



刘志,季邦,王修善,等.南方玉米籽粒联合收获机清选装置参数优化与试验[J].江西农业大学学报,2025,47(3):791-802.
LIU Z,JI B,WANG X S,et al.Parameter optimization and test of cleaning device for southern corn kernel combine harvester[J].Acta
agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(3):791-802.

南方玉米籽粒联合收获机清选装置 参数优化与试验

刘志¹,季邦^{1,2,3*},王修善^{1,2},范荣巍¹,谢方平^{1,2}

(1.湖南农业大学 机电工程学院,湖南 长沙 410128;2.智能农机装备湖南省重点实验室,湖南 长沙 410128;3.农业装备技术全国重点实验室,广东 广州 510642)

摘要:【目的】针对南方丘陵地区玉米籽粒联合收获机在清选作业中籽粒含杂率和清选损失率偏高的问题,通过优化清选装置结构和工作参数,提升清选效率,降低籽粒含杂率和清选损失率。【方法】对清选装置的工作原理进行了系统分析,并针对尾部逐稿器结构进行了优化设计。在此基础上,设计了一种以鱼鳞筛为主体结构的风机转速、振动频率和鱼鳞筛开度参数可调的玉米清选试验台。通过单因素试验,选取风机转速、振动频率和鱼鳞筛开度作为主要影响因素,以籽粒含杂率和清选损失率为评价指标,确定了各因素的最佳参数范围。随后,采用三因素三水平响应曲面试验,建立了各因素与评价指标之间的回归数学模型,并利用 Design Expert 13.0 软件对模型进行求解,得出最佳参数组合。最后,将优化后的参数应用于清选试验台和4YZ-2玉米联合收获机,分别进行了验证试验和田间试验,以评估优化效果。【结果】单因素试验结果表明,风机转速、振动频率和鱼鳞筛开度对清选性能具有显著影响。最佳参数范围为:风机转速1 500~1 700 r/min、振动频率540~580 r/min、鱼鳞筛开度16~20 mm。响应曲面试验进一步优化了参数组合,得出最佳参数为:风机转速1 604.3 r/min、振动频率540.0 r/min、鱼鳞筛开度18.1 mm,此时对应的籽粒含杂率与清选损失率分别为2.21%和0.9%。将此参数取整后的验证试验结果显示,最佳参数组合下的籽粒含杂率与清选损失率分别为2.304%和0.73%。田间试验结果表明,当籽粒含水率为27.8%时,籽粒含杂率为2.13%,清选损失率为0.98%。【结论】验证试验和田间试验结果与回归模型的预测值较为接近,表明所建立的回归模型具有较高的可信度,优化结果有效。本研究通过优化清选装置的结构和工作参数,降低了籽粒含杂率和清选损失率,为玉米籽粒联合收获机清选性能的改善提供了可靠的理论依据。

关键词:玉米籽粒联合收获机;清选装置;参数优化;籽粒含杂率;清选损失率;鱼鳞筛

中图分类号:S225.5¹ 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2025)03-0791-12

CSTR:32399.14.auj.2025068



Parameter optimization and test of cleaning device for southern corn kernel combine harvester

LIU Zhi¹,JI Bang^{1,2,3*},WANG Xiushan^{1,2},FAN Rongwei¹,XIE Fangping^{1,2}

收稿日期:2024-12-19 修回日期:2025-02-15

基金项目:湖南省智能农机装备创新研发项目(湘财农指[2023]60号)和湖南省旱粮产业技术体系项目

Project supported by Hunan Intelligent Agricultural Machinery Equipment Innovation and R&D Project (Xiang
Cai Nong Zhi [2023] No. 60)and Hunan Dryland Grain Industrial Technology System

作者简介:刘志,硕士生,orcid.org/0009-0003-4065-8392,1345175302@qq.com;*通信作者:季邦,讲师,主要从事农业
机械装备设计研究,orcid.org/0000-0001-9938-737X,369370030@qq.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Changsha 410128, China; 3. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Guangzhou 510642, China)

Abstract: [Objective] This study aims to address the problems of high grain impurity rate and cleaning loss rate during the cleaning process of corn grain combine harvesters in the hilly regions of southern China by optimizing the structure and operational parameters of the cleaning device. [Method] A systematic analysis of the working principles of the cleaning device was conducted, and the tail straw walker structure was optimized. On this basis, a corn cleaning test bench with an adjustable fish-scale sieve as the main structure was designed. The bench allows for adjustments to parameters such as fan rotational speed, vibration frequency, and fish-scale sieve opening degree. Single-factor experiments were performed to determine the optimal parameter ranges for fan speed, vibration frequency, and chaffer sieve opening, with grain impurity rate and cleaning loss rate as evaluation indicators. Subsequently, a three-factor, three-level response surface experiment was conducted to establish a regression mathematical model between the factors and evaluation indicators. The Design-Expert 13.0 software was used to solve the model and determine the optimal parameter combination. Finally, the optimized parameters were applied to the cleaning test bench and the 4YZ-2 corn combine harvester for verification and field tests to evaluate the optimization results. [Result] The single-factor experiments revealed that fan speed, vibration frequency, and chaffer sieve opening significantly affect cleaning performance. The optimal parameter ranges were: fan speed 1 500–1 700 r/min; vibration frequency 540–580 r/min; and chaffer sieve opening 16–20 mm. The response surface experiment further optimized the parameters, yielding the best combination: fan speed 1 604.3 r/min, vibration frequency 540.0 r/min, and chaffer sieve opening 18.1 mm, corresponding to grain impurity and cleaning loss rates of 2.21% and 0.9%, respectively. The verification test results after rounding these parameters showed that under the optimal parameter combination, the impurity content rate and cleaning loss rate of the grain were 2.304% and 0.73%, respectively. The field test results showed that when the grain moisture content was 27.8%, the impurity content rate of the grain was 2.13%, and the cleaning loss rate was 0.98%. [Conclusion] The verification and field test results closely matched the regression model predictions, indicating the model's high reliability and the effectiveness of the optimization. By optimizing the structure and operational parameters of the cleaning device, this study successfully reduced grain impurity and cleaning loss rates, providing a solid theoretical foundation for improving the cleaning performance of corn grain combine harvesters.

