doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.011

油葵联合收获机清选装置结构优化与试验

张学军　张云赫　史增录　马少腾　黄　爽　程金鹏
(新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对油葵联合收获作业过程中存在籽粒含杂率及损失率偏高的问题,测定油葵脱粒后脱出物的尺寸特征和悬浮特性,通过机构的运动学分析与物料的受力分析,确定了油葵联合收获机清选装置主要结构参数与工作参数。以风机转速、振动频率和分风板倾角为影响因素,油葵籽粒含杂率和籽粒损失率为评价指标,开展工作参数优化试验,单因素试验结果表明,清选装置较优工作区间为:风机转速 1 100 ~ 1 300 r/min、振动频率 3 ~ 5 Hz、分风板倾角 20° ~ 40°;设计 Box - Behnken 试验,建立了响应面回归模型,并进行参数优化,结果表明:各试验因素对含杂率和损失率影响显著性大小顺序均为风机转速、振动频率、分风板倾角;当风机转速 1 200 r/min、振动频率 4 Hz、分风板倾角 27°时,试验结果表明平均油葵籽粒含杂率为 4.25%,平均籽粒损失率为 1.82%,满足油葵联合收获机清选的国家标准要求。

关键词: 油葵联合收获机; 清选装置; 物料特性; 参数优化
中图分类号: S225.5+9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0103-11　　**OSID**:

Optimization and Experiment of Oil Sunflower Combined Harvester Cleaning Device

ZHANG Xuejun　ZHANG Yunhe　SHI Zenglu　MA Shaoteng　HUANG Shuang　CHENG Jinpeng
(*School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*)

Abstract: The main structure and working parameters of the cleaning device of oil sunflower combine harvester were determined through the kinematic analysis of the mechanism and the force analysis of the material, in view of the problems of high seed trash rate and loss rate of the cleaning operation in the process of oil sunflower combine harvesting. The results of the single-factor test showed that the optimal working range of the cleaning device was 1 100 ~ 1 300 r/min for fan speed, 3 ~ 5 Hz for vibration frequency and 20° ~ 40° for the inclination angle of the wind separator. The Box - Behnken test was designed, the response surface regression model was established, and the parameters were optimized. The results showed that the order of significance of each test factor on the trash content rate and the loss rate was fan speed, vibration frequency, and the tilting angle of the splitter; when the fan speed was 1 200 r/min, the vibration frequency was 4 Hz, and the tilting angle of the splitter was 27°, the test results showed that the trash content of the oil sunflower seeds was higher than that of the other seeds. When the fan speed was 1 200 r/min, the vibration frequency was 4 Hz, and the tilting angle of the splitter was 27°, the test results showed that the seed content rate of oil sunflower was 4.25% and the seed loss rate was 1.82%, which meets the national standard requirements of cleaning of oil sunflower combined harvester.

Key words: oil sunflower combined harvester; cleaning device; material characteristics; parameter optimization

0　引言

油用向日葵是我国第四大油料作物,具有成长周期短、产量大及含油量高等优点,现有种植面积超过 1.16×10^6 hm^2,新疆地区自然环境适合油葵生长,为我国油葵主要产区之一,随着油葵产业不断发

收稿日期: 2022 - 02 - 04　修回日期: 2022 - 04 - 23
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0702104 - 3)和新疆维吾尔自治区高校科研计划创新团队项目(XJEDU2017T005)
作者简介: 张学军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: tuec@163.com

展,机械化水平低成为影响油葵经济效益的主要因素[1]。清选装置作为油葵联合收获机关键部件,其作业质量是评价油葵收获重要指标之一,油葵联合收获机清选装置多由谷物收获机改制而成[2-3],但油葵脱出物与谷物脱出物物料特性存在巨大差异,谷物清选装置对油葵清选适应性差。因此,有必要根据油葵的物料特性,优化油葵联合收获机清选装置结构及工作参数,提高油葵收获机械化水平。

近年来,科研人员针对联合收获机清选装置开展了大量研究[4]。这些研究主要包括清选装置结构设计及优化[5]、清选机理分析[6]及清选装置工作参数优化[7]等方面。因缺少油葵脱出物物料特性的测定,现有油葵联合收获机清选装置存在振动筛后段物料堵塞及油葵籽粒在装置底部堆积等问题,导致油葵籽粒含杂率高、损失率高,油葵联合收获机清选装置结构及工作参数优化有待深入研究。本文基于合作研制的 4LZK-2.5Z 型油葵联合收获机,进行油葵脱出物物料特性研究,确定清选装置结构参数及工作参数,以解决油葵清选装置含杂率高、损失率高的问题。

1 整机结构与工作过程

1.1 整机结构

4LZK-2.5Z 型履带式油葵联合收获机配有拨禾轮式割台[8]、脱粒装置、履带式驱动系统、驾驶室、工作参数采集系统及液压控制系统等装置,为清选装置田间收获、工况作业参数调整及结构参数优化提供试验平台,如图 1 所示,主要技术参数如表 1 所示。

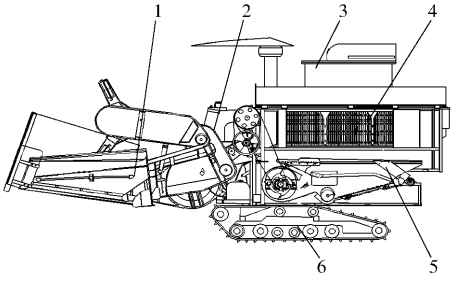


图 1 油葵联合收获机结构简图

Fig. 1 Structure drawing of oil sunflower combine harvester

1. 拨禾轮式割台 2. 驾驶室 3. 粮仓 4. 脱粒装置 5. 清选装置 6. 履带式驱动系统

1.2 工作过程

油葵联合收获机割台切割油葵植株得含有油葵籽粒的葵盘,通过提升器喂入脱粒装置,在脱粒元件揉搓作用下,于脱粒装置下方掉落含有油葵籽粒的脱出物,经清选装置作用后油葵籽粒被分离,随后输送至粮仓,杂质则排出机体。清选装置选用风筛式结构设计,由离心风机、分风板、振动筛上筛、振动筛下筛、籽粒输送板及输粮螺旋输送器等构成,如图 2 所示。

表 1 油葵联合收获机主要技术参数

Tab. 1 Main parameters of oil sunflower combine harvester

参数	数值
配套动力/kW	65
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 170×2 620×2 930
作业速度/(km·h^{-1})	5.8
喂入量/(kg·s^{-1})	2.5
振动筛尺寸(长×宽)/(mm×mm)	1 600×776
离心风机叶轮直径/mm	450

