

玉米籽粒收获机双层不平行振动筛设计与试验

王立军¹ 李瑞¹ 于泳涛¹ 沈宝山² 刘天华¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江农垦八五二农场, 双鸭山 155600)

摘要: 玉米籽粒收获机清选装置大多采用平行安装的双层筛面,为使双层筛的筛分性能最佳,利用偏置曲柄滑块机构设计了一种多自由度双层不平行振动筛驱动机构,利用矩阵法分析获得筛面的运动方程。选取双层筛筛面安装间距、上筛面安装倾角、筛面横向振幅为试验因素,以玉米籽粒损失率、籽粒含杂率为试验指标,设计二次正交旋转组合试验。利用 Design-Expert 软件对回归数学模型进行多目标优化,当下筛面安装倾角为 3.5°时,机构最优结构参数组合为:筛面前端安装间距 292.99 mm,上筛面安装倾角 3.04°,筛面横向振幅 5.55 mm。基于优化后的参数,调整驱动机构尺寸进行台架试验,玉米脱出物喂入量为 5.05 kg/s 时,筛分后的籽粒损失率、籽粒含杂率均值分别为 1.61%、2.17%,满足玉米收获机械技术标准。相比传统双层平行式平面往复振动筛清选装置,双层不平行振动筛的籽粒损失率平均降低了 1.59 个百分点。

关键词: 玉米籽粒收获机; 清选装置; 双层振动筛

中图分类号: S225.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)07-0130-10

Design and Test of Double-layer Non-parallel Vibrating Screens

WANG Lijun¹ LI Rui¹ YU Yongtao¹ SHEN Baoshan² LIU Tianhua¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. The 852 Farm of Heilongjiang Agricultural Reclamation, Shuangyashan 155600, China)

Abstract: Most of cleaning devices in maize harvester are parallel-mounted double screen. In order to improve the screening performance of the double screens, a four DOF double-layer non-parallel vibrating screen mechanism and test bench were designed by using the bias crank slider mechanism. The mathematical model of mechanism motion was obtained by using matrix analysis method. The results showed that the sieve movement was non-harmonic periodic motion. The factors were the installation spacing of double screens, the mounting inclination of upper screen, and the transverse amplitude of screen. The indexes were the loss and impurity rate of maize. The test data were analyzed by the response surface method and the regression mathematical models were multi-objectively optimized by using Design-Expert software. When the mounting inclination of lower screen was 3.5°, the optimal parameters were the installation spacing of double screens of 292.99 mm, mounting inclination of upper screen of 3.04°, and transverse amplitude of screen of 5.55 mm. Test of driving mechanism size was done based on optimized parameter adjustment. Under the condition of the normal feed quantity of maize mixture of 5.05 kg/s, the loss rate of grain was 1.61% and the impurity rate of grain was 2.17% after screening, which can meet the performance requirement of maize harvester. Compared with the traditional double plane reciprocating vibrating screen cleaning device, the loss rate of grain was reduced by 1.59 percentage points.

Key words: maize grain harvester; cleaning device; double-layer vibration screens

0 引言

玉米联合收获机中清选装置的性能是影响整机

作业性能的重要因素之一^[1],而振动筛的筛分性能决定了清选装置清选性能的优劣。目前,玉米联合收获机中清选装置大多采用双层平行式平面往复振

动筛,这类清选装置结构简单、易于实施,但难以实现脱出物在筛面上的快速均布;当筛面上物料层堆积较厚或被筛物料的含水率较高时,不能有效分层,并易堵塞筛孔,对清选装置的筛分效果及效率影响较大^[2-4]。

为提高振动筛筛分性能,国内外学者在振动筛驱动机构设计和振动筛机构运动特性分析等方面进行了大量研究^[5-17]。

在振动筛驱动机构设计方面,覃玉祝等^[5]基于曲柄滑块机构设计了一种单层混沌振动筛;王成军等^[6]采用 3-PRRR-R^(4R)混联结构作为激振主体,设计了三平移—转动单层振动筛,研究了多个工况下物料颗粒的筛分性能指标以及物料在筛面上的运动规律;王立军等^[7]设计了一种三平移两转动的玉米清选振动筛驱动机构,并确定了该机构的最佳工作参数;李菊等^[8]对四自由度振动筛的理想运动形式进行研究,据此设计了一种三平移—转动的单层并联振动筛,并试验证明四维振动形式筛分性能最佳;李耀明等^[9]根据 3 条空间支链构成的三平移并联振动筛,提出了不同支链初始相位、振幅等因素对单层振动筛筛分效率影响的主次顺序;PAUL 等^[10]设计了一种双层香蕉筛,并对其筛分性能进行研究;MAKINDE 等^[11]通过对振动筛结构改进,研究了振动筛的优化性能;GUNAJI 等^[12]研究了筛面倾斜角度对振动筛筛分效率的影响;AKBAR 等^[13]基于 DEM 分析了不同参数对筛分效率和筛面磨损的影响。

在振动筛机构非简谐运动特性分析方面,沈惠平等^[14]分析了并联运动振动筛的筛分运动,获得筛面运动轨迹为空间复杂曲线,且筛面各点运动不一致;刘初升等^[15]通过对弛张筛筛面动态特性进行研究,获得了沿筛面长度方向各点的位移、速度、加速度的计算公式及其分布规律,表明沿筛面长度方向各点处运动不相同;SONG 等^[16]基于多自由度动力学原理提出了一种三自由度混沌振动筛,以提高湿原煤精确筛选,并对筛面运动方程进行推导,利用 Matlab 编程,模拟获得筛面实际运动曲线为高次谐波曲线;JIANG 等^[17]提出了一种双轴激励驱动的单层等厚振动筛,以提高处理大量物料和高水分物料时的筛分效率,并建立了振动筛运动方程,根据拟合结果分析筛面运动为非简谐运动。

现有振动筛研究大多针对单层筛面或平行安装的双层筛面,从视筛面运动为简谐运动(即筛面上任一点的运动均相同,筛面倾角在筛分过程中保持不变),到确定振动筛筛面实际运动为非简谐周期运动,已取得了大量的研究成果。本文对曲柄滑块式振动筛驱动方式进行改进,设计一种多自由度玉

米清选振动筛驱动机构,并利用矩阵分析法分析筛面实际运动情况。通过台架试验对筛体结构进行优化,以期获得结构合理、性能较优的驱动机构。

1 振动筛驱动机构

由于双层平行式平面往复振动筛只能实现筛面水平和竖直方向的平动,不易实现玉米脱出物在筛面的快速均布。因此,本文设计一种多自由度振动筛驱动机构,在平面运动的基础上增加筛面横向运动及筛面摆动,以有效加快玉米脱出物的均布及分层,提高清选装置的筛分性能。