Keywords: corn kernel combine harvester; cleaning device; parameter optimization; grain impurity rate; cleaning loss rate; fish-scale sieve

【研究意义】南方丘陵地区玉米收获期玉米茎秆和籽粒的含水率普遍偏高,在收获高含水率玉米的过程中,由于清选参数不匹配,造成玉米籽粒含杂率偏高、清选损失严重等问题^[1-4]。我国玉米籽粒收获机械主要以东北三省一区、西北、黄淮海三大区域的大型玉米籽粒收获机械为主,适合南方丘陵地区的玉米籽粒收获机械还不成熟^[5-7]。【前人研究进展】由于清选性能关乎收获质量,众多学者对此进行了大量研究,Ginaji等^[8]通过分析和试验,对振动筛筛面倾斜角度与其筛分效率进行了研究。程超等^[9]通过台架试验探究了整机作业工况下清选装置作业参数对籽粒损失率和含杂率的影响规律,采用二次回归正交组合设计试验得到玉米籽粒收获机清选作业籽粒含杂率、籽粒损失率和综合指标的回归模型。通过田间验证试验得到了综合指标相对误差为4.6%,最优参数组合表现良好,且回归模型可靠。王飞等^[10]设计了一种具备预清选功能的清选装置,采用单因素试验确定风机转速、振动频率、上筛筛孔开度取值范围,以风机转速、振动频率、上筛筛孔开度为试验因素,以籽粒含杂率和清选损失率为评价指标,设计三因素三水平中心组合试验,建立各因素与指标之间的回归模型,通过响应曲面方法对试验结果进行分析得出较优参数组合。司增永等^[11]针对多滚筒脱粒分离装置的清选装置结构进行了研究,选取多风道离心式

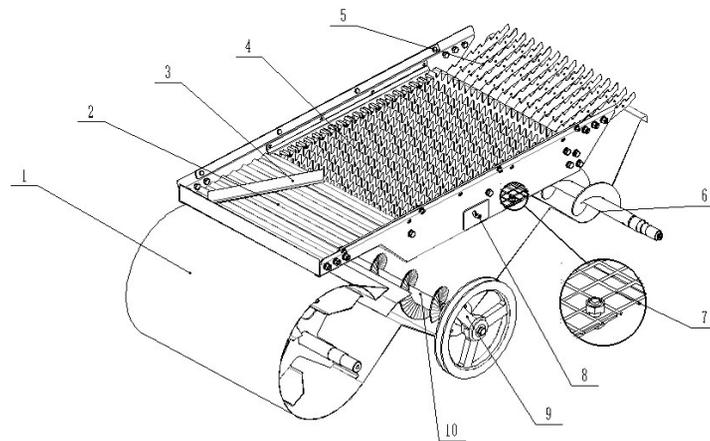
风机转速、鱼鳞筛开度、分风板倾角为研究参数,进行了单因素和正交试验,并基于正交试验结果使用极差分析法,对多滚筒联合收获机清选装置的参数进行优化。张黎骅等^[12]改进了原筛箱,应用 EDEM-Fluent 耦合仿真对比原筛箱与改进筛箱的清选过程,在此基础上选取振动频率、上筛倾角、下筛倾角为试验因素,以含杂率和损失率为试验指标,对大豆和玉米分别进行单因素试验和响应面试验,得到了适合大豆玉米的清选参数。刘鹏等^[13]分析了大豆机收时清选参数对清选指标的影响规律,求解出最佳清选参数组合,并对大豆机收最佳清选参数组合进行了田间验证试验。试验结果表明,对比常用清选参数条件,大豆联合收获机田间试验的清选损失率下降了 0.05%,含杂率下降了 2.09%。

【本研究切入点】目前针对清选装置的参数优化研究表明,风机转速、曲柄转速、鱼鳞筛开度、分风板倾角等参数改变对清选装置的清选效果有显著影响,研究多集中于低含水率情况下的玉米籽粒收获,针对南方高含水率条件下玉米籽粒收获中存在籽粒含杂率和清选损失率高的问题仍需要进一步改进和研究。【拟解决的关键问题】本试验以玉米籽粒联合收获机清选装置为研究对象,选取风机转速、振动频率、鱼鳞筛开度为试验影响因素,设计了单因素试验和三因素三水平响应面试验,考察清选装置的籽粒含杂率和清选损失率,通过优化装置的工作参数组合,以期为玉米籽粒联合收获机清选性能的改善提供依据。

1 清选装置的结构和工作原理

1.1 清选装置结构设计

所设计的玉米籽粒联合收获机清选装置结构如图 1 所示,它由清选筛和风机两大部件组成。清选筛包括抖动板、导流条、鱼鳞筛、逐稿器、复脱搅龙、传动皮带轮、编织筛和鱼鳞筛角度调节块等组件。为适应玉米脱出物清选时的尺寸差异,清选筛采用可调节开度的鱼鳞筛。鱼鳞筛筛片长度为 430 mm,筛面区域长度为 515 mm。根据作物清选要求,其开度调节范围为 14~22 mm。为进一步对透过鱼鳞筛面的小体积脱出物进行有效的推送清选,在鱼鳞筛下方增设了一层筛孔为 20 mm、筛丝直径为 2 mm 的方孔^[14]编织筛。考虑到在高含水率玉米收获时,玉米脱出物中出现的体积较大的玉米茎秆和玉米芯主要集中于鱼鳞筛尾部和逐稿器上,为了防止这一部分大体积杂质进入复脱搅龙中,所以本设计在逐稿器上增设了一层筛孔为 20 mm、筛丝直径为 2 mm 的方孔编织筛,如图 2 所示。



