

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.04.013

# 玉米籽粒清选波浪筛机构设计与试验

冯鑫<sup>1,2</sup> 王立军<sup>1,2</sup> 于琨蒙<sup>1,2</sup> 高云鹏<sup>1,2</sup> 毕晟莹<sup>1,2</sup> 王博<sup>1,2</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业农村部高效播种收获装备重点实验室, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为提高装置对大喂入量玉米脱出物的清选性能, 基于曲柄-双摇杆设计了一种波浪筛机构, 通过多筛片组“下凹”与“近似展平”姿态的连续转换, 实现了整个筛体的波浪式运动, 通过理论分析确定了波浪筛结构。采用CFD-DEM耦合仿真对波浪筛清选装置内气固两相运动进行了数值模拟, 得出波浪筛清选装置内上部空间可形成一条高速气流带, 其有利于杂余吹散, 近筛层气流速度沿波浪筛纵向呈先降低后升高趋势, 有利于配合筛片组的“下凹”与“近似展平”实现筛上物料运移与暂时滞留, 在筛体波浪式运动下筛上籽粒陆续完成撞筛、滞留、抛起、越筛, 此种筛分方式提高了籽粒的透筛效率。以清选装置入口气流速度、筛体安装倾角、驱动轴转速为试验因素, 以籽粒的清洁率和损失率为指标, 进行了二次正交旋转组合仿真试验, 建立了各因素与指标间的数学模型, 优化获得了各参数的最优组合为: 清选装置入口气流速度为14.6 m/s, 筛体安装倾角为8.5°, 驱动轴转速为240 r/min。高速摄像台架试验结果表明: 波浪筛上籽粒的实际运动与仿真中籽粒运动基本一致, 验证了仿真结果的准确性; 在玉米脱出物喂入量高达7 kg/s时, 波浪筛清选装置籽粒的清洁率和损失率分别为99.12%和0.45%, 筛分21 kg玉米脱出物时间为6.86 s, 波浪筛机构能够满足大喂入量玉米脱出物的清选要求。

**关键词:** 大喂入量; 玉米籽粒清选; 波浪筛; 驱动机构; 籽粒运动

中图分类号: S225.5<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)04-0142-13

OSID:



## Design and Experiment of Mechanism of Wave Screen for Maize Grain Cleaning

FENG Xin<sup>1,2</sup> WANG Lijun<sup>1,2</sup> YU Kunmeng<sup>1,2</sup> GAO Yunpeng<sup>1,2</sup> BI Shengying<sup>1,2</sup> WANG Bo<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of High Efficient Seeding and Harvesting Equipments,  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150030, China)

**Abstract:** To improve the performance of cleaning device under the condition of large feeding mass of maize mixture, a wave screen for maize grain cleaning was designed based on crank and double rockers mechanism. The concave and approximate flattening of the wave screen were realized by the combined movement of multi-stage screens. Structure of wave sieve was determined based on theoretical analysis. CFD-DEM method was used for numerical simulating the motion of gas-solid two-phase in wave screen cleaning device. A high speed airflow belt could be formed in the upper space in the cleaning device, which was beneficial to the blowing of impurities. The airflow velocity near the wave sieve was decreased first and then increased along the longitudinal direction of wave sieve. The airflow distribution near sieve layer was beneficial to the migration and temporary retention of materials on sieve when sieve group moved in wave mode. Maize grains successively completed the impact on the screen, retention, which were thrown and passed over the screen under the motion of the wave screen, which could improve the efficiency of grain penetrating the sieve hole. The air velocity at the inlet of the cleaning device, the angle of installed screen and rotational speed of drive shaft were selected as the test factors. The loss rate, cleaning rate and screening efficiency of maize grains were selected as test indexes. The quadratic orthogonal rotation combination test was carried out. The mathematical models between factors and indicators were established. The best combination of parameters was obtained as follows: the airflow

收稿日期: 2022-08-11 修回日期: 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075091)和黑龙江省博士后面基金项目(LBH-Z20114)

作者简介: 冯鑫(1992—), 男, 讲师, 博士, 主要从事收获与秸秆还田机械研究, E-mail: fx2020fx@163.com

通信作者: 王立军(1978—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事收获与秸秆还田机械研究, E-mail: wljszf@163.com

velocity of cleaning device inlet was 14.6 m/s, the angle of installed screen was 8.5°, and the rotational speed of drive shaft was 240 r/min. The high-speed camera bench test was carried out. The motion of the grains on the wave screen in the bench test was as same as that in the simulation, which verified the accuracy of the simulation result. When the feeding mass of maize mixture was as large as 7 kg/s, the cleaning rate of grains after screening by wave sieve was 99.12%, and the loss rate of grains was reduced by 0.45%. The time of screening 21 kg maize mixture was 6.86 s, and the mechanism of wave screen could meet the requirement of cleaning large feeding mass of maize mixture.

**Key words:** large feeding mass; maize grain cleaning; wave screen; driving mechanism; motion of grains

## 0 引言

清选是谷物联合收获关键工序之一<sup>[1]</sup>,清选装置的性能决定收获后籽粒的损失率和清洁率,影响籽粒的经济价值<sup>[2-3]</sup>。以优质高效机械化收获为目标,谷物联合收获机正朝着高效率、大喂入量方向发展<sup>[4]</sup>,因此要求作为联合收获机“消化系统”的清选装置应具备对大喂入量混合物的分离能力<sup>[5]</sup>,然而在混合物大喂入量条件下,混合物间相互作用加剧,导致籽粒透筛几率降低,易造成籽粒损失,同时进入清选装置内杂余数量相应增加,清选后获得清洁籽粒的难度提升<sup>[6]</sup>,大喂入量谷物清选技术有待提升。

为提高清选装置性能,许多专家学者对筛体结构及筛面运动进行了研究。马宗雨等<sup>[7]</sup>探究了筛孔尺寸对羊草种子清选装置性能的影响规律,确定了适用于羊草种子清选的平面双层圆筛孔结构;王晗昊等<sup>[8]</sup>设计了百叶窗振动筛,提升筛体导风能力,减少了筛上物料的堆积,提高了籽粒的透筛效率;李菊等<sup>[9]</sup>将一系列螺栓等距安装在平面筛网上设计了凸柱筛,提高了水稻筛分时籽粒的透筛率;LI等<sup>[10]</sup>设计了多拨指阶梯式振动筛,实现物料“过阶”时的有效分散,提高了籽粒的透筛效率;韩鑫等<sup>[11]</sup>设计了一种仿鲨鱼鳞片振动筛,减小了物料输送阻力,提高了筛体对物料单向推送能力;邓嘉鸣等<sup>[12]</sup>设计了凹坑非平面筛,实现籽粒三维透筛,提高了筛体的性能;王立军等<sup>[13]</sup>设计了一种两段高差式振动筛,提高了两段筛体间的气流速度,实现了物料的“二次喂入清选”,提高了筛体的性能;刘晓飞等<sup>[14]</sup>设计了3自由度风筛清选装置,利用综合平衡法得出物料最佳透筛时的清选条件;王成军等<sup>[15-16]</sup>设计了3自由度混联振动筛,运用离散元法对物料的运动规律分析得出,筛体的多维运动可提高物料的透筛率;李菊等<sup>[17]</sup>研究了筛体各单自由度运动对筛上物料分散的影响规律,优化设计出3平移1转动振动筛驱动机构。许多专家学者针对筛体结构和驱动机构进行了创新研究,并初见成效。在筛分中物料

运动受筛体结构及其驱动机构耦合作用影响,一体式筛面在曲柄摇杆的作用下,筛面整体实现往复运动对筛上物料作用较统一,而筛体不同区域内筛上物料数量、成分、运动具有一定差异,一体筛暂时还未具备对筛上不同区域物料运动合理控制的功能,多段筛体及相应驱动机构还有待进一步研究。

本文拟基于曲柄双摇杆机构,设计一种多段式玉米籽粒清选波浪筛,通过筛片组的“下凹”与“近似展平”,实现整个筛体的波浪式运动,暂时滞留筛上籽粒,提高籽粒透筛几率,采用CFD-DEM耦合仿真分析波浪筛清选装置内气固两相运动规律,通过多因素试验优化获得波浪筛清选装置参数的最优组合,通过台架试验验证仿真结果的准确性,以期为大喂入量谷物清选振动筛机构设计提供参考。

## 1 波浪筛机构及工作原理

### 1.1 波浪筛机构

波浪筛机构由机架、多段筛、曲柄双摇杆机构、尾筛等组成,其结构如图1所示。多段筛由10个筛片依次通过套筒和销轴铰接组成,3组曲柄双摇杆分别对应驱动筛片1和2、5和6、9和10(筛片序号由筛前至筛后位置对应),每组曲柄双摇杆驱动机构中曲柄为原动件,其动力由电动机通过链轮供给,每组曲柄带动相邻双摇杆进行摆动,实现各个筛片沿x方向(筛体纵向)与z方向(竖直方向)的移动

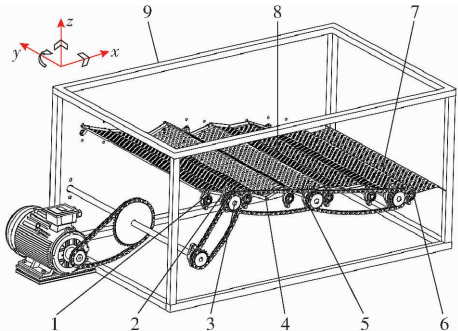


图1 波浪筛结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of wave screen

1. 摇杆 2. 曲柄 3. 曲柄驱动轴 4. 连杆 5. 连杆 6. 摇杆驱动轴 7. 尾筛 8. 波浪筛 9. 机架

和绕  $y$  方向(筛体横向)的转动,使相邻筛片(由双摇杆对应驱动)构成“近似展平”和“下凹”两种姿态,工作中完成两种姿态连续转换,从而使整体筛面实现波浪式运动。

