区油菜收获^[5-7]。清选作业是油菜机械化收获过程中的重要环节, 直接影响油菜籽粒的含杂率和损失率, 因此, 研制高效低损的清选装置, 对提升丘陵山区油菜机械化收获作业性能有重要意义。

近年来, 国内外学者对清选装置的主要研究分为两类。一是气流清选筒式: 如廖庆喜等^[8]针对传统油菜联合收获机风筛式清选装置结构复杂和振动大等问题, 首次将旋风分离技术引入油菜联合收获清选, 含杂率降至 3.02%, 损失率 6.54% 偏高; 万星宇等^[9]通过凸块结构扰动气流场, 解决油菜联合收获机旋风分离筒内存在“死区”等问题, 含杂率和损失率较高, 分别为 6.13%

和 4.21%; ELSAYED 等^[10]基于 CFD 仿真和遗传算法优化, 提出了新型低压降旋风分离器设计方法, 降低能耗, 但缺乏田间试验; WASILEWSKI 等^[11]引入反锥室增强气流湍流效应, 通过 CFD 仿真明确反锥室倾角与分离效率的关联性, 但未考虑物料特性对反锥室性能的影响; HUANG 等^[12]利用 CFD 双向耦合技术建立脱出物喂入量与分离效率的耦合模型, 揭示喂入量下对旋风分离器作业性能影响规律, 但未集成实时控制技术。李心平等^[13]针对高含水率谷码研制了一款辊搓圆筒筛式谷子清选装置, 试验表明籽粒含杂率为 1.64%、总损失率为 0.86%, 但其结构复杂, 维护成本较高; 二是风筛式: 王晗昊等^[14]采用六叶片式离心风机提高物料分层效率, 田间试验验证籽粒含杂率为 1.52%, 损失率为 1.11%, 但其结构尺寸较大, 通用性较差; 侯俊铭等^[15]针对蓖麻收获缺乏专用清选装置, 设计了一种双层倾斜振动风筛式清选装置, 台架试验验证实际筛分效率为 93.15%, 但其损失率 (6.94%) 和振动能耗高; John Deere 公司开发的多风道清选系统, 作业时清选系统内气流场平稳、清选性能和能效比高^[16]; 李洋等^[17]研制了一种多风道清选试验台, 揭示物料对气流场的非线性扰动规律, 但未考虑工况适用性。

综上所述, 目前关于清选装置的研究主要是针对旋风分离筒、“风道+振动筛”的结构设计和参数优化两方面, 对多风道和旋风分离筒的组合式清选装置鲜有探索。丘陵山区田块零碎分散, 高低不平, 相比较于振动筛结

收稿日期: 2024-10-28 修订日期: 2025-04-14

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-12)

作者简介: 孙晓晓, 博士生, 研究方向为现代农业装备工程。

Email: 1873795912@qq.com

*通信作者: 宗望远, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代农业装备设计与测控。Email: zwy@mail.hzau.edu.cn

构, 旋风分离筒解决了体积和振动大等问题, 但现有结构多采用抛扬装置与其配合, 扬谷轮与油菜籽粒作用速度过大, 籽粒易碎裂, 针对上述问题, 本文基于油菜脱出物物料特性, 设计一种双风道清选装置, 通过物料清选过程动力学和运动学分析, 明确影响清选装置作业性能的主要因素, 在自制的台架上进行正交试验, 获取较优参数组合, 旨在为丘陵山区油菜高效低损机械化分段收获提供技术参考。

1 整机结构与工作原理

丘陵山区油菜捡拾收获机行走方式为自走式, 主要由捡拾割台、脱粒分离装置、清选装置、动力系统及行走装置等组成, 其结构如图 1 所示。整机作业时, 捡拾割台将晾晒后的油菜植株抬起, 通过链耙输送机送至脱粒分离装置进行脱粒, 再由刮板输送机送至清选装置, 清选后的籽粒落入集粮袋。整机主要技术参数如表 1 所示。

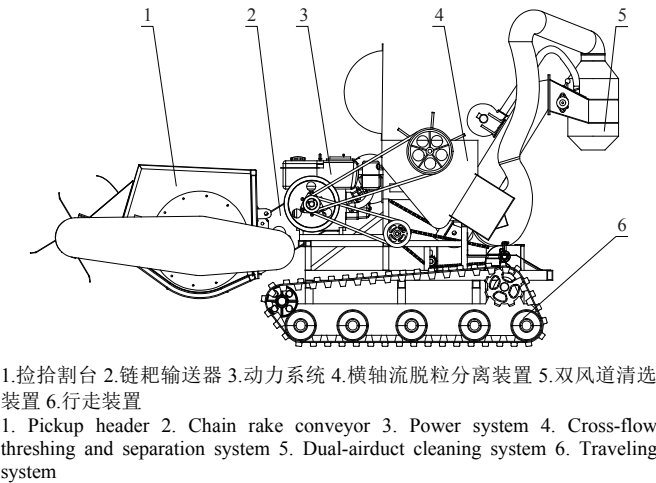


图 1 丘陵山区油菜捡拾收获机结构示意图
Fig.1 Structural diagram of rape pickup harvester for hilly and mountainous areas

表 1 丘陵山区油菜捡拾收获机主要技术参数		
Table 1 Main technical parameters of rape pickup harvester for hilly and mountainous areas		
项目 Items	参数值 Parameters value	
作业幅宽 Working width/mm	1 500	
作业速度 Operating speed/(km ² ·h ⁻¹)	1.4~3.6	
长×宽×高 (Length×width×height) /mm×mm×mm	3 300×1 500×1 500	
发动机额定功率 Engine rated power/kW	7.5	

1.1 双风道清选装置基本结构与工作过程

1.1.1 双风道清选装置基本结构

双风道清选装置清选方式为气流式, 整体结构图示意图如图 2 所示, 主要由刮板输送机、正压风机、加速辊、负压风机、旋风分离筒及籽粒和杂余收集仓组成。其主要参数如表 2 所示。

其中, 正压风机吹风口位于加速辊清选室上, 进气口内安装有可调节拨片, 通过旋转拨片实现气流角度的调节, 负压风机通过吸杂管道与旋风分离筒上锥段出口吸杂口连接, 加速辊清选室与中间圆柱段相连, 下锥段出口为出粮口。

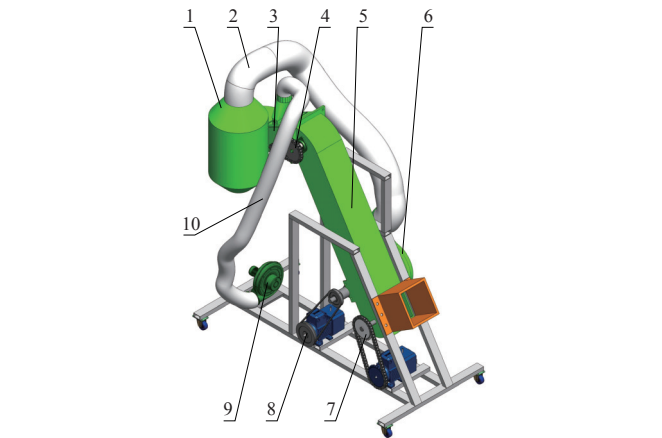


图 2 双风道清选装置总体结构示意图
Fig.2 Overall structural diagram of dual-airduct cleaning device

1. 旋风分离筒 2. 吸杂风管 3. 加速辊清选室 4. 加速辊动力驱动系统 5. 刮板输送机 6. 负压风机 7. 刮板输送机动力驱动系统 8. 负压风机动力驱动系统 9. 正压风机 10. 吹风管
1. Cyclone separation cylinder 2. Impurity suction duct 3. Acceleration roller cleaning chamber 4. Acceleration roller drive system 5. Scraper conveyor 6. Negative pressure fan 7. Scraper conveyor power drive system 8. Negative pressure fan power drive system 9. Positive pressure fan 10. Air blow pipe