1: 风机; 2: 抖动板; 3: 导流条; 4: 鱼鳞筛; 5: 逐稿器; 6: 复脱搅龙; 7: 编织筛; 8: 鱼鳞筛角度调节块; 9: 传动皮带轮; 10: 集粮搅龙。

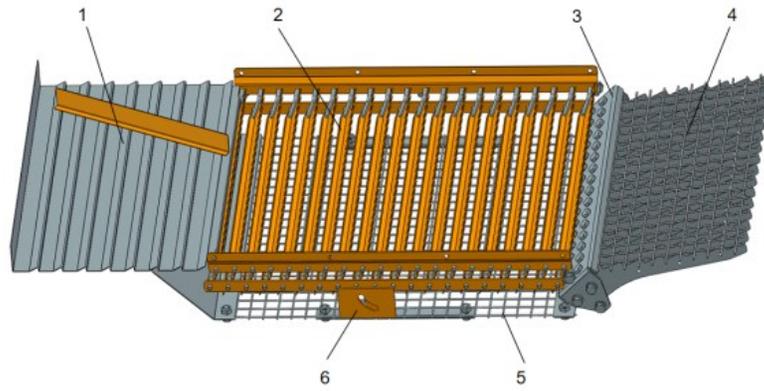
1: Fan; 2: Jitter plate; 3: Deflector strip; 4: Chaffer sieve; 5: Manuscript chaser; 6: Compound auger; 7: Woven sieve; 8: Chaffer sieve angle adjustment block; 9: Transmission pulleys; 10: Grain auger.

图 1 玉米籽粒联合收割机清选装置结构

Fig.1 Structure of the cleaning device of the corn grain combine harvester

1.2 清选工作原理

清选装置工作时,清选筛在曲柄连杆机构的带动下做往复简谐式运动,风机在其下端输送风力,玉米脱出物掉落在抖动板上,借助导流条和抖动板的作用移动到鱼鳞筛,在鱼鳞筛的筛分作用下,脱出物



1:抖动板;2:鱼鳞筛;3:逐稿器;4:逐稿器编织筛;5:编织筛;6:鱼鳞筛角度调节块。
 1: Jitter plate; 2: Chaffer sieve; 3: Manuscript grader; 4: Manuscript chaser weaving sieve;
 5: Woven sieve; 6: Chaffer sieve angle adjustment block.

图2 振动筛结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the structure of the vibrating screen

逐渐分层,部分较轻的玉米茎秆、玉米叶、玉米芯等杂质被风机直接吹出机体,较粗的玉米芯和长茎秆等杂质则随着鱼鳞筛筛面振动移动至尾部,被逐稿器排出机体,部分脱出物会穿过鱼鳞筛间隙落到下层编织筛上,借助筛面连续振动,玉米籽粒和轻小杂质进一步分开,在风机风力作用下,干净玉米籽粒直接落入输粮搅龙,并运输到粮仓,质量较轻的杂质会被吹出机体,掉落在尾部的玉米籽粒与杂质则一同落入尾部复脱搅龙,经由复脱搅龙输送到清选筛再进行二次振动清选^[15-17]。

1.3 玉米籽粒受力分析

为进一步阐述玉米籽粒清选机制,对玉米籽粒接触筛面时的受力进行分析,以玉米籽粒物理中心为原点,摩擦力 F 方向为 X 轴,支持力 N 方向为 Y 轴建立 XOY 平面直角坐标系如图3所示。

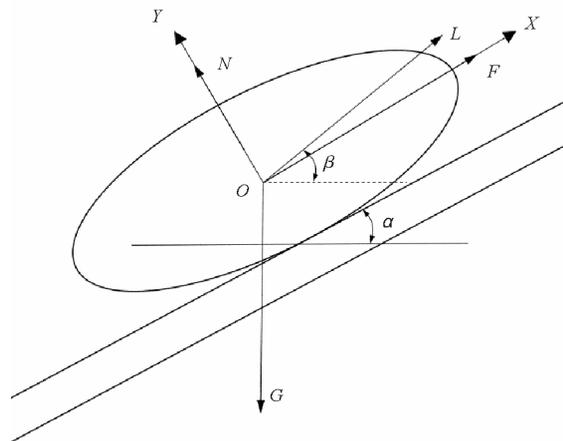


图3 鱼鳞筛面籽粒受力分析

Fig.3 Grain stress analysis on chaffer sieve surface

对此时的籽粒作用力分析如下:

$$\begin{cases} G \sin \alpha - F - L \cos(\beta - \alpha) = ma \\ N - G \cos \alpha + L \sin(\beta - \alpha) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: G 为玉米籽粒所受重力, N ; α 为籽粒接触筛面位置切线与水平方向夹角, $(^\circ)$; F 为玉米籽粒与鱼鳞筛的摩擦力, N ; L 为玉米籽粒所受风力, N ; β 为气流方向与水平方向夹角, $(^\circ)$; a 为玉米籽粒沿筛面的加速度, m/s^2 。

玉米籽粒受到的重力和摩擦力分别为:

$$\begin{cases} G = mg \\ F = \mu \cdot N \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: m 为玉米籽粒的质量,kg, μ 为摩擦系数。