## 1.2 工作原理

玉米脱出物(玉米籽粒、玉米秸秆、玉米芯)由抖动板喂入,经风机产生的气流吹散落至筛上,多段筛通过3组曲柄双摇杆机构实现整体筛面波浪式运动(即5个筛片组“近似展平”与“下凹”姿态的连续

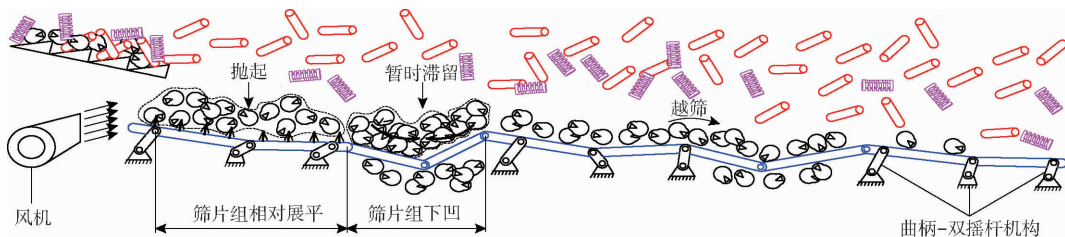


图2 波浪筛工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of wave screen

## 2 波浪筛机构设计与驱动机构急回特性分析

### 2.1 波浪筛机构设计

参考现有6行玉米籽粒联合收获机振动筛结构,设计筛片圆孔直径和横、纵间距分别为15、30、17.5 mm<sup>[18]</sup>。根据

$$L_1 = L_2 \cos \varepsilon \quad (1)$$

式中  $\varepsilon$ ——平面筛倾角,取  $3.5^\circ$

$L_1$ ——波浪筛投影长度,mm

$L_2$ ——平面筛长度,取 1 360 mm

计算获得波浪筛投影长度为 1 357.4 mm,考虑到波浪筛与尾筛的重叠配合取波浪筛垂直投影长度为 1 400 mm。参考仿蚯蚓运动振动筛结构<sup>[19]</sup>,同时考虑到波浪筛中每段筛片均可被驱动以及筛上物料顺利运移,设计波浪筛筛片数量为 10 个。沿筛体纵向均布 3 组曲柄双摇杆驱动机构,曲柄、摇杆应安装于相应筛片(共 10 片)下方并可顺利驱动对应筛片,曲柄与摇杆间距离  $L_3$  应满足

$$L_3 \leq L_1 / N \quad (2)$$

式中  $N$ ——筛片数量

考虑到实际装配曲柄与摇杆间距离不宜过小,设计曲柄与摇杆间距离为 140 mm。为使驱动机构处于筛体投影区域内不产生额外安装空间,驱动机构间距离  $L_4$  应满足

$$2L_4 + 2L_3 \leq L_1 \quad (3)$$

结合式(2)计算得出  $L_4 \leq 538$  mm,考虑到机构的实际装配时定位,设计  $L_4 = 535$  mm。

对曲柄双摇杆机构进行设计,根据《农业机械设计手册》中清选装置设计准则,驱动机构中曲柄

转换),如图2所示,在筛片组“展平”过程中筛上脱出物被抛起,通过气流协同作用完成越筛,脱出物与下个呈“下凹”姿态的筛片组碰撞后进入“凹坑”中,期间完成籽粒的暂时滞留,而后在此筛片组“下凹”至“近似展平”姿态转换过程中再次将脱出物抛起,通过气流协同作用将脱出物向筛后运移,玉米脱出物依次通过5个筛片组,在每组筛片组上依次进行撞筛、滞留、抛起、越筛,最终完成玉米籽粒清选。

半径应为 23 ~ 30 mm<sup>[20]</sup>,本文选取其范围的中心值,为了便于后续杆件加工进行参数取值,本文选取曲柄长度  $l_{CD}$  为 27 mm。曲柄与摇杆分别与连杆固接于  $B$ 、 $C$  两点,连杆  $l_{BC}$  应为筛片 1 的某一部分,其长度应满足的条件为:  $l_{BC} \leq l_1$  ( $l_1$  为筛片 1 长度),为保证筛分有效面积,筛片不宜设计过短,以波浪筛长度为参考,单筛片长度  $l_1$  同时应满足

$$l_{BC} \leq l_1 \leq L_1 / N \quad (4)$$

将各参数代入式(4)得出  $l_{BC} \leq 140$  mm,为实现筛体的顺利驱动本文设计  $l_{BC} = 140$  mm。为了实现波浪筛组对籽粒的顺利推送,即籽粒“下坡”、“上坡”时均可沿筛片滑动(不发生堆积),如图3所示,应保证曲柄转至最低位置时,筛片 1、筛片 2 与水平方向夹角  $\theta_1$  与  $\theta_2$  均应大于籽粒与筛面间静摩擦角  $24.4^\circ$ <sup>[21]</sup>,由此确定  $\theta_1 = \theta_2 = 25^\circ$ ,推导此时各杆件间的位置关系方程为

$$\begin{cases} l_{AB} = \sqrt{\left(l_{BC} - \frac{l_{CD}}{\sin \theta_1}\right)^2 + \left(l_{AD} - \frac{l_{CD}}{\tan \theta_1}\right)^2 - 2\left(l_{BC} - \frac{l_{CD}}{\sin \theta_1}\right)\left(l_{AD} - \frac{l_{CD}}{\tan \theta_1}\right)\cos \theta_1} \\ l_{EF} = \sqrt{\left(l_{CF} - \frac{l_{CD}}{\sin \theta_2}\right)^2 + \left(l_{DE} - \frac{l_{CD}}{\tan \theta_2}\right)^2 - 2\left(l_{CF} - \frac{l_{CD}}{\sin \theta_2}\right)\left(l_{DE} - \frac{l_{CD}}{\tan \theta_2}\right)\cos \theta_2} \end{cases} \quad (5)$$

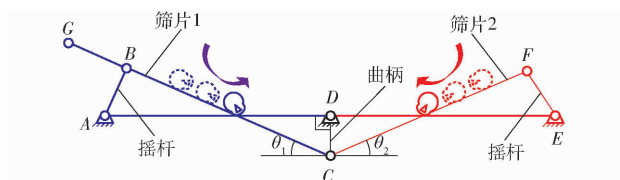


图3 曲柄双摇杆机构简图

Fig. 3 Diagram of crank and double rockers mechanism

考虑到筛片可连续向筛后输送物料,摇杆  $AB$

的摆角应略小于摇杆  $EF^{[22]}$ , 因此设计连杆长度  $l_{CF}$  为 135 mm, 分别将各杆件长度代入式(5)中, 计算出摇杆长度  $l_{AB}$ 、 $l_{EF}$  分别为 34.47、34.85 mm, 为了便于杆件后续加工, 将摇杆长度  $l_{AB}$ 、 $l_{EF}$  取整后均取 35 mm。

由于筛片 1 位于入料口, 为保证筛片 1 顺利承接抖动板下落物料<sup>[23]</sup>, 对筛片 1 前端点  $B$  位移进行分析, 如图 4 所示, 其中  $B'$ 、 $B''$  分别为摇杆处于极限位置时两点。筛片运动过程中点  $B$  的水平极限距离  $l_{E'E''}$  计算公式为

$$l_{E'E''} = \frac{l_{B''D}^2 - l_{B'D}^2}{2l_{AD}} \quad (6)$$

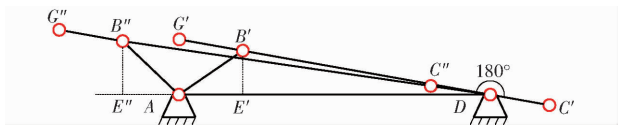


图 4 连杆处于极限位置时机构简图

Fig. 4 Diagram of mechanism with connecting rod in limit position

将各杆件长度代入得出  $l_{E'E''} = 53.96$  mm, 平面筛的振动方向角与振幅分别为  $\gamma = 43^\circ$ 、 $l_A = 19.8$  mm, 波浪筛安装与联合收获机中平面筛位置一致, 基于平面筛与波浪筛筛片 1 振动位移差, 计算波浪筛筛片 1 应加长长度, 根据公式

$$S = l_A \cos \gamma \quad (7)$$

$$l_{B'G'} = l_{E'E''} - S \quad (8)$$

式中  $S$ ——平面筛振动的水平位移, mm

计算出波浪筛筛片 1 应增加的水平长度为  $l_{B'G'} = 39.49$  mm, 根据公式

$$\begin{cases} \angle B''DA = \arccos \frac{l_{B''D}^2 + l_{AD}^2 - l_{B''A}^2}{2l_{AD}l_{B''D}} \\ \angle B'DA = \arccos \frac{l_{B'D}^2 + l_{AD}^2 - l_{B'A}^2}{2l_{AD}l_{B'D}} \\ l_{BG} \geq \frac{l_{B'G'}}{\min(\cos \angle B'DA, \cos \angle B''DA)} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $l_{BG}$ ——筛片 1 加长长度, mm

推导出筛片 1 运动时与水平方向夹角范围为  $8.4^\circ \sim 10.2^\circ$ , 并计算得出  $l_{BG} \geq 39.8$  mm, 因此为保证波浪筛可顺利承接由抖动板下落的物料, 设计筛片 1 加长长度  $l_{BG} = 40$  mm。