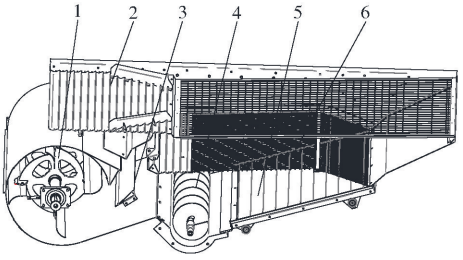


图 2 油葵联合收获机清选装置结构图

Fig. 2 Structure of oil sunflower combine harvester cleaning device

1. 离心风机 2. 振动筛上筛 3. 分风板 4. 输粮螺旋输送器 5. 籽粒输送板 6. 振动筛下筛

振动筛上筛采用编织网筛连至振动筛后段,替代传统逐稿尾筛。编织网筛可将脱出物中体积较大杂质筛分,筛面杂质在振动筛与清选气流共同作用下排出机体,同时油葵籽粒与小体积杂质可透过网筛孔,保证油葵籽粒的透筛率。透过振动筛的脱出物在清选气流作用下分离油葵籽粒,小体积杂质被吹出清选装置,油葵籽粒落至籽粒输送板喂入输粮螺旋输送器,油葵籽粒分离过程如图 3 所示。

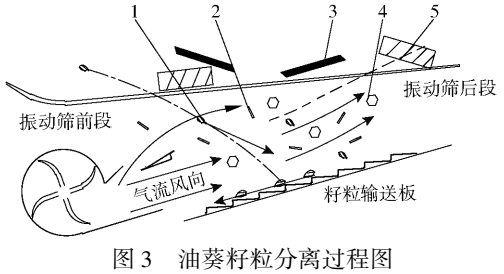


图 3 油葵籽粒分离过程图

Fig. 3 Diagram of oil sunflower seed separation process

1. 油葵籽粒 2. 碎茎秆 3. 长茎秆 4. 碎葵盘 5. 葵盘

2 脱出物物料特性试验

2.1 脱出物组成成分测定

油葵联合收获机脱粒装置为轴流式纹杆脱粒滚

筒，试验对象为新疆阜康地区成熟期矮大头 DW667 油用向日葵，葵盘由韧皮纤维层、木质层、葵盘叶片等组成，如图 4 所示。油葵脱出物主要成分为大块葵盘、碎葵盘、长茎秆、碎茎秆、油葵籽粒、碎叶片及颖壳等。碎葵盘等小体积杂质可随油葵籽粒透过筛网表面，透筛脱出物主要构成成分为油葵籽粒、碎葵盘、碎茎秆、轻质杂余（碎叶片及颖壳），如图 5 所示，质量占比分别为 85.6%、6.7%、4.9%、2.8%。

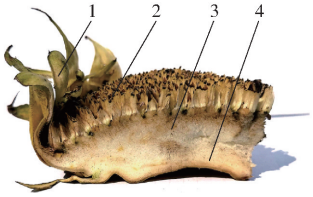


图 4　油葵葵盘结构图

Fig. 4　Oil sunflower sunflower plate structure diagram

1. 葵盘叶片　2. 油葵籽粒颖壳　3. 葵盘韧皮纤维层　4. 葵盘木质层

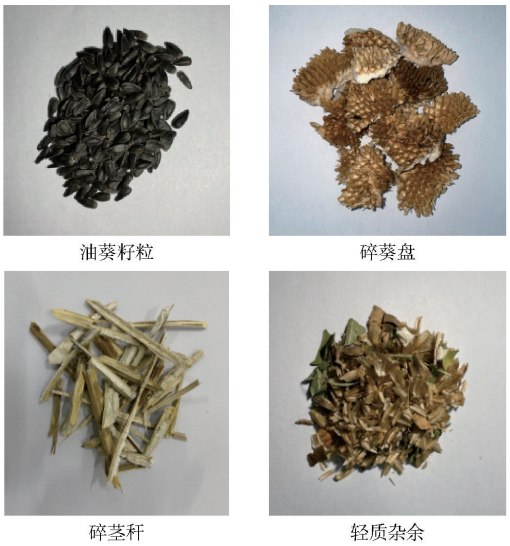


图 5　透筛脱出物组成成分图

Fig. 5　Composition diagram of through sieve mixture

2.2　脱出物物料特性测定

透筛脱出物的空气动力学特性可由物料悬浮速度表示[4]，与含水率及密度[9]有关，多次随机采集透筛脱出物试验样本，对透筛脱出物分组测定各物料的含水率及密度，计算各物料理论悬浮速度范围值。物料几何特征使用哈量 LINKS 型千分尺。物料密度采用排水法测试，使用仪器包括先行者 CP3102 型电子天平、测量物料体积的量筒、量杯及物料盛放盒等。含水率采用干燥法测定，由 DHG-9125A 型电热恒温鼓风干燥箱进行物料干燥，随后由精密电子天平进行称量，使用干基含水率表示，试验结果如表 2 所示。

2.3　脱出物悬浮速度测定

通过理论计算与实际试验相结合测定悬浮速

表 2　透筛脱出物基本物料特性参数

Tab. 2　Basic material characteristics of through sieve mixture

组分	含水率/%	形状	尺寸均值/mm	平均密度/(kg·m^{-3})
油葵籽粒	21.5	椭球形	11.53～15.39(长) 5.23～8.73(宽) 3.42～6.76(厚)	963
碎茎秆	39.1	椭圆柱形	30.42～93.23(长) 8.53～12.80(宽) 5.75～9.47(厚)	157
碎葵盘	32.7	立方体形	24.59～56.34(长) 20.42～43.29(宽) 13.97～24.13(厚)	196
碎叶片	73.6	薄片状	17.49～40.23(长) 19.45～35.23(宽) 0.35～0.87(厚)	

度，当物料自身重力与气流作用力相等时悬浮于垂直气流场[10]，此时物料处气流速度为悬浮速度，气流作用力表达式为

$$F_p = \frac{1}{2} C A \rho_s v^2 \tag{1}$$

式中　F_p——气流作用力，N

ρ_s——物料自身密度，油葵籽粒取 962 kg/m^3

A——物料垂直气流的截面积，m^2

C——阻力系数，取 0.44

v——气流流速，m/s

流体力学中气体流动阻力系数分为：Stokes 区、Allen 区、Newton 区，不同物料在气流场中的阻力系数值不同，采用粒径法[10]判断油葵籽粒及碎葵盘物料的阻力系数分区，各区域对应物料粒径分别为 $d_p \leqslant 2.2T$、$2.2T < d_p \leqslant 20.4T$、$20.4T < d_p \leqslant 1\ 100T$（$d_p$为被测物料粒径，mm），Newton 区的判别系数计算式为[11]

$$T = \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_s - \rho_a)}\right]^{\frac{1}{3}} = 0.065\ 61\ \text{mm} \tag{2}$$

式中　T——粒径法计算因子，mm

μ——空气运动粘度，取 0.181 Pa·s

ρ_a——空气密度，取 1.29 kg/m^3

计算得油葵籽粒及碎葵盘物料阻力系数均为 Newton 区。油葵籽粒形状为非球形，按照不规则球形物体的形状修正系数计算，取 $S = 1.1$[10]，碎葵盘按照立方体形状修正系数计算，取 $S = 1.86$[10]，短茎秆按照直径迎风面积[10]计算。Newton 区中物料悬浮速度 v_p 计算公式[10]为

$$v_p = \frac{5.451}{\sqrt{S}} \sqrt{\frac{d_p(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a}} \tag{3}$$