根据文献[18]可知筛面运动方程为:

$$a = -A\omega^2 \sin \omega t \quad (3)$$

式(3)中: A 为工作面沿振动方向的单振幅,mm; ω 为振动圆频率,rad/s; $\omega t = \theta$, θ 为振动相位角, $(^\circ)$; t 为时间,s。

由式(1)~式(3)得:

$$N = mg \cos \alpha - L \sin(\beta - \alpha) - mA\omega^2 \sin \omega t \quad (4)$$

根据式(4)可知,当风机转速和鱼鳞筛开度振动频率保持不变时,玉米籽粒受到的风力 L 和籽粒接触位置与水平方向夹角 α 保持不变。此时,随着 $A\omega^2$ 的增大,籽粒受到的支持力 N 减小,当 N 减小到0时,籽粒离开筛面被抛起。当鱼鳞筛开度和振动频率保持不变时, α 和 $A\omega^2$ 保持不变,此时随着 L 的增大,籽粒受到的支持力 N 减小;当 N 减小到0时,籽粒离开筛面被抛起。当鱼鳞筛开度变化时,籽粒与鱼鳞筛接触面位置切线与水平方向夹角 α 发生变化;当 α 增大时, L 或 ω^2 会较慢增大致使 $N=0$,此时籽粒更容易透过筛面;当 α 减小时, L 或 ω^2 会较快增大致使 $N=0$,此时籽粒将会更容易被抛起,同时也更容易向后位移。因此,较小的鱼鳞筛开度会使籽粒抛起角度更大,从而获得更多的清选时间。

2 台架试验

2.1 试验材料与方法

台架试验于2024年8月在湖南省浏阳市沙市镇映昌农机专业合作社进行,试验材料玉米的物理特性参数见表1。脱粒清选试验平台如图4所示,由传送带、脱粒清选室和控制柜3部分组成。试验前,通过控制柜调节试验参数使试验台架稳定运行;试验时,物料在传送带的驱动下以1.6 kg/s的喂入量通过喂入口进入脱粒清选室,喂入时长设定为5 s。完成清选后,收集排草口排出的杂质中夹杂的玉米籽粒和下方接料盒中的玉米籽粒与杂质混合物,分别称重。每组试验均按照上述步骤进行,重复3次,结果取平均值。

表1 玉米生物特性

Tab.1 Biological characteristics of maize

参数 Parameters	数值 Numerical value
玉米品种 Maize variety	登海605
作物平均高度/mm Average crop height	2 122
籽粒含水率/% Grain moisture content	28.6
茎秆含水率/% Stem moisture content	63.06
果穗平均长度/mm Average length of corn ear	200
果穗大端直径/mm Large end diameter of corn ear	48
果穗中端直径/mm Middle end diameter of corn ear	44
果穗小端直径/mm Apex diameter of corn ear	39
谷草比 Ratio of grain to straw	0.46

2.2 试验因素与指标

根据GB/T 11912—2014,籽粒含杂率计算公式为:

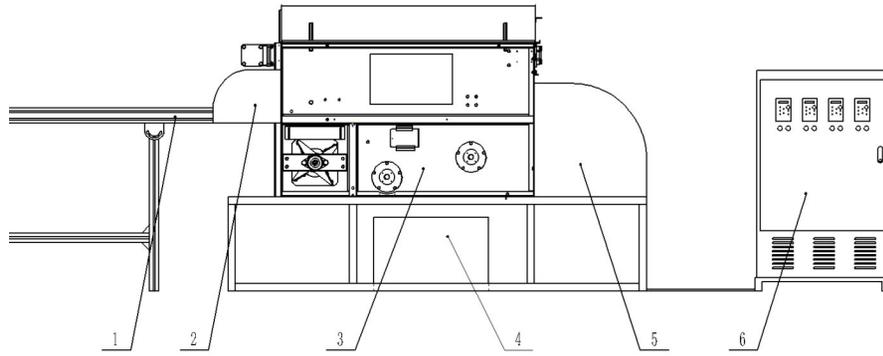
$$Z = \frac{W_x}{W_z + W_x} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中: Z 为籽粒含杂率,%; W_z 为接料盒中玉米籽粒质量,g; W_x 为接料盒中杂质质量,g。

清选损失率计算公式为:

$$S = \frac{W_s}{W_z + W_s} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中: S 为清选损失率,%; W_s 为清选后玉米籽粒损失质量,g。



1:输送带;2:喂入口;3:脱粒清洗室;4:接料盒;5:排草口;6:控制柜。

1: Conveyor belt; 2: Feeding inlet; 3: Threshing and cleaning room; 4: Receiving box; 5: Grass draining port; 6: Control cabinet.

图4 脱粒清洗试验平台

Fig.4 Threshing and cleaning test platform

3 试验结果与分析

3.1 单因素试验

为探究各因素对清选装置清选性能的影响规律,以风机转速、振动频率和鱼鳞筛开度为试验因素,以籽粒含杂率和清选损失率为清选性能指标,进行单因素试验。试验时,仅改变其中一个因素的水平,其他因素保持固定不变。根据前期预试验和试验台架可调范围,确定各因素水平如表2所示。

表2 单因素试验因素水平

Tab.2 Single factor test factor level

水平 Level	因素 Factor		
	风机转速/(r·min ⁻¹)	振动频率/(r·min ⁻¹)	鱼鳞筛开度/mm
	Fan speed	Vibration frequency	Chaffer sieve opening
1	1 400	520	14
2	1 500	540	16
3	1 600	560	18
4	1 700	580	20
5	1 800	600	22