1.1 机构设计

振动筛驱动机构三维图如图 1 所示,其主要由筛架、偏置曲柄滑块驱动机构、筛面以及球铰杆组成,驱动机构投影简图如图 2 所示。上、下筛面分别以一定角度倾斜安装,曲柄以一定角速度转动,在曲柄的推动下连杆带动滑块沿倾斜滑道运动;筛面前、后端分别与滑块、球铰杆连接,以实现上筛和下筛沿 x 、 y 方向的往复运动;滑道侧面与筛箱侧板呈一定夹角可以实现筛面沿 z 方向的往复运动。由于上、下筛做相对运动,可防止两筛之间堵塞或筛孔堵塞,利于清选,亦可部分平衡惯性力,减少机器振动^[18],所以本机构中上、下滑道采取反向布置方式,上、下滑块的运动相位差为 π 。本课题组在前期的研究中发现在实际筛分过程中筛面运动并非简谐运动,其倾角也非固定不变的而是呈周期性连续变化^[7,19],故本机构可实现筛面沿 x 、 y 、 z 3 个方向的平动以及绕 z 轴的摆动。

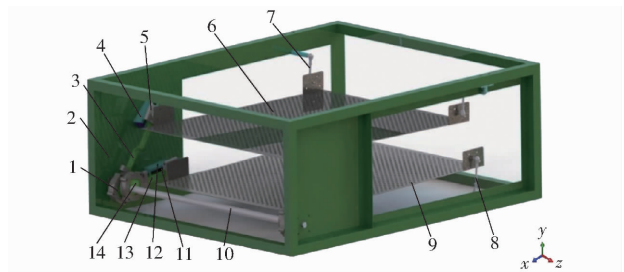


图 1 振动筛驱动机构三维图

Fig. 1 Three-dimensional diagram of driving mechanism of vibrating screens

- 1. 上筛偏心轮 2. 筛架 3. 上筛连杆 4. 上筛滑道 5. 直线轴承 6. 上筛 7. 球铰吊杆 8. 球铰支撑杆 9. 下筛 10. 主轴 11. 滑块 12. 下筛滑道 13. 下筛连杆 14. 下筛偏心轮

1.2 运动分析

由驱动机构在 xOy 平面投影简图,根据滑道水平倾角 γ 绘制局部参考坐标系 $x'Oy'$,如图 2a 所示,图中 l_{11} 、 l_{21} 、 l_{31} 、 l_{41} 、 l_{51} 、 l_{12} 、 l_{22} 、 l_{32} 、 l_{42} 、 l_{52} 为机构各杆长度(包含虚拟杆), θ'_1 、 θ'_2 分别为曲柄 OB 、连杆 BC

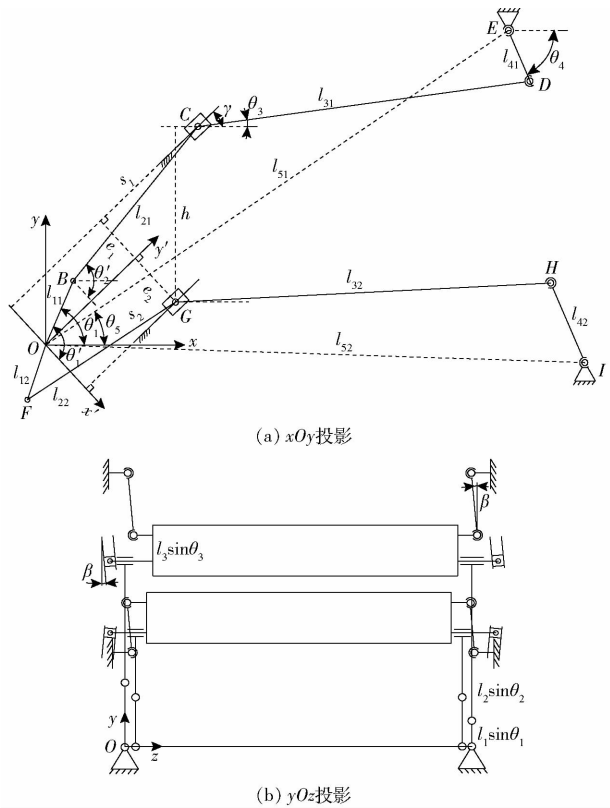


图 2 振动筛驱动机构投影简图
Fig.2 Projection sketches of driving mechanism of vibrating screens

与 x' 轴的夹角。

驱动机构在 $x'Oy'$ 平面投影运动方程为

$$l_{11} + l_{21} = s_1 + e_1 \tag{1}$$

$$\begin{cases} l_{11} \cos \theta'_1 + l_{21} \cos \theta'_2 = -e_1 \\ l_{11} \sin \theta'_1 + l_{21} \sin \theta'_2 = s_1 \end{cases} \tag{2}$$

式中 s_1 ——上滑块位移在 xOy 面投影长度, mm

e_1 ——驱动机构的偏距投影长度, mm

将式(2)对时间 t 求一阶导数,得

$$\omega_2 = \frac{-l_{11} \sin \theta'_1 \omega_1}{l_{21} \sin \theta'_2} \tag{3}$$

$$s'_1 = l_{11} \cos \theta'_1 \omega_1 + l_{21} \cos \theta'_2 \omega_2 \tag{4}$$

将式(2)对时间 t 求二阶导数,得

$$\alpha_2 = \frac{(l_{11} \cos \theta'_1 \omega_1^2 + l_{11} \sin \theta'_1 \alpha_1) l_{21} \sin \theta'_2 - l_{11} \sin \theta'_1 \omega_1 l_{21} \cos \theta'_2 \omega_2}{l_{21}^2 \sin^2 \theta'_2} \tag{5}$$

$$s''_1 = l_{11} \cos \theta'_1 \alpha_1 - l_{11} \sin \theta'_1 \omega_1^2 + l_{21} \cos \theta'_2 \alpha_2 - l_{21} \sin \theta'_2 \omega_2^2 \tag{6}$$

式中 ω_1 ——曲柄 OB 角速度, rad/s

ω_2 ——连杆 BC 角速度, rad/s

α_1 ——曲柄 OB 角加速度, rad/s², 当曲柄匀速转动时, $\alpha_1 = 0$

α_2 ——连杆 BC 角加速度, rad/s²

$$\theta_i = \theta'_i + \gamma - \frac{\pi}{2} \tag{7}$$

式中 θ_i ——机构各杆与 x 轴的夹角, rad

筛面在 xOy 平面投影运动方程为

$$l_{31} + l_{41} = l_{11} + l_{21} + l_{51} \tag{8}$$

$$\begin{cases} l_{31} \cos \theta_3 - l_{41} \cos \theta_4 = l_{51} \cos \theta_5 - l_{11} \cos \theta_1 - l_{21} \cos \theta_2 \\ l_{31} \sin \theta_3 + l_{41} \sin \theta_4 = l_{51} \sin \theta_5 - l_{11} \sin \theta_1 - l_{21} \sin \theta_2 \end{cases} \tag{9}$$