设筛片 3、筛片 4 长度分别为  $l_3$  和  $l_4$ , 两者长度应满足条件: ①设筛片 3、筛片 4 与水平面夹角分别为  $\theta_3$ 、 $\theta_4$ , 在任意时刻两者在水平面的投影应小于两组驱动机构相邻摇杆间的距离  $l_{A'E}$ 。②考虑到筛片 3 主要负责抛送物料, 而筛片 4 主要承接被抛送物料, 而后发生籽粒撞筛、分散、透筛<sup>[24]</sup>, 为提高筛

片单次下凹与近似展平时籽粒的透筛几率(主要发生在籽粒与筛片 4 撞击后), 应增加籽粒与筛片 4 的接触面积, 因此设计  $l_4$  大于  $l_3$ 。③ $l_3$  和  $l_4$  之和应大于等于双摇杆极限位置时铰接点间的距离  $L_{FG'}$ , 以保证筛片 3 和筛片 4 长度可满足双摇杆的连续运动(不发生卡死), 如图 5 所示。综上得出长度  $l_3$  和  $l_4$  限定方程为

$$\begin{cases} l_3 \cos \theta_3 + l_4 \cos \theta_4 \leq l_{A'E} = L_4 - 2L_M \\ l_3 < l_4 \\ l_3 + l_4 \geq L_{FG'} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $\theta_3$ 、 $\theta_4$ ——筛片 3、筛片 4 与水平面的夹角, 最小取  $25^\circ$ <sup>[21]</sup>

$L_{FG'}$ ——曲柄位于极限位置时(曲柄与连杆夹角为  $180^\circ$ )两摇杆间的距离, mm

$L_M$ ——曲柄与摇杆间距离, mm

基于余弦定理对  $L_{FG'}$  进行推导, 得

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arccos \frac{l_{DF}^2 + l_{DE}^2 - l_{EF}^2}{2l_{DE}l_{DF}} \\ \alpha_2 = 180^\circ - \alpha_1 \\ \alpha_3 = \arccos \frac{l_{A'D'} - l_{C'D'} \cos \alpha_2}{\sqrt{l_{A'D'}^2 + l_{C'D'}^2 - 2l_{A'D'}l_{C'D'} \cos \alpha_2}} \\ \alpha_4 = \arccos \frac{l_{A'D'}^2 + l_{C'D'}^2 - 2l_{A'D'}l_{C'D'} \cos \alpha_2 + l_{A'B'}^2 - l_{B'C'}^2}{2l_{A'B'} \sqrt{l_{A'D'}^2 + l_{C'D'}^2 - 2l_{A'D'}l_{C'D'} \cos \alpha_2}} \\ \alpha_5 = \alpha_3 + \alpha_4 \\ \alpha_6 = \arccos \frac{l_{DF}^2 + l_{AD}^2 - 2l_{DF}l_{AD} \cos \alpha_1 + l_{A'E}^2 - l_{EF}^2}{2l_{A'E} \sqrt{l_{DF}^2 + l_{AD}^2 - 2l_{DF}l_{AD} \cos \alpha_1}} \\ \alpha_7 = \arccos \frac{l_{A'B'}^2 + l_{B'C'}^2 - l_{C'D'}^2 - l_{A'D'}^2 + 2l_{A'D'}l_{C'D'} \cos \alpha_2}{2l_{A'B'}l_{B'C'}} \\ \alpha_8 = 180^\circ - \alpha_7 \\ \alpha_9 = \arccos \frac{l_{A'B'} - l_{B'C'} \cos \alpha_8}{\sqrt{l_{B'C'}^2 + l_{A'B'}^2 - 2l_{B'C'}l_{A'B'} \cos \alpha_8}} \\ \alpha_{10} = 180^\circ - \alpha_5 - \alpha_6 - \alpha_9 \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\alpha_1$ —— $DF$  与  $DE$  之间的夹角,  $(^\circ)$

$\alpha_2$ —— $\alpha_1$  的补角,  $(^\circ)$

$\alpha_3$ —— $A'C'$  与  $A'D'$  之间的夹角,  $(^\circ)$

$\alpha_4$ —— $A'B'$  与  $A'C'$  之间的夹角,  $(^\circ)$

$\alpha_5$ —— $A'B'$  与  $A'D'$  之间的夹角,  $(^\circ)$

$\alpha_6$ —— $A'F$  与  $A'E$  之间的夹角,  $(^\circ)$

$\alpha_7$ —— $A'B'$  与  $B'C'$  之间的夹角,  $(^\circ)$

$\alpha_8$ —— $\alpha_7$  的补角,  $(^\circ)$

$\alpha_9$ —— $A'G'$  与  $A'B'$  之间的夹角,  $(^\circ)$

$\alpha_{10}$ —— $A'G'$  与  $A'F$  之间的夹角,  $(^\circ)$



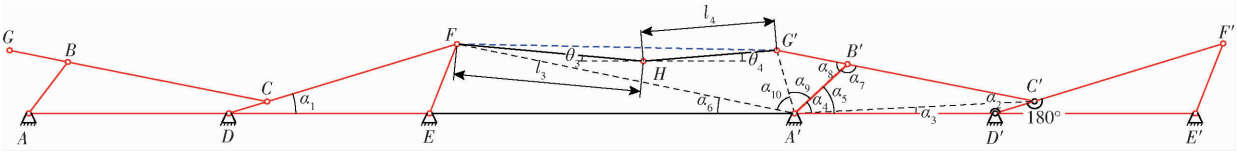


图 5 曲柄与连杆处于极限位置时机构简图

Fig. 5 Diagram of mechanism when crank and connecting rod were in limit position

$$L_{FC'} = \sqrt{l_{B'C'}^2 + l_{A'B'}^2 - 2l_{B'C'}l_{A'B'}\cos\alpha_8 + l_{A'D}^2 + l_{DF}^2 - 2l_{DF}l_{A'D}\cos\alpha_1 - 2\sqrt{l_{B'C'}^2 + l_{A'B'}^2 - 2l_{B'C'}l_{A'B'}\cos\alpha_8}\sqrt{l_{A'D}^2 + l_{DF}^2 - 2l_{DF}l_{A'D}\cos\alpha_1}\cos\alpha_{10}}$$

(12)

将各杆件长度代入式(11)、(12)中得出  $L_{FC'}$  为 223 mm,结合式(10)中限定条件最终确定筛片 3 和筛片 4 长度分别为 120 mm 和 140 mm。由于清选装置入口气流速度、筛面安装倾角和振动频率(驱动轴转速决定)是影响清选性能的关键参数,具体数值由多因素优化试验确定。

2.2 波浪筛驱动机构急回特性分析

四杆机构急回特性会影响筛上物料的运动(抛起与滑落),四杆机构急回特性判定公式为<sup>[25]</sup>

$$\left\{\begin{aligned}\theta_5 &= \arccos \frac{(l_{BC} - l_{CD})^2 + l_{AD}^2 - l_{AB}^2}{2(l_{BC} - l_{CD})l_{AD}} - \arccos \frac{(l_{BC} + l_{CD})^2 + l_{AD}^2 - l_{AB}^2}{2(l_{BC} + l_{CD})l_{AD}} < 0 \\ \theta_6 &= \arccos \frac{(l_{CF} - l_{CD})^2 + l_{DE}^2 - l_{EF}^2}{2(l_{CF} - l_{CD})l_{DE}} - \arccos \frac{(l_{CF} + l_{CD})^2 + l_{DE}^2 - l_{EF}^2}{2(l_{CF} + l_{CD})l_{DE}} < 0\end{aligned}\right. \quad (13)$$

式中  $\theta_5$ 、 $\theta_6$ ——机构  $ABCE$ 、机构  $CDEF$  急回夹角, (°)

由于籽粒在筛片 1 主要为“下坡”运动,机构是否具备急回特性对向筛后输送物料暂无干扰,且机构若不具备急回特性会增加其稳定性,通过式(13)计算得  $\theta_5$  为 1.81°,以此判定杆件组  $ABCD$  不具备急回特性;由于物料在筛片 2 主要为“上坡”运动,物料越筛难度增加,因此要求曲柄摇杆机构应具备急回特性,以此提升筛片 2 对物料的抛掷能力,实现物料向筛后稳定输送,通过式(13)计算得出  $\theta_6$  为 -3.8°,以此判定杆件组  $CDEF$  具备急回特性,机构设计初步满足要求。

3 清选装置内气固两相流数值模拟

3.1 数值模拟流程

波浪筛运动是多个筛片 2 移动 1 转动组成, EDEM 软件暂无对此运动直接添加的功能,因此本文通过 SolidWorks 软件建立波浪筛三维模型,去除与筛片运动无影响的零部件,将简化后模型导入 ADAMS 软件中,设定约束力、接触力、驱动及仿真参

数对波浪筛运动进行仿真。提取各个筛片运动曲线,通过 Matlab 软件对数据点进行拟合,获得各筛片运动方程,最后通过应用程序编程接口 API (Application programming interface)将波浪筛各筛片运动添加到 EDEM 中。

3.2 清选装置模型

参考 6 行玉米籽粒联合收获机清选装置结构,利用 SolidWorks 软件对波浪筛和平面筛清选装置进行三维建模,如图 6a、6b 所示。鉴于波浪筛工作时没有横向位移,考虑到计算机处理能力,将波浪筛清选装置宽度设定为 108 mm,  $\beta$  为筛体安装倾角,即

