

玉米收获机清选曲面筛设计与试验

王立军 武振超 冯鑫 李瑞 于泳涛

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为提高玉米收获机风筛式清选装置的清选效果,通过筛上颗粒受力分析,确定筛上颗粒运动状态与筛面方程 $f(x)$ 存在函数关系。以编织筛为研究对象,利用 CFD-DEM 耦合技术,通过对比清选装置内平面、凸面、凹面 3 种编织筛的气流场及不同区域筛分特点,提出一种正弦曲线编织筛,并与去除尾筛的正弦曲线筛进行性能对比,确定保留尾筛筛分性能更好。以正弦曲线筛筛形系数、入口气流速度、气流方向角为试验因素,以籽粒清洁率和籽粒损失率为评价指标,设计二次正交旋转组合试验,建立了各因素与指标间回归数学模型,运用 Design-Expert 软件的多目标优化算法进行参数优化。获得参数最优组合为:筛形系数 32.35 mm,入口气流速度 13.73 m/s,气流方向角 23.86°。当玉米脱出物喂入量为 5 kg/s,筛面振动频率为 5.15 Hz 时,利用高速摄像及室内台架进行了正弦曲线筛工作机理试验和性能对比试验。试验结果表明,正弦曲线筛可实现对杂余的快速推移,并提高籽粒透筛概率。正弦曲线筛清选装置的籽粒清洁率为 98.07%,籽粒损失率为 1.16%,相较平面编织筛清洁率提高 2.45 个百分点、损失率降低 0.79 个百分点,满足国家筛分质量评价技术规范要求。

关键词: 玉米收获机;清选装置;振动筛;正弦曲线筛;参数优化

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0090-12

Design and Experiment of Curved Screen for Maize Grain Harvester

WANG Lijun WU Zhenchao FENG Xin LI Rui YU Yongtao

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to improve the screening performance of the air-screen cleaning device of maize grain harvester, the relationship between the motion of grain on the screen and the function $f(x)$ of screen-shape was determined through the mechanics analysis of particle. In order to propose a type of sinusoidal-shape screen, the woven screen was studied. Computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) were coupled to compare and analyze the airflow in the cleaning device and the characteristics of flat, convex and concave screening. The screening performance of the sinusoidal-shape screen, compared with this one with tail screen was removed, was better. The quadratic orthogonal rotational-combinational simulation tests were designed. The coefficient of screen-shape and the inlet velocity of airflow and the direction angle of airflow were taken as factors, and the loss and cleanliness of maize grains collected were taken as indexes. The regression mathematical models between factors and indexes were multi-objective optimized by using Design-Expert software. The best combination of parameters was obtained, including the coefficient of screen-shape of 32.35 mm, the inlet velocity of airflow of 13.73 m/s, the direction angle of airflow of 23.86°. The best combination of parameters was set in the bench test. The flat weave screen was compared with that of the screening performance of sinusoidal-shape screen. The experimental results showed that the sinusoidal-shape screen can realize the fast passage of maize debris, and increase the possibility of maize grains passing the screen when the total feeding quantity was 5 kg/s and the vibration frequency of the screen was 5.15 Hz. The working mechanism and screening performance of the sinusoidal-shape screen were tested by high-speed camera and indoor bench. The experimental results showed that the state of movement of maize mixture on different screens was more favorable to the performance of the cleaning device. The cleaning rate of maize grains collected was 98.07% and the rate of maize loss was 1.16% after screening. Compared with the flat weave screen, the cleaning rate of maize grains was increased by 2.45 percentage points and the rate

收稿日期: 2018-08-20 修回日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475090)、黑龙江省自然科学基金项目(E2017004)和国家重点研发计划项目(2018YFD0300103)

作者简介: 王立军(1978—),女,教授,博士生导师,主要从事收获机械研究,E-mail: wljszf@163.com

of maize loss was reduced by 0.79 percentage points, which met the requirements of technical specification for quality evaluation of screening in China.

