doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.018

油菜联合收获后含杂油菜籽复清机设计与试验

廖庆喜[1,2]　王　昌[1]　何　坤[1]　袁佳诚[1]　万星宇[1]
(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: 针对现有油菜联合收获机收获作业时油菜籽粒细小不易分离导致收获后籽粒含杂率高、人工复清劳动强度大、缺乏晾晒前机械化复清装备的生产实际问题,设计了一种适于油菜联合收获机作业后含杂油菜籽的复清机。通过运动学和动力学分析确定了螺旋输送装置、离心振动式筛分装置和侧向风选装置的结构及其运行参数,解析了离心振动式筛分装置离心过程和振动过程,基于 CFD 分析了清选罩壳内部气流场状态。以振动频率、垂直振幅和离心风机出风口风速为影响因素,以油菜联合收获后含杂油菜籽复清机籽粒含杂率和筛分效率为评价指标,开展了单因素试验与正交试验,确定了较优运行参数组合。单因素试验结果表明:振动频率在 12.08 ~ 14.61 Hz,垂直振幅在 3.59 ~ 3.64 mm,离心风机出风口风速在 5 ~ 7 m/s 范围内时,清选性能较优;正交试验结果表明:影响含杂率因素主次为离心风机出风口风速、振动频率、垂直振幅,影响筛分效率因素主次为振动频率、垂直振幅、离心风机出风口风速,确定较优参数组合:振动频率为 14.61 Hz、垂直振幅为 3.61 mm、离心风机出风口风速为 7 m/s,在此参数组合下,油菜联合收获后含杂油菜籽复清机的籽粒含杂率平均值为 0.53%,筛分效率平均值为 98.39%,符合油菜籽粒后续存储标准(含杂率小于 3%)。

关键词: 油菜; 含杂籽粒; 复清机; 离心振动; 筛分
中图分类号: S226.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0175-11　　**OSID**:

Design and Experiment on Re-cleaning Machine for Rapeseed after Combine Harvesting

LIAO Qingxi[1,2]　WANG Chang[1]　HE Kun[1]　YUAN Jiacheng[1]　WAN Xingyu[1]
(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: After conventional combine harvesting, high impurity rate and large labor consumption due to the small size of rapeseed that makes the seed hard to be separated, are still the problems that remained to be solved, highlighting the necessity of the mechanized re-cleaning equipment before the drying process. As a solution, a re-cleaning machine for rapeseed after combine harvesting was put forward. Systematically, the structure and operating parameters of the key components, including the screw conveyor device, centrifugal-vibrating screening device and lateral air separation device, were determined by kinematics and dynamic analyses. Furthermore, the centrifugal motion and vibration motion of the centrifugal-vibrating screening device were also analyzed. Based on CFD, the status of the airflow field inside the shell of the lateral air separation device was figured out. Finally, a single factor experiment and an orthogonal combination experiment were carried out to determine the optimal combination of operating parameters by taking the vibration frequency, vertical amplitude, and air velocity of fan outlet as influencing factors, and considering the impurity rate and screening efficiency as evaluation indexes. The results of the single factor experiment indicated that the cleaning performance was better when the vibration frequency, vertical amplitude, and air velocity of the fan outlet were in the ranges of 12.08 ~ 14.61 Hz, 3.59 ~ 3.64 mm, and 5 ~ 7 m/s, respectively. What's more, the results of the orthogonal experiment illustrated that the primary and secondary factors affecting the impurity rate were the air velocity of the fan outlet, vibration frequency, and vertical amplitude. Meanwhile, the primary and

收稿日期: 2020-11-11　修回日期: 2020-12-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(52075210)、湖北省农业科技创新行动项目和中国博士后科学基金项目(2020M682438)
作者简介: 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

secondary factors affecting the screening efficiency were the vibration frequency, vertical amplitude, and air velocity of fan outlet. The optimal parameter combination was obtained when the vibration frequency, vertical amplitude, and the air velocity of fan outlet were 14.61 Hz, 3.61 mm, and 7 m/s, respectively. Under optimal parameter combination conditions, the average impurity rate was 0.53% which met the requirement of subsequent storage of rapeseeds (impurity rate was lower than 3%), and the screening efficiency could achieve 98.39%. The research result can provide a reference for the structural improvement and optimal design of the screening device for rapeseed.

Key words: rapeseed; miscellaneous grains; re-cleaning machine; centrifugal-vibrating; screening

0 引言

目前,国内油菜联合收获机多由稻-麦联合收获机改装而来,适应性不强导致收获后籽粒含杂率较高[1]。相关学者在降低油菜联合收获机含杂率与损失率方面做了大量研究,主要集中在割台研究[2-4]、脱粒装置研究[5]及清选装置研究[6-8]方面,但受籽粒细小不易分离、油菜脱出物组分糅杂、含水率较高等因素的影响,联合收获机清选后的油菜籽粒中依旧含有较多轻细杂余,含杂率有待进一步降低。而我国对联合收获后的籽粒处理大部分仍停留在传统人工清选方式上,机械化程度不高,难以适应细小油菜籽粒与轻细杂余的分离,影响储存安全和后续加工的成品质量。

油菜籽清选是为了清除杂质、提高品质,一般可根据油菜籽与杂质之间的物理特性差异确定有效的分离方法,如:颗粒度、比重差及空气动力学特性等[9]。国内油料的清理多采用筛选法,常用的油菜籽筛选设备有平面回转筛和振动筛[10-11]。廖庆喜等[12]基于含杂油菜籽各组分空气动力学特性差异设计了一种离心气流清选和回转筛选组合式的清选试验台;王立军等[13]在利用 CFD-DEM 耦合技术对传统双层往复振动筛清选装置内气固两相流动进行仿真基础上,设计一种分段式振动圆孔筛清选装置;王豪东等[14]基于 EDEM 模拟了物料在回转组合多层筛筛选过程中的运动情况,得到了较优结构及运行参数组合;BARBOSA 等[15]基于图像分析技术开展了振动筛上固液分离动力学研究;曾乙伦等[16]基于非连续变形分析(DDA)方法,对 ZKR-1022 型振动筛的筛分过程进行了动力学模拟,揭示了直线振动筛的筛分过程和机理。由于收获后的含杂油菜籽中成分糅杂:由籽粒、短茎秆、果荚壳、轻杂余组成[17],平面回转筛作业后籽粒含杂率较低,但筛分效率不高,振动筛作业效率高,但杂余透筛率也高,致使含杂率增加。综上,应用于油菜联合收获机作业后含杂油菜籽的复清装备有待深入研究。

本文结合不同筛分结构形式的特点,设计一种油菜联合收获后含杂油菜籽复清机,采用分级筛搭载偏心配重块组合式结构,实现“先筛分,再风选”的工艺流程:先依靠偏心配重块旋转产生的激振力驱动分级筛振动筛分大杂余,再采用离心风机吹除小杂余,从而实现含杂油菜籽中籽粒与杂余的分离。