表 2 双风道清选装置结构及性能参数
Table 2 Structural and performance parameters of dual-airduct cleaning device

项目 Items	参数值 Parameters value
结构尺寸 (长×宽×高) Structure size (Length×width×height)/mm×mm×mm	1 180×600×1 484
旋风分离筒吸杂口直径 Cyclone separator cylinder inlet diameter/mm	120
旋风分离筒圆柱端外径 Cyclone separator cylinder outer diameter/mm	260
旋风分离筒出粮口直径 Cyclone separator grain outlet diameter/mm	110
喂入量 Feeding rate/(kg·s ⁻¹)	0.35
损失率 Loss rate/%	≤6.5
含杂率 Impurity rate/%	≤5

1.1.2 双风道清选装置工作原理

作业时, 先启动电机驱动刮板输送机、加速辊及风机, 待工作平稳后, 将油菜脱出物按比例从喂入口喂入刮板输送机, 刮板输送机将油菜脱出物以一定初速度送至加速辊清选室, 在加速辊和正压风机气流的作用下, 加速后的油菜脱出物被抛出切向进入旋风分离筒, 在旋风分离筒内负压风机气流作用下, 油菜脱出物产生分离现象, 短茎秆和轻杂余从负压风机的吸杂口排出, 油菜籽粒从旋风分离筒的出粮口落下, 完成清选作业, 双风道清选装置作业流程图如图 3 所示。

2 双风道清选装置关键部件设计

2.1 刮板输送机

刮板输送机配合喂入螺旋输送机做倾斜升运。由输送链条上装橡胶刮板, 油菜脱出物沿壳体刮运。橡胶刮板尺寸为 0.14 m×0.07 m, 输送方式为下刮式, 在刮板的作用下, 做抛物运动。刮板输送器的输送量 Q (kg/s) 可按 (1) 式计算:

$$Q = BVhv_0\phi k$$

(1)

式中 B 、 h 为刮板的宽度和高度, m ; V 为输送物料单位容积质量, kg/m^3 ; v_0 为刮板升运速度, 取 2 m/s ; ϕ 为充满系数, 取 0.75 ; k 为倾斜系数, 取 0.3 ^[18]。

经实际测量, 输送油菜脱出物的单位容积质量 V 为 61.73 kg/m^3 , 根据式 (1) 计算得输送量 Q 为 $0.36\text{ m}^3/\text{s}$, 满足脱粒装置脱出物升运量。

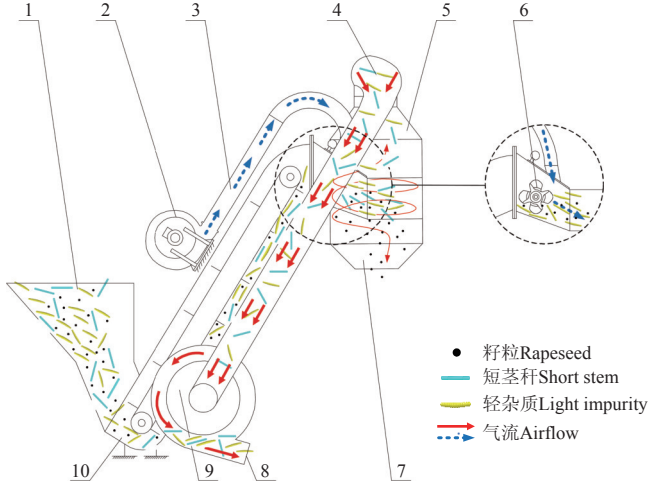


图 3 双风道清选装置作业流程图

Fig.3 Operational flowchart of dual-airduct cleaning device

2.2 加速辊结构设计

由工作原理可知, 为实现旋风分离筒的有效分离, 需确保油菜脱出物以一定初速度切向进入筒体。经过刮板输送机输送后的脱出物初速度较小, 易在输送机与旋风分离筒的衔接处产生堵塞, 为此, 在两者衔接部位增设加速辊, 以防止堵塞并加速脱出物。

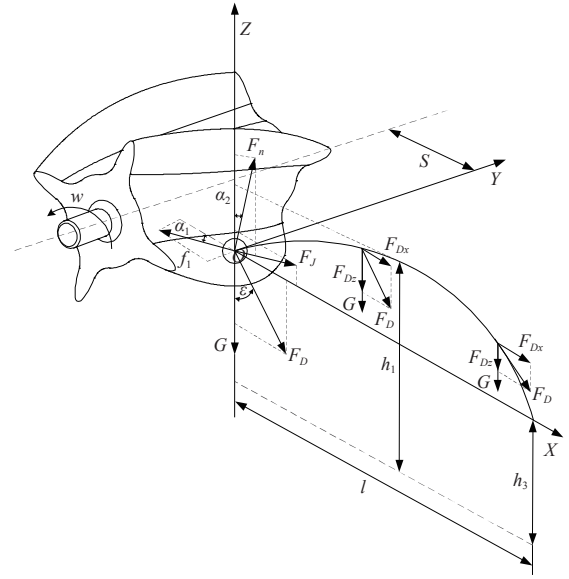
为探究影响清选装置工作性能的主要因素, 分析脱出物在加速辊清选室内运动规律, 开展脱出物动力学和运动学分析。

2.2.1 脱出物动力学分析

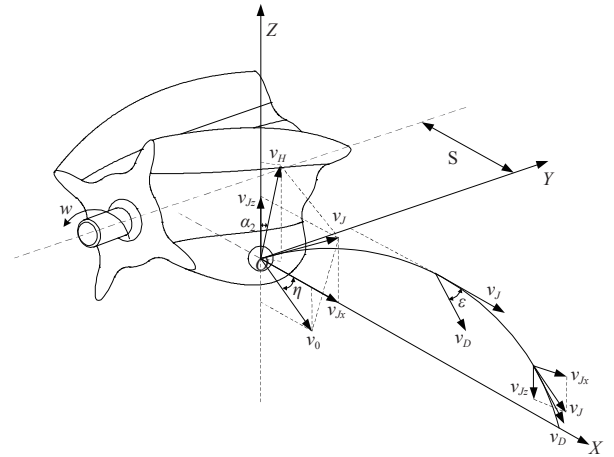
如图 4 所示, 以脱出物中心 O 为原点, 加速辊拨板表面为平面坐标系的 XY 平面, 建立空间坐标系, 其中 X 指向油菜脱出物抛送方向, Z 轴方向垂直于地面方向。在刮板输送装置工作过程中, 脱出物被刮板抛送出, 自由落体的距离较短, 落到加速辊拨板上的初速度 v_0 较小, 且正压风机给在拨板上的脱出物斜向下的气流等效力, 因此脱出物落在加速辊上不会被弹起。

如图 4a 所示, 对刚落到加速辊拨板上及抛出的脱出物进行受力分析。脱出物受重力 G 、正压风机气流等效力 F_D 、离心力 F_J 、拨板支持力 F_N 和摩擦力 f_1 。脱出物在加速辊拨板上受力方程为

$$\begin{cases} F_x = F_J \cos \alpha_1 - f_1 \cos \alpha_1 + F_D \sin \varepsilon + F_n \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \\ F_z = F_n \cos \alpha_2 - mg - F_D \cos \varepsilon \\ F_J = mw^2 S \end{cases} \quad (2)$$



a. 受力分析
a. Force analysis



b. 运动速度分析
b. Velocity analysis

注: α_1 为螺旋角, ($^\circ$); α_2 为拨板支持力 F_n 与 Z 轴夹角, ($^\circ$); ε 为正压风机气流方向角, ($^\circ$); F_{Dx} 为 F_D 在 X 方向的分力, N ; F_{Dz} 为 F_D 在 Z 方向的分力, N ; h_1 为脱出物上升的最大高度, m ; h_3 为旋风分离筒进料口高度, m ; S 为物料颗粒距轴中心的距离, mm ; l 为抛出距离, mm ; η 为刮板升运速度 v_0 与 X 轴夹角, ($^\circ$); v_{Jx} 为 v_J 在 X 方向的分速度, $m \cdot s^{-1}$; v_{Jz} 为 v_J 在 Z 方向的分速度, $m \cdot s^{-1}$; v_D 为在正压风机作用下脱出物所获速度, $m \cdot s^{-1}$ 。