Key words: maize grain harvester; cleaning device; vibrating screen; sinusoidal-shape screen; optimization of parameters

0 引言

当前,玉米联合收获机械的清选方式主要以风筛式为主,即在气流与筛面的共同作用下,实现玉米脱出物的筛分^[1-4]。振动筛筛体结构对风筛式清选装置清选效果具有显著影响。

CLEARY 等^[5]采用离散元法模拟了工业双层香蕉筛作业,探索粒子间能量传递与吸收对筛面筛分效率的影响。FERNANDEZ 等^[6]利用 SPH 单向耦合 DEM 模拟高速、高分散的颗粒流通过双层香蕉筛时的流动特性。杨忠高^[7]阐述了弧形筛作业原理和分级理论,提出一种矩-梯形组合断面筛条,并讨论了弧形筛串联分级问题。张正等^[8]为了研究陆基工厂化海水养殖废水理想的净化工艺,对弧形筛净水效果进行了定量检测。曹丽英等^[9]通过试验台试验与颗粒动力学仿真相结合的方法,研究物料的透筛机理,揭示粉碎机筛片结构参数对装置筛分效率的影响规律。李菊等^[10]基于凸柱筛面的直线振动筛和并联振动筛进行了筛分试验,并与平面筛性能进行对比,结果表明并联凸柱筛有利于提高谷物的筛分效率和透筛率。邓嘉鸣等^[11]试验对比了平筛面、凹坑型筛面和波浪型筛面的筛分效果,结果表明凹坑型筛面可增大有效筛分面积、减少筛上物料堆积、具有三维透筛性等优点。

现有清选筛筛体主要为平面筛,筛体形状较单一,筛面对物料适应性较差。曲面筛弧度在纵向方向上以一定规律变化,依靠作业对象各成分在不同位置所受弧形筛面作用力的不同进行筛分作业。本课题组前期通过对清选装置筛分玉米脱出物仿真及高速摄像研究发现:在筛面纵向方向的不同位置,玉米脱出物各成分比例及运动特性均不相同^[12-13]。为实现筛面不同位置玉米脱出物筛分能力,本文选定筛分效率较高、籽粒损失率较低的编织筛为研究对象,应用 CFD-DEM 耦合仿真技术对平面、凸面、凹面编织筛筛分作业进行仿真^[14],分析筛面不同区域筛分特点,提出一种正弦曲线筛面。设计二次正交旋转组合仿真试验对各试验因素进行优化,并通过台架试验验证清选装置作业性能。

1 理论分析与筛形研究

1.1 振动筛运动分析

以风筛式清选装置为研究对象,上筛选用编织

筛,筛长为 1 360 mm,筛宽为 1 100 mm,筛孔边长 11 mm,筛丝直径 2 mm,筛面安装倾角为 3.5°,尾筛为贝壳筛,长度为 242 mm;下筛为平面圆孔筛,长度为 1 360 mm,筛孔直径 15 mm,筛体厚度 2 mm,筛面通过曲柄连杆机构驱动。

上筛面运动方程为

$$\begin{cases} s = r \sin(\omega t) \\ a = -r\omega^2 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 s ——筛面位移, m

r ——曲柄长度, m

ω ——曲柄角速度, rad/s

t ——筛面运动时间, s

a ——筛面加速度, m/s²

1.2 颗粒受力分析及筛形研究

筛上颗粒受力分析如图 1 所示。

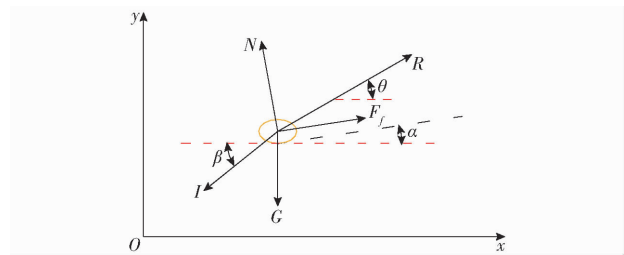


图 1 颗粒受力分析

Fig. 1 Forces analysis on particle

由图 1 可得

$$\begin{cases} G = mg \\ R = K_p m v^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$K_p = \frac{K \rho S}{m} \quad (3)$$

式中 G ——颗粒重力, N m ——颗粒质量, kg

g ——重力加速度, m/s²

R ——颗粒所受风力, N

K_p ——漂浮系数, mm⁻¹

v ——气流速度, m/s

K ——阻力系数

ρ ——空气密度, kg/m³

S ——颗粒正对气流速度方向的面积, m²

惯性力 I 计算式及各分力关系式为

$$\begin{cases} I = ma_0 \\ mgs \sin \alpha + I \cos(\beta - \alpha) - R \cos(\theta - \alpha) - F_f = 0 \\ N + R \sin(\theta - \alpha) - mg \cos \alpha - I \sin(\beta - \alpha) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 I ——颗粒所受惯性力, N
 a_0 ——颗粒所受惯性加速度, m/s^2
 α ——筛面倾角, $(^\circ)$
 θ ——气流方向角, $(^\circ)$
 β ——筛面振动方向角, $(^\circ)$
 N ——颗粒所受支持力, N
 F_f ——颗粒所受摩擦力, N