3.1.1 风机转速对清选性能的影响

本试验中振动频率为 560 r/min,鱼鳞筛开度为 18 mm,风机转速为变量,试验结果如图 5 所示。随着风机转速的不断增加,籽粒含杂率呈下降趋势,而清选损失率呈上升趋势。出现这种情况的原因是:较高的风机转速使得清选室内空气流速增大,杂质容易被排出机体,从而使得籽粒含杂率呈下降趋势;同时,较大的风机转速也容易把籽粒吹出机体外,导致清选损失率呈上升趋势。

3.1.2 振动频率对清选性能的影响

本试验中风机转速为 1 600 r/min,鱼鳞筛开度为 18 mm,振动频率为变量,试验结果如图 6 所示。籽粒含杂率随着振动频率的增加呈下降趋势,而清选损失率随着振动频率的增加呈上升趋势。这是因为在较高的振动频率下,杂质的运动速度和跳跃次数增加,停留在筛面上的时间及透筛概率减小,从而减小了籽粒含杂率;同时,振动频率的增加会使籽粒向后移动的速度加快,导致少部分籽粒未及时透筛便被抛出机体外,此外,振动频率的增加会使籽粒抛起次数增加,减小了籽粒与鱼鳞筛面的接触,导致清选损失率升高。

3.1.3 鱼鳞筛开度对清选性能的影响

本试验中风机转速 1 600 r/min,振动频率为 560 r/min,鱼鳞筛开度为变量,试验结果如图 7 所示。随着鱼鳞筛开度的增大,籽粒含杂率呈上升趋势,而清选损失率则呈下降趋势。这是由于鱼鳞筛开度增大时,筛面间隙扩大,一方面使杂质更容易透过筛面进入粮仓,导致籽粒含杂率增加;另一方面也使玉米籽粒容易透过筛面,从而降低了清选损失率。

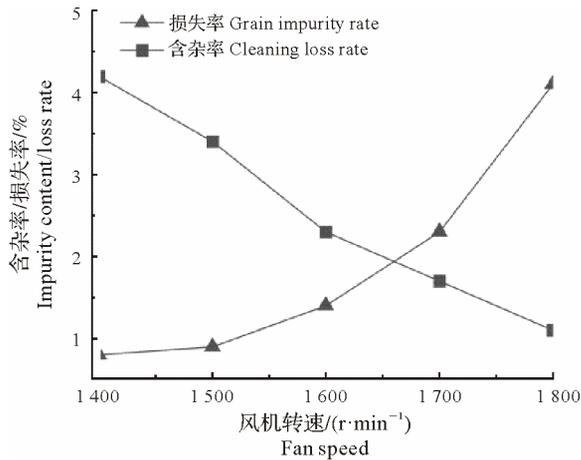


图5 风机转速单因素试验

Fig.5 Single factor test of fan speed

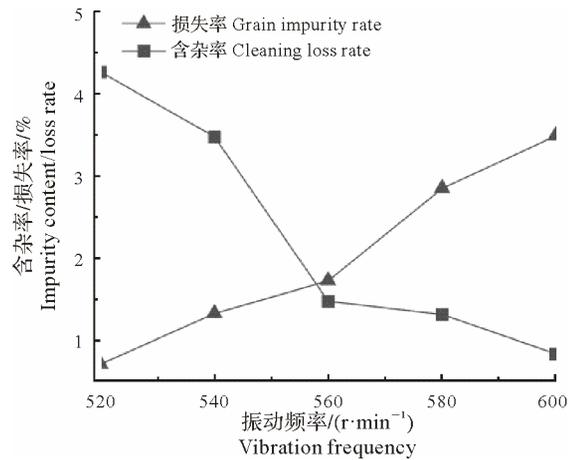


图6 振动频率单因素试验

Fig.6 Vibration frequency single factor test

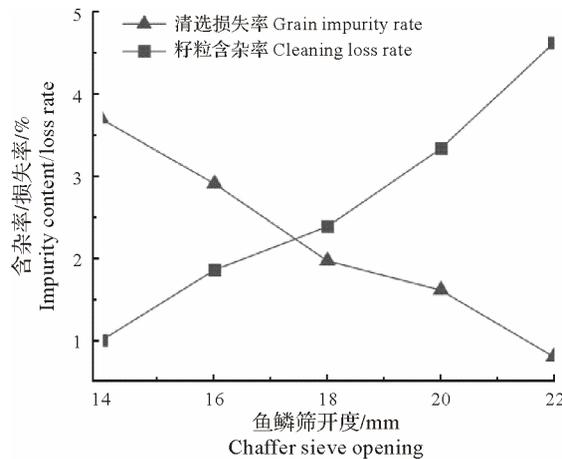


图7 鱼鳞筛开度单因素试验

Fig.7 Single factor test of chaffer sieve opening

3.2 响应曲面试验

3.2.1 试验设计与结果

本试验选用 Box-Behnken 中心组合试验设计理论,参考单因素试验结果,设计三因素三水平参数优化试验^[19-21],试验因素与水平如表3所示,以籽粒含杂率 J_1 与清选损失率 J_2 作为清选效果指标。响应面试验结果列于表4。

表3 响应面试验因素及水平

Tab.3 Levels and factors of the Box-Behnken test

水平 Level	风机转速 A/(r·min ⁻¹) Fan speed	振动频率 B/(r·min ⁻¹) Vibration frequency	鱼鳞筛开度 C/mm Chaffer sieve opening
-1	1 500	540	16
0	1 600	560	18
1	1 700	580	20

3.2.2 方差分析

对籽粒含杂率进行方差分析,结果如表5所示,籽粒含杂率模型的 P 值显著($0.01 < P \leq 0.05$);而响应失拟项($P > 0.05$)不显著,且模型的决定系数 $R^2 = 0.9774$,表明该回归模型能反映出97.74%的响应值变化^[22-24]。影响籽粒含杂率极显著的因素为风机转速和鱼鳞筛开度,通过回归分析拟合试验数据,得到籽粒含杂率的数学模型:

$$J_1 = 2.41 - 2.02A + 0.3087B + 0.94C - 1.27AB - 0.52AC - 0.87BC + 3.3A^2 + 0.0033B^2 + 1.95C^2 \quad (7)$$