Note: α_1 is the spiral angle, ($^\circ$); α_2 is the angle between the paddle support force F and the Z -axis, ($^\circ$); ε is the direction angle of the airflow from the positive pressure fan, ($^\circ$); $a_{F_{Dx}}$ is the acceleration of the ejected material in the X -direction, $m \cdot s^{-2}$; $a_{F_{Dz}}$ is the acceleration of the ejected material in the Z -direction, $m \cdot s^{-2}$; F_{Dx} is the component force of F_D in the X -direction, N ; F_{Dz} is the component force of F_D in the Z -direction, N ; h_1 is the maximum rising height of the ejected material, m ; h_3 is the inlet height of the cyclone separator cylinder, m ; S is the distance of the material particles from the axis center, mm ; l is the throw distance, mm ; η is the angle between the scraper lifting speed v_0 and the X -axis, ($^\circ$); v_{Jx} is the component velocity in the X -direction, $m \cdot s^{-1}$; v_{Jz} is the component velocity in the Z -direction, $m \cdot s^{-1}$; v_D is the velocity of residues acquired under the action of the positive-pressure fan, $m \cdot s^{-1}$ 。

图 4 脱出物在加速辊清选室内的受力与运动分析

Fig.4 Force and motion analysis of residues in acceleration roller cleaning chamber

脱出物在加速辊拨板上受到的合力为

$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_z \quad (3)$$

式中 F_x 为脱出物在 X 方向上受力合力, N ; F_z 为脱出物

在 Z 方向上受力合力, N ; w 为加速辊旋转角速度, rad/s ; m 为脱出物质量, kg ; g 为重力加速度, m/s^2 ; t 为脱出物运动到距轴中心线所用时间, s 。

在合力作用下脱出物所获得的速度为

$$v_H = \int \frac{F}{m} dt \quad (4)$$

脱出物离开加速辊前的合速度为

$$v_J = v_H + v_0 \quad (5)$$

v_J 为脱出物离开加速辊前的合速度, v_0 为刮板输送机升运速度及脱出物落到加速辊上的初速度

2.2.2 脱出物运动学分析

脱出物在拨板的转动下被抛送至加速辊清选室内, 对其进行动力学和运动学分析时需要考虑正压风机气流等效力 F_D 的影响。在清选室内脱出物各方向的加速度为

$$\begin{cases} a_{F_{Dx}} = \frac{F_{Dx}}{m} \\ a_{F_{Dz}} = \frac{F_{Dz}}{m} \\ F_{Dx} = F_D \cos \varepsilon \\ F_{Dz} = F_D \sin \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

以脱出物中心 O 为原点, 加速辊拨板表面为平面坐标系的 XY 平面, 建立空间坐标系, X 轴指向脱出物抛出的方向, Z 轴垂直于地面上。脱出物在加速辊清选室内的动力学和运动学分析在 XOZ 平面上的运动轨迹投影如图 4 所示。在加速辊清选室内运动方程为

$$\begin{cases} l = v_{Jx} t_2 + \int_0^{t_2} \int_0^{t_2} a_{F_{Dx}} dt dt \\ h_1 = v_{Jz} t_1 - \int_0^{t_1} \int_0^{t_1} (a_{F_{Dz}} + g) dt dt + h_3 \\ v_{Jz} = \int_0^{t_1} (a_{F_{Dz}} + g) dt \end{cases} \quad (7)$$

式中 $a_{F_{Dx}}$ 为脱出物 X 方向的气流加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; $a_{F_{Dz}}$ 为脱出物 Z 方向的气流加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; l 为抛出距离, m ; t_1 为脱出物上升至最高点的时间, s ; t_2 为脱出物在清选室内运动的总时间, s 。

由式 (7) 可知, v_{Jx} 决定抛出距离的关键因素, 由式 (2) ~ (4) 可知, v_J 由 v_H 和 v_0 共同决定的, v_H 主要取决于加速辊转速和加速间隙; $a_{F_{Dz}}$ 决定上升最大高度, 由式 (6) 可知, F_D 主要取决于正压风机转速及气流方向角大小, 故加速辊转速、正压风机转速和气流方向角大小是关键因素。

根据整机的结构布局, 清选室内的安装空间有限, 为避免加速辊与清选室产生干涉, 加速辊的半径为 20 mm , 叶片高度为 30 mm , 加速辊轴心到清选室下板的垂直距离为 6 mm , 考虑脱出物与拨板相对滑动时的滑动摩擦角, 结合工程实践经验, 拨板螺旋角为 25° , 拨板数量为 4, 结构如图 5 所示。

2.3 正压风机转速确定

正压风机选用吹出型农用风机。清选室内的气流作业速度应大于油菜脱出物的最大悬浮速度 v_l (7.3 m/s)^[19], 则风机产生的全压 P_a 为

$$\begin{cases} P_a = P_d + P_j \\ P_d = \frac{\rho v_a^2}{2} \\ v_a = \lambda v_l \end{cases} \quad (8)$$

式中 P_d 为出风口动压, Pa ; P_j 为风机出风口静压, 取 200 Pa ; v_a 为风机出风口风速, m/s ; λ 为速度增大系数, 取 1.1 ^[20]; ρ 为空气密度, 取 1.292 kg/m^3 , 计算得 $P_a \geq 241 \text{ Pa}$ 。

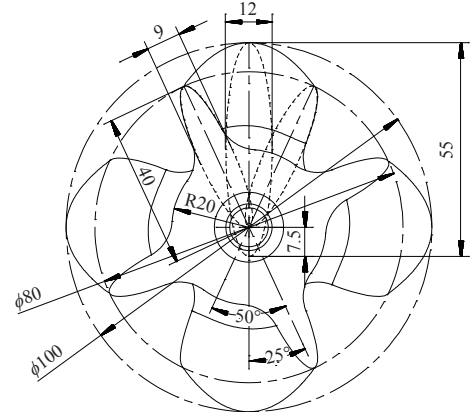


图 5 加速辊结构图

Fig.5 Structural diagram of acceleration roller

吹出型农用正压风机叶轮直径 D_1 大多在 $300 \sim 500 \text{ mm}$, 设计中取 350 mm , 则风机转速 n 为

$$n = \frac{60}{\pi D_1} \sqrt{\frac{P_a}{\tau \rho}} \quad (9)$$

式中 τ 为计算系数, 取 0.4 ^[21]。

带入 P_a 计算得出 $n=1180 \text{ r/min}$, 据此确定吹出型正压风机最小转速为 1200 r/min 。

3 仿真分析

为验证双风道清选装置作业性能, 借助 CFD-DEM 耦合仿真技术探究脱出物各成分在双风道清选装置内运动规律和空间位移变化。通过对脱粒装置筛下物分析可得, 油菜脱出物主要包含油菜籽粒、短茎秆和轻杂质, 割台喂入量为 1.5 kg/s 时, 脱粒装置脱出物输出量为 0.35 kg/s , 油菜脱出物中油菜籽粒、短茎秆和轻杂质质量之比为 $1:1.5:0.5$ ^[22]。结合样机前期预试验设定加速辊转速为 1100 r/min , 正压风机转速 1600 r/min , 正压风机气流方向角为 20° , 经实测本研究所用吹出型农用风机在该转速下, 出风口转速为 12 m/s 。