设筛形方程为

$$y=f(x)$$
 (5)

则倾角 α 的正切值为

$$\tan\alpha=\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}=\frac{\text{d}f(x)}{\text{d}x}$$
 (6)

若 $N\leq 0$, 表明颗粒跃起。 N 越小, 表明颗粒跃起程度越大^[13]。

颗粒跃起方程为

$$N(\alpha)=mg\cos\alpha-mr\omega^2\sin(\beta-\alpha)\sin(\omega t)-R\sin(\theta-\alpha)$$
 (7)

因而, 夹角 α 与 x 具有函数关系, 整理式 (1) ~ (7), 跃起程度方程与筛面方程的关系为

$$N(x)=mg\cos\left(\arctan\frac{\text{d}f(x)}{\text{d}x}\right)-mr\omega^2\sin\left(\beta-\arctan\frac{\text{d}f(x)}{\text{d}x}\right)\sin(\omega t)-R\sin\left(\theta-\arctan\frac{\text{d}f(x)}{\text{d}x}\right)$$
 (8)

颗粒跃起程度最大时, 存在一个 x_0 (且 x_0 为 $N(x)$ 的稳定点), 使得物料跃起程度最大, 方程表达为

$$\begin{cases} \left.\frac{\text{d}N(x)}{\text{d}x}\right|_{x=x_0}=0 \\ \left.\frac{\text{d}^2N(x)}{\text{d}x^2}\right|_{x=x_0}>0 \\ N_{\min}\leq 0 \end{cases}$$
 (9)

式中 $N_{\min}$ ——颗粒所受最小支持力

由公式 (5) ~ (9) 可知, 筛面方程 $f(x)$ 影响筛上颗粒运动状态。

相对于平面筛, 本文提出凹、凸两种筛面, 如图 2 所示。其中, δ 为筛面安装倾角, 参照《农业机械设计手册》所规定筛面倾角范围, 得到坐标系 x_0Oy_0 中凹面筛控制方程为

$$y_0=49\sin\left(\frac{\pi}{1\,360}x_0+\pi\right)\quad(x_0\in[0,1\,360])$$
 (10)

凸面筛控制方程为

$$y_0=49\sin\left(\frac{\pi}{1\,360}x_0\right)\quad(x_0\in[0,1\,360])$$
 (11)

将坐标系 x_0Oy_0 绕原点顺时针旋转, 旋转角为

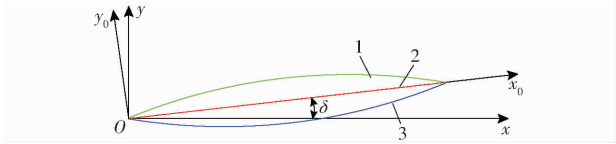


图 2 筛面分析模型

Fig. 2 Model of screen analysis

1. 凸面筛 2. 平面筛 3. 凹面筛

δ , 即可得坐标系 xOy , 旋转矩阵函数方程为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos(-\delta) & \sin(-\delta) \\ -\sin(-\delta) & \cos(-\delta) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$$
 (12)

坐标系 xOy 中凹面筛控制方程为

$$\begin{cases} x=x_0\cos\delta-49\sin\delta\sin\left(\frac{\pi}{1\,360}x_0+\pi\right) \\ y=x_0\sin\delta+49\cos\delta\sin\left(\frac{\pi}{1\,360}x_0+\pi\right) \end{cases}$$
 (13)

凸面筛控制方程为

$$\begin{cases} x=x_0\cos\delta-49\sin\delta\sin\left(\frac{\pi}{1\,360}x_0\right) \\ y=x_0\sin\delta+49\cos\delta\sin\left(\frac{\pi}{1\,360}x_0\right) \end{cases}$$
 (14)