式中 S——非球形形状修正系数

计算得油葵籽粒理论悬浮速度为 13.85 m/s,碎葵盘理论悬浮速度为 6.97 m/s,短茎秆理论悬浮速度为 2.78 m/s,物料间悬浮速度存在明显差异,风选油葵籽粒具有良好效果。碎叶片及颖壳等轻质杂余迎风面积小且质量轻,不进行理论悬浮速度计算。使用密封袋分类封装脱出物,将物料置于悬浮速度试验台下方喂料口阻尼网处,通过调节变频器改变风机转速及试验装置内气流流速。观察透明管中被测物料运动状态,当物料呈动态平衡时,由热球式风速仪测量,记作被测物料悬浮速度。

油葵籽粒悬浮速度为 9.62 ~ 12.54 m/s,碎葵盘、短茎秆、碎叶片、颖壳等杂质的悬浮速度变化范围为 3.42 ~ 5.16 m/s、3.92 ~ 6.76 m/s、0.96 ~ 2.17 m/s、1.93 ~ 3.14 m/s,悬浮速度差异是离心风机工作参数优化的主要依据。为实现油葵脱出物中杂质的有效排出,清选装置内部气流流速应大于杂质悬浮速度,同时避免风速过高造成的籽粒损失增加,离心风机出风口处气流流速应小于油葵籽粒悬浮速度,参考文献[11],计算得离心风机出口气流流速为 9.62 m/s 时,风机转速为 1 326 r/min,结合样机试验,离心风机转速应小于 1 400 r/min。

3 清选装置关键部件设计

油葵联合收获机清选装置为曲柄双滑块机构,由偏心轮驱动,可视为曲柄,振动筛为负偏置式滑块机构,籽粒输送板为对心式滑块机构。振动筛机架为连杆,沿上滑块轨道平移,带动振动筛面往复运动,不同于曲柄摇杆式机构振动筛视为简谐运动[12],滑块机构中连杆各点运动趋势受装置结构参数影响。籽粒输送板为滑块部件,由提升连杆带动沿下滑块轨道平移,实现籽粒输送板面的往复运动,如图 6 所示。

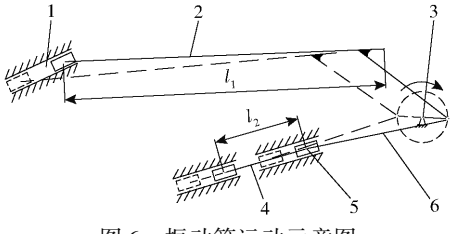


图 6 振动筛运动示意图

Fig. 6 Schematic of shaker movement

1. 上滑块轨道 2. 振动筛机架 3. 偏心轮 4. 籽粒输送板 5. 下滑块轨道 6. 提升连杆

3.1 振动筛主要参数设计

油葵脱出物组成成分在振动筛上分布不均,振动筛前段脱出物以油葵籽粒和轻质杂余为主,中段出现碎葵盘、短茎秆及碎叶片,后段掉落大块葵盘和长茎秆。不同脱出物对振动筛运动趋势要求不同,采用封闭矢量多边形分析法建立矢量方程,分析筛面不同点的运动趋势,以曲柄滑块机构和振动筛安装位置建立坐标系 $x'O'y'$ 和 xOy,如图 7 所示。

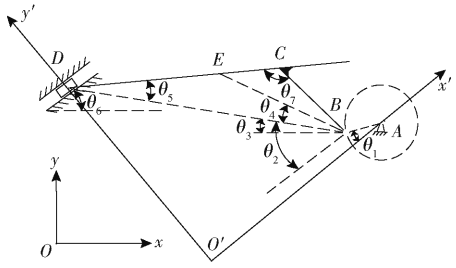


图 7 振动筛机构运动简图

Fig. 7 Movement diagram of vibrating screen mechanism

图 7 中 l_{AB} 为曲柄长度,l_{BC} 和 l_{CD} 为振动筛机架长度,振动筛体参数可由 $\triangle BCD$ 求得,l_{BD} 为曲柄铰接点与滑块所连虚拟杆长度,l_e 为曲柄滑块机构偏心距。构建封闭矢量多边形 $O'ABD$,坐标系 $x'O'y'$ 中位置矢量环方程为

$$\boldsymbol{l}_{AB}+\boldsymbol{l}_{BD}=\boldsymbol{l}_{AO'}+\boldsymbol{l}_{O'D} \tag{4}$$

式(4)的复数形式表达式为

$$l_{AB}e^{i\theta_1}+l_{BD}e^{i\theta_2}=l_e e^{i\pi/2}+l_{O'A} \tag{5}$$

式中 θ_1——曲柄转动角度,(°)

θ_2——连杆 BD 与 x' 轴夹角,(°)

将虚部与实部进行分离得

$$\begin{cases} l_{AB}\cos\theta_1+l_{BD}\cos\theta_2=l_{O'A} \\ l_{AB}\sin\theta_1+l_{BD}\sin\theta_2=l_e \end{cases} \tag{6}$$

对式(6)进行求解可得连杆 l_{BD} 角位移表达式

$$\theta_2=\arctan\frac{l_e-l_{AB}\sin\theta_1}{l_{O'A}-l_{AB}\cos\theta_1} \tag{7}$$

式(5)对 t 求导,通过虚部与实部相等,求得连杆 l_{BD} 角速度及角加速度为

$$\begin{cases} \omega_1=\dfrac{-\omega\cos\theta_1 l_{AB}}{\cos\theta_2 l_{BD}} \\ \alpha_1=\dfrac{\omega^2 l_{AB}\sin\theta_1+\omega_1^2 l_{BD}\sin\theta_2}{l_{BD}\cos\theta_2} \end{cases} \tag{8}$$

式中 ω——曲柄角速度,rad/s

点 E 为筛面任意一点,在坐标系 xOy 中位置方程为

$$\begin{cases} X_E=X_A+l_{AB}\cos(\theta_1-\theta_6)+l_{BE}\cos(\theta_2-\theta_6+\theta_4) \\ Y_E=Y_A+l_{AB}\sin(\theta_1-\theta_6)+l_{BE}\sin(\theta_2-\theta_6+\theta_4) \end{cases} \tag{9}$$

式中 l_{BE}——筛面任意点 E 与曲柄铰接处距离,mm

θ_4——振动筛内部夹角,(°)

θ_6——滑块轨道与地面夹角,(°)

由余弦定理求解 $\triangle BDE$ 得 l_{BE} 为

$$l_{BE}=\sqrt{l_{DE}^2+l_{BD}^2-2l_{DE}l_{BD}\cos\theta_5} \tag{10}$$

式中　l_{DE}——筛面任意点 E 与滑块距离，mm

θ_5——振动筛内部夹角，(°)

式(9)对 t 求二次导数，得点 E 水平和竖直方向加速度，为便于分析影响因素采用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix}u_x\\u_y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-l_{AB}\sin(\theta_1-\theta_6) & -l_{BE}\sin(\theta_2-\theta_6+\theta_4)\\ l_{AB}\cos(\theta_1-\theta_6) & l_{BE}\cos(\theta_2-\theta_6+\theta_4)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\\alpha_1\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}l_{AB}\cos(\theta_1-\theta_6) & l_{BE}\cos(\theta_2-\theta_6+\theta_4)\\ l_{AB}\sin(\theta_1-\theta_6) & l_{BE}\sin(\theta_2-\theta_6+\theta_4)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega^2\\\omega_1^2\end{bmatrix} \tag{11}$$