参考相关文献^[23-26] 在 EDEM 中建立油菜脱出物中油菜籽粒、短茎秆和轻杂质颗粒离散元模型, 如图 6 所示, 其中油菜籽粒为球形, 直径为 2 mm ; 短茎秆为长 40 mm , 直径 3 mm 的长圆柱形, 轻杂质根据实际形状进行简化。各脱出物的力学特性和物料接触系数见表 3 和表 4。创建颗粒工厂 Factory 并设置物料生成相关参数, 选择 Herz-mindlin (no slip) 模型, 设置时间步长为 $2 \times 10^{-7} \text{ s}$, 启动 Coupling server。

在 Fluent 中, 读取耦合接口 Journal 文件手动与

EDEM 进行耦合，选择 Realizable K-epsilon 标准壁面函数（SWF）湍流模型，设置边界条件参数，选则 Coupled 压力速度耦合方案，确保耦合计算稳定性，EDEM 与 Fluent 时间步长应为整数倍关系，因此设置 Fluent 时间步长为 1×10^{-4} s，进行耦合仿真。

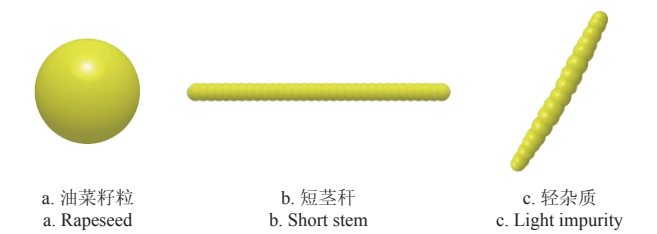


图 6 油菜脱出物模型
Fig.6 Rapeseed threshed residue model

表 3 油菜脱出物力学特性

Table 3 Mechanical properties of rapeseed threshed residues				
物料 Materials	泊松比 Poisson ratio	剪切模量 Shear modulus /MPa	密度 Density/ (kg·m ⁻³)	
油菜籽粒 Rapeseed	0.25	1.1×10^7	1 060	
短茎秆 Short stem	0.40	1.5×10^6	494	
轻杂质 Light impurity	0.40	1.0×10^6	80	
加速辊 Acceleration roller	0.30	1.0×10^{10}	7 850	

表 4 物料接触系数

Table 4 Material contact coefficients				
物料 Materials	接触物料 Contact material	碰撞恢复系数 Collision recovery factor	静摩擦系数 Dynamic friction coefficient	动摩擦系数 Static friction coefficient
油菜籽粒 Rapeseed	油菜籽粒	0.6	0.5	0.01
	短茎秆	0.6	0.4	0.01
	轻杂质	0.6	0.8	0.01
	加速辊	0.6	0.3	0.01
短茎秆 Short stem	短茎秆	0.3	0.7	0.01
	轻杂质	0.2	0.7	0.01
	加速辊	0.4	0.8	0.01
轻杂质 Light impurity	轻杂质	0.2	0.7	0.01
	加速辊	0.2	0.7	0.01

3.1 油菜脱出物与气流互作过程

为探究装置内气流对油菜脱出物清选效果的影响，利用 Tecplot 后处理软件，得到双风道清选装置气流速度云图和油菜脱出物与气流互作流线图，如图 7 所示。

由图 7a 可知，加速辊清选室和旋风分离筒内均无涡流产生，加速辊清选室内气流流速沿流向递减，旋风分离筒内气流运动分为高速区和低速区，高速区为吸风口垂直区域，低速区为靠近壁面环形区域。由图 7b 可知，脱出物在加速辊清选室受气流作用，切向进入旋风分离筒，短茎秆（黄色球型颗粒）、轻杂质（绿色球型颗粒）随气流方向运动，籽粒（黑色球形颗粒）在加速辊清选室右壁上产生滑移分层；在旋风分离筒内脱出物在自身重力、气流作用力、离心力和与筒壁间的相互作用力的共同作用下达达到分层分离效果，形成螺旋运动，短茎秆颗粒和轻杂质颗粒在高速区直接被吸走，籽粒颗粒在低速区螺旋下落。清选过程中脱出物随着气流的方向运动，相对运动轨迹统一，脱出物对气流的影响效果较小，气流对脱出物运动影响较大。

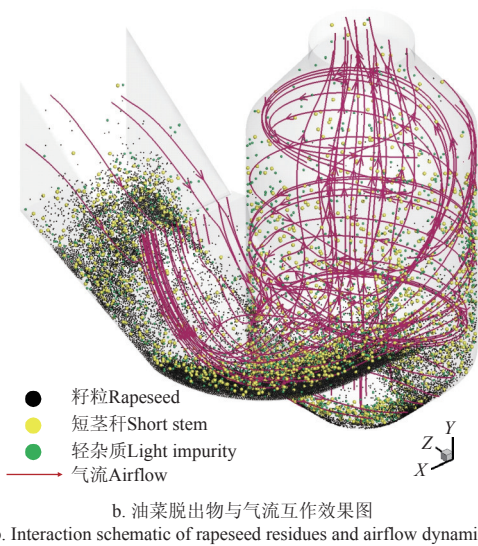
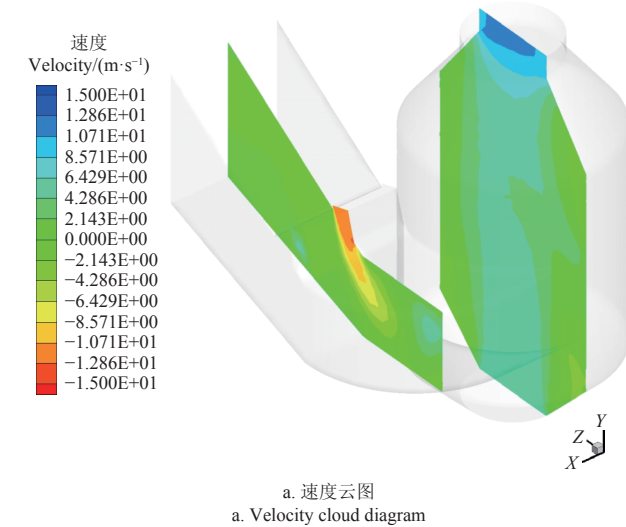


图 7 双风道清选装置脱出物-流场状态图
Fig.7 Residue-flow field dynamic state diagram in the dual-airduct cleaning device

3.2 油菜脱出物运动规律

在 EDEM 软件中获得双风道清选装置作业时脱出物速度变化过程，如图 8 所示。随机选取作业时装置中的油菜籽粒、短茎秆、轻杂质颗粒作为数据提取对象，可得到单颗粒运动轨迹，如图 9 所示。

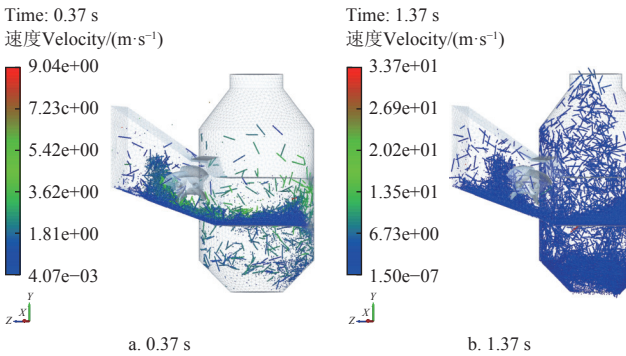


图 8 不同时刻清选装置内脱出物速度分布
Fig.8 Velocity distribution of residues in dual-airduct cleaning device at different time intervals

如图 8~9 可知，脱出物经加速辊抛出后各组分颗粒

速度增加,进入加速辊清洗室气流场瞬时被气流沿着壁面的切线方向导流,进入旋风分离筒并处于悬浮状态,脱出物颗粒在旋风分离筒内的气流速度稳定,在负压风机与正压风机双气流作用下,旋风分离筒内产生负压,对油菜脱出物颗粒进行分离清选,因油菜籽粒的临界悬浮速度大于短茎秆和轻杂质的临界悬浮速度,油菜籽粒在重力的作用下朝出粮口做螺旋下降运动进入集粮袋,短茎秆和轻杂质在筒内随气流朝吸风口做螺旋上升运动,在此运动过程中由于颗粒与筒壁间的相互作用力,产生分层现象,轻杂质和短茎秆依次被排出。