2 振动筛筛分物料仿真与筛型设计

2.1 玉米脱出物模型

玉米品种选用德美亚一号, 玉米籽粒依据外形分为球形、锥形、矩形 3 种, 所占籽粒总质量分数分别为 15.8%、74.1%、10.1%; 根据玉米芯破碎程度分为 1/4、1/2 及整个圆柱体 3 类, 分别占玉米芯总质量分数为 50%、20.7% 和 29.3%; 玉米茎秆按其长度分为 28、36、44、52 mm, 占玉米茎秆总质量分数分别为 13.9%、32.2%、30%、23.9%^[15]。

通过东北农业大学三维激光扫描试验台, 对玉米脱出物进行扫描建模, 去除噪点及尖边后, 利用 Solidworks 软件将颗粒模型云点图转换为 STEP 格式文件, 导入到 EDEM 中进行小球填充, 如图 3 所示。

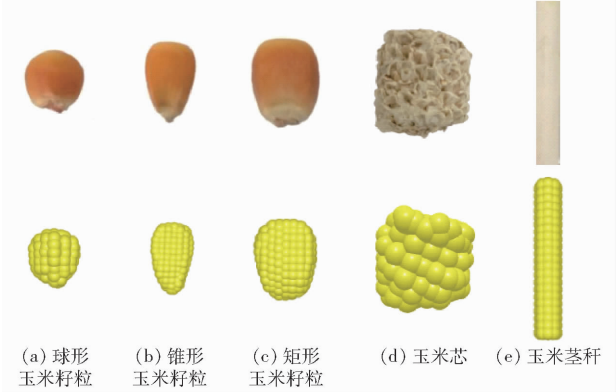


图 3 玉米脱出物实物图与仿真模型

Fig. 3 Physical diagrams and simulation models of maize mixture

仿真中设定玉米脱出物喂入量为 5 kg/s,以 0 m/s 的初速度从上筛前端喂入。玉米脱出物具体喂入数量见表 1。在进行 EDEM 后处理操作时,通过 ID 提取方法获取不同位置玉米脱出物个数。

表 1 玉米脱出物喂入数量
Tab.1 Number of maize mixture fed

种类	类别	数目/个	单类总数目/个
玉米籽粒	锥形	765	988
	球形	133	
	矩形	90	
玉米茎秆	28 mm	137	513
	36 mm	189	
	44 mm	112	
	52 mm	75	
玉米芯	1/4	128	440
	1/2	181	
	1	131	
玉米脱出物总计			1 941

表 3 材料间接触属性
Tab.3 Interaction properties of materials

参数	玉米籽粒- 玉米籽粒	玉米籽粒- 玉米茎秆	玉米籽粒- 玉米芯	玉米籽粒- 筛面(钢)	玉米茎秆- 玉米茎秆	玉米茎秆- 玉米芯	玉米茎秆- 筛面(钢)	玉米芯- 玉米芯	玉米芯- 筛面(钢)
碰撞恢复系数	0.31	0.27	0.25	0.54	0.21	0.22	0.29	0.22	0.33
静摩擦因数	0.79	0.71	0.68	0.48	0.65	0.68	0.62	0.78	0.70
滚动摩擦因数	0.060 7	0.010 0	0.010 0	0.031 1	0.010 0	0.010 0	0.010 0	0.010 0	0.010 0

EDEM 中接触模型选用 Hertz - Mindlin (no-slip)模型。设定清选装置振动筛频率 5.15 Hz,上下筛面最大振幅均为 19 mm,上筛的振动方向角为 136.6°,下筛的振动方向角为 43.4°。EDEM 中时间步长是 Rayleigh 步长的 17%,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。

2.3 仿真结果分析及筛形设计

2.3.1 筛面区域划分

沿筛面纵向方向等距离划分 4 个区域(标号 I、II、III、IV),均各占筛面总长度的 1/4,以便于分析筛面不同位置物料筛分情况,为后期曲面筛定形提供参考,如图 4 所示。

2.2 仿真参数设置

2.2.1 物料特性设定

各材料的力学特性和物料间接触属性参数如表 2 和表 3 所示^[16-18]。

表 2 材料的力学特性
Tab.2 Mechanical properties of materials

参数	玉米籽粒	玉米芯	玉米茎秆	筛面(钢)
泊松比	0.40	0.45	0.42	0.30
剪切模量/MPa	1.27	1.09	1.00	700.00
密度/(g·cm ⁻³)	1.197	0.330	0.112	7.800

2.2.2 耦合模型及参数

Fluent 中选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,求解器类型选定为压力基非稳态,利用局部网格重构法实现动网格计算更新。设定入口气流速度为 12.8 m/s,湍流强度 3.15%,水力直径 163.6 mm,气流方向角为 25°。