由式(11)可知，振动筛面各点的运动趋势受振动筛机架、曲柄长度、机架夹角、偏心距及滑块轨道与地面倾角等装置结构参数的影响，4LZK－2.5Z 型油葵联合收获机脱粒滚筒脱出段长度为 1 251 mm，油葵脱出物需要全部落入振动筛面，振动筛机架 l_{CD} 长度设计为 1 290 mm，根据联合收获机清选装置设计标准对振动幅度的要求[13]，确定曲柄长度为 35 mm，振动筛前段油葵籽粒含量较多，应增大脱出物分散程度提高油葵籽粒透筛率，振动筛后段存在葵盘等大块杂质，应提高振幅增强对杂质的抛送效果，因此以振动筛面后段振幅大于前段为目标[14]，通过前期样机试验，确定振动筛机架 l_{BC} 长度为 380 mm、偏心距为 800 mm、机架夹角为 142°、滑块轨道与地面倾角为 20°。

3.2　振动筛面葵盘运动分析

脱粒装置掉落至振动筛面的葵盘，因振动筛表面为编织网筛网孔较密，与葵盘间摩擦因数大，不易在筛面滑动，形成物料堆积筛网堵塞，影响清选质量，取振动筛面与曲柄运动趋势相同处，分析葵盘运动趋势，提高排出效率，将曲柄的运动划分 4 个区域，如图 8 所示。

当曲柄由区域Ⅰ向区域Ⅱ运动且 $N>0$ 时，葵盘沿筛面方向受力 F_x 的方程为

$$F_x=F_p\cos\beta+q\cos(\omega t_1-\gamma)-G\cos\gamma-F_f \tag{12}$$

其中　　$F_f=N\tan\varphi_1$

式中　N——葵盘支持力，N

F_f——葵盘摩擦力，N

G——葵盘重力，N

γ——重力与筛面垂直方向夹角，(°)

β——气流作用力与筛面夹角，(°)

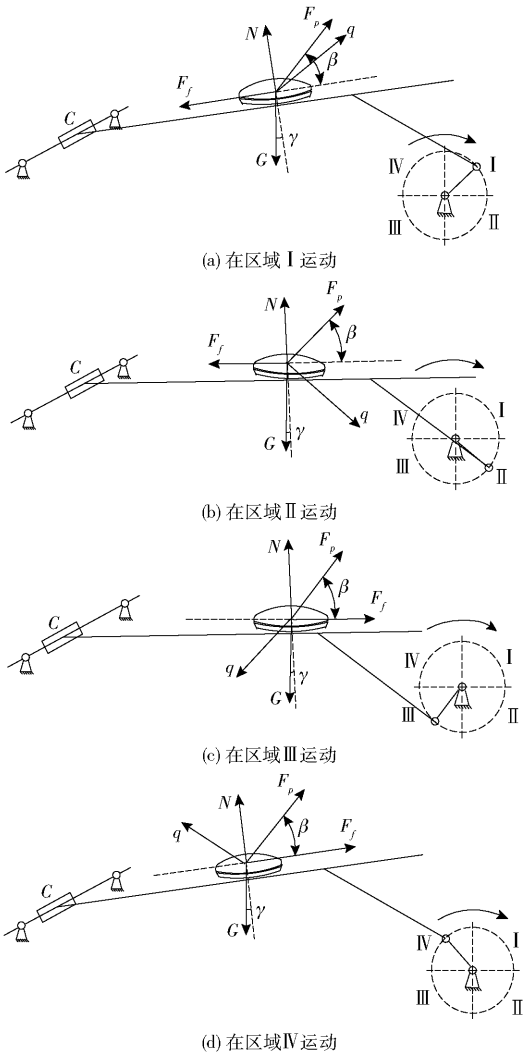
φ_1——葵盘滑动摩擦角，(°)

t_1——曲柄转动时间，s

曲柄由区域Ⅲ向区域Ⅳ运动且 $N>0$ 时，葵盘沿筛面方向受力方程为

$$F_x=F_p\cos\beta-q\cos(\omega t_1-\gamma)-G\cos\gamma+F_f \tag{13}$$

当 $F_x\neq0$ 时，葵盘在区域Ⅰ、Ⅱ产生向振动筛前段相对运动的趋势，在区域Ⅲ、Ⅳ产生向振动筛后段相对运动趋势。



(a) 在区域Ⅰ运动　(b) 在区域Ⅱ运动　(c) 在区域Ⅲ运动　(d) 在区域Ⅳ运动

图 8　葵盘在曲柄不同运动状态下受力图

Fig. 8　Mallow plate subjected to force diagram under different motion states of crank

葵盘在振动筛表面垂直方向受力方程为

$$\begin{cases}N=G\cos\gamma\pm u\sin(\omega t_1-\gamma)-F_p\sin\beta\\ G=mg\\ q=m\omega^2 r\end{cases} \tag{14}$$

式中　q——葵盘惯性力，N

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

m——单个葵盘质量，kg

r——曲柄长度，mm

曲柄由区域Ⅱ向区域Ⅲ运动，气流对葵盘的作用力小于重力，所受筛面支持力始终大于 0，葵盘不会被抛离筛面。曲柄由区域Ⅳ向区域Ⅰ运动，当 $N=0$ 时葵盘位于抛起临界点，葵盘抛起角度与曲柄转动角度有关，抛起时曲柄角速度需满足条件

$$\omega^2 r\sin(\omega t_1-\gamma)\geqslant g\cos\gamma-\frac{F_p}{m}\sin\beta \tag{15}$$

葵盘抛起后的运动状态与抛起角度有关,若曲柄转动角度为 δ 时,葵盘抛离筛面,其水平与竖直方向速度 v_x、v_y 为

$$\begin{cases} v_x = \omega r \sin\delta \\ v_y = \omega r \cos\delta \end{cases} \tag{16}$$

葵盘抛起后受重力与气流作用力的合力为 F,再次掉落至筛面的时间 t_2 为

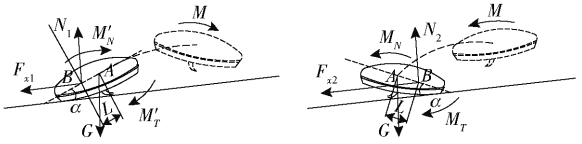
$$\begin{cases} F = ma = mg - F_p\cos(\beta+\gamma) \\ t_2 = \dfrac{v_y}{a} = \dfrac{2m\omega r\cos\delta}{mg - F_p\cos(\beta+\gamma)} \end{cases} \tag{17}$$

式中 a——葵盘合加速度,m/s^2

葵盘水平方向移动距离 X 为

$$X = v_x t_2 + \frac{1}{2}at_2^2 = 2\omega r t_2 \sin\delta + \frac{mg + F_p\cos(\beta+\gamma)}{2m}t_2^2 \tag{18}$$