将式(9)对时间 t 求一阶导数, 由图 2a 可知, θ_5 是筛后机架吊挂点与主轴回转中心连线与 x 轴的夹角, 其为定值, 故求得

$$\begin{bmatrix} \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{31} \sin \theta_3 & l_{41} \sin \theta_4 \\ l_{31} \cos \theta_3 & l_{41} \cos \theta_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} l_{11} \sin \theta_1 & l_{21} \sin \theta_2 \\ -l_{11} \cos \theta_1 & -l_{21} \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

将式(9)对时间 t 求二阶导数, 得

$$\alpha_3 = \left[\frac{-\cos \theta_4}{l_{31} \cos \theta_3 \sin \theta_4 + l_{31} \cos \theta_4 \sin \theta_3} \quad \frac{\sin \theta_4}{l_{31} \cos \theta_3 \sin \theta_4 + l_{31} \cos \theta_4 \sin \theta_3} \right] \cdot \begin{bmatrix} l_{11} \sin \theta_1 & l_{11} \cos \theta_1 & l_{21} \sin \theta_2 & l_{21} \cos \theta_2 & l_{31} \cos \theta_3 & -l_{41} \cos \theta_4 \\ -l_{11} \cos \theta_1 & l_{11} \sin \theta_1 & -l_{21} \cos \theta_2 & l_{21} \sin \theta_2 & l_{31} \sin \theta_3 & l_{41} \sin \theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \omega_1^2 & \alpha_2 & \omega_2^2 & \omega_3^2 & \omega_4^2 \end{bmatrix}^{-1} \tag{11}$$

根据式(11)可知, 振动筛在筛分过程中筛面角加速度 α_3 是变化的, 其决定筛面倾角 θ_3 变化的速度, 故筛面倾角 θ_3 并非定值而是时刻变化的。杆件长度 l_{ij} 、杆件夹角 θ_i 、杆件角速度 ω_i 及杆件角加速度 α_i 对筛面角加速度变化产生影响, 从而影响筛面倾角的变化。其中, l_{31} 为筛面长度、 l_{51} 为机架吊挂点与主轴回转中心的连线长度, 二者均为定值, 在不改变原动件运动参数的条件下, 改变驱动机构杆件长度则直接改变了各杆件与 x 轴的夹角 θ_i , 从而对杆件角速度 ω_i 及杆件角加速度 α_i 产生影响。因此, l_{11} 、 l_{21} 、 l_{41} 是对筛面倾角变化产生影响的直接因素。由于本驱动机构是对偏置曲柄滑块机构的改进, 其满足偏置曲柄滑块机构的结构参数关系, 故 l_{11} 、 l_{21} 的变化导致偏距 e_1 的变化, 直接反映为筛面安装间距的不同; l_{41} 为筛后吊挂球铰杆长度, l_{41} 的长度直接决定了筛面安装倾角的大小, 因此有必要研究筛面安装间距及筛面安装倾角的变化对筛分性能的影响。

根据投影分析得

$$v_x = s'_1 \cos \alpha \tag{12}$$

$$v_y = s'_1 \sin \alpha \tag{13}$$

$$v_z = v_y \tan \beta = s'_1 \sin \alpha \tan \beta \tag{14}$$

$$a_x = v'_x = s''_1 \cos \gamma \tag{15}$$

$$a_y = v'_y = s''_1 \sin \gamma \tag{16}$$

$$a_z = v'_z = s''_1 \sin \gamma \tan \beta \tag{17}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = s'_1 \sqrt{1 + \sin^2 \gamma \tan^2 \beta} \tag{18}$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = s''_1 \sqrt{1 + \sin^2 \gamma \tan^2 \beta} \tag{19}$$

式中 β ——滑道侧向倾角,rad
 γ ——滑道与水平面夹角,rad
 v_x ——滑块沿 x 方向的速度分量,m/s
 v_y ——滑块沿 y 方向的速度分量,m/s
 v_z ——滑块沿 z 方向的速度分量,m/s
 a_x ——滑块沿 x 方向运动加速度分量,m/s²
 a_y ——滑块沿 y 方向运动加速度分量,m/s²
 a_z ——滑块沿 z 方向运动加速度分量,m/s²
 v ——滑块运动的合速度,即筛面前端铰接点合速度,m/s
 a ——滑块运动的合加速度,即筛面前端铰接点合加速度,m/s²

根据式(14)~(17)分析可知,在机构 xy 方向振幅与双层平行式平面往复振动筛一致的情况下,本机构可通过调节滑道侧向倾角 β 改变筛面横向振幅,因此有必要研究筛面横向振幅对筛分性能的影响。

筛面不存在绕 x 向和 y 向的旋转,故沿筛面横向上各点运动一致;筛面存在绕 z 向的摆动,故沿筛面纵向上各点的运动存在差异。

筛面纵向上一点 M 在 xOy 平面投影运动方程为

$$\begin{cases} X_M = l_{11} \cos \theta_1 + l_{21} \cos \theta_2 + l_M \cos \theta_3 \\ Y_M = l_{11} \sin \theta_1 + l_{21} \sin \theta_2 + l_M \sin \theta_3 \end{cases} \tag{20}$$

式中 X_M ——筛面纵向上任一点 M 的 x 坐标值
 Y_M ——筛面纵向上任一点 M 的 y 坐标值
 l_M ——筛面纵向任一点 M 与筛面前端铰接点距离

将式(20)对时间 t 求一阶导数,得

$$\begin{bmatrix} v_{x_M} \\ v_{y_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{11} \sin \theta_1 & -l_{21} \sin \theta_2 & -l_M \sin \theta_3 \\ l_{11} \cos \theta_1 & l_{21} \cos \theta_2 & l_M \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \tag{21}$$

式中 v_{x_M} ——筛面纵向上任一点 M 沿 x 方向的速度分量,m/s
 v_{y_M} ——筛面纵向上任一点 M 沿 y 方向的速度分量,m/s

将式(20)对时间 t 求二阶导数,得

$$\begin{bmatrix} a_{x_M} \\ a_{y_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{11} \cos \theta_1 & -l_{11} \sin \theta_1 & -l_{21} \cos \theta_2 & -l_{21} \sin \theta_2 & -l_M \cos \theta_3 & -l_M \sin \theta_3 \\ -l_{11} \sin \theta_1 & l_{11} \cos \theta_1 & -l_{21} \sin \theta_2 & l_{21} \cos \theta_2 & -l_M \sin \theta_3 & l_M \cos \theta_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \alpha_1 & \omega_2^2 & \alpha_2 & \omega_3^2 & \alpha_3 \end{bmatrix}^{-1} \tag{22}$$

筛面纵向上任意点 M 的运动方程为

$$v_{z_M} = v_z \tag{23}$$

$$v_M = \sqrt{v_{x_M}^2 + v_{y_M}^2 + v_{z_M}^2} \tag{24}$$

$$a_{z_M} = a_z \tag{25}$$

$$a_M = \sqrt{a_{x_M}^2 + a_{y_M}^2 + a_{z_M}^2} \tag{26}$$

式中 v_{z_M} ——筛面纵向上任意点 M 沿 z 方向的速度分量,m/s
 v_M ——筛面纵向上任意点 M 的合速度,m/s
 a_{x_M} ——筛面纵向上任意点 M 沿 x 方向的加速度分量,m/s²
 a_{y_M} ——筛面纵向上任意点 M 沿 y 方向的加速度分量,m/s²
 a_{z_M} ——筛面纵向上任意点 M 沿 z 方向的加速度分量,m/s²
 a_M ——筛面纵向上任意点 M 的合加速度,m/s²