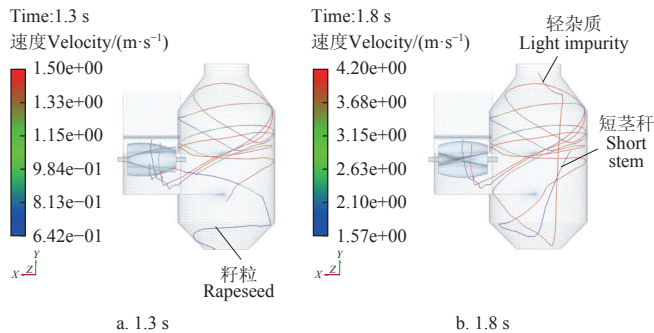


图9 不同时刻清选装置内脱出物运动轨迹

Fig.9 Movement trajectories of residues in dual-airduct cleaning device at different time intervals

3.3 油菜脱出物运动分离机理

在 EDEM 软件中随机选取单个颗粒单元并提取其轴向平均速度与位移数据,得到双风道清选装置油菜脱出物运动速度与位移变化曲线,如图 10 所示。

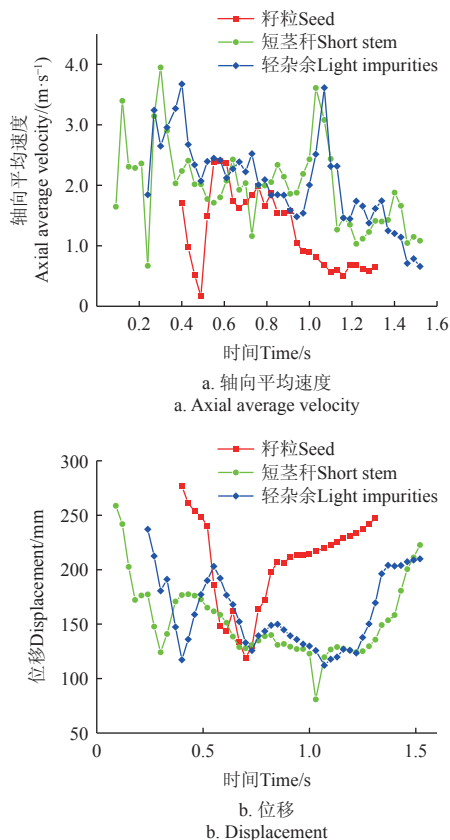


图 10 油菜脱出物轴向平均运动速度与位移

Fig.10 Axial average motion velocity and displacement of rapeseed residues

由图 10 可知,脱出物的速度均有两次大幅度的变化,第一次为加速辊加速作用,第二次为正压风机气流作用,其中籽粒颗粒最大速度与最小速度差为 2.4 m/s,位移变化量为 276.52 mm,短茎秆颗粒最大速度与最小速度差为 3.61 m/s,位移变化量为 258.72 mm,轻杂质颗粒最大速度与最小速度差为 3.67 m/s,位移变化量为 237.05 mm。

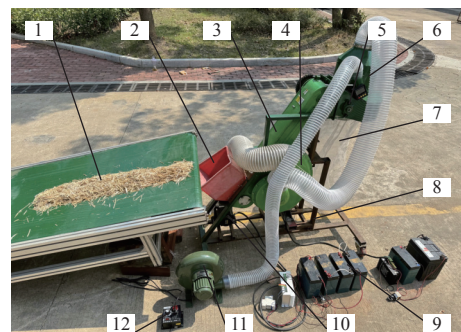
仿真结束后通过统计可得含杂率为 2.29%,损失率为 2.71%,表明该双风道清选装置能够完成油菜籽粒的清选工作,整体结构设计合理。

4 台架试验

为验证双风道清选装置作业效果,2024 年 4 月于华中农业大学工程训练中心开展台架试验。油菜脱出物由物料输送装置经过喂入料斗喂入刮板输送机,在加速辊、正压风机、负压风机和旋风分离筒的共同作用下实现籽粒与杂质的分离。

4.1 试验设备与仪器

试验过程使用的设备和仪器主要有:自制双风道清选装置试验台(图 11),永磁直流无刷电机,无刷驱动器,电子秤(量程 0~3 000 g,精度 0.01 g)、德力西转速表(范围 2.5~99 999 r/min,精度:±0.05%)、变频器、得力风速测定仪(范围 0~30 m/s,准确度:±5%,精度:±0.05 m/s)、数显倾角仪(量程 0~360°,精度:±0.1°)等仪器和设备。



1.物料输送装置 2.喂入料斗 3.刮板输送机 4.负压风机 5.加速辊清洗室 6.旋风分离筒 7.籽粒收集装置 8.机架 9.动力控制组 10.电机 11.正压风机 12.变频器
1. Material conveying device 2. Feed hopper 3. Scraper conveyor 4. Negative pressure fan 5. Acceleration roller cleaning chamber 6. Cyclone separation cylinder 7. Grain collection unit 8. Machine frame 9. Power control module 10. Motor 11. Positive pressure fan 12. Frequency converter

图 11 双风道清选装置台架试验

Fig.11 Bench test of dual-airduct cleaning device

4.2 试验材料及方法

试验材料为经过丘陵山区油菜捡拾机脱粒处理后“华油杂 62”油菜脱出物,主要由油菜籽粒(千粒质量 4.2 g),短茎秆(20 mm 以上)和轻杂质组成,悬浮速度分别为 6.3~7.0 m/s、6.5~7.3 m/s、5.4~6.1 m/s^[19],质量占比分别为 33%、50%、17%。田间作业时,受地形、割晒天数、割幅一致性、留茬高度等因素影响,导致田间作业实际喂入量难以精准,故台架试验采用 0.2 kg/s 的喂入量。

参照 DG/T 057-2019《油菜籽收获机》,选取加速辊转速、正压风机转速、正压风机气流倾角为试验因素,

含杂率和损失率为试验指标，开展正交试验。试验开始前根据试验要求调整正压风机和负压风机转速，调整正压风机气流方向角，将油菜脱出物按比例均匀铺放在在输送带上，启动电源，在刮板输送机作业平稳后，启动输送带将油菜脱出物依次喂入刮板输送机。

每组试验结束后，收集出粮口收集袋内的油菜籽粒质量 m_1 (g)，杂质总质量 m_2 (g)，排杂口油菜籽粒质量 m_3 (g)。含杂率 Y_1 和损失率 Y_2 的计算式为

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{m_3}{m_1 + m_3} \times 100\% \end{cases} \quad (10)$$

4.3 单因素试验

为得出加速辊转速、正压风机气流方向角和转速对双风道清选装置作业性能的影响规律，根据上文分析及目前油菜收获机清选装置作业参数^[27-30]，在自制的双风道清选装置试验台架上在加速辊转速 800~1 200 r/min，正压风机气流方向角 5°~25°，正压风机转速 1 200~2 000 r/min 范围内进行单因素试验。

4.3.1 加速辊转速对清选性能的影响

固定正压风机气流方向角 20°、转速 1 400 r/min，在加速辊转速 800~1 200 r/min 范围内选 5 个水平进行试验，结果如图 12 所示。随着加速辊转速的增加，含杂率和损失率逐渐增加，分析原因可知：当转速为 800 r/min 时，加速辊转速低于脱出物运动速度，大部分脱出物无法及时抛送至清选室，在加速辊拨片底部出现堆积，且加速辊转速过低不能有效地加速脱出物，导致含杂率和损失率较低；当转速增加至 1 200 r/min 时，加速辊对脱出物加速作用过大，干扰了籽粒与杂质的分层效果及加速辊转速过高时易造成籽粒破损，导致含杂率和损失率较高。因此，加速辊转速优选区间为 1 000~1 200 r/min。