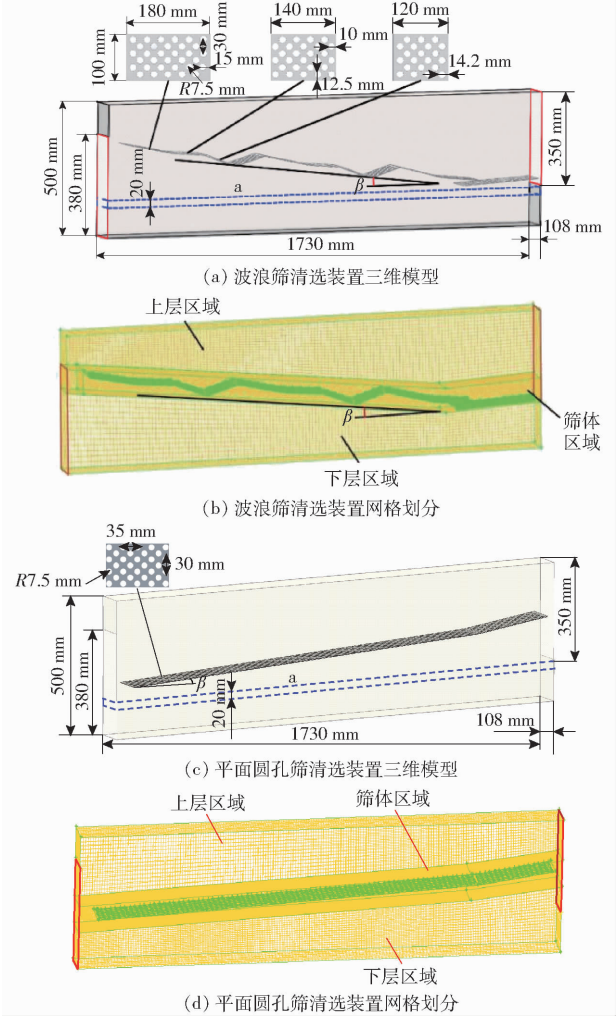


图 6 仿真模型及其网格划分

Fig. 6 Simulation model and divided mesh

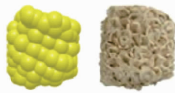
四杆机构中的定杆与水平方向的夹角,具体数值通过后文多因素试验确定;为对比分析波浪筛筛上籽粒的运动特性,建立平面圆孔筛清选装置三维模型,筛面倾角为 3.5°,清选装置外壳尺寸、圆孔尺寸及排布均与波浪筛清选装置一致。将模型保存为 STEP 格式并导入 Gambit 软件中进行网格划分,为提高模拟的准确性,筛片表面选用三角形非结构化网格,筛片周围采用四面体非结构化网格,其他区域采用六面体结构网格,划分后波浪筛和平面筛清选装置(如图 6b、6d 所示)网格数量分别为 2 155 001

个和 1 900 454 个。

3.3 颗粒模型

选取德美亚一号玉米品种为试验对象,测定收获期玉米籽粒、玉米芯、玉米秸秆的含水率分别为 24.8% ± 1%、47.8% ± 1.2% 和 63.7% ± 0.9%,利用三维扫描系统对玉米脱出物外形进行扫描建模,除去噪点和尖边后利用 SolidWorks 软件将扫描对象云点图转换为 STEP 格式文件,导入 EDEM 软件中以各脱出物轮廓为边界,确定每个小球直径和坐标进行小球填充<sup>[26]</sup>,填充后颗粒模型及其参数如表 1 所示。

表 1 颗粒模型及其参数  
Tab.1 Models and parameters of particles

| 颗粒类型      | 球形籽粒                                                                              | 锥形籽粒                                                                              | 矩形籽粒                                                                              | 玉米芯                                                                                | 玉米秸秆                                                                                |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 模型        |  |  |  |  |  |
| 长度/mm     | 9.1                                                                               | 13.2                                                                              | 12.2                                                                              | 6~12                                                                               | 28~52                                                                               |
| 宽度/mm     | 8.1                                                                               | 8.2                                                                               | 9.6                                                                               |                                                                                    |                                                                                     |
| 厚度(直径)/mm | 6.7                                                                               | 5.1                                                                               | 5.3                                                                               | 7~20                                                                               | 6~8                                                                                 |

3.4 仿真参数设定

在 EDEM 中选用 Hertz - Mindlin (no - slip) 模型,筛体及清选装置材料设置为钢<sup>[27]</sup>,基于课题组前期研究成果<sup>[28-29]</sup>,材料力学特性及相互接触参数设定如表 2 和表 3 所示。

表 2 材料力学特性参数

Tab.2 Parameters of mechanical properties of materials

| 材料    | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 剪切模量/MPa | 泊松比  |
|-------|--------------------------|----------|------|
| 籽粒    | 1 190                    | 1.27     | 0.40 |
| 茎秆    | 150                      | 1.00     | 0.42 |
| 芯     | 650                      | 1.09     | 0.45 |
| 筛面(钢) | 7 800                    | 700.00   | 0.30 |

表 3 材料相互接触参数

Tab.3 Parameters of interaction properties of materials

| 材料    | 碰撞恢复系数 | 滚动摩擦因数 | 静摩擦因数 |
|-------|--------|--------|-------|
| 籽粒-籽粒 | 0.44   | 0.06   | 0.50  |
| 籽粒-茎秆 | 0.35   | 0.01   | 0.32  |
| 籽粒-芯  | 0.28   | 0.01   | 0.73  |
| 籽粒-筛面 | 0.61   | 0.03   | 0.53  |
| 茎秆-茎秆 | 0.26   | 0.01   | 0.32  |
| 茎秆-芯  | 0.29   | 0.01   | 0.47  |
| 茎秆-筛面 | 0.43   | 0.01   | 0.45  |
| 芯-芯   | 0.27   | 0.01   | 0.97  |
| 芯-筛面  | 0.39   | 0.01   | 0.43  |

在清选装置前部设置颗粒工厂(长 120 mm、宽 100 mm)用于生产颗粒,设定玉米脱出物大喂入量为 7 kg/s(6 行玉米联合收获机清选装置常规喂入量为 5 kg/s),由于清选筛宽度等比例缩减,通过换

算设定仿真中玉米脱出物喂入量为 0.7 kg/s,玉米籽粒(圆形、锥形、矩形的籽粒分别占玉米脱出物总量比例为 7.6%、54.6%、11.1%)、玉米芯、玉米秸秆占比分别为 73.3%、9.1%、17.6%;设定平面圆孔筛振动幅度为 19 mm,振动方向角和频率分别为 136.6°和 5.15 Hz。

Fluent 中采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型,采用瞬态压力模型作为求解器<sup>[30]</sup>,大气压力默认为一个标准大气压 101.325 kPa,设定湍流强度为 3.16%,鉴于实际作业时玉米籽粒联合收获机清选装置风机出口风角为 20°~25°,选取中心值 22.5°作为仿真参数,清选装置入口气流速度为 9.6~16.0 m/s;残差为  $1 \times 10^{-3}$ ,时间步长为 0.005 s,迭代步数为 1 600,总模拟时间为 8 s,Rayleigh 时间步长占 EDEM 时间步长的 20%,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。

3.5 波浪筛清选装置内气固两相运动分析

3.5.1 清洗装置内气流场分析

利用 Fluent 软件提取清选装置内气流场,如图 7 所示,分析可知气流由风口进入“绕过”筛体前端在装置内上位形成一条高速气流带,气流速度范围为 14.41~15.50 m/s,相比于入口气流速度 12.8 m/s 增加了 2.61~2.7 m/s,此高速气流带产生利于杂余的吹送与分散(效果见图 8);筛尾上部气流沿水平方向(入口至出口方向)逐渐增加、沿竖直方向逐渐减小,筛尾上部气流速度为 10.48~13.1 m/s,气流最高速度相比于入口气流速度有提升,利于筛体尾

部杂余吹散与排出;分别提取垂直于波浪筛方向 100 mm 和 200 mm 处(籽粒运动层)近筛层气流速度,分析可知沿波浪筛体纵向近筛层气流速度呈先降低后升高趋势,区域 I 和区域 V (筛片组呈“近似展平”姿态)近筛层平均气流速度相对较高,分别为 9.50 m/s 和 8.64 m/s,证明了筛体前端(物料需分散)和尾部(杂余需排出)气流分布有助于筛上物料吹散和运移,当筛片组呈“下凹”姿态时近筛层气流速度减小,区域 II 和区域 IV (筛片组呈“下凹姿态”)平均速度分别为 8.21 m/s 和 8.45 m/s,此处气流有利于籽粒暂时滞留而后透筛,区域 III 近筛层平均气流速度最低为 8.19 m/s,利于物料在筛体中部实现稳定筛分。

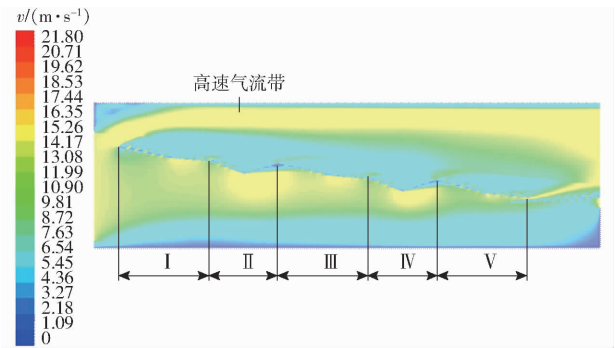


图 7 波浪筛清选装置内气流分布

Fig. 7 Distribution of airflow in wave sieve cleaning device

3.5.2 筛分过程分析

图 8 为在清选装置入口气流速度为 12.8 m/s,筛片组安装倾角为 6°,驱动轴转速为 300 r/min 条件下 0.4~4.4 s 内(玉米脱出物喂入至稳定筛分)波浪筛筛分过程,将波浪筛等距分为 6 个区域,并实时显示区域内籽粒数量。分析可知当玉米脱出物喂入时大部分杂余(茎秆和芯)在气流的作用下被吹至清选装置尾部,小部分杂余通过多段筛体的波浪式运动实现向筛后运移(筛上不发生堆积);筛上籽粒被“近似展平”筛片组抛掷,与“下凹”筛片组撞击