简谐运动的变化规律必满足正余弦曲线运动形式,根据以上分析,筛面运动并非简谐运动的简单叠加,其运动方程并非正余弦方程;此外,本机构运动过程中带动筛面实现往复式周期运动,所以在该驱动机构带动下筛面运动为非简谐周期性运动,且筛面运动状态与筛面安装间距、上筛面安装倾角、筛面横向振幅均存在关系。

1.3 参数确定

图 3 中,假设曲柄 OB 长度为 l_{ij} ,连杆 BC 长度为 l_{2j} ,偏距投影为 e_j ,滑块位移投影为 s_j 。偏置曲柄滑块机构曲柄 l_{ij} 的尺寸区间应满足^[20]

$$\frac{s_j}{2} \tan \frac{\theta}{2} < l_{ij} < \frac{s_j}{2} \tag{27}$$

式中 θ ——极位夹角,rad

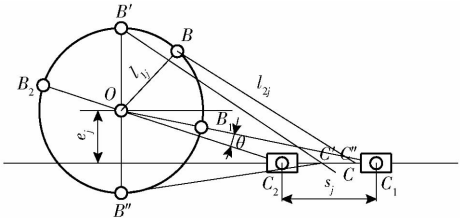


图 3 偏置曲柄滑块机构原理图

Fig. 3 Schematic of offset crank-slider mechanism

在 $\triangle OC_1C_2$ 中,根据三角形余弦定理,有

$$l_{2j} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4(l_{ij}^2 - e_j^2) - s_j^2}{\frac{l_{ij}^2}{s_j^2} - 1}} \tag{28}$$

将式(28)变形得

$$e_j = \sqrt{l_{ij}^2 + l_{2j}^2 - \frac{s_j^4 + 16l_{ij}^2 l_{2j}^2}{4s_j^2}} \tag{29}$$

根据余弦定理,有

$$\sin\theta=\frac{e_js_j}{l_{2j}^2-l_{1j}^2}$$

(30)

根据现有平面往复双层平行式平面往复振动筛清选装置的设定,获得振动筛振幅为 19.5 mm,筛面行程为 39 mm^[21]。偏置曲柄滑块机构仅限平面运动,本文通过改变滑道与筛箱侧壁的夹角,实现了筛面的三维空间运动。为保证双层不平行振动筛与双层平行式平面往复振动筛在 xOy 面筛面行程一致,确定滑块位移投影 s_j 为 39 mm。根据式 (27),确定本驱动机构中,曲柄半径 l_{1j} 小于 19.5 mm。本机构在基于筛箱空间的条件下布置筛面,即在满足式 (27)、(29) 的条件下, $e_js_j \ll l_{2j}^2 - l_{1j}^2$, 故本机构急回特性十分微弱。因此,假设不同杆长时滑块运动一致, xy 方向合振幅均为 19.5 mm。

鉴于双层筛上筛的运动对清选装置的性能起主要作用,为对比研究双层不平行振动筛与双层平行式平面往复振动筛中上筛的筛分性能,上、下筛面位置以双层平行式平面往复振动筛筛面位置为基准。根据式 (29) 可知,设计变量 l_{1j} 、 l_{2j} 、 e_j 、 s_j 中有 3 个为独立设计变量^[22]。由于 s_2 已确定,取另外两个变量 l_{12} 、 l_{22} 为独立设计变量,并以现有机机构尺寸参数作为参考,根据式 (29) 进行计算,不满足式 (27) 则修改尺寸值重复计算,在满足式 (27) 的条件下得到 e_2 。根据计算结果对驱动机构进行虚拟样机装配,对装配结果进行测量,当两种机构下筛位置相同时,最终获得 l_{12} 为 16.5 mm, l_{22} 为 250 mm, e_2 为 133 mm。在下筛驱动机构尺寸参数 l_{12} 、 l_{22} 、 e_2 确定后,选择独立设计变量 l_{11} 、 l_{21} , 利用相同的方法进行计算、装配、测量,获得满足上筛面安装间距所对应的上筛驱动机构尺寸 l_{11} 、 l_{21} 、 e_1 。当 l_{11} 、 l_{21} 、 e_1 尺寸确定后,则驱动机构的各杆件长度相应确定。

2 单因素试验

2.1 清选装置参数及试验材料

2.1.1 清选装置参数

6 行玉米籽粒联合收获机清选装置主要参数为长度 1 850 mm,高度 925 mm,筛面长度 1 360 mm,上、下筛面安装倾角均为 3.5°,两筛面前端的安装间距为 300 mm。机器实际作业时振动筛主轴转速为 310 r/min,风机入口气流速度为 9.6 ~ 16.0 m/s,风机入口导风板角度可在 20° ~ 30° 范围内调节^[21,23]。由于本装置中风机为反转出风,因此风机下部为出风主体,通过测量得风机下壳体角度为 25°,为保证风机入口导风板对气流速度的影响最小,本文取风机入口导风板角度为 25°。

由于圆孔筛加工方便、结构简单、成本低,清选后籽粒含杂率较低,本文选择圆孔筛作为清选筛,选用贝壳筛作为尾筛对杂余进行推送。双层不平行振动筛驱动机构如图 4 所示。



图 4 双层不平行振动筛驱动机构
Fig. 4 Driving mechanism of double-layer non-parallel vibrating screens

2.1.2 试验材料

玉米脱出物的喂入量为 5.05 kg/s (玉米籽粒、玉米茎秆、玉米芯、轻质杂余的质量分数分别为 73%、17%、9%、1%),以 0 m/s 的初速度从上筛前端喂入^[21]。

2.1.3 试验因素

由于气体流速会对清选装置的筛分性能产生影响,利用 CFD-DEM 耦合方法对清选装置内气流场进行仿真,当风机入口气流速度为 16.0 m/s 时,在不改变风机入口位置的条件下,根据图 5 仿真结果可知,筛面处于不同位置时会对清选装置内气流场产生影响,进而影响筛分性能。

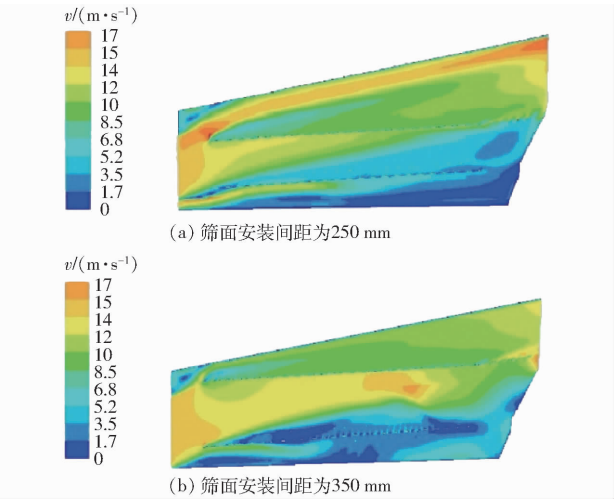


图 5 筛面不同安装间距清选装置内气体速度分布
Fig. 5 Velocities distribution of airflow in cleaning device with different installation spacings of sieve