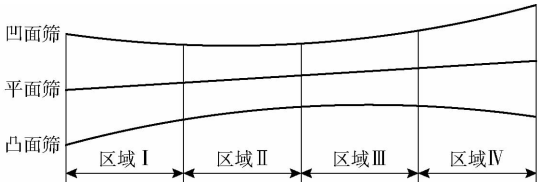


图 4 筛面区域划分
Fig.4 Divisions of screens

2.3.2 不同筛形清选装置气流场分析

鉴于筛上气流对清选玉米脱出物起主要作用,为分析不同筛形对筛上气流影响,沿筛面纵向方向,依次对筛上数据点 a~g 进行气流速度提取。由图 5 可知,在平面、凹面、凸面清选装置内,从区域 I 至区域 IV,平面、凹面、凸面编织筛上气流速度均先

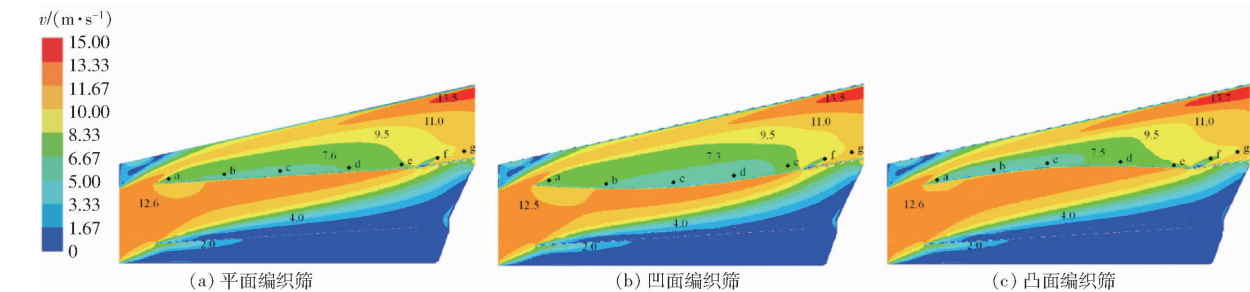


图 5 不同筛形清选装置内气流速度分布
Fig.5 Velocities distributions of airflow in different screen-type cleaning devices

逐渐减小再增大,筛面上 b 点处气流速度(平面筛上 6.71 m/s,凹面筛上 6.84 m/s,凸面筛上 6.31 m/s)的差值最大,为 0.40 m/s。因此,对于编织筛清选装置,筛面结构变化对筛上气流场的影响相对筛上气体平均速度较小。

2.3.3 不同筛面筛分性能分析

2.3.3.1 物料透筛分析

为进一步探究各筛面筛分特点,并为确定最终筛形提供依据,分别对各区域籽粒及杂余透筛情况进行统计分析,结果见表 4。

表 4 筛面物料透筛情况					
Tab.4 Situation of maize mixture passing screen					
筛面类型	籽粒损失率/%	籽粒清洁率/%	筛面区域	透筛籽粒质量/g	透筛杂余质量/g
平面	1.68	94.72	I	109.42	5.48
			II	192.42	4.25
			III	16.60	3.19
			IV	5.08	2.86
凸面	3.81	94.19	I	130.38	10.45
			II	148.47	4.17
			III	26.28	1.55
			IV	5.46	0.75
凹面	1.59	96.12	I	69.71	1.14
			II	146.52	2.61
			III	96.29	3.96
			IV	10.64	4.20

图 6 为平面、凸面、凹面筛在不同时刻玉米脱出物筛分情况对比,图中红色、蓝色、绿色颗粒分别为玉米茎秆、玉米芯和玉米籽粒。平面、凸面筛的籽粒透筛主要区域为 I 区域,透筛籽粒质量分别占喂入籽粒总质量的 32.84%、39.13%;同时平面、凸面筛在 I 区域透过杂余质量最大。这是因为玉米脱出物经抖动板落至 I 区域时的初速度较小,平面、凸面筛在 I 区域倾角均为正值,进一步增加了玉米脱出物在该区域的停留时间,造成脱出物在筛前堆积,致使