后,在“凹坑”中的暂时滞留,经下次“近似展平”向筛后继续输送,在稳定筛分时筛体后部(区域 5 和区域 6)籽粒的数量为 7~44 个,相比于筛体中部(区域 3 和区域 4 中籽粒数量 451~500)大幅度减少,证明了波浪筛对籽粒的暂时滞留提高了籽粒的透筛几率。

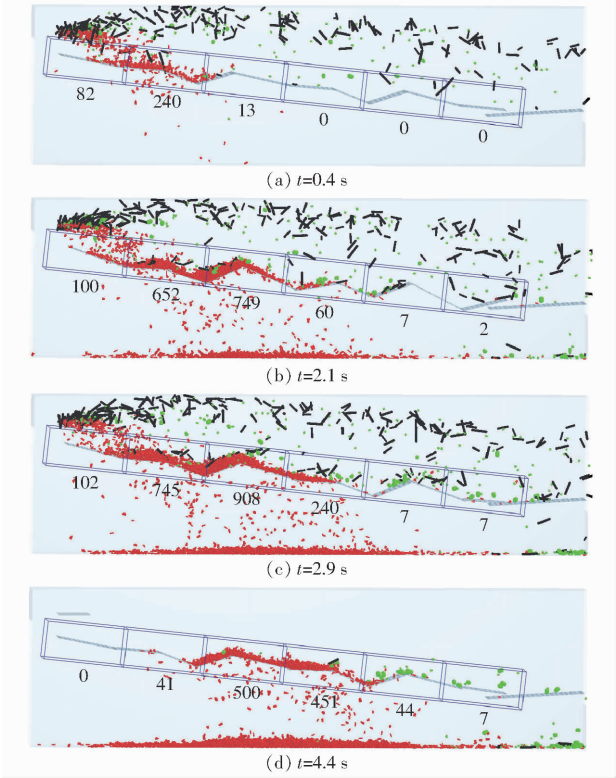


图 8 波浪筛工作过程仿真结果

Fig. 8 Simulation result of working process of wave screens

3.5.3 筛上籽粒运动速度分析

不同筛片上籽粒的运动如图 9 所示,籽粒在筛片 1、2 上的运动形式呈现为:抛起→越筛→撞筛→滞留,籽粒在筛片 3、4 上运动形式同步呈现为撞筛→滞留→抛起→越筛,在相同时间点不同筛片上籽粒运动存在差异,并且筛片 3、筛片 4 实现了对筛片 1、2 抛后籽粒承接、滞留及透筛。

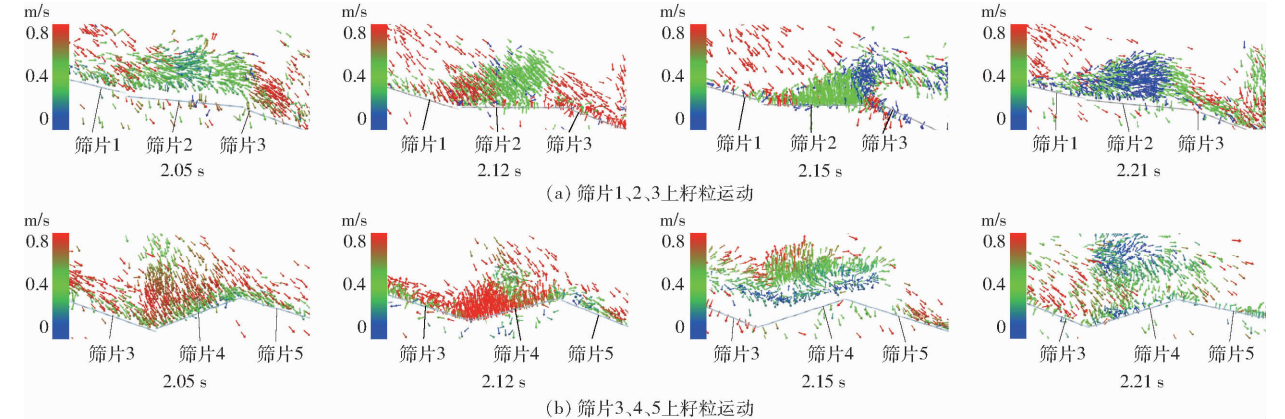


图 9 不同筛片上籽粒速度

Fig. 9 Velocities of grains on different screens



建立  $xoy$  坐标系根据籽粒速度角判定其运动方向,即当速度角为  $(-90^{\circ}, 90^{\circ})$ ,籽粒沿  $x$  轴正方向(向筛后)运动;当速度角为  $90^{\circ}$  时,籽粒竖直向上运动;当速度角大于  $90^{\circ}$  时,籽粒沿  $x$  轴负方向(向筛前)运动。对比波浪筛与平面筛上籽粒速度方向角变化,分析可知:平面筛上籽粒的速度方向角在  $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,表明筛上籽粒一直向后运移,而波浪筛(筛片 1~4)筛上籽粒速度方向角在  $-90^{\circ} \sim 100^{\circ}$ (出现高于  $90^{\circ}$  的数值),说明筛上籽粒在向后运移的过程中,籽粒发生近似竖直抛起与退移;结合图 10 可知:在 2.04~2.06 s 内,籽粒与筛片 3、4 撞击,速度方向角由  $-49.4^{\circ}$  增至  $89.9^{\circ}$ ,撞筛后部分籽粒透筛,其余籽粒在 2.06~2.14 s 内,速度方向角增加并大于  $90^{\circ}$ ,此时籽粒被筛片回抛,期间籽粒处于暂时滞留状态,在 2.14~2.24 s 内,被抛起的籽粒由于气流作用,速度方向角开始减小,向筛后运动实现越筛。

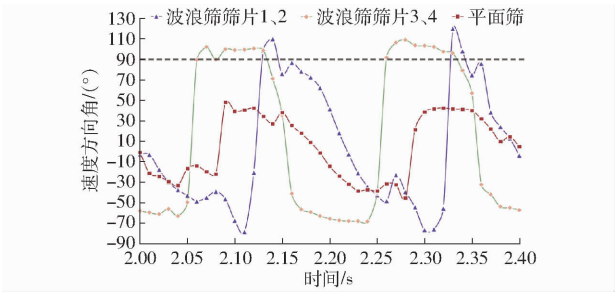


图 10 不同筛片上籽粒速度方向角随时间变化曲线  
Fig. 10 Changes of velocity angle of grain on different screens with time

3.5.4 籽粒透筛质量分析

利用 EDEM 后处理模块在清选装置区域 a (图 6a)中添加 Grid Bin Group,提取不同时间点 Grid Bin Group 中玉米籽粒的质量,通过曲线拟合获得透筛籽粒质量随时间的变化规律,如图 11 所示,分析可知波浪筛与平面筛透筛籽粒质量随时间增加均呈“周期性波浪式”变化,波浪筛透筛籽粒平均质量为 30 g,相比于平面筛透筛籽粒平均质量高 15 g,分析原因为平面筛为整体式,在筛体的反复振动中筛上籽粒整体呈近似一致运动形式,即籽粒全部被抛起、下落、透筛<sup>[31]</sup>,而波浪筛为多段筛体,同一时刻不同筛片运动具有差异,即当一部分籽粒被筛片 1、2 抛起时,存在另一部分籽粒与筛片 3、4 撞击而透筛,因此波浪筛透筛籽粒最低质量高于平面筛;波浪筛透筛籽粒最高质量也高于平面筛,分析原因为在一个筛体运动周期内籽粒透筛质量最高点主要发生于籽粒与筛面接触过程中,由 3.5.3 节分析可知,籽粒与波浪筛撞击后产生“趋凹”运动,实现籽粒暂时滞留增加籽粒的透筛几率,而平面筛仅对籽粒实

现撞击、小程度的分散而后透筛,相比于波浪筛,平面筛上籽粒与筛面接触几率小,因此透筛籽粒质量较低。

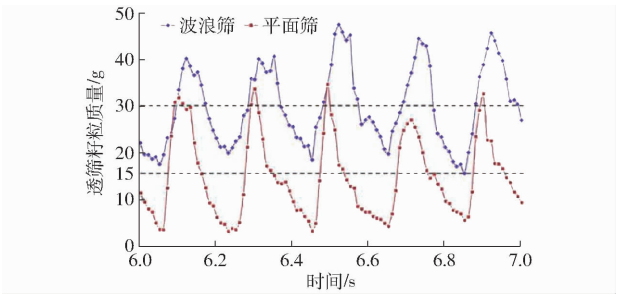


图 11 透筛籽粒质量随时间变化曲线  
Fig. 11 Change of mass of grain passing through sieve holes with time

3.6 多因素试验

3.6.1 试验设计

清选装置入口气流速度、筛体安装倾角、筛体振动频率(由驱动轴转速决定)是影响筛上物料运动主要因素<sup>[32]</sup>,因此选取波浪筛清选装置入口气流速度  $x_1$ 、筛体安装倾角  $x_2$ 、驱动轴转速  $x_3$  为试验因素。

基于玉米收获机质量评价技术规范 and 国家标准 GB/T 21962,选定玉米籽粒的清洁率  $y_1$  和损失率  $y_2$  为清选装置性能评价指标。利用 Design-Expert 8.0.6 软件设计三因素五水平二次正交旋转组合仿真试验。