1 总体结构与工作过程

1.1 总体结构

油菜联合收获后含杂油菜籽复清机结构示意图如图 1 所示,由机架、螺旋输送装置、联接软管、离心振动式筛分装置、侧向风选装置、电机等部分组成。该机具为独立机具,主要对油菜联合收获后的含杂油菜籽进行筛分,工作时,振动驱动部件(图 2)的上、下偏心块高速旋转产生离心力的合力作用在轴线的中垂面内,从而形成激振力并驱动筛体振动。螺旋输送装置驱动电机、激振源驱动电机及离心风机转速均可调,主要技术参数如表 1 所示。

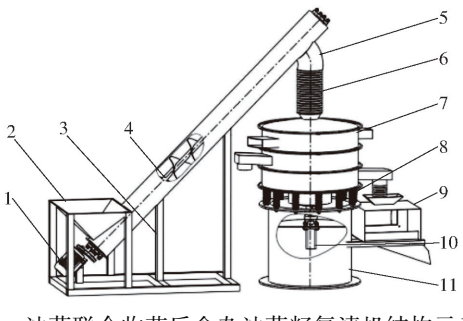


图 1 油菜联合收获后含杂油菜籽复清机结构示意图

Fig. 1 Schematic of re-cleaning machine for rapeseed after combine harvesting

1. 电机 2. 料斗 3. 支架 4. 螺旋输送装置 5. 卸料口 6. 联接软管 7. 离心振动式筛分装置 8. 弹簧 9. 侧向风选装置 10. 直流电机 11. 底座

离心振动式筛分装置分为上部组合筛体、中间激振源、下部底座 3 部分,上部组合筛体喂料口与螺旋输送装置出口通过软管联接;中间激振源通过金属束边与上部组合筛体联接,并通过固定弹簧支撑于下部底座上方,第 1 层筛网选择圆形冲孔筛式,第 2 层筛网选择方孔编织筛式。

1.2 工作过程

如图 3 所示,油菜联合收获后含杂油菜籽复清机工作过程主要包括:物料输送过程、筛分过程以及

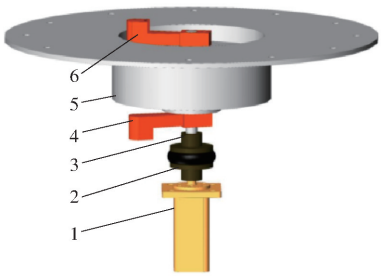


图 2　振动驱动部件结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of vibration drive parts

1. 直流电机　2. 橡胶联轴器　3. 轴　4. 下偏心块　5. 筛座　6. 上偏心块

表 1　离心振动式筛分装置主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of centrifugal-vibrating screening device

参数	数值
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	600 × 600 × 1300
偏心块质量/kg	2
圆形冲孔筛孔径/mm	5
方孔编织筛尺寸/目	8
生产效率/($t \cdot h^{-1}$)	5.4

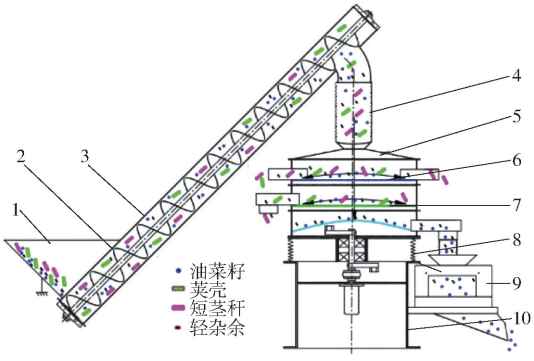


图 3　油菜联合收获后含杂油菜籽复清机作业流程图

Fig. 3　Schematic of working process for re-cleaning machine for rapeseed after combine harvesting

1. 料斗　2. 螺旋叶片　3. 机壳　4. 联接软管　5. 顶盖　6. 圆形冲孔筛　7. 方孔编织筛　8. 弹簧　9. 清选罩壳　10. 底座

风选过程。物料输送过程是指料斗内的含杂油菜籽在螺旋叶片的作用下被动提升至螺旋输送装置出口，经软管落至离心振动式筛分装置中；筛分过程指经螺旋输送装置输送过来的含杂油菜籽受重力影响，落在由振动驱动部件作用产生振动的筛网上，使得含杂油菜籽在筛网上“跳跃”，而含杂油菜籽中各组分因物理特性各异[18]，籽粒和细小轻杂余从大杂余中分离出来，透过上下不同孔径的筛网落到集料金属片上并经下层出料口排出，而短茎秆、夹壳等则因尺寸较大无法透过筛网，在激振力作用下做圆周扩散运动，经各筛网排草口排出；风选过程指从离心振动式筛分装置下层出料口排出的籽粒和细小轻杂余在下落至侧向风选装置内时受离心风机作用，轻杂余被吹除，剩余油菜籽粒从出料口排出，从而完成籽粒清选。

2　关键部件设计与参数分析

2.1　生产效率

为满足收获机作业后含杂油菜籽的复清要求，以市场占有率较高的雷沃谷神 4LZ－8.0F 型、沃得 4LZ－6.0MCQ 型、东禾牌 4LZ－4.0Z 型全喂入谷物联合收获机为例，查阅对应收获机使用说明书可知，其工作效率分别为 0.6 ~ 1.3 hm^2/h、0.27 ~ 0.85 hm^2/h、0.34 ~ 0.64 hm^2/h，收获机对应粮箱容积分别为 2.5、1.4、1.3 m^3；由文献[1]可知，油菜籽产量为 1 800 ~ 2 100 kg/hm^2，为保证各收获机粮箱满箱时，上一箱籽粒能完成复清，以便后续进一步处理，则

$$V\rho_c \geqslant \eta t Q_c \tag{1}$$

式中　V——联合收获机粮箱容积，m^3

ρ_c——油菜籽平均容重，690 kg/m^3[19]

η——收获机工作效率，hm^2/h

t——粮箱满箱时收获机工作时间，h

Q_c——油菜籽产量，取 2 100 kg/hm^2

经计算，各收获机粮箱满箱时收获机工作时间分别为 0.63、0.54、0.67 h，此时，对应的含杂油菜籽复清机喂入量应为 0.76、0.50、0.37 kg/s，方可实现含杂油菜籽的复清，考虑到实际作业时籽粒转运、人工喂料、装袋、晾晒等环节会占用一定时间，油菜联合收获后含杂油菜籽复清机喂入量在满足较大喂入量收获机复清条件下应尽可能取较大值，此时复清机喂入量需乘以一个安全系数 f_0，取 $f_0 = 2$，计算得复清机喂入量分别为 1.52、1.00、0.74 kg/s，故设计含杂油菜籽复清机喂入量为 1.5 kg/s，即生产效率为 5.4 t/h。

2.2　螺旋输送装置

螺旋输送装置利用旋转的螺旋叶片连续、稳定地推送含杂油菜籽，从而完成其倾斜输送过程。含杂油菜籽在螺旋输送装置内的运动主要有 2 个阶段：料斗里的含杂油菜籽受重力作用自然下落到螺旋叶片上，完成物料的填充；含杂油菜籽被旋转的螺旋叶片以一定速度向上提升，由卸料口排出。