杂余透筛、堵塞。对于凹面筛,虽然其 I 区域籽粒透筛质量较平面、凸面筛分别减少 36.29%、46.53%,但透筛杂余质量均减少 75% 以上,清杂效果显著。

平面、凸面、凹面筛籽粒透筛质量最大区域均为 II 区域,透筛籽粒质量分别占喂入籽粒总质量的 57.75%、44.56%、43.98%。这是因为脱出物在运移至筛面中部时已具有一定速度,由于脱出物各成分物理特性不同,杂余与籽粒发生分层,利于籽粒透筛。对于平面、凸面筛,III 区域的籽粒透筛较少,仅分别占喂入籽粒总质量的 4.98%、7.89%。这是因为, I、II 区域为平面、凸面筛主要籽粒透筛区域,两区域籽粒透筛总质量占喂入籽粒总质量均达 83% 以上。玉米脱出物在到达 III 区域时,其各成分中籽粒占脱出物比例降低至 35% 以下,III 区域的筛面无法得到有效利用。

对于凹面筛,脱出物在到达 II 区域时,所含籽粒质量较平面、凸面筛分别高 17.75%、29.92%,但凹面筛 II 区域籽粒透筛质量均小于平面、凸面筛。这是因为,凹面筛在 II 区域的几何外形致使籽粒产生“滑坡运动”,降低了该筛面区域的籽粒透筛能力。III 区域为凹面筛的主要透筛区域,透筛籽粒质量占喂入籽粒总质量的 28.90%,III 区域筛面得到有效利用,充分弥补了 I、II 区域的籽粒量。

玉米脱出物在到达 IV 区域时,其籽粒质量占脱出物百分比小,仅为 12.30%~21.60%,过量杂余降低了籽粒与筛面接触几率。对于平面、凹面筛,两者 IV 区域的几何外形均会使脱出物产生“爬坡运动”,籽粒难以从脱出物中分离、透筛,在筛分物料的过程中,杂余大量透筛。对于凸面筛,其 IV 区域的杂余透筛质量最小,分别仅为平面、凸面筛的 26.22%、17.86%,凸面筛在 IV 区域筛形的清杂能力显著优于另外两者。

为提高筛面清选性能,应提高 I 区域筛面对脱出物的推移能力,使筛前物料快速推移、均布;将 II、

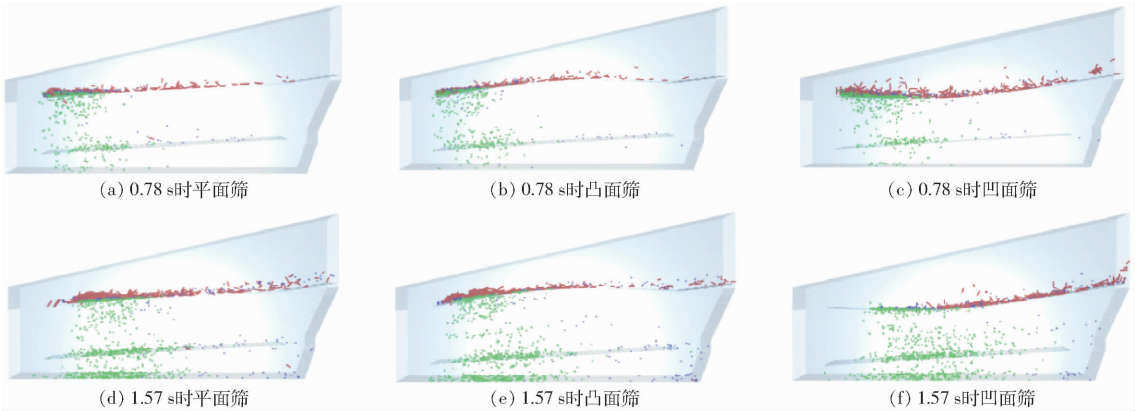


图 6 不同筛面对玉米脱出物的清选效果
Fig.6 Cleaning performance of different screens

Ⅲ区域作为主要籽粒透筛区域,降低Ⅱ、Ⅲ区域筛面对脱出物的推移能力,增加脱出物在Ⅱ、Ⅲ区域的停留时间,降低籽粒损失率;提高Ⅳ区域筛面对脱出物的推移能力,使筛尾杂余快速排出,提高籽粒清洁率。

2.3.3.2 筛面物料推移能力分析

为考察不同筛面推移玉米脱出物能力,提取筛面Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ区域上玉米脱出物在水平方向平均速度,并将其作为不同筛面装置推移玉米脱出物能力的评价指标。考虑到玉米脱出物喂入时间为1 s,本文选取1.07~1.75 s为数据提取时间段,时间间隔为0.01 s。