葵盘底部存有部分葵柄,倾斜于振动筛表面,葵盘受力点与质心为不同点,导致葵盘在抛起过程中受到力矩作用绕质心发生转动,若葵盘转动角度过大,葵盘再次接触筛面的姿态不固定,存在向振动筛前段运动的情况,影响清选效率,对葵盘的抛起姿态进行分析,如图 9 所示。根据受力点与质心相对位置,分类为受力点位于质心左侧或受力点位于质心右侧。



(a) 受力点位于质心左侧 (b) 受力点位于质心右侧

图 9 葵盘抛起姿态图

Fig. 9 Sunflower dish throwing posture diagrams

葵盘受力点位于质心左侧时有

$$\begin{cases} M_1 = M'_N + M'_T \\ M'_N = N_1 L\cos\alpha \\ M'_T = F_{x1} L\sin\alpha \end{cases} \tag{19}$$

葵盘受力点位于质心右侧时有

$$\begin{cases} M_2 = M_N - M_T \\ M_N = N_2 L\cos\alpha \\ M_T = F_{x2} L\sin\alpha \end{cases} \tag{20}$$

动量矩公式为 $M = J\omega_2$,葵盘转动角 δ_1 为

$$\delta_1 = \omega_2 t_2 = \frac{M}{J}t_2 \tag{21}$$

式中 J——转动惯量,kg·m^2

N_1、N_2——葵盘所受筛面垂直合力,N

F_{x1}、F_{x2}——葵盘所受筛面水平合力,N

M、M_1、M_2——葵盘合力矩,N·m

M_N、M'_N——垂直筛面合力产生的力矩,N·m

M_T、M'_T——水平筛面合力产生的力矩,N·m

L——葵盘受力点与质点距离,mm

α——葵盘与筛面夹角,(°)

ω_2——葵盘转动角速度,rad/s

由式(18)可知,葵盘抛起后移动距离受曲柄转速影响,曲柄转速提高时,葵盘抛起角度减小,垂直方向速度增大,水平位移减少,使得葵盘排出清选装置所需时间增加,同时葵盘抛起时间增大,由式(21)可知,葵盘抛起时间增大使得葵盘空中转动角度增大,造成筛面接触时运动状态不明,葵盘无法有效排出,清选效率降低。振动筛面各点运动趋势不同,需通过试验确定曲柄转速较优工作区间。

3.3 籽粒输送板主要参数设计

油葵籽粒穿过清选气流与籽粒输送板表面碰撞后,法向速度降低,运动状态发生改变,落入籽粒输送板。油葵籽粒的碰撞恢复系数随碰撞角增加而增加[15],为使油葵籽粒碰撞后尽可能平稳落入槽内,减少飞溅损失,籽粒输送板表面采用阶梯状设计,单层阶梯外形与锯齿相似,单向输送油葵籽粒。籽粒输送板运动状态与滑块 M 相同,曲柄滑块机构中连杆远长于曲柄,滑块 M 的运动可看作简谐运动[16],如图 10 所示。

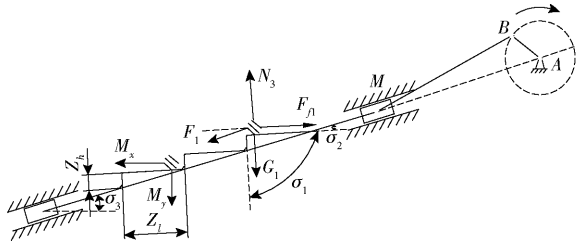


图 10 籽粒输送板物料受力分析图

Fig. 10 Working diagram of grain conveyor plate

油葵籽粒在籽粒输送板表面受力方程为

$$\begin{cases} F_1 = m_1\omega r\sin(\omega t_1) \\ N_3 = G_1\cos(\sigma_3 - \sigma_2) + F_1\sin\sigma_2 = \\ \qquad m_1 g\cos(\sigma_3 - \sigma_2) + m_1\omega r\sin(\omega t_1)\sin\sigma_2 \\ F_{f1} = N_3\tan\varphi_2 \end{cases} \tag{22}$$

式中 F_1——油葵籽粒惯性力,N

N_3——油葵籽粒支持力,N

F_{f1}——油葵籽粒摩擦力,N

G_1——油葵籽粒重力,N

m_1——单个油葵籽粒质量,kg

φ_2——油葵籽粒滑动摩擦角,(°)

σ_2——锯齿宽面与籽粒输送板夹角,(°)

σ_3——滑块轨道与地面夹角,(°)

油葵籽粒沿输送板向下滑动的临界条件为

$$G_1\sin(\sigma_3-\sigma_2)+F_1\cos\sigma_2\geqslant F_{f1} \tag{23}$$

将式(22)代入式(23)可得

$$g\sin(\sigma_3-\sigma_2)+\omega^2 r\sin(\omega t_1)\cos\sigma_2\geqslant (g\cos(\sigma_3-\sigma_2)+\omega^2 r\sin(\omega t_1)\sin\sigma_2)\tan\varphi_2 \tag{24}$$

化简式(24)，将 $\max(\sin(\omega t_1))=1$ 和 $\omega=\frac{n\pi}{30}$ 代入，得油葵籽粒沿输送板表面向下滑动时曲柄临界转速 n_{cri} 为

$$n_{cri}\geqslant 30\sqrt{\frac{g\sin(\varphi_2+\sigma_2-\sigma_3)}{\pi^2 r\cos(\sigma_2+\varphi_2)}} \tag{25}$$

根据前期试验，考虑籽粒输送板的安装空间，同时保证油葵籽粒尽可能掉落至籽粒输送板表面，设计提升连杆 BM 长 300 mm，籽粒输送板长 610 mm，滑块轨道与地面夹角为 $\sigma_3=16°$。籽粒输送板表面锯齿需逐齿推送油葵籽粒，使前一级锯齿槽内籽粒落入下一级锯齿槽，同时防止籽粒回滑至上一级锯齿槽。当籽粒输送板沿滑块轨道上行时，油葵籽粒沿锯齿宽面相对输送板向下移动，籽粒水平位移 M_x 应大于单齿距的宽度 Z_l，籽粒输送板下行时，油葵籽粒在回推作用力下易发生回滑，锯齿高度 Z_h 应大于籽粒宽度最大值，确定锯齿高度为 13 mm。锯齿内部夹角 σ_1 过大会导致油葵籽粒抛离籽粒输送板形成籽粒飞溅，过小则会形成锯齿槽内籽粒堆积，籽粒输送板夹角 σ_2 影响锯齿宽面对油葵籽粒的推送作用，角度过大会导致籽粒反向回滑，过小时油葵籽粒垂直位移 M_y 减少，籽粒推送效率降低，参考振动筛抖动板设计，确定锯齿内部夹角为 95°、锯齿宽面与籽粒输送板夹角为 12°，由三角代换得锯齿宽度为 52 mm。油葵籽粒与输送板表面为非弹性碰撞，为避免油葵籽粒在碰撞与推送过程产生破损，齿尖进行圆角处理，圆角半径为 2 mm。

油葵籽粒滑动摩擦角取 $\varphi_2=29°$[17]，将相关参数代入式(25)，得油葵籽粒沿输送板表面向下滑动时需满足 $n\geqslant 119.61$ r/min，取整确定曲柄转速应大于 120 r/min，即振动频率 2 Hz。