螺旋叶片表面是由垂直于轴的元线绕轴作等速回转并沿轴向等速移动而形成，综合考虑筛分效率和整机尺寸，查阅文献[9]，按照推荐的 R20 优先系数，螺旋外径 D 取 160 mm，螺旋叶片厚度取 2 mm，主轴一般采用无缝钢管，直径 d 取 30 mm，螺旋叶片与机壳之间的间隙 δ 一般取 5 ~ 10 mm，因油菜籽直径较小，由文献[19]可知，油菜籽当量直径集中在

1.9 ~ 2.1 mm,为保证籽粒的顺利输送,螺旋叶片与机壳间隙取较小值,取 5 mm。

由图 4 可知,螺旋叶片与含杂油菜籽存在摩擦力 F_f和法向推力 F_T,二者合力 F_H与 F_T偏离一个角度 φ,为含杂油菜籽与螺旋叶片的摩擦角,油菜籽摩擦角为 27°[20]。由文献可知,欲使含杂油菜籽轴向运动速度最大[21],则需最大螺旋升角 $\beta_{0\max} < 45° - \frac{\varphi}{2} = 31.5°$。可确定螺旋叶片螺距 P 的范围为

$$P = \pi D \tan\beta_0 < 308 \text{ mm} \tag{2}$$

又因螺距 P 一般为螺旋外径 D 的 80% ~ 100%,综合考虑取螺距 $P = 160$ mm,计算螺旋升角 β_0为 18°。

螺旋叶片的轴向输送能力需大于筛分装置的喂入量,即

$$Q_l = \frac{\pi}{24}[(D-2\delta)^2 - d^2]\psi P n_l \gamma C_0 \times 10^{-10} \geqslant 1.5 \text{ kg/s} \tag{3}$$

式中 Q_l——螺旋输送装置生产率,kg/s

ψ——输送谷粒或杂余时的充满系数,油菜籽取 0.3

n_l——螺旋叶片转速,r/min

γ——谷粒或杂余单位容积质量,1 060 kg/m^3

C_0——螺旋叶片倾斜输送系数,取 0.76

计算得:$n_l \geqslant 138$ r/min。

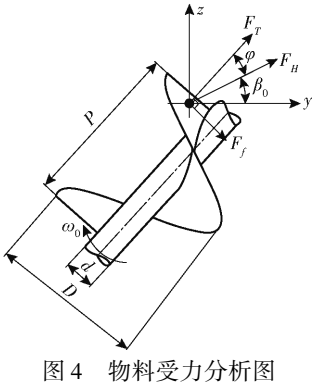


图 4 物料受力分析图

Fig. 4 Schematic of force analysis of material

2.3 离心振动式筛分装置

筛分是将混合物料通过一层或数层带孔的筛面,使物料按宽度或厚度分成若干个粒度级别的过程[22]。离心振动式筛分装置主要工作部件为筛体和激振源,其结构如图 5 所示。

2.3.1 筛体

筛体主要由筛框、筛网、排草口组成。为避免物料堆积引起堵塞,使筛分效率降低,影响清选性能,筛网有效筛分面积 S_1需满足

$$q_s S_1 \geqslant Q_s(1-\eta_1) \tag{4}$$

式中 Q_s——含杂油菜籽喂入量,kg/s

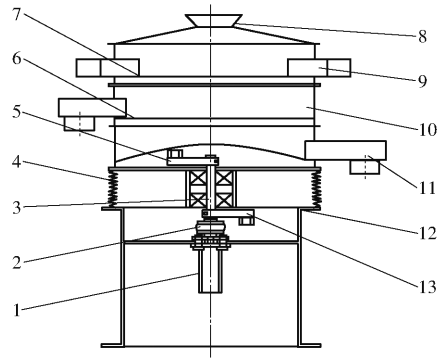


图 5 离心振动式筛分装置结构简图

Fig. 5 Schematic of centrifugal-vibrating screening device

1. 直流电机 2. 橡胶联轴器 3. 激振源 4. 弹簧 5. 上偏心块 6. 下层编织筛网 7. 上层冲孔筛 8. 入料口 9. 杂余排草口 10. 筛框 11. 籽粒排料口 12. 底座 13. 下偏心块

η_1——含杂油菜籽中能透过圆形冲孔筛的成分质量分数,经试验测得圆形冲孔筛为 69.04%

q_s——筛网单位面积可承担含杂油菜籽质量,kg/(s·m^2),查农业机械设计手册可知,q_s为 1.5 ~ 2.5 kg/(s·m^2),油菜籽粒较小,q_s可取 2.5 kg/(s·m^2)

计算得:$S_1 \geqslant 0.19$ m^2。

而筛网为圆形,因此可确定筛网半径 r_0计算式

$$S = \pi r_0^2 \geqslant S_1 \tag{5}$$

计算得:$r_0 \geqslant 246$ mm。

考虑到实际筛分作业时喂入量会有一定波动,筛网半径应取较大值,取 $r_0 = 300$ mm。

2.3.2 运动过程简化模型

离心振动式筛分装置可简化为图 6 所示的力学模型,通过质心 O 建立固定空间直角坐标系,由于

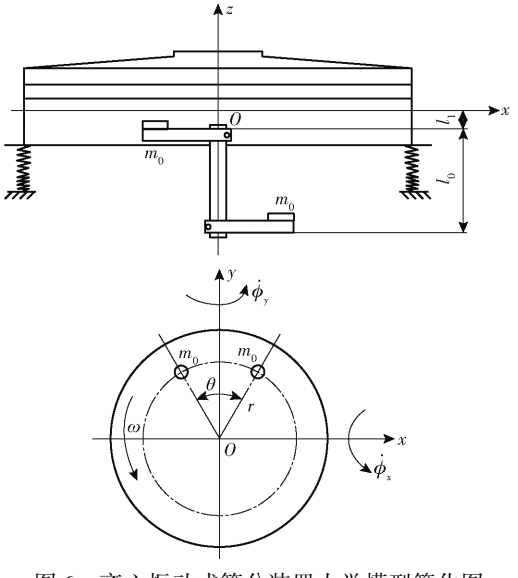


图 6 离心振动式筛分装置力学模型简化图

Fig. 6 Schematic of mechanical model of centrifugal-vibrating screening device

上下偏心块的质心与整个参振部分的质心不重合，筛面上会形成一个旋转激振主矢 $\boldsymbol{P}(t)$ 和一个旋转激振主矩 $\boldsymbol{M}(t)$。

$$\boldsymbol{P}(t)=2m_0\omega^2 r\cos\frac{\theta}{2}e^{i\omega t} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{M}(t)=2m_0\omega^2 rLe^{i(\pi-\omega t-\beta)} \tag{7}$$

其中

$$L=\sqrt{\left(\frac{l_0}{2}+l_1\right)^2\cos^2\frac{\theta}{2}+\frac{l_0^2}{4}\sin^2\frac{\theta}{2}} \tag{8}$$

$$\beta=\arctan\left(\left(1+\frac{2l_1}{l_0}\right)\tan\frac{\theta}{2}\right) \tag{9}$$