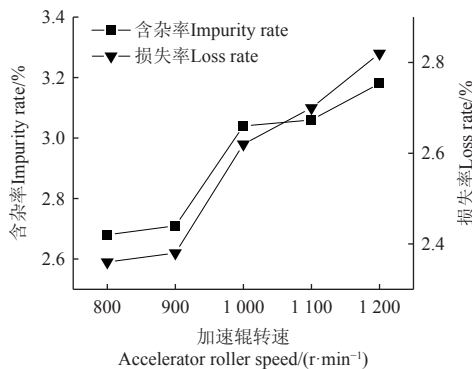


图 12 加速辊转速对清选性能的影响

Fig.12 Effect of acceleration roller speed on cleaning performance

4.3.2 正压风机气流方向角对清选性能的影响

固定加速辊转速 1 100 r/min，正压风机转速 1 400 r/min，在正压风机气流方向角 5°~25°范围内选 5 个水平进行试验，结果如图 13 所示。随着气流方向角的增加，含杂率和损失率均急剧下降后趋于平缓，分析原因可知：当气流方向角为 5°时，气流接近垂直进入加速辊清选室并径直作用在底板上，导致流场紊乱，此时物料极易堆积在

加速辊清选室两侧无法达到悬浮效果，故含杂率和损失率过高；当气流方向角为 15°~25°时，加速辊清选室流场较为平稳，脱出物在气流的作用下易产生分离现象。因此，正压风机气流方向角优选区间为 15°~25°。

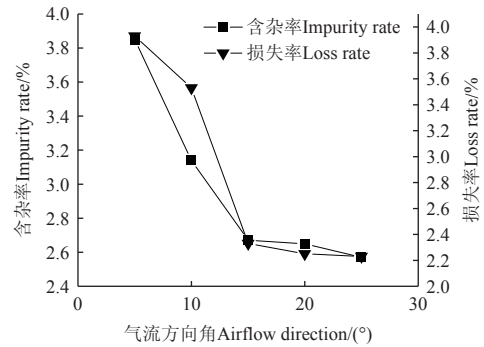


图 13 正压风机气流方向角对清选性能的影响

Fig.13 Effect of airflow direction angle of positive pressure fan on cleaning performance

4.3.3 正压风机转速对清选性能的影响

固定加速辊转速 1 100 r/min，正压风机气流方向 20°，在正压风机转速 1 200~2 000 r/min 范围内选 5 个水平进行试验，结果如图 14 所示。随着正压风机转速的增加，含杂率逐渐减小，损失率逐渐增大。分析原因可知：当正压风机转速为 1 200 r/min 时，气流速度小于短茎秆与轻杂质的悬浮速度，脱出物在加速辊清选室无法实现分层，故含杂率过高，损失率较低；当正压风机转速为 2 000 r/min 时，气流速度大于籽粒的悬浮速度，部分籽粒夹杂在短茎秆与轻杂质中被负压风机排出，导致损失率过高。因此，正压风机转速优选区间为 1 400~1 800 r/min。

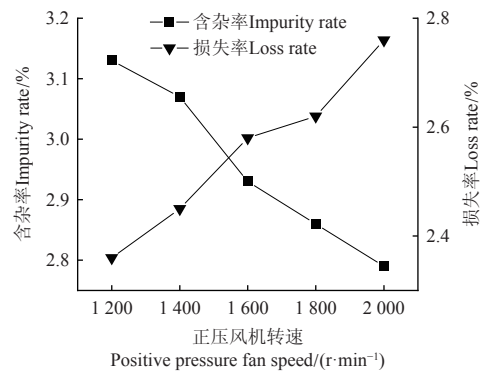


图 14 正压风机转速对清选性能的影响

Fig.14 Effect of positive pressure fan speed on cleaning performance

4.4 正交试验

以加速辊转速 A 、正压风机气流方向角 B 、正压风机转速 C 为试验因素，以含杂率 Y_1 和损失率 Y_2 为评价标准，开展三因素三水平正交试验。依据单因素试验结果，加速辊转速在 1 000~1 200 r/min，正压风机气流方向角在 15°~25°，正压风机转速在 1 400~1 800 r/min，含杂率和损失率都较低，试验因素水平见表 5。

试验方案及结果见表 6，试验结果表明，双风道清选装置在不同的参数条件下，含杂率和损失率均小于 5%。

表 5 因素水平表
Table 5 Factor levels

水平 Level	加速辊转速 Acceleration roller speed $A/(r \cdot \min^{-1})$	气流方向角 Airflow direction $B/(^{\circ})$	正压风机转速 Positive pressure fan speed $C/(r \cdot \min^{-1})$
-1	1 000	15	1 400
0	1 100	20	1 600
1	1 200	25	1 800

表 6 正交试验方案及结果
Table 6 Orthogonal experimental design and results

试验号 No.	a	b	c	含杂率 Impurity rate $Y_1/\%$	损失率 Loss rate $Y_2/\%$
1	1	1	1	2.81	2.43
2	1	2	2	2.75	2.42
3	1	3	3	2.70	2.44
4	2	1	2	2.74	2.40
5	2	2	3	2.69	2.41
6	2	3	1	2.75	2.35
7	3	1	3	2.73	2.46
8	3	2	1	2.79	2.38
9	3	3	2	2.72	2.39

注: a 、 b 、 c 为 A 、 B 、 C 的水平值。
Note: a , b , c is the level value of A , B , C .

对试验结果进行极差分析, 如表 7 所示, 影响含杂率大小的试验因素顺序为 C 、 B 、 A , 较优参数组合为 $A_1B_1C_1$, 影响损失率大小的试验因素顺序为 C 、 A 、 B , 较优参数组合为 $A_1B_1C_3$ 。

表 7 试验结果极差分析
Table 7 Range analysis of experimental results

指标 Index	项目 Items	A	B	C
Y_1	k_1	2.754	2.757	2.782
	k_2	2.726	2.744	2.736
	k_3	2.744	2.723	2.707
	R	0.029	0.033	0.076
	较优水平 主次因素	$A_1B_1C_1$ C 、 B 、 A		
Y_2	k_1	2.430	2.430	2.386
	k_2	2.386	2.403	2.403
	k_3	2.410	2.392	2.437
	R	0.044	0.038	0.051
	较优水平 主次因素	$A_1B_1C_3$ C 、 A 、 B		

利用 SPSS 软件对试验结果进行方差分析, 结果如表 8, 正压风机转速对双风道清选装置含杂率和损失率影响均极显著 ($P<0.01$); 加速辊转速对双风道清选装置含杂率影响显著 ($P<0.05$), 对双风道清选装置损失率影响极显著; 正压风机气流方向角对双风道清选装置影响均为显著。

表 8 试验结果方差分析
Table 8 Variance analysis of experimental results

指标 Index	因素 Factor	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方差 Standard deviation	F	P
Y_1	A	0.001	2	0.001	52.00	0.019
	B	0.002	2	0.001	91.00	0.011
	C	0.009	2	0.004	403.00	0.002
Y_2	A	0.003	2	0.001	127.00	0.008
	B	0.002	2	0.001	97.000	0.010
	C	0.004	2	0.002	175.00	0.006

为全面评估各试验因素对双风道清选装置含杂率和损失率的影响, 采用一种基于指标重要性的加权综合评价法, 指标隶属计算公式为

$$M = \frac{N - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \quad (11)$$

式中 N 为评价指标隶属度, N 为评价指标值, $N_{\min}$ 为评价指标最小值, $N_{\max}$ 为评价指标最大值。

因实际清选作业中往往以减损为目标, 保证减少损失的前提下, 籽粒含杂率小, 所以拟定含杂率权重为 0.4, 损失率权重为 0.6, 为了评估效果, 采用综合得分作为评价标准, 该分数的加权方式计算式为 (12), 计算结果如表 9 所示。