4　试验

4.1　试验方案

试验于新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州阜康市进行，试验品种为矮大头 DW667 号油葵，种植平均行距为 400 mm，完整葵盘质量范围为 280 ~ 370 g，油葵籽粒千粒质量为 55.9 g，油葵籽粒平均含水率为 27.1%，自然落籽量为 0.2 g/m^2，作物长势均匀，地势平坦，无障碍物。参考相关标准 GB/T 8097—2008《联合收割机试验方法》和 NY/T 373—2011《风筛式种子清选机质量评价技术规范》，以风机转速、振动频率和分风板倾角作为试验因素，油葵籽粒含杂率 S_w 和籽粒损失率 Z_p 为清选质量评价指标。

油葵联合收获机装有自抗扰-动态矩阵系统，可保证喂入量稳定在 2.45 kg/s。为减少田间作业对单因素试验造成的误差，试验时拆除油葵联合收获机割台，采用输送带喂入葵盘。每组试验仅调整单个试验因素，参数调节通过机器液压系统及更换零部件实现，数值由霍尔转速传感器反馈至监测显示屏。每组试验开始前清除上组试验残留物料，待本次试验结束，通过分样筛将粮仓内油葵籽粒与杂质筛分，统计油葵籽粒含杂率；使用集料箱与集料袋收集清选装置尾部排出物，筛选其中油葵籽粒，统计籽粒损失率。为提高单因素试验的准确度，每组试验重复 3 次，将均值作为试验结果。

4.2　单因素试验

图 11a 为风机转速对清选性能的影响，设定振动频率为 4 Hz，分风板倾角为 30°，风机转速在 1 000 ~ 1 400 r/min 范围内选取 5 个转速对清选装置的清选性能进行评价。随风机转速提高，油葵籽粒含杂率呈下降趋势，籽粒损失率持续上升。风机转速升高对应气流作用力增大，对油葵籽粒与杂质分离作用增强，清选效果得到明显提高，但被吹出清选室油葵籽粒数量增加，导致籽粒损失率上升。风机转速取值范围为 1 000 ~ 1 200 r/min 时，油葵籽粒含杂率迅速下降，同时损失率上升明显；风机转速调节至 1 200 ~ 1 400 r/min 区间，油葵籽粒含杂率继续下

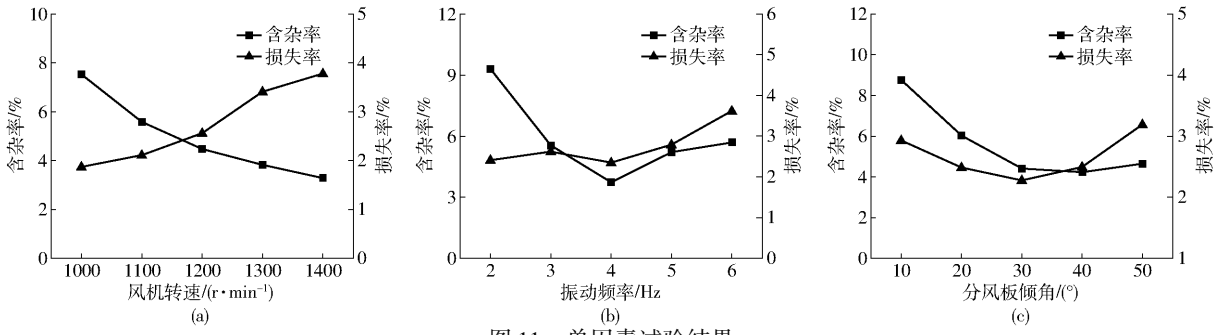


图 11　单因素试验结果

Fig. 11　Single factor test results

降,籽粒损失率逐渐趋于稳定上升幅度较小,风机转速 1 100 ~ 1 300 r/min 为清选装置较优工作区间。

图 11b 为振动频率对清选性能的影响,固定风机转速为 1 200 r/min,分风板倾角为 30°,振动频率在 2 ~6 Hz 的范围内调整。油葵籽粒含杂率呈先下降后上升趋势,籽粒损失率整体呈现缓慢上升趋势。振动频率较低时,筛面物料抛起效果差,筛网堵塞,部分油葵籽粒未透过筛面被直接排出。当振动频率位于 2 ~4 Hz 区间时,脱出物在振动筛面离散度增大、跳动明显,对油葵籽粒与杂质的筛分效果明显,油葵籽粒含杂率显著下降。在 4 ~6 Hz 区间时,随振动频率增大,部分杂质碰撞后落回筛面,堆积于筛面影响杂质排出,油葵籽粒含杂率上升,同时油葵籽粒未经筛分被直接排出,导致籽粒损失率上升。振动频率 3 ~5 Hz 是满足油葵联合收获机清选作业要求的较优区间。

图 11c 为分风板倾角对清选性能的影响,分风板倾角在 10° ~50°区间调节进行试验,由图可知油葵籽粒含杂率呈先下降后平稳的趋势,籽粒损失率呈先降后上升趋势,产生这种变化趋势的原因是:风机产生的清选气流受分风板导向吹至清选装置各处,当分风板倾角处于低水平时,清选装置内部气流散乱,气流对杂质推送效果较弱,含杂率高,筛面处杂质堆积,导致油葵籽粒无法透过筛网,油葵籽粒损失率高;随着分风板倾角增大,气流推送效果明显,杂质吹出清选装置,籽粒透筛率上升,籽粒损失率下降,当分风板倾角处于较高水平时,振动筛前中段清选气流推送效果变强,部分油葵籽粒被直接吹出清选装置,同时振动筛后段推送效果变弱,脱出物在筛面堆积,造成籽粒损失率上升。

4.3 正交试验

为进一步探究上述试验因素与清选指标之间的交互作用,寻找影响规律及较优参数组合,根据响应面分析法,以油葵籽粒含杂率和籽粒损失率为试验指标,开展响应面试验。根据单因素结果选取该机的风机转速、振动频率、分风板倾角作为试验因素,试验因素编码设计如表 3 所示,试验设计与结果如表 4 所示,A、B、C 为因素编码值。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Factors and levels of experiment

编码	因素		
	风机转速/(r·min^{-1})	振动频率/Hz	分风板倾角/(°)
-1	1 100	3	20
0	1 200	4	30
1	1 300	5	40

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experimental layout and results

序号	试验因素			油葵籽粒含杂率 Y_1/%	油葵籽粒损失率 Y_2/%
	A	B	C		
1	0	0	0	4.28	1.51
2	-1	-1	0	6.62	2.26
3	0	-1	1	8.06	2.78
4	0	0	0	3.34	1.96
5	0	0	0	3.61	1.48
6	0	0	0	5.36	1.62
7	1	0	1	3.45	3.47
8	0	1	1	11.29	2.15
9	1	0	-1	4.38	2.35
10	1	1	0	7.33	2.75
11	0	1	-1	10.06	1.99
12	1	-1	0	4.94	4.02
13	-1	1	0	11.07	2.98
14	-1	0	1	12.15	1.80
15	-1	0	-1	6.81	2.19
16	0	-1	-1	6.40	2.36
17	0	0	0	4.69	1.71