式中　m_0——上下偏心块质量，kg

ω——直流电机角速度，rad/s

r——上下偏心块偏心距，mm

θ——上下偏心块夹角，(°)

l_0——上下偏心块之间的垂直距离，mm

l_1——上偏心块与机体质心的垂直距离，mm

β——力矩矢相对于力矢超前角，rad

将该装置的运动微分方程表示为复数形式

$$M\ddot{\boldsymbol{X}}+C\dot{\boldsymbol{X}}+K\boldsymbol{X}=2m_0\omega^2 r\cos\frac{\theta}{2}e^{i\omega t} \tag{10}$$

$$J\ddot{\boldsymbol{\phi}}+C_\phi\dot{\boldsymbol{\phi}}+K_\phi\boldsymbol{\phi}=2m_0\omega^2 rLe^{i(\pi-\omega t-\beta)} \tag{11}$$

其中　$\boldsymbol{X}=X+iY$　　$\boldsymbol{\phi}=\phi_y+i\phi_x$

式中　M——参振质量

J——参振质量对坐标轴的转动惯量

C——阻力系数

C_ϕ——阻力矩系数

K——弹簧水平刚度

K_ϕ——弹簧绕坐标轴刚度

$\boldsymbol{X}$——位移的复数形式

$\boldsymbol{\phi}$——角位移的复数形式

ϕ_x——绕 x 轴角位移

ϕ_y——绕 y 轴角位移

设稳态解为

$$\boldsymbol{X}=Ae^{i(\omega t-\theta_1)}$$

$$\boldsymbol{\phi}=\phi e^{i(\omega t-\beta-\theta_2)}$$

式中　A——筛体随质心作圆平动半径，mm

ϕ——筛体绕质心平面作圆锥面摆动摆角，(°)

θ_1——激振力对其位移的相位差角

θ_2——激振力矩对其位移的相位差角

忽略阻尼影响可得

$$A=\frac{2m_0 r\cos\frac{\theta}{2}}{M\left(1-\frac{1}{Z_0^2}\right)} \tag{12}$$

$$\phi=\frac{2m_0 rL}{J\left(1-\frac{1}{Z_{0\phi}^2}\right)} \tag{13}$$

其中　$Z_0=\dfrac{\omega}{\omega_0}$　$Z_{0\phi}=\dfrac{\omega}{\omega_{0\phi}}$　$\omega_0=\sqrt{\dfrac{K}{M}}$　$\omega_{0\phi}=\sqrt{\dfrac{K_\phi}{J}}$

式中　Z_0、$Z_{0\phi}$——频率比

ω_0、$\omega_{0\phi}$——固有频率

考虑到 $\theta_1=\theta_2\approx180°$，则稳态解为

$$\boldsymbol{X}=-Ae^{i\omega t}=-A(\cos(\omega t)+i\sin(\omega t)) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{\phi}=-\phi e^{i(\omega t-\beta)}=-\phi(\cos(\omega t-\beta)+i\sin(\omega t-\beta)) \tag{15}$$

由式(14)可知，在旋转激振主矢 $\boldsymbol{P}(t)$ 的作用下，筛体随质心作半径为 A 的圆平动；由式(15)可知，在旋转激振主矩 $\boldsymbol{M}(t)$ 的作用下，筛体绕质心平面作摆角为 ϕ 的圆锥面摆动。

2.3.3　离心过程分析

筛体的圆平动是向第一、二层筛面上的含杂油菜籽施加离心力从而促进杂余排出的主要因素，离心运动过程中籽粒透过筛孔，对清选效果影响最大的运行参数为直流电机角速度 ω。假设物料由入料口落至清选筛面后获得与筛体同样的回转速度。将物料各成分的运动视为质量为 m_1 的点运动，并忽略各成分之间的相互作用，则物料所受作用力如图 7 所示[23]。

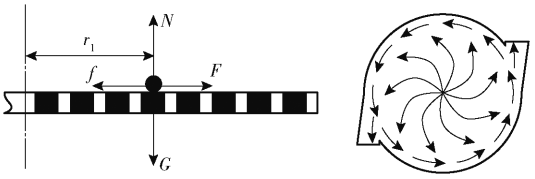


图 7　筛面上物料受力分析与运动轨迹示意图

Fig. 7　Schematic of stress analysis and trajectory for impurities on screen surface

由图 7 可得

离心力　$F=m_1\omega^2 r_1$　(16)

重力　$G=m_1 g$　(17)

筛面支撑力　$N=G=m_1 g$　(18)

摩擦力　$f=\mu N$　(19)

式中　r_1——物料所在位置与筛网中心轴线距离，mm

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

μ——物料与金属的摩擦因数，约为 0.71[24]

由力学分析可知，为保证筛面上物料具有良好流动性能，使物料中杂余顺利从排草口排出的必要条件为

$$m_1\omega^2 r_1\geqslant\mu m_1 g \tag{20}$$

即直流电机最低角速度 ω_{min} 为

$$\omega_{\min}=\sqrt{\frac{\mu g}{r_1}} \tag{21}$$

由式(21)可知,杂余顺利排出所需最低转速主要取决于物料所在位置与筛网中心轴线距离 r_1,当 r_1取最小值时,中心位置的物料可稳定向四周扩散,此时,筛面上物料具有较好的流动性能。假设含杂油菜籽由入料口进入后垂直落在筛网上,r_1最小值应取油菜籽粒的半径,即 $r_{1\min}=1$ mm,代入式(21)求得 $\omega_{\min}=83.41$ rad/s,即杂余顺利排出直流电机所需最低转速为 796.55 r/min。

2.3.4 振动过程分析

含杂油菜籽中各组分由于密度不同,在受到振动时各组分会自动分级,而含杂油菜籽中油菜籽粒比重较大,且其呈球状,受到振动易于接触筛面并透过筛网,因此含杂油菜籽在筛面上的振动对提升筛分效率具有重要意义,而含杂油菜籽在筛面上的振动要求筛体运动时能给含杂油菜籽一个向上的抛掷力。