表 4 响应面试验的籽粒含杂率和清选损失率

Tab.4 Grain impurity rate and cleaning loss rate of the Box-Behnken test

序号 Serial number	风机转速/(r·min ⁻¹) Fan speed	振动筛频率/(r·min ⁻¹) Vibration frequency	鱼鳞筛开度/mm Chaffer sieve opening	籽粒含杂率/% Grain impurity rate	清选损失率/% Cleaning loss rate
1	1 600	580	16	4.46	3.11
2	1 500	580	18	9.05	0.96
3	1 600	560	18	2.87	1.19
4	1 700	540	18	4.97	1.17
5	1 600	560	18	2.95	0.95
6	1 600	560	18	1.86	1.24
7	1 600	580	20	4.64	1.44
8	1 600	560	18	1.73	1.0
9	1 700	580	18	3.27	1.98
10	1 700	560	20	5.66	1.26
11	1 600	540	16	2.33	2.11
12	1 500	560	20	11.54	0.84
13	1 600	560	18	2.62	1.22
14	1 500	560	16	8.66	2.32
15	1 600	540	20	5.99	1.06
16	1 700	560	16	4.86	3.0
17	1 500	540	18	5.66	0.88

表 5 籽粒含杂率的方差分析

Tab.5 ANOVA of grain impurity rate

方差来源 Source of variance	均方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	P 值 P-value
模型 Model	117.03	9	<0.000 1**
A	32.60	1	<0.000 1**
B	0.76	1	0.203 0
C	7.07	1	0.003 7*
AB	6.48	1	0.004 6*
AC	1.08	1	0.138 4
BC	3.03	1	0.026 6
A ²	46.64	1	<0.000 1**
B ²	0.00	1	0.991 7
C ²	15.94	1	0.000 4**
残差 Residual	2.71	7	
失拟项 Lack of fit	1.39	3	0.361 2
误差 Pure error	1.31	4	
R ²	0.977 4		

*表示因素显著($P<0.05$), **表示因素极其显著($P<0.01$)。

* and ** indicated significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

对清选损失率进行方差分析,结果如表 6 所示,清选损失率模型的 P 值显著($0.01<P\leq 0.05$);而响应失拟项($P>0.05$)不显著,且模型的决定系数 $R^2=0.983 4$,该回归模型能反映出 98.34% 的响应值变化。影响清选损失率极显著的因素为风机转速、振动频率和鱼鳞筛开度,通过回归分析拟合试验数据,得到清选损失率的数学模型:

$$J_2 = 1.12 + 0.301 3A + 0.283 8B - 0.742 5C + 0.182 5AB - 0.065AC - 0.155BC + 0.026 2A^2 + 0.101 2B^2 + 0.708 8C^2 \quad (8)$$

表 6 清选损失率的方差分析
Tab.6 ANOVA of cleaning loss rate

方差来源 Source of variance	均方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	P 值 P-value
模型 Model	8.240 0	9	<0.000 1**
A	0.726 0	1	0.000 5**
B	0.644 1	1	0.000 7**
C	4.410 0	1	0.000 1**
AB	0.133 2	1	0.036 1
AC	0.016 9	1	0.387 5
BC	0.096 1	1	0.064 0
A ²	0.002 9	1	0.714 0
B ²	0.043 2	1	0.184 4
C ²	2.120 0	1	<0.000 1**
残差 Residual	0.139 4	7	
失拟项 Lack of fit	0.066 8	3	0.409 3
误差 Pure error	0.072 6	4	
R ²	0.983 4		

*表示因素显著($P<0.05$), **表示因素极其显著($P<0.01$)。

* and ** indicated significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3.2.2 响应面分析

从表 5 可以看出,风机转速、振动频率和鱼鳞筛开度对籽粒含杂率的影响显著(均为显著项)。基于响应曲面分析,从图 8 可看出,籽粒含杂率随着风机转速的提高而降低,说明在风速加大的过程中,气流能更有效地将脱出物中的杂质带出,从而减小了籽粒含杂率;籽粒含杂率随着鱼鳞筛开度增大而升高,说明越大的鱼鳞筛开度使得玉米脱出物中较大的杂质颗粒更容易透过筛面进入粮仓,导致籽粒含杂率升高;籽粒含杂率随着振动频率的增加而降低,说明较高振动频率可使脱出物在鱼鳞筛面分层更充分,从而提高筛分效率,最终降低籽粒含杂率。