参考 6 行玉米籽粒联合收获机清选装置入口气流速度范围为 9.6~16.0 m/s,以此为多因素试验中参数水平;根据《农业机械设计手册》<sup>[20]</sup> 确定筛体安装倾角为  $3^{\circ} \sim 9^{\circ}$ ;进行单因素试验获得驱动轴转速对籽粒损失率和清洁率的影响规律,如图 12 所示,鉴于驱动轴转速为 240~360 r/min 时对清选性能影响显著,且此参数范围籽粒损失率或清洁率均满足 GB/T 21962—2020《玉米籽粒收获机标准》,以此为多因素试验的参数水平范围,试验因素编码如表 4 所示。

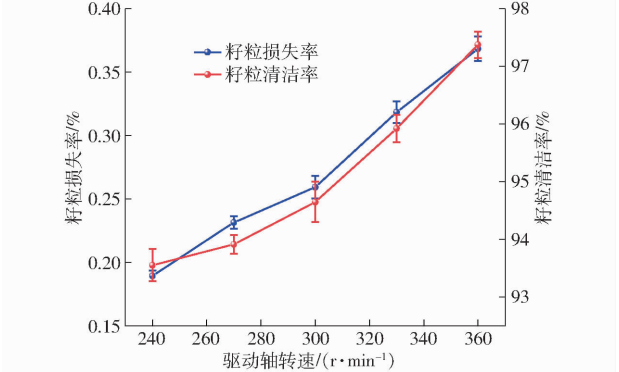


图 12 驱动轴转速对清选性能影响曲线  
Fig. 12 Effect of drove shaft speed on cleaning performance



3.6.2 试验结果与分析

多因素试验结果如表 5 所示( $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  为因素编码值),利用 Design-Expert 8. 0. 6 软件对试验结果进行分析,得到籽粒清洁率和损失率的回归方程,并进行显著性检验。

表 4 试验因素编码  
Tab. 4 Codes of test factors

| 编码      | 因素                                          |                       |                                          |
|---------|---------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|
|         | 清选装置入口气流速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 筛体安装倾角/( $^{\circ}$ ) | 驱动轴转速/( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) |
| -1. 682 | 9. 6                                        | 3. 0                  | 240                                      |
| -1      | 10. 9                                       | 4. 2                  | 264                                      |
| 0       | 12. 8                                       | 6. 0                  | 300                                      |
| 1       | 14. 7                                       | 7. 8                  | 336                                      |
| 1. 682  | 16. 0                                       | 9. 0                  | 360                                      |

表 5 试验设计与结果  
Tab. 5 Design and results of experiment

| 试验<br>序号 | 因素      |         |         | 清洁率<br>$y_1/\%$ | 损失率<br>$y_2/\%$ |
|----------|---------|---------|---------|-----------------|-----------------|
|          | $x_1$   | $x_2$   | $x_3$   |                 |                 |
| 1        | 1       | -1      | -1      | 94. 5           | 0. 25           |
| 2        | 0       | 0       | 0       | 95. 3           | 0. 28           |
| 3        | 1. 682  | 0       | 0       | 99. 5           | 0. 45           |
| 4        | 0       | 0       | 0       | 95. 0           | 0. 28           |
| 5        | 0       | -1. 682 | 0       | 91. 4           | 0. 14           |
| 6        | -1      | 1       | -1      | 92. 3           | 0. 17           |
| 7        | -1. 682 | 0       | 0       | 91. 6           | 0. 16           |
| 8        | 0       | 0       | -1. 682 | 93. 6           | 0. 19           |
| 9        | -1      | -1      | -1      | 88. 2           | 0. 01           |
| 10       | 0       | 0       | 0       | 94. 6           | 0. 26           |
| 11       | 1       | -1      | 1       | 97. 8           | 0. 34           |
| 12       | 0       | 1. 682  | 0       | 98. 1           | 0. 38           |
| 13       | -1      | 1       | 1       | 97. 3           | 0. 36           |
| 14       | -1      | -1      | 1       | 92. 4           | 0. 17           |
| 15       | 0       | 0       | 1. 682  | 97. 4           | 0. 37           |
| 16       | 1       | 1       | 1       | 98. 2           | 0. 40           |
| 17       | 0       | 0       | 0       | 94. 2           | 0. 25           |
| 18       | 0       | 0       | 0       | 93. 8           | 0. 23           |
| 19       | 0       | 0       | 0       | 95. 5           | 0. 28           |
| 20       | 1       | 1       | -1      | 98. 6           | 0. 42           |
| 21       | 0       | 0       | 0       | 94. 0           | 0. 24           |
| 22       | 0       | 0       | 0       | 94. 8           | 0. 27           |
| 23       | 0       | 0       | 0       | 94. 5           | 0. 26           |

(1) 籽粒清洁率

通过对数据分析和拟合<sup>[33]</sup>可知:模型显著性检验  $F$  值为 34. 94,  $p$  值小于 0. 05, 该模型显著;失拟项  $p=0. 143\ 0>0. 05$ , 残差项不显著, 表明该回归模型成立。其中 3 个主效应项、交互项  $x_1x_2$  和  $x_1x_3$  对指标影响显著, 其余项影响不显著。对籽粒清洁率影响的主次顺序为:  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 。剔除不显著项获得各因素对籽粒清洁率的回归方程为

$$y_1=94. 66+2. 36x_1+1. 82x_2+1. 36x_3-0. 56x_1x_2-0. 77x_1x_3\quad(R^2=0. 960\ 3)\quad(14)$$

各因素对籽粒清洁率影响的响应曲面如图 13 所示。分析可知:当清选装置入口气流速度一定时, 籽粒清洁率随筛体安装倾角增大而增大, 分析原因为当筛体安装倾角的增大, 整个波浪筛向下倾斜, 筛片对物料滞留作用减弱, 杂余的运移速度增加、透筛几率降低, 籽粒清洁率增大;当筛体安装倾角一定时, 籽粒清洁率随清选装置入口气流速度增大而增大, 分析原因为气流速度增大, 气流对杂余的吹散作用增强, 杂余的触筛几率减小、透筛几率降低, 籽粒清洁率增大;当清选装置入口气流速度一定时, 籽粒清洁率随筛体驱动轴转速的增大而增大, 分析原因为驱动轴转速增加, 杂余抛起速度增加, 单位时间内杂余的运移距离增大、触筛几率变小、透筛几率降低, 籽粒清洁率增大。

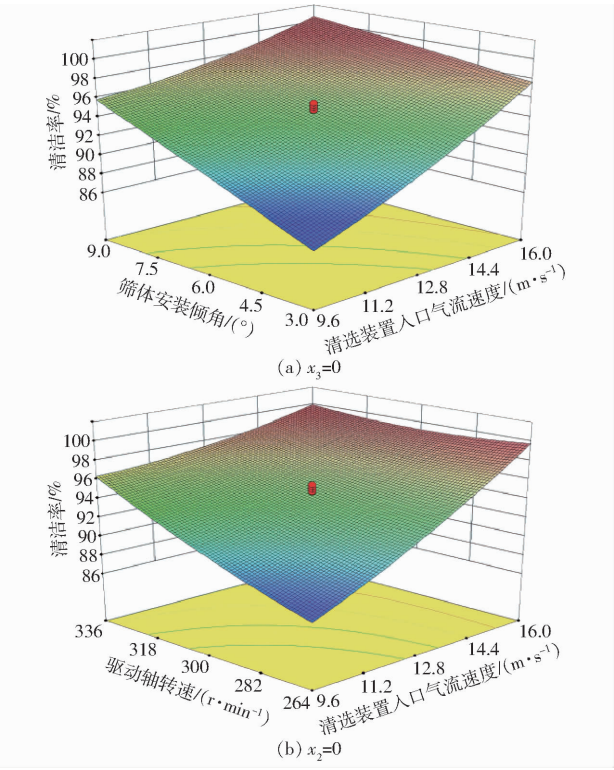


图 13 各因素对清洁率影响的响应曲面  
Fig. 13 Response surfaces of effect of factors on cleaning rate of grain

(2) 籽粒损失率

同理分析可知:模型显著性检验  $F$  值为 59. 31,  $p$  值小于 0. 05, 该模型显著;失拟项  $p=0. 237\ 9>0. 05$ , 残差项不显著, 表明该回归模型成立。其中 3 个主效应项、交互项  $x_1x_2$  和  $x_1x_3$ 、二次项  $x_1^2$  对指标影响显著, 其余项影响不显著, 主效应项对籽粒损失率影响的主次顺序为:  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 。剔除不显著项获得各因素对籽粒损失率的回归方程为

$$y_2=0. 26+0. 086x_1+0. 072x_2+0. 053x_3-0. 016x_1x_2-0. 036x_1x_3+0. 013x_1^2\quad(R^2=0. 976\ 2)\quad(15)$$

各因素对籽粒损失率影响的响应曲面如图 14 所示。分析可知:当清选装置入口气流速度一定时,籽粒损失率随筛体安装倾角增大而增大,分析原因为当筛体安装倾角增大,整个波浪筛向下倾斜,筛片对籽粒的滞留作用减弱,籽粒透筛几率降低,籽粒损失率增大;当筛体安装倾角一定时,籽粒损失率随清选装置入口气流速度增大而增大,分析原因为气流速度增加,气流对籽粒吹散作用增强,籽粒的触筛几率变小、透筛几率降低,籽粒损失率增大;当清选装置入口气流速度一定时,籽粒损失率随筛体驱动轴转速的增大而增大,分析原因为驱动轴转速增加,籽粒抛起速度增加,单位时间内籽粒的运移距离增大、触筛几率变小、透筛几率降低,籽粒损失率增大。