鉴于新机构要应用到样机中,为确定双层不平行振动筛中筛面安装间距、上筛面安装倾角、筛面横向振幅对筛分性能的影响,进行试验研究。单因素试验中的参数以现有清选装置中各参数为基准,以箱体尺寸为界限,确定因素的其他水平,进而进行单

因素试验研究,并为多因素试验提供依据。

2.2 上筛面安装倾角对筛分性能的影响

根据新机构的理论分析可知,筛分过程中筛面倾角是变化的,筛面各点运动不一致,且筛面安装倾角的不同会对筛面倾角变化产生影响,因此选取上筛面安装倾角为因素进行试验,分析其对筛分性能的影响。

根据筛箱边界尺寸确定单因素试验中筛面最大安装倾角为 5.5°,以双层平行式平面往复振动筛中筛面安装倾角 3.5°为基准,确定单因素试验中筛面最小安装倾角为 1.5°,在 [1.5°,5.5°] 范围内设计 5 个水平(1.5°、2.5°、3.5°、4.5°、5.5°)进行单因素试验。本文通过改变吊挂球铰杆 l_{41} 的长度(172、153、134、115、96 mm)实现上筛面安装倾角的调节。

在筛面安装间距为 300 mm,下筛面安装倾角为 3.5°时,取上筛面安装倾角为因素进行试验。试验结果如图 6 所示。

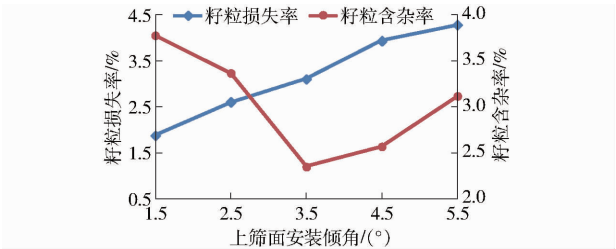


图 6 上筛面安装倾角对筛分性能的影响
Fig. 6 Effect of installation inclination of upper screen on screening performance

由图 6 可得,当上筛面安装倾角由 1.5°增大到 5.5°时,籽粒损失率由 1.90% 增至 4.31%,籽粒含杂率由 3.79% 先减小到 2.36% 后增至 3.13%。其主要原因是,随着上筛面安装倾角的增大,玉米脱出物在筛面被抛掷的强度不断增强,其在筛面上的前进速度加快、松散程度增加,且杂余有效透筛面积和筛面倾角的变化幅度均减小,杂余透筛概率降低,使得籽粒含杂率降低,但上筛面安装倾角的增大导致玉米脱出物在筛面上停留的时间缩短,降低了籽粒透筛的概率,使籽粒损失率增加,当籽粒损失率增大至一定程度后筛下杂余比例增加,使得籽粒含杂率随之增大。

2.3 筛面安装间距对筛分性能的影响

筛面不同间距配置方式对筛分作业过程有重要影响,当筛面安装倾角在同一水平时,筛面安装间距的改变影响清选装置内气流场变化以及筛面与杂余出口间的相对位置,从而对籽粒损失率和含杂率产生影响。目前,筛面间距配置对筛分性能的影响未见报道。

根据筛箱边界尺寸确定单因素试验中筛面最大

安装间距为 350 mm,以双层平行式平面往复振动筛中筛面安装间距 300 mm 为基准,确定单因素试验中筛面最小安装间距为 250 mm,在 [250 mm,350 mm] 范围内设计 5 个水平进行单因素试验。当筛面安装间距的因素水平确定后,根据驱动机构参数确定中的分析方法获得不同筛面安装间距所对应的驱动机构尺寸 l_{11} 、 l_{21} 、 e_1 ,并据此对台架驱动机构进行调试,通过调节吊挂球铰杆 l_{41} 长度使上筛面安装倾角为 3.5°,研究筛面不同间距配置对筛分性能的影响,具体结构参数如表 1 所示。

表 1 不同筛面安装间距所对应的驱动机构结构参数
Tab.1 Structural parameters of drive mechanism corresponding to different screen mounting distances

mm				
筛面安装间距	l_{11}	l_{21}	e_1	l_{41}
250	19	330.0	74.1	175
275	19	360.0	80.9	147
300	19	390.0	87.6	134
325	19	405.5	91.1	118
350	19	445.0	100.0	91

在筛面安装倾角为 3.5°时,取筛面安装间距为因素进行试验,试验结果如图 7 所示。

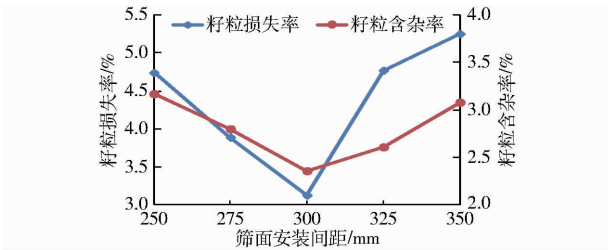


图 7 筛面安装间距对筛分性能的影响
Fig. 7 Effect of initial installation spacing of screen on screening performance

由图 7 可得,当筛面安装间距由 250 mm 增大到 350 mm 时,籽粒损失率呈先减小后增大的趋势,籽粒含杂率呈先减小后增大的趋势。其主要原因是,随着筛面安装间距的增大,筛面上气流速度减小,导致筛上脱出物运动的加速度减小,籽粒透筛时间增加、透筛概率增大,损失率降低,筛下籽粒含量相较杂余含量增加,使含杂率降低;当筛面安装间距继续增加,筛面上气流速度开始增大,筛上脱出物运动的加速度增大,籽粒透筛时间减小、透筛概率降低,损失率增加,筛下杂余含量相较籽粒含量增加,使含杂率增加。

2.4 筛面横向振幅对筛分性能的影响

上、下滑道沿筛面横向的反向倾斜布置,实现了筛面沿横向的反向往复运动,更有利于玉米脱出物沿筛面均匀分散;但当横向振幅过大时不仅造成筛

分速度的大幅降低,还会降低筛下物料的清洁度^[6]。刘晓飞等^[24]通过分析不同筛面横向振幅时小麦籽粒的筛分效率,获得筛面最佳横向振幅为2 mm。鉴于不同农业物料间的特殊性和差异性,基于筛箱宽度与筛面宽度的尺寸界限,本文选择筛面横向振幅为2~10 mm,在[2 mm,10 mm]范围内设计5个水平(2、4、6、8、10 mm)进行单因素试验。通过改变滑道侧向倾角 β (2.94°、5.86°、8.75°、11.59°、14.38°)实现筛面横向振幅的变化。