筛体绕质心平面作摆角为 ϕ 的圆锥面摆动时,筛面上与质心 O 距离为 r_2 处含杂油菜籽的运动轨迹如图 8 所示。可以看出含杂油菜籽的运动轨迹是半径为 $l_2\sin\phi$ 的圆柱体被某斜面所截的空间椭圆交截线,进一步可以分解成水平面内半径为 $l_2\sin\phi$ 的平动和垂直方向上振幅为 $r_2\sin\phi$ 的直线振动。因此,含杂油菜籽在垂直方向上的位移表达式为

$$Z=A_Z\cos(\omega t-\beta) \tag{22}$$

其中 $$A_Z=r_2\sin\phi$$

式中 A_Z——垂直振幅,mm

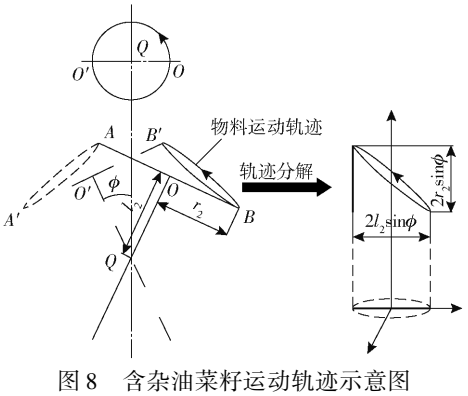


图 8 含杂油菜籽运动轨迹示意图

Fig. 8 Schematic of trajectory for impurities

承载含杂油菜籽的筛体在垂直方向上做直线振动运动时,筛面上某点的垂直负加速度与含杂油菜籽的重力加速度在数值上一旦出现 $\ddot{Z}\geqslant g$,该点的含杂油菜籽即被抛起,取其临界状态,即

$$\ddot{Z}=g \tag{23}$$

由式(23)得

$$\cos(\omega t-\beta)=-\frac{g}{A_Z\omega^2} \tag{24}$$

令 $K_Z=\dfrac{A_Z\omega^2}{g}$,称为垂直抛掷指数,显然 $K_Z\geqslant 1$ 为临界抛掷条件,在直流电机角速度 ω 一定条件下,垂直振幅 A_Z越大,抛掷指数 K_Z也就越大,而垂直振幅 A_Z又与含杂油菜籽和筛面质心水平距离 r_2有关,即随着 r_2的增加,抛掷指数 K_Z会逐渐增大,使含杂油菜籽在筛面上能有一个持续垂直向上的抛掷力,满足筛分要求。

2.4 风选装置设计与分析

含杂油菜籽经筛分装置筛分去除大杂余后,剩下的油菜籽粒和颖壳等细小轻杂余经排草口落入侧向风选装置,由侧向风选装置完成进一步清选。侧向风选装置主要由离心风机、清选罩壳、入料口等组成,其结构如图 9 所示。

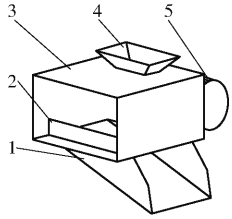


图 9 风选装置结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of air separation device

1. 出料口 2. 挡板 3. 清选罩壳 4. 入料口 5. 离心风机

2.4.1 最小风量

清选罩壳是风选装置的关键结构,清选罩壳内气流场分布直接影响风选装置清选性能。由文献[9]可知,风选装置所需最小风量与杂余含量有关,计算式为

$$V_0=\beta_1 Q_s/(\mu_1\rho) \tag{25}$$

式中 V_0——清选罩壳所需最小风量,m^3/s

β_1——颖壳等轻杂余占含杂油菜籽的比率,试验取 0.8%

μ_1——携带杂质气流混合浓度比,为 0.2 ~ 0.3,取 0.3

ρ——空气密度,取 1.2 kg/m^3

计算得风选装置所需最小风量 $V_0=0.03$ m^3/s。

为保证含杂油菜籽中轻杂余能够从风选装置出口排出,清选罩壳内最小风速不能低于轻杂余悬浮速度。含杂油菜籽悬浮速度测定表明:籽粒悬浮速度为 7.4 ~ 9.4 m/s,短茎秆为 6.3 ~ 11.2 m/s,荚壳为 2.4 ~ 3.2 m/s,轻杂余为 1.1 ~ 3.2 m/s[25]。

设计清选罩壳出风口截面积为 $S_a=0.36\times0.2=0.072$ m^2,此时,清选罩壳内应有风量 V_1为

$$V_1=S_a v_q \tag{26}$$

式中 v_q——含杂油菜籽中轻杂余悬浮速度,取 3.2 m/s

计算得 $V_1 = 0.23\ m^3/s > V_0$，满足风选要求。

2.4.2　气流场分析

进入气流场的物料为油菜籽粒和轻杂余混合物，由文献[25]对含杂油菜籽各组分悬浮速度测定结果可知：当风选装置出口截面上的风速为 3 ~ 7 m/s 时，能达到较好的清选效果。为进一步确定离心风机出口截面上的风速范围，基于 CFD (Computational fluid dynamics)对风选装置内部流体的流场特性进行研究。

基于清选罩壳几何模型结合布尔运算[26]对其内部流体域进行提取，利用 mesh 软件对提取后的流体域进行网格划分，如图 10 所示。设置风机出口为流场的风速入口，空气以恒定速度流入流体域，将流体域网格导入 Fluent 软件中进行仿真参数设置。将流体介质设置为空气，进气口处气体流速范围为 3 ~ 7 m/s，出口处压力设置为标准大气压，湍流模型选择 Standard $k-\varepsilon$ 模型。

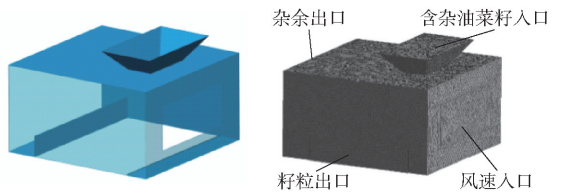


图 10　清选罩壳几何模型及其网格划分图

Fig. 10　Diagram of geometric model and mesh division for air separation enclosure

设置进气口处气体流速范围为 3 ~ 7 m/s，迭代 1 500 次，Fluent 软件计算完成后，利用 CFD - Post 软件对计算结果进行后处理。图 11 所示为清选罩壳中心垂直面上的速度分布云图以及速度矢量图。

由图 11 可以看出，出口风速在 3 ~ 7 m/s 范围内时，入口风速与出口风速基本相等，风速衰减较弱，由此可以确定为实现较好的风选效果，应设定离心风机出风口风速范围为 3 ~ 7 m/s。

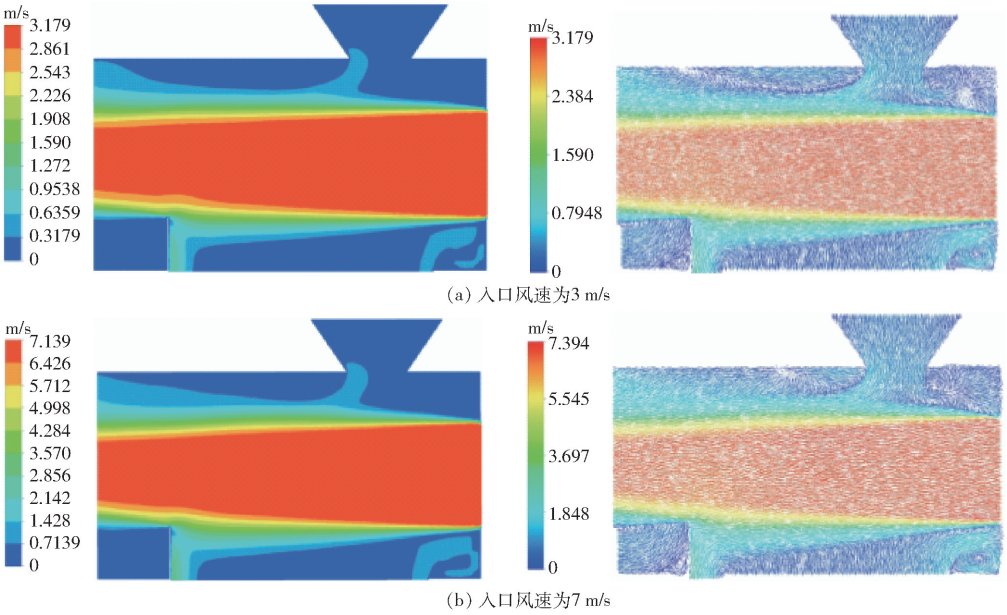


图 11　中垂面速度分布云图及速度矢量图

Fig. 11　Velocity distribution cloud diagram and velocity vector diagram of vertical plane