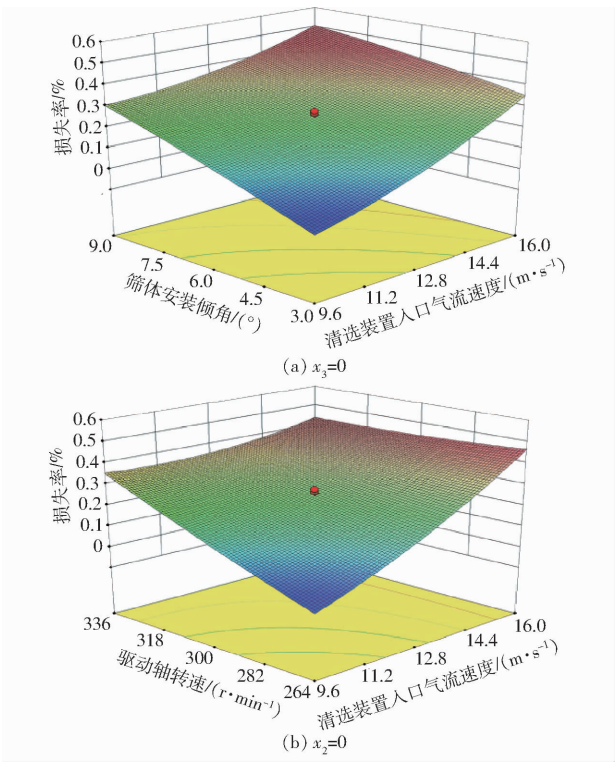


图 14 各因素对损失率影响的响应曲面  
Fig. 14 Response surfaces of effect of factors on loss rate of grain

3.6.3 参数优化

在满足清选性能要求的前提下获得籽粒较高的清洁率、籽粒较低的损失率,据此选取目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ \min y_2 \\ -1.682 \leq x_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq x_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq x_3 \leq 1.682 \end{cases} \quad (16)$$

优化结果为:当清选装置入口气流速度为 14.6 m/s,筛体安装倾角为 8.5°,驱动轴转速为 240 r/min 时,

籽粒清洁率为 99.5%,籽粒损失率为 0.43%。

4 验证试验

4.1 试验准备与过程

为了验证仿真试验优化结果的准确性,依据优化结果加工试验装置并搭建高速摄像试验台架,如图 15 所示。选择玉米品种、物理力学特性与仿真模型参数一致,将抖动板按面积均匀划分 6 个区域,根据仿真中脱出物各成分比例(由课题组前期调研获得)共称量 21 kg,将脱出物每种成分按质量均匀分成 6 份,并将各成分每份均匀混合后依次分布于抖动板的区域 1~6 内,利用高速摄像机判断 3 s 后抖动板上混合物是否完全喂入,若 3 s 后混合物有剩余,增加激振频率;若 3 s 前混合物提前喂入,降低激振频率,反复标定确定 21 kg 混合物 3 s 均匀喂入时的激振频率,以此保证混合物喂入的均匀性与连续性。

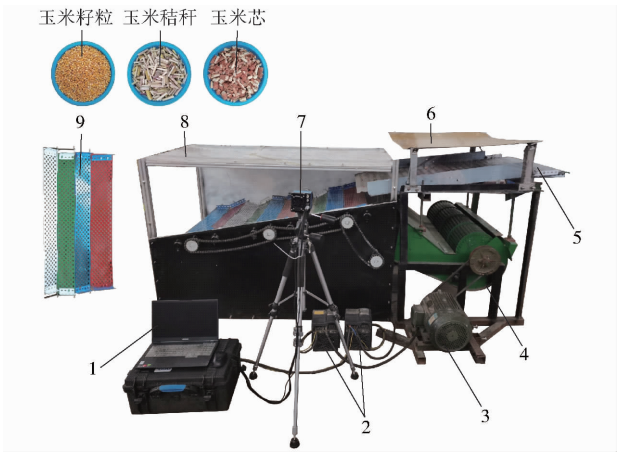


图 15 试验台架  
Fig. 15 Test bench

1. 计算机 2. 变频器 3. 电机 4. 风机 5. 抖动板 6. 密封板  
7. 高速摄像机 8. 清选装置 9. 波浪筛

利用变频器分别调整贯流风机转速与波浪筛驱动轴转速,控制清选装置入口气流速度与波浪筛振动频率,分别利用风速测量仪和转速测量仪测定清选装置入口气流速度与波浪筛驱动轴转速(推算筛体振动频率),通过 Matlab 软件对数据拟合获得清选装置入口气流速度  $x_1$ 、波浪筛振动频率  $x_2$  分别与变频器频率  $f_1$ 、 $f_2$  的关系式

$$\begin{cases} f_1 = 3.235x_1 - 0.0298 & (R^2 = 0.998) \\ f_2 = 0.05574x_2 + 0.2439 & (R^2 = 0.998) \end{cases} \quad (17)$$

通过式(17)计算得出当清选装置入口气流速度为 14.6 m/s、驱动轴转速为 240 r/min 时,变频器  $f_1$  和  $f_2$  分别应调为 47.20 Hz 与 13.62 Hz,据此保证台架试验清选装置工作参数与优化结果一致。

试验前调整高速摄像镜头位置与拍摄画面清晰



度,开始录制;接通电源启动贯流风机转速变频器与波浪筛驱动轴转速变频器,实现波浪筛机构与贯流风机运行;待波浪筛运行稳定、清选装置内形成稳定气流场后,通过抖动板将混合物喂入进行玉米籽粒清选;待清选结束后关闭变频器、保存高速摄像文件,收集筛下玉米籽粒和杂余并称量,结合籽粒喂入质量计算籽粒损失率和清洁率,记录数据。

4.2 试验结果

因高速摄像机视觉范围有限,无法对整个波浪筛上籽粒进行追踪,考虑到籽粒在筛片 3、4 上滞留

时间较长(便于追踪),因此以筛片 3、4 上玉米籽粒运动为例进行分析。观察高速摄像图像(20 f/s)追踪籽粒运动,如图 16 所示,为在物料混杂情况下逐帧追踪单个籽粒,对高速摄像图像进行方格阵列划分,方格阵列规格为  $20 \times 16$ ,并对方格进行横纵编号,确定每帧图像中籽粒相对于方格的位置,提取图像不同时刻籽粒横纵坐标,拟合获得籽粒运动轨迹,如图 17 所示。台架试验中筛上籽粒由筛片 3 抛起后,与筛片 4 撞击实现滞留,并通过筛片 4 抛掷实现越筛,其运动轨迹与仿真中籽粒运动轨迹基本一致。

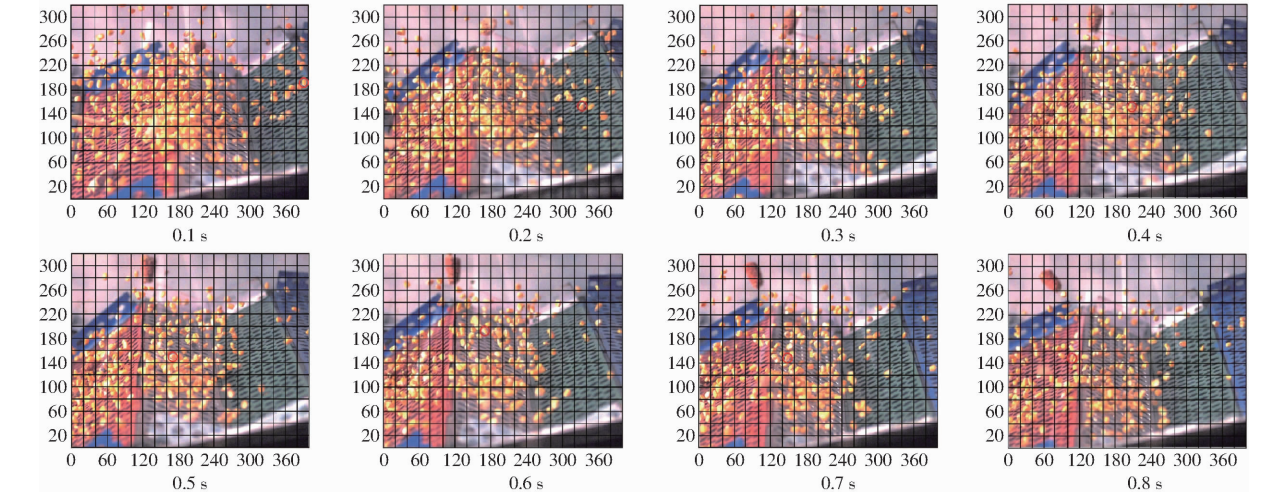


图 16 高速摄像中籽粒运动图像

Fig. 16 Motion of grain in high speed photography

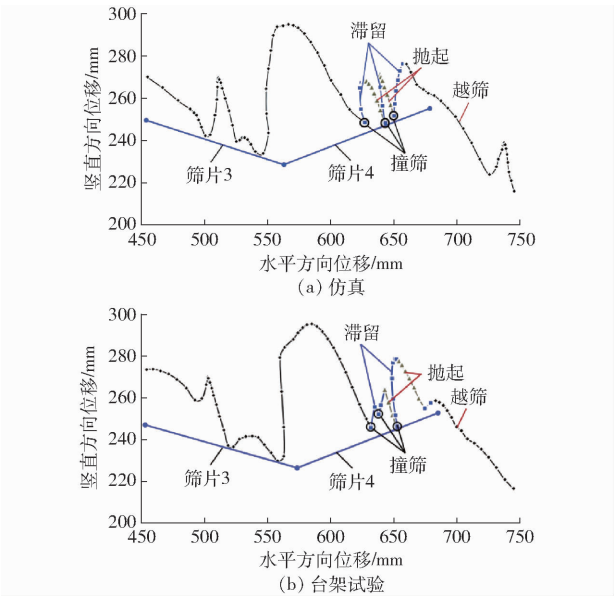


图 17 玉米籽粒运动轨迹

Fig. 17 Trajectories of maize grains

利用 CORREL 函数对仿真和高速摄像试验中籽粒的位移进行相关性分析<sup>[31]</sup>,如图 18 所示,得出仿真与台架试验中籽粒的水平位移的相关性分别为 0.987(越接近 1,证明两组数据相关性越高),以此验证仿真试验结果的准确性。