在筛面安装倾角为3.5°,筛面安装间距为300 mm时,取筛面横向振幅为因素进行试验。试验结果如图8所示。

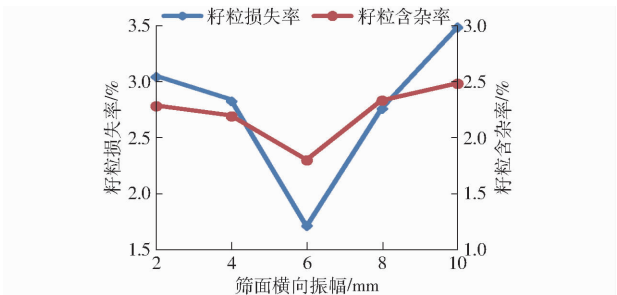


图8 筛面横向振幅对筛分性能的影响
Fig.8 Effect of transverse amplitude of screen on screening performance

由图8可得,当筛面横向振幅由2 mm增大到6 mm时,籽粒损失率逐渐降低,籽粒含杂率逐渐降低;当筛面横向振幅由6 mm增大到10 mm时,籽粒损失率逐渐增大,籽粒含杂率逐渐增大。这是因为,随着筛面横向振幅的增大,玉米脱出物沿筛面横向的位移和运动速度增加使其在筛面快速均布,透筛概率提高,从而使籽粒损失率下降,脱出物分布均匀更有利于气流场对杂余的推送,使得籽粒含杂率降低;当横向振幅过大时,玉米脱出物沿筛面横向的运动速度过快,反而使筛面的筛分性能降低,造成籽粒损失率再次增加及籽粒含杂率的增大。

3 多因素试验

3.1 二次正交旋转组合试验设计

选取筛面安装间距、上筛面安装倾角、筛面横向振幅为试验因素,以籽粒损失率和籽粒含杂率为试验评价指标。采用三因素五水平二次正交旋转组合设计方案进行试验,根据单因素试验结果确定试验因素编码,如表2所示。

根据二次正交旋转组合设计23组试验,分别收集筛下籽粒与杂余并对其进行称量,然后据此计算双层不平行振动筛清选装置的籽粒损失率 y_1 和籽粒含杂率 y_2 。试验方案与结果如表3所示。

表2 试验因素编码
Tab.2 Coding of experimental factors

编码	因素		
	筛面安装间距	上筛面安装倾角	筛面横向振幅
	x_1/mm	$x_2/(\text{^\circ})$	x_3/mm
-1.682	250.0	1.5	2.0
-1	270.3	2.3	3.6
0	300.0	3.5	6.0
1	329.7	4.7	8.4
1.682	350.0	5.5	10.0

表3 试验方案与结果
Tab.3 Test scheme and results

序号	试验因素			性能指标/%	
	x_1/mm	$x_2/(\text{^\circ})$	x_3/mm	y_1	y_2
1	270.3	2.3	3.6	2.25	2.61
2	329.7	2.3	3.6	2.48	2.46
3	270.3	4.7	3.6	2.62	2.13
4	329.7	4.7	3.6	3.63	2.02
5	270.3	2.3	8.4	2.65	2.87
6	329.7	2.3	8.4	3.15	2.42
7	270.3	4.7	8.4	2.87	2.51
8	329.7	4.7	8.4	3.96	2.24
9	250.0	3.5	6.0	2.46	2.32
10	350.0	3.5	6.0	3.83	1.89
11	300.0	5.5	6.0	1.55	3.11
12	300.0	5.5	6.0	2.84	2.48
13	300.0	3.5	2.0	3.05	2.16
14	300.0	3.5	10.0	3.54	2.48
15	300.0	3.5	6.0	1.72	1.82
16	300.0	3.5	6.0	1.75	1.79
17	300.0	3.5	6.0	1.82	1.74
18	300.0	3.5	6.0	1.69	1.86
19	300.0	3.5	6.0	1.78	1.77
20	300.0	3.5	6.0	1.75	1.78
21	300.0	3.5	6.0	1.68	1.89
22	300.0	3.5	6.0	1.81	1.76
23	300.0	3.5	6.0	1.66	1.91

3.2 籽粒损失率回归模型与响应曲面分析

根据正交旋转组合试验的结果,利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行处理,通过对试验数据和拟合结果分析得:试验模型显著($p < 0.01$),其中3个主效应及其对应的二次项对籽粒损失率影响均显著,筛面安装间距和上筛面安装倾角的交互项 x_1x_2 、上筛面安装倾角和筛面横向振幅的交互项 x_2x_3 均显著,其余交互项不显著,获得籽粒损失率 y_1 的回归数学模型为

$$y_1 = 1.74 + 0.38X_1 + 0.35X_2 + 0.18X_3 + 0.17X_1X_2 - 0.061X_2X_3 + 0.5X_1^2 + 0.16X_2^2 + 0.55X_3^2$$

$(R^2 = 0.994)$

(31)

根据试验结果,所得各因素对籽粒损失率影响

的响应曲面如图 9 所示。

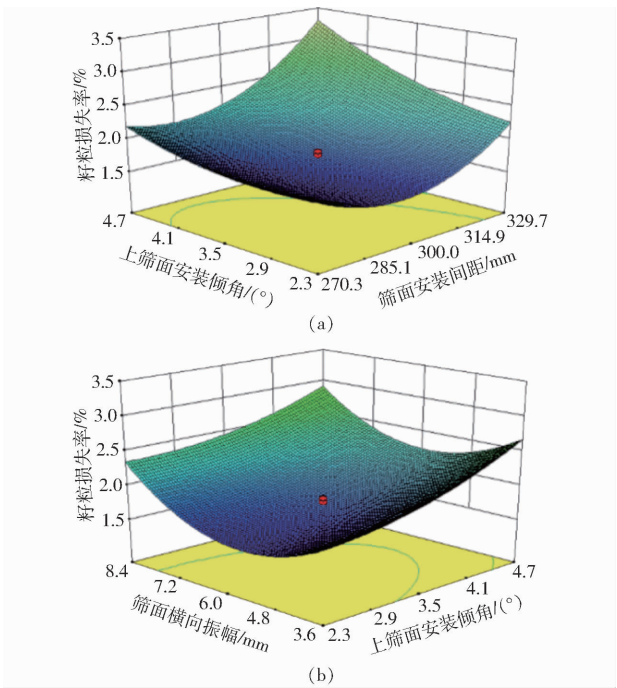


图 9 各因素对籽粒损失率影响的响应曲面
Fig. 9 Response surfaces of all factors on loss rate of maize

由图 9a 可知,当筛面横向振幅处于零水平,上筛面安装倾角处于高水平时,随筛面安装间距的增大籽粒损失率先降低后增大且变化幅度比低水平时大。其主要原因是,随着筛面安装间距的增加,筛面上气流速度先减小后增加,筛上脱出物的透筛时间先增加后减小;当气流速度较小时,籽粒透筛概率增加,损失率降低,当气流速度较大时,籽粒透筛概率降低,损失率增加。