3　清选性能试验

3.1　试验材料与方法

试验在华中农业大学现代农业科技试验基地进行，试验油菜品种为华油杂 62，种植方式为机直播，人工收获后运送至试验场地，以喂入量 3 ~ 4 kg/s 均匀连续喂送至东禾 4LYZ - 4.0 型油菜联合收获机完成脱粒清选，收集粮箱内的含杂油菜籽，主要包括籽粒、荚壳、短茎秆及轻杂余 4 种成分。试验测得：含杂油菜籽中籽粒比例约为 94.10%，籽粒千粒质量为 4.7 g，荚壳比例约为 2.24%，短茎秆比例约为 2.88%，轻杂余比例约为 0.77%。将含杂油菜籽中各组分按比例配制，混合均匀后倒入螺旋输送装置料斗内，调节螺旋叶片提升转速为 140 r/min，均匀连续喂送含杂油菜籽至离心振动式筛分装置内，再经侧向风选装置完成清选，最后收集各排草口物料。试验台架如图 12 所示。

由于试验材料为人工收割后在大棚晾晒的挂藏油菜，为模拟实际作业情况，对含杂油菜籽做复水处理，调节含水率至 15% ~ 20%[27]。试验主要设备有：SW6236C 型高精度转速仪、电子天平(精度为 0.1 g)、高精度手提电子秤、直流电机调速器、NES - 350 - 24 型开关电源、水分测定仪等。

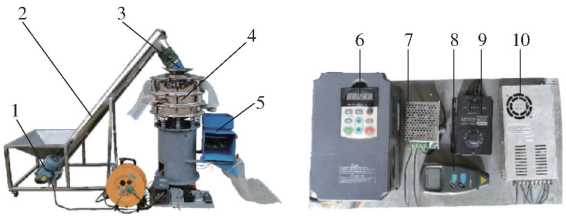


图 12 油菜联合收获后含杂油菜籽复清机试验台架

Fig. 12 Test bed of re-cleaning machine for rapeseed after combine harvesting

1. 电机 2. 螺旋输送装置 3. 联接软管 4. 离心振动式筛分装置 5. 侧向风选装置 6. 电机调速器 7. 直流电机调速器 8. SW6236C 型高精度转速仪 9. 直流风机调速器 10. NES－350－24 型开关电源

3.2 试验因素及指标

为使油菜联合收获后含杂油菜籽复清机具备较好的清选性能,应满足含杂油菜籽在筛面上有合适的抛掷指数和抛掷次数以及离心风机出风口有合适的风速。由式(24)可知,直流电机角速度一定时,抛掷指数与垂直振幅有关,而垂直振幅主要由激振力决定,激振力又与偏心块夹角有关;抛掷次数指单位时间物料被抛起次数,可用振动频率表征,振动频率与偏心块转速有关。因此,确定试验以振动频率、垂直振幅及离心风机出风口风速为影响因素,以复清机籽粒含杂率与筛分效率为评价指标。含杂率与筛分效率计算公式为

$$Y_Z = \left(1 - \frac{m_6}{m_2}\right) \times 100\% \tag{27}$$

$$Y_S = \frac{m_5 + m_6}{m_3 + m_4 + m_5 + m_6} \times 100\% \tag{28}$$

式中 Y_Z——含杂率,%

Y_S——筛分效率,%

m_2——侧向风选装置出粮口物料总质量,kg

m_3——第 1 层排草口籽粒质量,kg

m_4——第 2 层排草口籽粒质量,kg

m_5——侧向风选装置排草口籽粒质量,kg

m_6——侧向风选装置出粮口油菜籽粒质量,kg

3.3 试验与分析

3.3.1 振动检测

为确定油菜联合收获后含杂油菜籽复清机工作时,不同的偏心块转速和偏心块夹角对应的振动频率及垂直振幅,利用 iSV2101 型测振仪对筛体的振动情况进行检测。如图 13 所示,在筛体上均匀布置 4 个测量点,分别测量偏心块夹角为 60°,偏心块转速在 800～1 400 r/min 范围内时对应的振动频率,以及偏心块转速为 1 200 r/min,偏心块夹角在 0°～180°范围内时对应的垂直振幅,测量结果取平均值,测量结果如表 2、3 所示。



图 13 振动检测过程

Fig. 13 Vibration detection process

表 2 偏心块转速与振动频率对照

Tab. 2 Comparison of rotation speed of eccentric block and vibration frequency

偏心块转速/(r·min⁻¹)	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400
振动频率/Hz	9.99	11.17	12.08	13.48	14.61	16.11	17.63

表 3 偏心块夹角与垂直振幅对照

Tab. 3 Comparison of angle of eccentric block and vertical amplitude

偏心块夹角/(°)	0	30	60	75	90	120	150	180
垂直振幅/mm	3.71	3.67	3.64	3.61	3.59	3.55	3.52	3.43

3.3.2 单因素试验结果与分析

3.3.2.1 离心风机出风口风速

设置振动频率为 14.61 Hz,垂直振幅 3.64 mm,离心风机出风口风速在 3～9 m/s 间选取 7 个水平,每个水平下重复 3 次试验(下同)。离心风机出风口风速与转速之间对照如表 4 所示。

表 4 离心风机出风口风速与转速对照

Tab. 4 Comparison of air velocity and fan speed

风速/(m·s⁻¹)	3	4	5	6	7	8	9
风机转速/(r·min⁻¹)	620	735	880	940	1 060	1 130	1 200

图 14 为离心风机出风口风速与清选性能关系曲线。由图可知:含杂率随离心风机出风口风速的增加逐渐降低,而筛分效率随离心风机出风口风速的增加变化幅度不大,基本稳定在 98.35% 左右,原