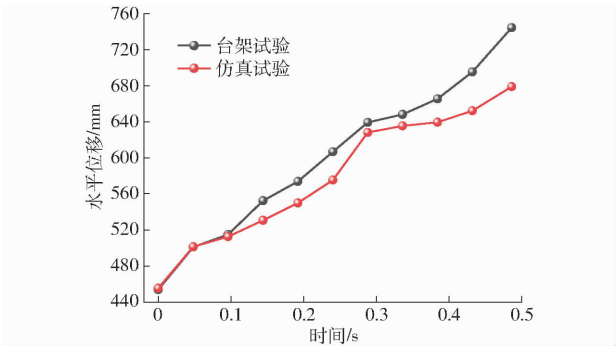


图 18 籽粒水平位移随时间变化曲线

Fig. 18 Changes of horizontal displacement of grain with time

根据多因素试验优化结果设定台架试验中清选装置参数值,在清选装置入口气流速度为  $14.6 \text{ m/s}$ ,筛体安装倾角为  $8.5^\circ$ ,驱动轴转速为  $240 \text{ r/min}$  时,波浪筛清选装置籽粒清洁率和损失率分别为  $99.12\%$  和  $0.45\%$ ,如表 6 所示,符合国家标准要求<sup>[27]</sup>,与多因素仿真试验优化结果误差分别为  $0.38\%$  与  $4.65\%$ ,证明了多因素优化结果的准确性。台架试验结果与仿真优化结果基本一致,证明了多因素优化结果的准确性,筛分  $21 \text{ kg}$  玉米脱出物时间为  $6.86 \text{ s}$ ,波浪筛机构能够满足大喂入量玉米脱出物



表 6 台架试验结果  
Tab.6 Results of bench test

| 序号  | 籽粒清洁率/% | 籽粒损失率/% | 筛分时间/s |
|-----|---------|---------|--------|
| 1   | 99.5    | 0.45    | 6.7    |
| 2   | 99.6    | 0.47    | 6.9    |
| 3   | 99.2    | 0.48    | 7.1    |
| 4   | 98.7    | 0.42    | 6.7    |
| 5   | 98.6    | 0.41    | 6.9    |
| 均值  | 99.12   | 0.45    | 6.86   |
| 标准差 | 0.41    | 0.03    | 0.15   |

的清选要求。

5 结论

(1)设计了波浪筛机构,实现了多段筛“下凹”与“近似展平”姿态的连续转换,进而实现整个筛体波浪式运动。

(2)波浪筛清选装置内上部气流速度高于清选装置入口气流速度,有利于杂余吹散,近筛层气流分布可配合筛体波浪式运动实现筛上物料运移与暂时滞留,筛上玉米籽粒陆续完成撞筛、滞留、抛起、越筛,籽粒暂时滞留期间提高了其透筛效率。

(3)建立了清选装置主要参数与关键指标间回归模型,获得了波浪筛清选装置参数最优组合为:清选装置入口气流速度 14.6 m/s,筛体安装角度 8.5°,驱动轴转速 240 r/min。

(4)台架试验表明波浪筛筛上籽粒的运动轨迹与仿真中运动轨迹基本一致,证明了仿真结果的准确性。当玉米脱出物喂入量为 7 kg/s 时,在参数最优组合条件下波浪筛清选装置籽粒的清洁率和损失率分别为 99.12% 和 0.45%,波浪筛机构能够满足大喂入量玉米脱出物的清选要求。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] CRAESSAERTS G,BAERDEMAEKER J D,MISSONTTEN B,et al. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester[J]. Biosystems Engineering,2010,106(2):103-111.

[3] 杨猛,胡志超,张延化,等. 农业颗粒物料气力清选装置研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):121-127.  
YANG Meng,HU Zhichao,ZHANG Yanhua,et al. Research status and prospect of pneumatic cleaning device for agricultural granular materials[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(3):121-127. (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] 魏纯才,李耀明,徐立章,等. 大喂入量水稻联合收获机脱粒清选装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(8):70-74.  
WEI Chuncai,LI Yaoming,XU Lizhang,et al. Design and experimental study of large feed quantity crawler full feeding rice combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(8):70-74. (in Chinese)

[6] LI Yang,XU Lizhang,ZHOU Ying,et al. Effects of throughput and operating parameters on cleaning performance in air-and-screen cleaning unit: a computational and experimental study[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2018,152:141-148.

[7] 马宗雨,万其号,陈文星,等. 羊草种子脱出物料风筛清选装置设计与试验[J]. 中国农机化学报,2022,43(8):96-105,127.  
MA Zongyu,WANG Qihao,CHEN Wenxing,et al. Design and testing of air-and-screen cleaning device for *Leymus chinensis* seed threshing material[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022,43(8):96-105,127. (in Chinese)

[8] 王晗昊,李耀明,徐立章,等. 小型再生稻联合收获机清选装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(5):85-90,103.  
WANG Hanhao,LI Yaoming,XU Lizhang,et al. Design and experimental study of cleaning device of small-scale ratooning rice combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2021,43(5):85-90,103. (in Chinese)

[9] 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 Ju,WANG Zengbiao,SHEN Huiping,et al. Experiment and analysis of parallel vibrating sieve with convex column screen surface on grain screening[J]. Machine Design and Research,2016,32(1):150-154,158. (in Chinese)

[10] LI Yibo,FAN Hongfei,XU Yang,et al. CFD-DEM investigation of particle dispersion degree on a novel vibrating screen[J]. Powder Technology,2022,404:117497.

[11] 韩鑫,闫文辉,温信宇. 一种仿鲨鱼鳞片鱼眼筛: CN107983643B[P]. 2021-04-09.

[12] 邓嘉鸣,沈惠平,李菊,等. 三维并联振动筛设计与实验[J]. 农业机械学报,2013,44(11):342-346,328.  
DENG Jiaming,SHEN Huiping,LI Ju,et al. Design and experiment for three-dimensional parallel kinematics vibration sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(11):342-346,328. (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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):89-100. (in Chinese)

[14] 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)
- [15] 王成军, 李耀明, 马履中, 等. 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, et al. 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)
- [16] 王成军, 刘琼, 马履中, 等. 棉籽颗粒在三自由度混联振动筛面上的运动规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 49 – 56.  
WANG Chengjun, LIU Qiong, MA Lüzhong, et al. Cotton seed particle motion law in 3-DOF hybrid vibration screen surface[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 49 – 56. (in Chinese)
- [17] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 399 – 407.  
LI Ju, ZENG Qingfei, DENG Jiaming, et al. Screening process analysis for multi-dimensional parallel vibrating screen and optimization of screen surface movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 399 – 407. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 王立军, 于泳涛, 张帅, 等. 蚯蚓运动特征仿生筛筛上玉米脱出物运动特性研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 158 – 166.  
WANG Lijun, YU Yongtao, ZHANG Shuai, et al. Motion characteristics of maize mixture on bionic screen based on earthworm motion characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 158 – 166. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 丁振军. 基于筛面运动特性的单颗粒运动规律理论研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.  
DING Zhenjun. Theoretical research on motion law of a particle based on motion characteristics of screen[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [22] 孙恒. 机械原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [23] WANG Lijun, YU Yongtao, ZHANG Shuai, et al. Bionic design and performance test of maize grain cleaning screen through earthworm motion characteristics[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 12 – 21.
- [24] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [25] 池丽婷. 平面四杆机构急回运动特性的分析[J]. 机械工程与自动化, 2011(4): 153 – 154, 157.  
CHI Liting. Analysis of quick-return characteristic in plane four-bar linkage[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2011(4): 153 – 154, 157. (in Chinese)
- [26] COETZEE C J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape[J]. Powder Technology, 2016, 297: 50 – 70.
- [27] 王立军, 刘伟腾, 李懿航, 等. 大喂入量玉米籽粒收获机清选系统双层筛孔抖动板研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 92 – 102.  
WANG Lijun, LIU Weiteng, LI Yihang, et al. Research of double-layer jitter plates with holes in large-feeding mass cleaning system of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 92 – 102. (in Chinese)
- [28] WANG Lijun, ZHOU Wenxiu, DING Zhengjun, et al. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions[J]. Powder Technology, 2015, 284: 187 – 194.
- [29] WANG Lijun, LI Rui, WU Baoxin, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. Particuology, 2018, 38: 185 – 195.
- [30] 王立军, 冯鑫, 武振超, 等. 玉米联合收获机贯流风阶式振动筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 115 – 123.  
WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of stepped vibrating screen with cross air for maize harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 115 – 123. (in Chinese)
- [31] FENG Xin, GONG Zhenping, WANG Lijun, et al. Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit[J]. Powder Technology, 2021, 385(10): 501 – 516.
- [32] 王立军, 李瑞, 于泳涛, 等. 玉米籽粒收获机双层非平行振动筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 130 – 139.  
WANG Lijun, LI Rui, YU Yongtao, et al. Design and test of double-layer non-parallel vibrating screens[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 130 – 139. (in Chinese)
- [33] 潘丽军, 陈锦权. 试验设计与数据处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.