由图 9b 可知,当筛面安装间距处于零水平,上筛面安装倾角处于低水平时,随着筛面横向振幅的增大,籽粒损失率先降低后增大且籽粒损失率比高水平时低。其主要原因是,筛面沿横向的往复运动使玉米脱出物沿筛面的分散更均匀,籽粒透筛速度增加,籽粒损失率降低,但当横向振幅过大时,筛分速度大幅降低,造成籽粒损失率的升高;上筛面安装倾角处于高水平时比低水平时籽粒损失率高,这是因为随着上筛面安装倾角的增大,筛面垂直运动分量增大,籽粒在筛面上的滑移时间变短,籽粒透筛概率降低,造成籽粒损失率较低水平时高。

3.3 籽粒含杂率回归模型与响应曲面分析

通过对试验数据和拟合结果分析得:试验模型显著($p < 0.01$),其中 3 个主效应及其对应的二次项对籽粒含杂率影响均显著,筛面安装间距和筛面横向振幅的交互项 x_1x_3 、上筛面安装倾角和筛面横向振幅的交互项 x_2x_3 均显著,其余交互项不显著,获得籽粒含杂率 y_2 的回归数学模型为

$$y_2 = 1.81 - 0.12X_1 - 0.18X_2 + 0.099X_3 - 0.057X_1X_3 + 0.048X_2X_3 + 0.096X_1^2 + 0.34X_2^2 + 0.17X_3^2 \quad (R^2 = 0.987) \quad (32)$$

根据试验结果得各因素对籽粒含杂率影响的响应曲面如图 10 所示。

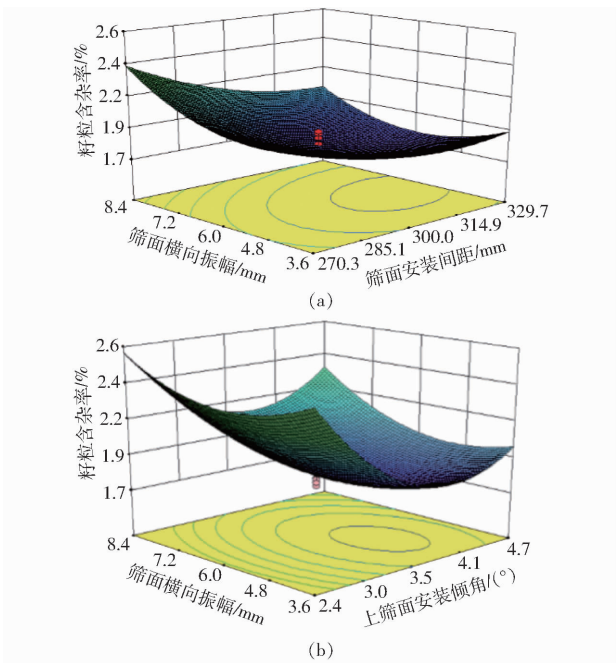


图 10 各因素对籽粒含杂率影响的响应曲面
Fig. 10 Response surfaces of all factors on impurity rate of maize

由图 10a 可知,当上筛面安装倾角处于零水平时,随着筛面安装间距的增大,籽粒含杂率呈先减小后增大的趋势,且筛面横向振幅处于高水平时比筛面安装间距处于低水平时的籽粒含杂率高,其主要原因是随着筛面安装间距的增大,筛面上气流速度先减小后增加,筛上脱出物的加速度先减小后增加,当气流速度较小时籽粒透筛概率增加,损失率降低,含杂率降低,当气流速度较大时籽粒透筛概率降低,损失率增加,筛下杂余含量相较籽粒含量增加,使得含杂率提高;筛面横向运动有利于脱出物的均匀分散,使得杂余透筛概率降低,籽粒含杂率降低,但筛面横向振幅处于高水平时,脱出物的横向运动过快反而不利于筛分,籽粒损失率增大,筛下杂余占比增加,故而筛面横向振幅处于低水平时含杂率比高水平时低。

由图 10b 可知,当筛面安装间距处于零水平时,在上筛面安装倾角一定时,随着筛面横向振幅的增加,籽粒含杂率呈先减小后升高的变化趋势。这是因为,随着筛面横向振幅的增加,玉米脱出物在筛面分布更均匀,利于气流场对杂余的推送,使得籽粒含杂率降低;当横向振幅过大时,玉米脱出物沿筛面的横向运动速度过快,反而使筛面的筛分性能降低,造成籽粒损失率的增加进而导致籽粒含杂率的增大;

且上筛面安装倾角处于高水平时比低水平时籽粒含杂率低,这是因为杂余有效透筛面积和筛面倾角变化的幅度均比低水平时小,因而杂余透筛概率小,籽粒含杂率低。

3.4 参数优化

为提高振动筛的筛分性能,利用 Design-Expert 软件对试验参数进行优化,限定籽粒损失率与含杂率满足国家标准要求,建立参数化数学模型为

$$\begin{cases} 0 \leq y_1 \leq 2\% \\ 0 \leq y_2 \leq 3\% \\ 250\text{ mm} \leq x_1 \leq 350\text{ mm} \\ 1.5^\circ \leq x_2 \leq 5.5^\circ \\ 2\text{ mm} \leq x_3 \leq 10\text{ mm} \end{cases} \quad (33)$$

优化结果为:筛面安装间距 292.99 mm,上筛面安装倾角 3.04°,筛面横向振幅 5.55 mm。籽粒损失率为 1.57%,籽粒含杂率为 1.96%。

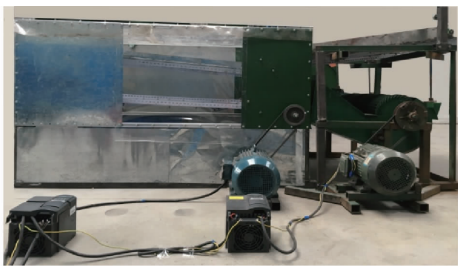
3.5 验证试验

根据优化结果调整驱动机构杆件尺寸,进行验证试验,并与双层平行式平面往复圆孔振动筛清选装置性能进行对比。试验装置如图 11 所示。取常规玉米脱出物喂入量为 5.05 kg/s,试验重复 3 次,试验数据如表 4 所示。

双层不平行振动筛在最优结构条件下,相较于双层平行式振动筛,其筛面安装间距减小,清选装置上筛面上气流速度降低,使得籽粒在筛面的运动时间增加,籽粒透筛概率增大;上筛面安装倾角的减小增加了籽粒在筛面上的停留时间,筛面横向运动实现了籽粒的均匀分散,有效提高了籽粒透筛概率,使得籽粒损失率显著降低,如表 4 所示,双层不平行振动筛较双层平行式振动筛筛分后籽粒损失率降低了 1.59 个百分点、籽粒含杂率降低了 0.18 个百分点,均满足 GB/T 21962—2008《玉米收获机械技术条件》要求。