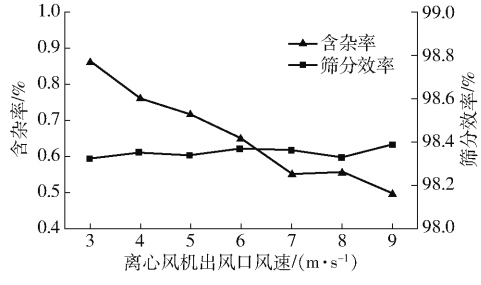


图 14 离心风机出风口风速与清选性能关系曲线

Fig. 14 Relationship between air velocity of fan outlet and cleaning performance

因在于随着离心风机出风口风速的增大，清选罩壳内的气流速度增加，杂余所受气流的作用力逐渐增大，致使杂余被吹出的质量增加，因此风选装置出粮口所得籽粒含杂率降低；而筛分效率主要由筛分装置的振动频率和垂直振幅决定，与离心风机出风口风速关联不大，因此筛分效率基本稳定在一定范围内。当出风口风速达到 7 m/s 或更大时，含杂率基本保持稳定，且考虑到油菜籽粒悬浮速度因素，因此出风口风速不宜超过 7 m/s。综合考虑籽粒含杂率与筛分效率要求，离心风机出风口风速在 5 ~ 7 m/s 范围内时，清选性能较好。

3.3.2.2　振动频率

设置垂直振幅为 3.64 mm，离心风机出风口风速为 6 m/s，振动频率在 9.99 ~ 17.63 Hz 间选取7 个水平。振动频率可通过偏心块转速的改变来实现调节。

图 15 为振动频率与清选性能关系曲线。由图可知：含杂率随着振动频率的增加呈现先减小后增加的趋势，原因在于振动频率为 9.99 Hz 时，对应偏心块转速较低，筛分装置筛网上物料所受的离心力较小，导致物料流动到筛分装置第 1、2 层筛体排草口时间较长，期间随着装置运行，混合物料中较多杂余进入到风选装置，风选装置负荷增加，使得含杂率较大，而后随着振动频率增加，物料所受的离心力变大，含杂率逐渐降低；当振动频率达到 12.08 Hz 时，物料所受的离心力已能保证物料较快流动到筛分装置各层筛体排草口，而随着振动频率继续增大，物料在筛网上的抛掷次数逐渐增加，杂余透过筛网的概率增加，含杂率又逐渐增大。而筛分效率整体呈现逐渐降低的趋势，原因在于随着振动频率增加，筛网上油菜籽粒所受的离心力逐渐增大，使得各层筛体排草口排出物料中籽粒质量逐渐增加，筛分效率降低。综合考虑籽粒含杂率与筛分效率要求，当振动频率在 12.08 ~ 14.61 Hz 范围内时，清选性能较好。

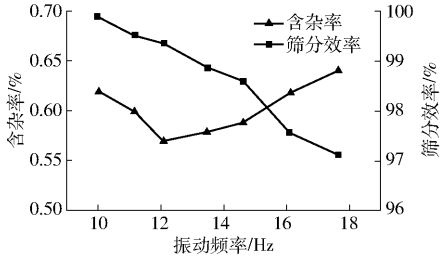


图 15　振动频率与清选性能关系曲线

Fig. 15　Relationship between vibration frequency and cleaning performance

3.3.2.3　垂直振幅

设置离心风机出风口风速为 6 m/s，振动频率为 14.61 Hz，垂直振幅在 3.43 ~ 3.71 mm 间选取 7 个水平。垂直振幅可通过偏心块夹角的改变实现调节。

图 16 为垂直振幅与清选性能关系曲线。由图可知：含杂率随着垂直振幅增加而逐渐增大，原因在于随着垂直振幅增加，筛面上物料所受的激振力逐渐增大，使得进入风选装置中的杂余质量逐渐增加，含杂率增大；而筛分效率随着垂直振幅增加而降低，原因在于随着激振力的增加，筛网上油菜籽粒所受力逐渐增大，使得各排草口排出物料中籽粒质量逐渐增加，筛分效率降低。由于激振力较小时，各层筛体排草口排出物质总质量也较小，不利于杂余排出，综合考虑籽粒含杂率与筛分效率要求，当垂直振幅在 3.59 ~ 3.64 mm 范围内时，清选性能较好。

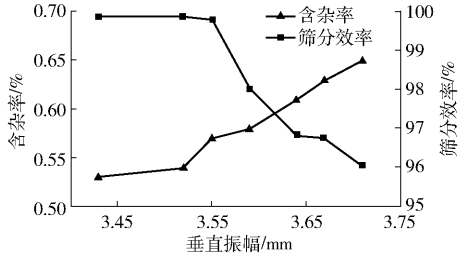


图 16　垂直振幅与清选性能关系曲线

Fig. 16　Relationship between vertical amplitude and cleaning performance

3.3.3　正交试验结果与分析

在单因素试验基础上，选择合适的因素水平，分析确定影响清选因素的主次顺序以及合理的工作参数组合。选择正交表 $L_9(3^4)$ 安排正交试验，因素水平如表 5 所示，清选试验结果如表 6 所示，A、B、C 为因素水平值。

表 5　试验因素水平

Tab. 5　Factors and levels of experiment

水平	因素		
	振动频率/Hz	垂直振幅/mm	离心风机出风口风速/(m·s^{-1})
1	12.08	3.64	5
2	13.48	3.61	6
3	14.61	3.59	7

由表 6 可知，影响含杂率因素主次为：离心风机出风口风速(C)、振动频率(A)、垂直振幅(B)，较优参数组合为 $A_3B_2C_3$；影响筛分效率因素主次为：振动频率(A)、垂直振幅(B)、离心风机出风口风速(C)，较优参数组合为 $A_3B_3C_1$。表 7 表明，离心风机出风口风速对含杂率影响极显著，振动频率、垂直振幅对含杂率影响显著；振动频率、垂直振幅对筛分效率影响显著，离心风机出风口风速对筛分效率影响不显著。由此可以确定为达到较优清选效果，垂直振幅(B)应取第2水平值；离心风机出风口风速

表 6 正交试验结果和极差分析

Tab. 6 Results of orthogonal test and range analysis

试验序号		因素 A	因素 B	因素 C	空列	评价指标 含杂率 Y_Z/%	评价指标 筛分效率 Y_S/%
1		1	1	1	1	0.68	97.68
2		1	2	2	2	0.54	97.18
3		1	3	3	3	0.52	98.39
4		2	1	2	3	0.61	97.76
5		2	2	3	1	0.51	98.09
6		2	3	1	2	0.67	98.67
7		3	1	3	2	0.49	98.37
8		3	2	1	3	0.59	98.53
9		3	3	2	1	0.54	98.60
Y_Z	K_1	1.74	1.78	1.94			
	K_2	1.79	1.64	1.69			
	K_3	1.62	1.73	1.52			
	R	0.17	0.14	0.42			
	主次因素		C、A、B				
	优化组合		$A_3B_2C_3$				
Y_S	K_1	293.25	293.81	294.88			
	K_2	294.52	293.80	293.54			
	K_3	295.50	295.66	294.85			
	R	2.25	1.85	1.34			
	主次因素		A、B、C				
	优化组合		$A_3B_3C_1$				

表 7 方差分析

Tab. 7 Variance analysis result

试验指标	方差来源	自由度	平方和	F	显著性
含杂率	A	2	0.005	32.71	0.030 *
	B	2	0.003	21.57	0.044 *
	C	2	0.030	191.29	0.005 **
	误差	2	0.001		
筛分效率	A	2	0.848	23.12	0.041 *
	B	2	0.765	20.84	0.046 *
	C	2	0.390	10.64	0.086
	误差	2	0.037		