表 9 综合分数分析结果
Table 9 Comprehensive score analysis results

序号 No.	a	b	c	含杂率隶属度 Membership of impurity rate	损失率隶属度 Membership of loss ratio	综合评分 Comprehensive score
1	1	1	1	1.00	0.74	-0.04
2	1	2	2	0.54	0.65	-0.17
3	1	3	3	0.11	0.82	-0.45
4	2	1	2	0.40	0.47	-0.12
5	2	2	3	0.00	0.56	-0.34
6	2	3	1	0.51	0.00	0.21
7	3	1	3	0.31	1.00	-0.47
8	3	2	1	0.86	0.29	0.17
9	3	3	2	0.23	0.38	-0.14

$$u = 0.4u_1 + 0.6u_2 \quad (12)$$

式中 u 为综合评分, u_1 为含杂率隶属度, u_2 为损失率隶属度。

综合评分极差分析表明 (表 10): 最优参数组合为加速辊转速 1 100 r/min, 正压风机气流方向角 20°, 正压风机转速 1 400 r/min, 影响双风道清选装置清选效果的因素主次顺序为正压风机转速、加速辊转速、正压风机气流方向角; 以优选参数组合为条件, 进行台架验证试验, 多次试验取平均值, 得出双风道清选装置的含杂率为 2.35%, 损失率为 2.75%。

表 10 综合分数极差分析
Table 10 Range analysis of comprehensive scores

项目 Items	A	B	C
k_1	-0.220	-0.213	0.110
k_2	-0.084	-0.113	-0.144
k_3	-0.149	-0.127	-0.419
R	0.136	0.099	0.530
较优水平 主次因素	$A_2B_2C_1$ C 、 A 、 B		

4.5 田间试验

截止 2024 年 5 月, 已加工试制了两轮丘陵山区油菜捡拾收获机。两轮样机将割台方形喂入口改为锥形, 清选装置采用刮板输送机将脱出物以一定初速度送入旋风分离筒, 2024 年加设加速辊和第二风道提高脱出物初速度。

2024 年 5 月在华中农业大学油菜试验田开展田间试验, 试验对象为割晒后晾晒 5~7d “华油杂 62” 油菜。选定 4 个长 10 m 的作业区, 每个作业区测试 1 次, 取平均值。样机作业宽幅为 1 500 m, 前进速度为 1.4~3.6 km/h, 试验现场如图 15 所示。

每个作业区结束后收集、称量出粮口收集袋内油菜籽粒和杂质、双风道清选装置排杂口籽粒、负压风机籽

粒和排草口籽粒，按照公式（13）~（14）计算籽粒含杂率 T_1 和损失率 T_2 。



图 15 田间试验
Fig.15 Field test

$$T_1 = \frac{M_1}{M_2} \times 100\% \tag{13}$$

$$T_2 = \frac{M_3}{M_8} \times 100\% \tag{14}$$

式中 M_1 为双风道清选装置出粮口收集袋内籽粒与杂质总质量，g； M_2 为双风道清选装置出粮口收集袋内杂质质量，g； M_3 为作业区籽粒损失总质量， $M_3=M_4+M_5+M_6$ ，g；其中 M_4 为双风道清选装置排杂口籽粒质量，g； M_5 为负压风机出口籽粒质量，g； M_6 为排草口籽粒质量，g； M_8 为籽粒总质量， $M_8=M_4+M_5+M_6+M_7$ ，g； M_7 为捡拾割台籽粒损失质量，g。

田间试验过程中，捡拾割台捡拾喂入顺畅，清选装置无堵塞现象，测得双风道清选装置籽粒含杂率平均值为 3.05%，籽粒损失率平均值 3.47%，试验结果如表 11，双风道清选装置清选后油菜籽粒含杂率和损失率均小于 5%，低于单风道清选装置，且满足油菜籽粒分段收获标准。

表 11 清选性能对比

Table 11 Cleaning performance comparative

项目 Items	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
双风道清选装置 Dual-airduct cleaning device	3.05	3.47
单风道清选装置 ^[8] Single air channel cleaning device	9.79	6.54
标准值 Standards value	≤5	≤6.5

5 结 论

- 1) 设计了一种双风道清选装置，主要由刮板输送机、加速辊、正压风机、旋风分离筒和负压风机等组成，为防止清选室堵塞及加速脱出物，设计了加速辊装置，该装置长 180 mm，直径 100 mm，拨板螺旋角 25°，拨板数量 4。
- 2) 基于对清选过程中脱出物动力学和运动学分析，得出加速辊转速、正压风机气流方向角和正压风机转速为影响双风道清选装置作业性能的主要因素，为验证双风道清选装置作业性能，利用 CFD-DEM 气固耦合技术，对清选过程进行仿真模拟。
- 3) 对台架试验正交试验分析得到：双风道清选装置

最优参数组合为加速辊转速 1 100 r/min，正压风机气流方向角 20°，正压风机转速 1 400 r/min，在最优参数组合下含杂率为 2.35%，损失率为 2.75%；田间试验表明，双风道清选装置籽粒含杂率为 3.05%，籽粒损失率 3.47%，结果满足油菜分段收获标准。

[参 考 文 献]

[1] 殷艳, 尹亮, 张学昆, 等. 我国油菜产业高质量发展现状和对策[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(8): 1-7.
YIN Yan, YIN Liang, ZHANG Xuekun, et al. Status and countermeasure of the high-quality development of rapeseed industry in china[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(8): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[2] 刘成, 冯中朝, 肖唐华, 等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485-489.
LIU Cheng, FENG Zhongchao, XIAO Tanghua, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(4): 485-489. (in Chinese with English abstract)

[3] 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 with English abstract)

[4] 顾峰玮, 胡志超, 曹明珠, 等. 丘陵山区用轻简型 4LZ—1.0Q 稻麦联合收割机的研制[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 148-154.
GU Fengwei, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of 4LZ—1.0Q type lightweight-simplified combine harvester of rice & wheat with hilly and mountainous area[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 148-154. (in Chinese with English abstract)

[5] 胡进雄. 油菜生产全程机械化存在的问题及对策[J]. 农业机械, 2020(3): 94-95.

[6] 吴传云, 冯健, 陈兴和, 等. 油菜联合机收与分段机收作业效果综合测评[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(2): 1-6.
WU Chuanyun, FENG Jian, CHEN Xinghe, et al. Comprehensive evaluation of the effectiveness of combined and segmented rapeseed harvesting operations[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(2): 1-6. (in Chinese with English abstract)

[7] 石增祥, 吴明亮, 杨文敏, 等. 我国油菜分段收获机械研究现状与发展对策[J]. 农业工程, 2015, 5(5): 1-4.
SHI Zengxiang, WU Mingliang, YANG Wenmin, et al. Research status and development measures of rape segment harvester in china[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(5): 1-4. (in Chinese with English abstract)

[8] 廖庆喜, 万星宇, 李海同, 等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 24-31.
LIAO Qingxi, WAN Xingyu, LI Haitong, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(14): 24-31. (in Chinese with English abstract)

[9] 万星宇, 袁佳诚, 廖庆喜, 等. 油菜联合收获机凸块扰流式旋风分离清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 159-172.
WAN Xingyu, YUAN Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of cyclone separation cleaning device with