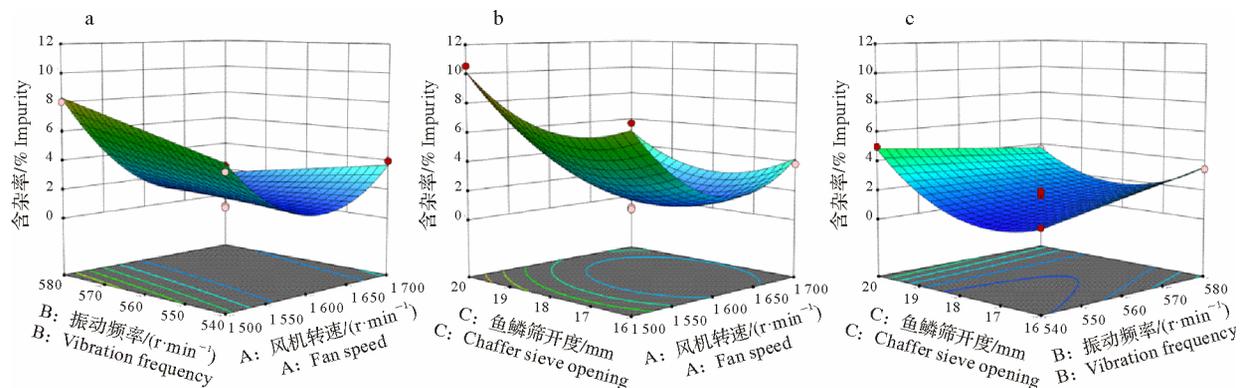


图 8 各因素对籽粒含杂率的响应曲面

Fig.8 Response surface of each factor to grain impurity rate

从表 6 可以看出,风机转速、振动频率和鱼鳞筛开度对清选损失率的影响显著(均为显著项)。基于响应曲面分析,从图 9 可看出,清选损失率随着风机转速的增加而升高,表明风机转速越大时,清选室内气流速度越大,玉米籽粒和杂质易被吹出机体外,导致清选损失率越大;清选损失率随着鱼鳞筛开度的增大而降低,说明当鱼鳞筛开度增大时,脱出物中的玉米籽粒更容易透过筛面进入粮仓,清选损失率因此减小;清选损失率随着振动频率的增大而升高,表明越大的振动频率对玉米籽粒和杂质的筛分能力越强,使得被筛出机体外的玉米籽粒和杂质增多,从而导致清选损失率越大。

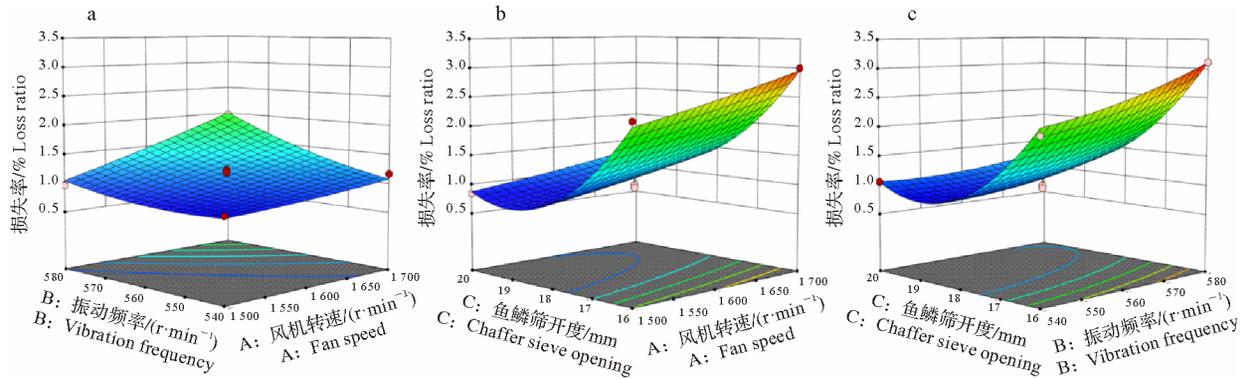


图 9 各因素对清选损失率的响应曲面

Fig.9 Response surface of each factor to cleaning loss rate

3.3 参数优化及验证

为使 4YZ-2 型玉米籽粒联合收获机清选效果最佳,需使籽粒含杂率和清选损失率均降至最低。利用 Design Expert13.0 对模型进行约束求解,得到最佳参数组合为:风机转速 1 604.3 r/min、鱼鳞筛开度 18.1 mm、振动频率 540 r/min,在该参数组合下,籽粒含杂率和清选损失率分别为 2.21% 和 0.9%。为便于实际工作时参数设定,将最佳参数取整为风机转速 1 600 r/min、鱼鳞筛开度 18 mm、振动频率 540 r/min;采用同一批试验材料,将优化后的参数应用于试验台架进行验证,经 3 次重复试验取平均值,测得籽粒含杂率和清选损失率分别为 1.34% 和 0.73%。

3.4 田间试验

为验证优化的清选参数在田间机收作业中的适应性,将试验获得的参数组合应用于 4YZ-2 型玉米籽粒联合收获机上进行田间试验。试验依据《GB/T 29162—2020 玉米收获机械》试验方法,以籽粒含杂率与清选损失率为试验指标,试验地点为浏阳市映昌农机合作社的大豆玉米带状复合种植田(3+2 模式)。试验玉米品种为东单 808,种植参数为株距 12 cm,行距 39 cm,最低结穗高度 120 cm。试验中采用台架试验优化参数组合(风机转速 1 600 r/min、鱼鳞筛开度 18 mm、振动频率 540 r/min),机具以 0.5 m/s 的速度匀速收割 20 m。当籽粒含水率为 27.8% 时,测得籽粒含杂率为 2.13%,清选损失率为 0.98%。



图 10 田间试验

Fig.10 Field experiments

4 结 论

基于 4YZ-2 玉米联合收获机清选装置的参数优化模型,获得清选参数最佳组合为:风机转速 1 600 r/min、振动频率 540 r/min、鱼鳞筛开度 18 mm。该参数组合下,籽粒含杂率为 1.34%,清选损失率为 0.73%;通过验证试验,结果与模型预测值较接近,表明回归模型及优化结果具有可靠性。

清选台架单因素试验结果表明:风机转速增大时,清选损失率升高而籽粒含杂率降低;振动频率增大时,清选损失率升高且籽粒含杂率降低;鱼鳞筛开度增大时,籽粒含杂率升高但清选损失率降低。

田间试验表明,在玉米籽粒含水率较高(27.8%)的收获条件下,优化参数组合对应的籽粒含杂率(2.13%)和清选损失率(0.98%)均符合《GB/T 29162—2020 玉米收获机械》技术条件要求。