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

（C）对含杂率影响极显著，对筛分效率影响不显著，因此选取第 3 水平值；振动频率（A）对含杂率、筛分效率影响都显著，为使二者都达到较优效果，选取第 3 水平值。由此确定较优参数组合方案为 $A_3B_2C_3$，即振动频率为 14.61 Hz、垂直振幅为 3.61 mm、离心风机出风口风速为 7 m/s。在该组合条件下进行试验，重复 5 次取平均值，试验结果：籽粒含杂率平均值为 0.53%，筛分效率平均值为 98.39%，符合油菜籽粒后续存储标准（含杂率小于 3%）。

油菜联合收获后含杂油菜籽复清机作业时整机运行平稳，物料流动顺畅未出现堵塞现象，试验表明油菜联合收获后含杂油菜籽复清机可实现对含杂油菜籽的分离、清选功能。

4 结论

（1）设计了一种油菜联合收获后含杂油菜籽复清机，确定了含杂油菜籽复清机的结构与主要参数，此装备可在满足油菜籽粒存储标准的基础上有效降低人工作业强度。

（2）通过分析振动频率、垂直振幅、离心风机出风口风速对清选性能影响的单因素试验，得到清选性能较好的情况下各因素的合理变化范围：振动频率为 12.08 ~ 14.61 Hz、垂直振幅为 3.59 ~ 3.64 mm、离心风机出风口风速为 5 ~ 7 m/s。

（3）采用三因素三水平正交试验，确定了影响籽粒含杂率的因素由大到小为离心风机出风口风速、振动频率、垂直振幅，影响筛分效率的因素由大到小为振动频率、垂直振幅、离心风机出风口风速；确定了较优参数组合：振动频率为 14.61 Hz、垂直振幅为 3.61 mm、离心风机出风口风速为 7 m/s，在此参数组合下，油菜联合收获后含杂油菜籽复清机籽粒含杂率平均值为 0.53%，筛分效率平均值为 98.39%，符合油菜籽粒后续存储标准（含杂率小于 3%）。

参 考 文 献

[1] 吴崇友. 油菜机械化收获技术[M]. 镇江：江苏大学出版社，2017.

[2] 冉军辉，沐森林，李海同，等. 油菜联合收获机往复式双动割刀行星轮驱动器设计与试验[J]. 农业工程学报，2020，36(9)：17 - 25.
RAN Junhui, MU Senlin, LI Haitong, et al. Design and test of planet gear driver of reciprocating double-acting cutter for rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 17 - 25. (in Chinese)

[3] 柴晓玉，徐立章，严超，等. 油菜割台竖割刀切割频率随动调节装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(12)：93 - 99.
CHAI Xiaoyu, XU Lizhang, YAN Chao, et al. Design and test of cutting frequency follow-up adjusting device for vertical cutting knife of rapeseed cutting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 93 - 99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20181211&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.011. (in Chinese)

[4] 黄小毛，查显涛，宗望远，等. 油菜联合收获割台落粒横流气压收集装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：227 - 233.

HUANG Xiaomao, ZHA Xiantao, ZONG Wangyuan, et al. Design and test of transverse positive pressure airflow collection device for header losses of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 227 - 233. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2016s035&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.035. (in Chinese)

[5] 廖庆喜,徐阳,袁佳诚,等. 油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):140 - 150.
LIAO Qingxi, XU Yang, YUAN Jiacheng, et al. Design and experiment on combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):140 - 150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190714&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.014. (in Chinese)

[6] 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 CSAE, 2018, 34(14):27 - 35. (in Chinese)

[7] 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, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14):24 - 31. (in Chinese)

[8] WAN Xingyu, LIAO Qingxi, XU Yang, et al. Design and experiments on cyclone separation cleaning devices and a conical sieve for rape combine harvester[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(4): 677 - 686.

[9] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[10] 朱永义. 谷物加工工艺及设备[M]. 北京:科学出版社, 2002.

[11] 阮竞兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.

[12] 廖庆喜,陈立,李海同, 等. 油菜联合收获机脱出物清选试验台[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(10):80 - 85,79.
LIAO Qingxi, CHEN Li, LI Haitong, et al. Cleaning unit test-bed of extraction components for rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):80 - 85, 79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20131014&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.014. (in Chinese)

[13] 王立军,马杨,冯鑫,等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(9):89 - 100.
WANG Lijun, MA Yang, FENG Xin, et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device of maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9):89 - 100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200911&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.011. (in Chinese)

[14] 王豪东,阮竞兰,原富林. 基于 EDEM 的回转组合多层筛筛选过程的离散元分析[J]. 中国油脂,2019,44(6):151 - 157.
WANG Haodong, RUAN Jinglan, YUAN Fulin. Discrete element analysis of EDEM-based rotary combined multi-layer sieve screening process[J]. China Oils and Fats,2019,44(6):151 - 157. (in Chinese)

[15] BARBOSA V P, MENEZES A L, GEDRAITE R, et al. Vibration screening: a detailed study using image analysis techniques to characterize the bed behavior in solid - liquid separation[J]. Minerals Engineering,2020,154:106383.

[16] 曾乙伦,甯尤军. 直线振动筛筛分过程与效果的动力学模拟分析[J]. 机械设计与研究,2020,36(2):163 - 168.
ZENG Yilun, NING Youjun. Dynamics simulation analysis of screening process and effect of linear vibrating screen[J]. Machine Design & Research,2020,36(2):163 - 168. (in Chinese)

[17] 李耀明,马征,徐立章. 油菜混合物与仿生筛面基体间的粘附特性[J]. 农业机械学报,2012,43(2):75 - 78,84.
LI Yaoming, MA Zheng, XU Lizhang. Adhesion property between rape mixture and bionic screen matrix[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):75 - 78, 84. (in Chinese)

[18] 陆林. 基于 ADAMS 的油菜收割机清选装置仿真与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2005.

[19] 雷小龙,杨文浩,杨龙君,等. 油菜精量穴播集中排种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):54 - 64.
LEI Xiaolong, YANG Wenhao, YANG Longjun, et al. Design and experiment of seed hill-seeding centralized metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):54 - 64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2002007&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.007. (in Chinese)

[20] 张青松,余琦,王磊,等. 油菜勺式精量穴播排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):47 - 54,64.
ZHANG Qingsong, YU Qi, WANG Lei, et al. Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):47 - 54, 64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200605&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.005. (in Chinese)

[21] 杨方飞,阎楚良. 谷物在纵向轴流滚筒脱粒空间中的运动状态分析[J]. 农业机械学报,2008,39(11):48 - 50,25.
YANG Fangfei, YAN Chuliang. Movement analysis of cereal in axial flow threshing roller space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):48 - 50, 25. (in Chinese)

[22] 刘协舫,郑晓,丁应生,等. 食品机械[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2002.

(下转第 232 页)