4.4 回归模型建立与显著性检验

通过 Design-Expert 12 软件开展多元回归拟合分析,建立油葵籽粒含杂率、籽粒损失率与风机转速、振动频率、分风板倾角 3 个自变量的响应面正交回归模型,对其进行方差分析,结果如表 5 所示。油葵籽粒含杂率和损失率模型 $P = 0.001$、$P < 0.000\ 1$ ($P < 0.01$),证实所得回归模型高度显著;失拟项 P 分别为 0.233 8、0.790 9,该清选装置工作参数可根据回归模型进行优化。油葵籽粒含杂率模型中

表 5 油葵籽粒含杂率与损失率方差分析

Tab. 5 Variance analysis of impurity rate and loss rate in oil sunflower

方差来源	含杂率				损失率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	127.68	9	14.17	0.001 0	7.64	9	31.56	<0.000 1
A	34.24	1	34.21	0.000 6	1.41	1	52.46	0.000 2
B	23.36	1	23.34	0.001 9	0.300 3	1	11.16	0.012 4
C	6.77	1	6.77	0.035 4	0.2145	1	7.97	0.025 6
AB	1.06	1	1.06	0.337 5	0.99	1	36.80	0.000 5
AC	9.83	1	9.82	0.016 5	0.57	1	21.19	0.002 5
BC	0.03	1	0.03	0.858 5	0.02	1	0.63	0.454 0
A^2	1.04	1	1.04	0.342 0	2.3	1	85.60	<0.000 1
B^2	31.54	1	31.51	0.000 8	1.55	1	57.67	0.000 1
C^2	15.92	1	15.91	0.005 3	0.013 7	1	0.51	0.498 8
残差	7.01	7			0.188	7		
失拟项	4.34	3	2.17	0.233 8	0.039 4	3	0.353	0.790 9
误差	2.66	4			0.148 9	4		
总和	134.68	16			3.41	16		

A、B、B^2、C^2对回归模型影响极显著($P<0.01$)；AB、BC、A^2对回归模型影响不显著($P>0.05$)；油葵籽粒损失率模型中A、AB、AC、A^2、B^2对回归模型影响极显著($P<0.01$)；BC、C^2对回归模型影响不显著($P>0.05$)。去除不显著回归项优化后的方程为

$$Y_1 = 5.05 - 2.07A + 1.71B + 0.92C - 1.57AC + 2.76B^2 + 1.97C^2 \quad (26)$$

$$Y_2 = 1.68 + 0.42A - 0.19B + 0.16C - 0.49AB + 0.38AC + 0.74A^2 + 0.61B^2 \quad (27)$$

根据回归模型分析结果，利用数据分析软件绘制交互响应曲面，如图 12 所示。

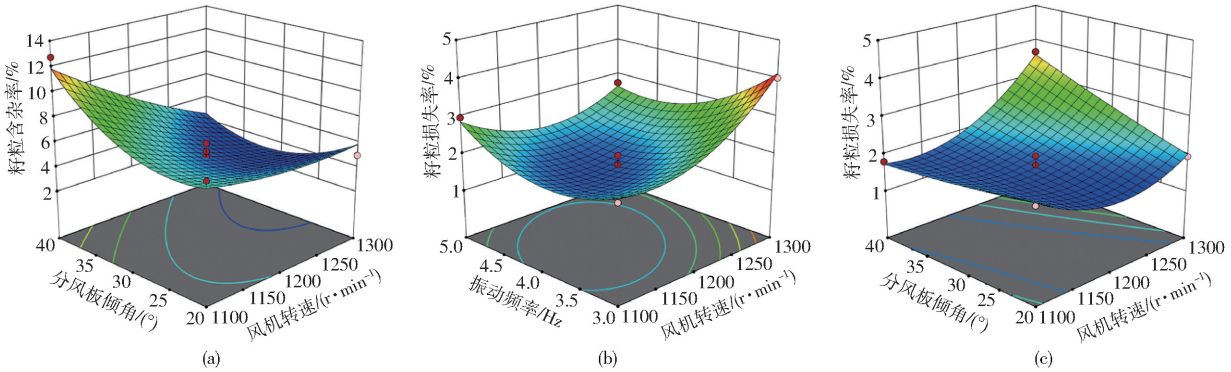


图 12　正交试验响应曲面

Fig. 12　Orthogonal test response surfaces

由图 12a 可知，当风机转速与分风板倾角增大时，含杂率均呈下降趋势，与风机转速呈负相关关系，分风板倾角呈先负后正相关关系。风机转速变化对响应曲面影响更明显，主要因为风机转速改变清选装置各处气流作用力，影响杂质排出效果。由图 12b 可知，振动频率与风机转速对油葵籽粒损失率均呈先负后正相关关系，风机转速对油葵籽粒损失率的作用比振动频率的作用显著。由图 12c 可知，风机转速与油葵籽粒损失率呈正相关关系，分风板倾角与油葵籽粒损失率在风机转速处于高水平时，呈正相关关系，由图可知风机转速对油葵籽粒损失率的作用相比分风板倾角作用显著。各试验因素对油葵籽粒含杂率和损失率影响大小顺序均为风机转速、振动频率、分风板倾角。

以籽粒含杂率、籽粒损失率最小值为优化目标，以风机转速、振动频率和分风板倾角为优化对象，通过 Design-Expert 软件对回归模型进行寻优，目标及约束条件方程为

$$\begin{cases} \min Y_1(A,B,C) \\ \min Y_2(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (28)$$

得到清选装置最优工作参数为：风机转速 1 204.7 r/min、振动频率 3.91 Hz、分风板倾角 26.48°，此参数组合下求得油葵籽粒含杂率与籽粒损失率为 3.95%、1.65%。

4.5　试验验证

根据优化所得参数组合进行 3 次田间验证试验(图 13)，考虑试验可行性将工作参数圆整：风机转速 1 200 r/min、振动频率 4 Hz，分风板倾角 27°。田间试验过程分为 3 个区域：调节清选装置工作参数的稳定区、油葵联合收获机作业的测定区和确保试验完全进行的停车区。各区域长度均为 20 m，其中测定区宽度不小于 3 个工作幅宽。试验结果如表 6 所示。



图 13　田间验证试验

Fig. 13　Validation test in field

表 6　试验验证结果

Tab. 6　Experiment verification results　%

试验序号	籽粒含杂率	籽粒损失率
1	3.96	1.75
2	4.67	1.84
3	4.12	1.88
平均值	4.25	1.82

分析田间验证试验的结果，得出最优参数组合下平均油葵籽粒含杂率为 4.25%，平均籽粒损失率为 1.82%，油葵籽粒含杂率小于 5%，损失率小于

3%,满足国家及相关标准要求。

5 结论

(1)分析了油葵联合收获机脱粒装置脱出物组成成分及物料特性,测定了脱出物各物料悬浮速度,通过运动学分析确定清选装置振动筛与籽粒输送板的主要结构参数,对振动筛面葵盘及籽粒输送板面油葵籽粒进行了受力分析,得到影响清选质量主要工作参数。