- raised cylinder disturbing airflow field for rapeseed combine harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 159-172. (in Chinese with English abstract)
- [10] ELSAYED K. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using Co-Kriging[J]. Powder Technology, 2015, 269: 409-424.
- [11] WASILEWSKI M. Analysis of the effect of counter-cone location on cyclone separator efficiency[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 179: 236-247.
- [12] HUANG A N, ITO K, FUKASAWA T, et al. Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018, 90: 61-67.
- [13] 李心平, 孟亚娟, 张家亮, 等. 辊搓圆筒筛式谷子清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 92-102, 136. LI Xinping, MENG Yajuan, ZHANG Jialiang, et al. Design and test of cleaning device for roller rubbing cylinder sieve of millet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 92-102, 136. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王晗昊, 李耀明, 徐立章, 等. 再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 84-92. WANG Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 84-92. (in Chinese with English abstract)
- [15] 侯俊铭, 任兆坦, 朱红杰, 等. 双层倾斜振动风筛式蓖麻清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S2): 39-51. HOU Junming, REN Zhaotan, ZHU Hongjie, et al. Design and test of double-layer inclined vibrating air-screen castor cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S2): 39-51. (in Chinese with English abstract)
- [16] 车艳. 约翰迪尔 S660 型联合收获机[J]. 现代化农业, 2014(10): 40.
- [17] 李洋, 徐立章, 周莹, 等. 脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 48-55. LI Yang, XU Lizhang, ZHOU Ying, et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 48-55. (in Chinese with English abstract)
- [18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册 (下) [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [19] 林蜀云, 刘伟, 张明, 等. 5TG-100A 型油菜脱粒机结构设计[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(7): 208-211. LIN Shuyun, LIU Wei, ZHANG Ming. Structure design of 5TG-100A rape thresher[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(7): 208-211. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王飞, 阿力木·买买提吐尔逊, 张俊三, 等. 玉米籽粒收获机组合筛面预筛分式清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 135-147, 166. WANG Fei, ALIMU Maimaititursun, ZHANG Junsan, et al. Design and experiment of pre-screening cleaning device for combined screen surface of corn grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 135-147, 166. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘正怀, 郑一平, 王志明, 等. 微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 102-108. LIU Zhenghuai, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 102-108. (in Chinese with English abstract)
- [22] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27-35. WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 27-35. (in Chinese with English abstract)
- [23] 舒彩霞, 杨佳, 万星宇, 等. 联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 34-43. SHU Caixia, YANG Jia, WAN Xingyu, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 34-43. (in Chinese with English abstract)
- [24] 吴崇友. 油菜机械化收获技术[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2017.
- [25] 詹广超, 马丽娜, 黄小毛, 等. 油菜脱粒过程中茎秆碰撞破碎的试验研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 11-18. ZHAN Guangchao, MA Lina, HUANG Xiaomao, et al. Experimental study on impact crushing of rapeseed stalks during threshing of oilseed rape[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(24): 11-18. (in Chinese with English abstract)
- [26] 施新新, 吴崇友, 李骅, 等. 两种油菜收获脱出物的物理机械特性及空气动力学特性测定与分析[J]. 江西农业学报, 2018, 30(6): 104-108. SHI Xinxin, WU Chongyou, LI Hua, et al. Measurement and analysis of physical mechanical properties and aerodynamic characteristics of harvesting extractions from two rape varieties[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(6): 104-108. (in Chinese with English abstract)
- [27] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 117-125+247. DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117-125+247. (in Chinese with English abstract)
- [28] 任述光, 陈赛, 吴明亮, 等. 小型油菜联合收获机双风道气流清选装置的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2020, 46(4): 472-479. REN Shuguang, CHEN Sai, WU Mingliang, et al. Design and experimental study of the air cleaning device with double air duct for small rapeseed combined harvest[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2020, 46(4): 472-479. (in Chinese with English abstract)
- [29] 金诚谦, 李庆伦, 倪有亮, 等. 小麦联合收获机双出风口多风道清选作业试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 26-34. JIN Chengqian, LI Qinglun, NI Youliang, et al. Experimental study on double air outlet multi-ducts cleaning device of wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of

Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 26-34. (in Chinese with English abstract)

- [30] 宗望远, 魏鑫鑫, 马丽娜, 等. 食葵联合收获机圆筒清选筛结构优化与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 44-53.
ZONG Wangyuan, WEI Xinxin, MA Lina, et al. Structural

optimization and experiments of cylinder cleaning sieve for the edible sunflower combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(6): 44-53. (in Chinese with English abstract)

Design and testing of a dual-airduct cleaning device for oilseed rape harvesters in hilly and mountainous areas

SUN Xiaoxiao¹, ZONG Wangyuan^{1,2*}, MA Lina^{1,2}, WAN Xingyu^{1,2}

(1. College of Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: To address the issues of residue blockage, high seed impurity rates, and high loss rates in the cleaning system of rapeseed pickup harvesters operating in hilly and mountainous terrains, this study designed a dual-airduct cleaning device. The system consists of a scraper conveyor, an acceleration roller, a positive pressure fan, a cyclone separation cylinder, and a negative pressure fan. To prevent blockages in the cleaning chamber and accelerate residue removal, the acceleration roller was designed with a length of 180 mm, a diameter of 100 mm, a spiral blade angle of 25°, and four blades. Based on the kinematic and dynamic analysis of the residue during the cleaning process, the main factors affecting the performance of the device were identified as the acceleration roller speed, the airflow direction angle of the positive pressure fan, and the speed of the positive pressure fan. To validate the performance of the dual-airduct cleaning device, Fluent-EDEM gas-solid coupling simulations were conducted for the rapeseed residue cleaning process. The simulation was set with an acceleration roller speed of 1 100 r/min, a positive pressure fan speed of 1 600 r/min, and a positive pressure fan airflow direction angle of 20°. During the cleaning process, residues moved in the direction of the airflow, with uniform relative movement trajectories and minimal impact of the residues on the airflow. The airflow had a greater impact on the residue motion. The motion trajectories of different residue components showed that the velocity of the residues underwent two significant changes: the first due to the acceleration roller's action, and the second due to the positive pressure fan airflow. The simulation results indicated that the velocity change of different residue components varied significantly, allowing for better separation of seeds, stems, and impurities, achieving effective cleaning. After the simulation, statistical analysis revealed a seed impurity rate of 2.29% and a loss rate of 2.71%, indicating that the dual-airduct cleaning device was capable of completing the cleaning of rapeseed seeds with a reasonable overall structural design. Using the acceleration roller speed, positive pressure fan airflow direction angle, and positive-pressure fan speed as influencing factors, with seed impurity rate and loss rate as evaluation indices, bench tests were carried out with a feeding rate of 0.2 kg/s. Single-factor tests were conducted within the following ranges: acceleration roller speed (800-1 200 r/min), positive pressure fan airflow direction angle (5°-25°), and positive pressure fan speed (1 200-2000 r/min). The optimal parameter ranges were found to be: acceleration roller speed (1 000-1 200 r/min), airflow direction angle (15°-25°), and fan speed (1 400-1 800 r/min). Based on the single-factor test results, a three-factor, three-level orthogonal experiment was performed. SPSS software was used for range and variance analysis of the test results, which showed that the positive pressure fan speed had an extremely significant effect on both impurity and loss rates. The acceleration roller speed had a significant effect on the impurity rate and an extremely significant effect on the loss rate. The airflow direction angle had a significant effect on both performance metrics. To comprehensively evaluate the impact of each experimental factor on the seed impurity and loss rates, a weighted comprehensive evaluation method was used. Since, in actual cleaning operations, loss reduction is prioritized while keeping the seed impurity rate low, the impurity rate weight was set at 0.4 and the loss rate weight at 0.6. A comprehensive score was used as the evaluation standard. The analysis showed that the main influencing factors on cleaning performance were: positive pressure fan speed, acceleration roller speed, and airflow direction angle. The optimal parameter combination was found to be: acceleration roller speed of 1 100 r/min, airflow direction angle of 20°, and positive pressure fan speed of 1 400 r/min. Under these settings, the dual-airduct cleaning device achieved a seed impurity rate of 2.35% and a loss rate of 2.75%. Field trials with these optimized parameters showed smooth material feeding with no blockage in the pickup header. The average impurity rate was 3.05%, and the average loss rate was 3.47%. The test results confirmed that both rates were below 5%, outperforming single-airduct cleaning systems and meeting the segmented rapeseed harvesting standards. This study provides theoretical support for the improvement and optimization of cleaning devices in the mechanized rapeseed harvesting process in hilly and mountainous areas.

Keywords: hilly and mountainous areas; cleaning device; rapeseed pickup harvester; dual-airduct; CFD-DEM coupling