致谢:农业装备技术全国重点实验室(华南农业大学)开放基金资助项目(SKLAET-202406)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 崔涛,樊晨龙,张东兴,等.玉米机械化收获技术研究进展分析[J].农业机械学报,2019,50(12):1-13.
CUI T, FAN C L, ZHANG D X, et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(12): 1-13.
- [2] 罗琪.玉米联合收获机割台优化设计与试验研究[D].长沙:湖南农业大学,2021.
LUO Q. Optimal design and experimental research on the header of corn combine harvester [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [3] 柴宗文,王克如,郭银巧,等.玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系[J].中国农业科学,2017,50(11):2036-2043.
CHAI Z W, WANG K R, GUO Y Q, et al. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content [J]. Scientia agricultura Sinica, 2017, 50(11): 2036-2043.
- [4] 方会敏,牛萌萌,史嵩,等.机械收获方式及籽粒含水率对玉米收获质量的影响[J].农业工程学报,2019,35(18):11-18.
FANG H M, NIU M M, SHI S, et al. Effect of harvesting methods and grain moisture content on maize harvesting quality [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2019, 35(18): 11-18.
- [5] 赵一鸣,戴飞,史瑞杰,等.自走式制种玉米联合收获机设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(5):121-134.
ZHAO Y M, DAI F, SHI R J, et al. Design and experiment of self-propelled seed corn combine harvester [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2024, 55(5): 121-134.
- [6] 吕杰,席晓玲,刘洪彬,等.辽宁省玉米布局变化及其区域比较优势研究[J].沈阳农业大学学报,2016,47(3):379-384.
LYU J, XI X L, LIU H B, et al. Study on the change of corn distribution and its regional comparative advantage in Liaoning Province [J]. Journal of Shenyang agricultural university, 2016, 47(3): 379-384.
- [7] 王建廷,李耀明,马征,等.玉米收获机械关键装置结构特点及发展趋势[J].农机化研究,2019,41(9):1-8.
WANG J T, LI Y M, MA Z, et al. Structural characteristics and development trend of key equipment of corn harvesting machinery [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2019, 41(9): 1-8.
- [8] GUNAJI A S, V. M M, SANDIP A S. Study and analysis of deck inclination angle on efficiency of vibration sieve [J]. International journal of engineering development and research, 2016, 4(1): 631-635.
- [9] 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 C, FU J, CHEN Z, 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.
- [10] 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.
WANG F, ALIMU M, ZHANG J S, 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.
- [11] 司增永,李耀明,唐忠,等.横置多滚筒联合收获机清选装置参数优化与试验[J].农机化研究,2018,40(7):185-189.
SI Z Y, LI Y M, TANG Z, et al. Parameter test and optimization of cleaning device with multi cylinder combine harvester [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2018, 40(7): 185-189.
- [12] 张黎骅,邱清宇,秦代林,等.大豆玉米兼用清选装置的设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(15):21-30.
ZHANG L H, QIU Q Y, QIN D L, et al. Design and test of the dual-purpose cleaning device for soybean and corn [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2022, 38(15): 21-30.
- [13] 刘鹏,金诚谦,刘政,等.大豆联合收获机田间清选作业参数优化[J].农业工程学报,2020,36(10):35-45.
LIU P, JIN C Q, LIU Z, et al. Optimization of field cleaning parameters of soybean combine harvester [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2020, 36(10): 35-45.
- [14] 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 L J, SONG L L, FENG X, 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.
- [15] 李园,罗海峰,李自皓,等.侧置可折叠式油菜茎采收机设计与试验[J].江西农业大学学报,2024,46(6):1637-1653.

- LI Y, LUO H F, LI Z H, et al. Design and experiment of lateral and foldable rapeseed stalks harvester[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(6): 1637-1653.
- [16] 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 L Z, LI Y, LI Y M, 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.
- [17] 李奇, 谢方平, 康家鑫, 等. 4LZ-4.0大豆联合收割机清选装置参数优化及脱出物分布试验[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 48(6): 737-743.
LI Q, XIE F P, KANG J X, et al. Parameter optimization and experiment on post-threshed mixture for the cleaning device in 4LZ-4.0 combine harvester of soybean[J]. *Journal of Hunan agricultural university (natural sciences)*, 2022, 48(6): 737-743.
- [18] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
LI Y M. Design and analysis of grain combine harvester[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [19] 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]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 89-100.
WANG L J, MA Y, FENG X, et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device of maize grain harvester[J]. *Transactions of the Chinese society for agricultural machinery*, 2020, 51(9): 89-100.
- [20] 王君, 孙建超, 季明仁, 等. 纵式轴流油莎豆脱粒分离装置设计与试验[J]. *沈阳农业大学学报*, 2024, 55(2): 195-206.
WANG J, SUN J C, JI M R, et al. Design and testing of a longitudinal axial flow cyperus esculentus threshing and separating device[J]. *Journal of Shenyang agricultural university*, 2024, 55(2): 195-206.
- [21] 胡雅琴. 响应曲面二阶设计方法比较研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
HU Y Q. A comparative study on the second-order designs in response surface methodology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [22] 邱轶兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
QIU Y B. Experiment design and data processing[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009.
- [23] 邹备, 钱怀源, 黄天赐, 等. 基于EDEM的生猪粥料离散元模型参数标定[J]. *江西农业大学学报*, 2023, 45(3): 726-736.
WU B, QIAN H Y, HUANG T C, et al. Calibration of discrete element model parameters of pig porridge based on EDEM[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(3): 726-736.
- [24] 耿端阳, 张道林, 王相友. 新编农业机械学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
GENG D Y, ZHANG D L, WANG X Y. New agricultural mechanics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.