(2)开展了单因素试验和响应面试验,得到了清选装置主要工作参数取值范围:风机转速 1 100 ~ 1 300 r/min、振动频率 3 ~ 5 Hz、分风板倾角 20° ~ 40°,各因素对油葵籽粒含杂率和损失率影响大小顺序均为风机转速、振动频率、分风板倾角。

(3)通过 Design-Expert 软件优化工作参数,得工作参数组合:风机转速 1 204.7 r/min、振动频率 3.91 Hz、分风板倾角 26.48°,此时,油葵籽粒含杂率为 3.95%,籽粒损失率为 1.65%。田间试验表明:风机转速 1 200 r/min、振动频率 4 Hz、分风板倾角 27°时,平均油葵籽粒含杂率为 4.25%,平均籽粒损失率为 1.82%,满足油葵联合收获机清选的国家标准要求。

参 考 文 献

[1] 宗望远, 刘羊, 黄小毛, 等. 向日葵机械化收获研究现状及发展对策[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(3): 600 - 606.
ZONG Wangyuan, LIU Yang, HUANG Xiaomao, et al. Present situation and developmental strategies for sunflower mechanized harvest in China[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(3): 600 - 606. (in Chinese)

[2] 郝建军,魏文波,秦家辉,等. 切流式油葵脱粒筛分机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):139 - 148.
HAO Jianjun,WEI Wenbo,QIN Jiahui,et al. Design and test of cut - flow type oil sunflower threshing and screening machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):139 - 148. (in Chinese)

[3] 徐立章, 李洋, 李耀明, 等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1 - 16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1 - 16. (in Chinese)

[4] 王立军, 宋良来, 冯鑫, 等. 谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 1 - 17.
WANG Lijun, SONG Lianglai, FENG Xin, et al. Research status and development analysis of screening devices of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 1 - 17. (in Chinese)

[5] 王立军, 冯鑫, 郑招辉, 等. 玉米清选组合孔筛体设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 104 - 113.
WANG Lijun, FENG Xin, ZHENG Zhaohui, et al. Design and test of combined sieve of maize screening[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 104 - 113. (in Chinese)

[6] 耿端阳, 牟孝栋, 张国栋, 等. 小麦联合收获机清选机理分析与优化试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(1): 219 - 230.
GENG Duanyang, MOU Xiaodong, ZHANG Guodong, et al. Analysis and optimization of cleaning mechanism of wheat combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2022,52(1):219 - 230. (in Chinese)

[7] 程超, 付君, 陈志, 等. 玉米籽粒收获机清选装置参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 151 - 158.
CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization experiment on cleaning device parameters of corn kernel harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 151 - 158. (in Chinese)

[8] 刘巍, 黄小毛, 马丽娜, 等. 油葵联合收获机专用割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8):83 - 88,135.
LIU Wei, HUANG Xiaomao, MA Li'na, et al. Design and experiment of special header of oil sunflower combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):83 - 88,135. (in Chinese)

[9] 侯华铭, 崔清亮, 郭玉明. 全喂入谷子联合收获机脱出物含水率对其悬浮特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 29 - 35.
HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming. Effects of moisture contents of threshed materials from whole-feeding combine for foxtail millet on their suspension characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 29 - 35. (in Chinese)

[10] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[11] 杨猛, 张延化, 张冲, 等. 先揉切后分离风筛组合式花生膜秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(12): 112 - 121.
YANG Meng, ZHANG Yanhua, ZHANG Chong, et al. Design and experiment of fan-sieve combined peanut film seedling separating device based on shredding and separating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 112 - 121. (in Chinese)

[12] 耿端阳,苏国梁,魏忠彩,等. 马铃薯清选机气力悬浮薯石分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021, 52(5):102 - 110.
GENG Duanyang, SU Guoliang, WEI Zhongcai, et al. Design and experiment of potato-stone separator based on airflow suspension technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5):102 - 110. (in Chinese)

[13] 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.

[14] 王立军, 段良坤, 郑招辉, 等. 三移动两转动振动筛驱动机构优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 138 - 145.
WANG Lijun, DUAN Liangkun, ZHENG Zhaohui, et al. Optimization and experiment on driving mechanism of vibrating

screen with three translations and two rotations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 138 – 145. (in Chinese)

[15] 刘羊, 宗望远, 马丽娜, 等. 采用高速摄影技术测定油葵籽粒三维碰撞恢复系数[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 44 – 53.
LIU Yang, ZONG Wangyuan, MA Li'na, et al. Determination of three-dimensional collision restitution coefficient of oil sunflower grain by high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 44 – 53. (in Chinese)

[16] 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. Parameter optimization and experiment on 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)

[17] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 36 – 44.
HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 36 – 44. (in Chinese)

(上接第 102 页)

[18] 栗晓宇, 杜岳峰, 牛兴成, 等. 玉米清选装置结构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 233 – 242.
LI Xiaoyu, DU Yuefeng, NIU Xingcheng, et al. Optimization design and experiment of corn cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 233 – 242. (in Chinese)

[19] 张克平, 樊宏鹏, 孙步功, 等. 间作模式下小麦联合收获机清选装置 CFD – DEM 联合仿真与试验验证[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 268 – 274.
ZHANG Keping, FAN Hongpeng, SUN Bugong, et al. The CFD – DEM gas-solid coupling simulation and experimental verification of cleaning device of wheat combine harvester for intercropping system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(1):268 – 274. (in Chinese)

[20] 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.
WANG 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)

[21] 宋学锋, 戴飞, 张雪坤, 等. 基于 CFD – DEM 耦合的揉丝机排料装置内物料运动模拟与试验[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(5): 99 – 107.
SONG Xuefeng, DAI Fei, ZHANG Xuekun, et al. Numerical simulation and experiment of materials movement based on CFD – DEM coupling method in the discharging device of kneading machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(5): 99 – 107. (in Chinese)

[22] DAI F, SONG X F, ZHAO W Y, et al. Motion simulation and test on threshed grains intapered threshing and transmission device for plot wheat breeding based on CFD – DEM[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019,12(1): 66 – 73.

[23] DAI F, SONG X F, GUO W J, et al. Simulation and test on separating cleaning process of flax threshing material based on gas-solid coupling theory[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2020,13(1): 73 – 81.

[24] DAI F, ZHAO W Y, SONG X F, et al. Working process analyses of direct insert hill-device with corn whole plastic-film mulching on double ridges based on EDEM[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(4): 124 – 131.

[25] 石林榕, 赵武云. 西北寒旱农区胡麻滚勺式精量穴播器的设计与试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1 – 16[2022 – 04 – 18]. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20211270.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun. Design and test of a rolling spoon type precision hole sower for caraway in northwest cold and arid agricultural region[J/OL]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition): 1 – 16[2022 – 04 – 18]. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20211270. (in Chinese)

[26] 石林榕, 马周泰, 赵武云, 等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 25 – 33.
SHI Linrong, MA Zhoutai, ZHAO Wuyun, et al. Calibration of simulation parameters of flaxed seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 25 – 33. (in Chinese)

[27] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM – CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48 – 57.
DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM – CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):48 – 57. (in Chinese)

[28] 高筱钧, 徐杨, 杨丽, 等. 基于 DEM – CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):92 – 100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of venturi feeding tube based on DEM – CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):92 – 100. (in Chinese)