4 结论

(1)设计了偏置曲柄滑块式双层不平行振动筛



(a) 双层不平行振动筛



(b) 双层平行式平面往复振动筛

图 11 试验台架

Fig. 11 Test devices

表 4 台架试验结果

Tab. 4 Results of experimental tests %

试验序号	双层不平行振动筛		双层平行式振动筛	
	损失率	含杂率	损失率	含杂率
1	1.65	2.09	3.26	2.29
2	1.56	2.25	3.15	2.41
3	1.62	2.18	3.19	2.36
平均值	1.61	2.17	3.20	2.35

驱动机构,基于矩阵法分析获得筛面运动方程。

(2)通过多因素试验获得振动筛不同结构参数与筛分性能指标间的回归数学模型,并确定不同因素对贯流风筛式玉米清选装置筛分性能的影响规律。

(3)通过优化分析获得下筛面安装倾角为 3.5°时,各因素间的最优组合:筛面前端安装间距为 292.99 mm,上筛面安装倾角为 3.04°,筛面横向振幅为 5.55 mm。此条件下,双层不平行振动筛籽粒损失率较双层平行式平面往复振动筛平均降低了 1.59 个百分点。

参 考 文 献

[1] 苏天生,韩增德,崔俊伟,等. 谷物联合收割机清选装置研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2016, 38(2):6-11. SU Tiansheng, HAN Zengde, CUI Junwei, et al. Research status and development trend of cleaning unit of cereal combine harvesters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2):6-11. (in Chinese)

[2] 鲁云松,朱明,陈海军,等. 二自由度振动筛运动学分析及仿真试验[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(3):107-112. LU Yunsong, ZHU Ming, CHEN Haijun, et al. Kinematic analyses and simulation of two degree of freedom vibration screen [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(3):107-112. (in Chinese)

[3] 王成军,李耀明,马履中. 3 自由度混联振动筛设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊):69-73. WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong. Design of three degree of freedom hybrid vibration screen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):69-73. (in Chinese)

[4] 李菊,王增彪,沈惠平,等. 凸柱筛面并联振动筛的谷物筛分试验与分析[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(1):150-154,158. LI Jü, WANG Zengbiao, SHEN Huiping, et al. Experiment and analysis of parallel vibrating screen with convex column screen surface on grain screen[J]. Machine Design and Research, 2016, 32(1):150-154,158. (in Chinese)

- [5] 覃玉祝,谢进,陈永,等.混沌振动筛机构的研究[J].机械设计,2011,28(7):17-20.
QIN Yuzhu, XIE Jin, CHEN Yong, et al. Research on mechanism of chaotic vibration screen[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(7):17-20. (in Chinese)
- [6] 王成军,李耀明,马履中.基于并联机构的多维振动筛分试验台设计[J/OL].农业机械学报,2012,43(4):70-74,112.
WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong. Design of multi-dimensional vibration screening test bench based on parallel mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):70-74,112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.015. (in Chinese)
- [7] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):138-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180616&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.016. (in Chinese)
- [8] 李菊,曾氢菲,邓嘉鸣,等.多维并联振动筛筛分过程解析与筛面运动形式优选[J/OL].农业机械学报,2016,47(11):399-407.
LI Jü, ZENG Qingfei, DENG Jiaming, et al. Screening process analysis for multi-dimensional parallel vibrating screen and optimization of screen surface movement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):399-407. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161154&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.054. (in Chinese)
- [9] 李耀明,刘晓飞,马征,等.不同支链初始相位的三维并联筛分性能研究[J/OL].农业机械学报,2017,48(9):88-95.
LI Yaoming, LIU Xiaofei, MA Zheng, et al. Investigation on three-dimensional parallel screening performance based on initial phase of different branches[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):88-95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170911&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.011. (in Chinese)
- [10] PAUL W C, MATTHEW D S. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM part 1—compression crushers[J]. Minerals Engineering, 2015, 74:178-197.
- [11] MAKINDE O A, RAMATSETSE B I, MPOFU K. Review of vibrating screen development trends: linking the past and the future in mining machinery industries[J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 145:17-22.
- [12] GUNAJI A S, VMURALI M, SANDIP A S. Study and analysis of deck inclination angle on efficiency of vibration screen[J]. International Journal of Engineering Development and Research, 2016, 4(1):631-635.
- [13] AKBAR J, VAHID S N. Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear[J]. Powder Technology, 2016, 297:126-143.
- [14] 沈惠平,张会芳,张江涛,等.并联运动振动筛的筛分运动规律及其轨迹的研究[J].机械设计,2008,25(12):20-24.
SHEN Huiping, ZHANG Hui Fang, ZHANG Jiangtao, et al. Research on law of screening movement of parallel moving vibration sieve and its track[J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(12):20-24. (in Chinese)
- [15] 刘初升,赵跃民.弛张筛筛面动态特性及其筛分理论研究[J].煤炭学报,1998,23(4):92-96.
LIU Chusheng, ZHAO Yuemin. Dynamic characteristics of flip-flow screen and screenings theory[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(4):92-96. (in Chinese)
- [16] SONG Y, JIANG X H, SONG J, et al. Dynamic analysis of a chaotic vibrating screen[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1:1525-1531.
- [17] JIANG H S, ZHAO Y M, DUAN C L, et al. Dynamic characteristics of an equal-thickness screen with a variable amplitude and screening analysis[J]. Powder Technology, 2017, 311:239-246.
- [18] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [19] WANG L J, DING Z J, MENG S, et al. Kinematics and dynamics of a particle on a non-simple harmonic vibrating screen[J]. Particology, 2017, 32:167-177.
- [20] 苏有良.基于最优传动性能设计偏置曲柄滑块机构的研究[J].机械传动,2014,38(3):50-53.
- [21] 王立军,张传根,丁振军.玉米收获机清选筛体结构优化[J/OL].农业机械学报,2016,47(9):108-114.
WANG Lijun, ZHANG Chuan'gen, DING Zhenjun. Structure optimization of cleaning screen for maize harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):108-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.016. (in Chinese)
- [22] 金熙哲,王玉新,郭为忠,等.传动角最优的曲柄滑块机构多变量优化设计[J].上海交通大学学报,2007,41(4):561-564.
KIM Huichol, WANG Yuxin, GUO Weizhong, et al. Transmission angle-oriented multi-variable optimized design of slider-crank mechanisms[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(4):561-564. (in Chinese)
- [23] 王立军,李洋,梁昌,等.贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):122-127.
WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Motion law of maize mixture in cross air-and-screen cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):122-127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150918&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.018. (in Chinese)
- [24] 刘晓飞,李耀明,马征,等.三自由度风筛清选试验研究[J].农机化研究,2018,40(6):139-144.
LIU Xiaofei, LI Yaoming, MA Zheng, et al. Experimental study on 3-DOF air-and-screen cleaning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6):139-144. (in Chinese)