玉米脱出物在平面、凹面、凸面编织筛上的平均速度对比如图7所示。对于Ⅰ区域,凹面编织筛的物料推移能力最强,对应玉米脱出物的平均速度为

0.61 m/s,均高于平面、凸面编织筛,利于物料向筛后推移、均布。考虑到筛面Ⅱ、Ⅲ区域为籽粒透筛主要区域,因而在Ⅱ、Ⅲ区域应选推移能力较弱的筛形,以增加物料在筛上的停留时间,增大籽粒透筛概率。对于Ⅱ区域,凸面编织筛推移能力最弱,对应玉米脱出物平均速度为0.76 m/s,均低于平面、凹面编织筛,利于籽粒透筛;对于Ⅲ区域,凹面编织筛推移能力最弱,对应玉米脱出物平均速度为1.27 m/s,利于脱出物各成分分离,籽粒持续透筛。考虑玉米脱出物在到达Ⅳ区域时,杂余占脱出物比例极大,因而该区域需选择推移能力较强的筛形,以实现杂余的快速推移、抛送。对于Ⅳ区域,凸面编织筛推移能力最强,对应玉米脱出物平均速度为2.82 m/s,较平面、凹面编织筛均高20%以上,利于杂余抛送、提高籽粒清洁率。

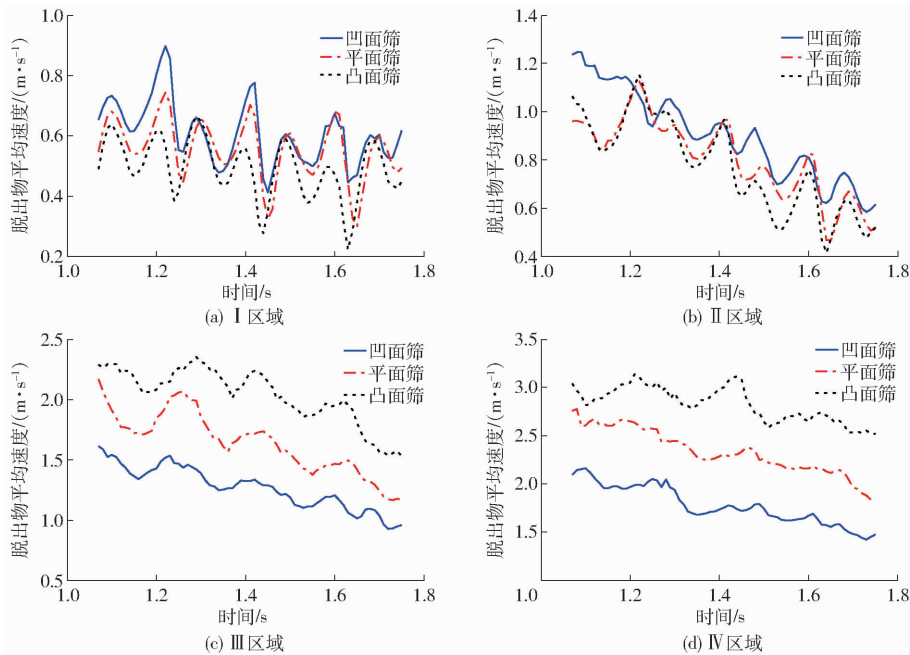


图 7 不同区域玉米脱出物平均速度
Fig. 7 Average velocities of maize threshed in different regions

2.3.3.3 筛形设计

为实现筛面不同区域对不同物料更好的筛分,即:Ⅰ区域实现物料向后推移、均布;Ⅱ、Ⅲ区域籽粒集中透筛;Ⅳ区域实现杂余的抛送,本文结合凹面、凸面筛在不同区域的筛分特性,提出正弦曲线筛面,并引入两个正弦曲线筛方案,见图8。

参照 JB/T 9022—2012《振动筛设计规范》,确定方案1所对应的正弦曲线筛面控制方程为

$$y_0 = 25 \sin \left(\frac{\pi}{680} x_0 + \pi \right) \quad (x_0 \in [0, 1\ 360]) \quad (15)$$

方案2所对应的正弦曲线筛面控制方程为

$$y_0 = 29 \sin \left(\frac{\pi}{800} x_0 + \pi \right) \quad (x_0 \in [0, 1\ 600]) \quad (16)$$

分别对方案1、2筛面进行筛分物料仿真,结果

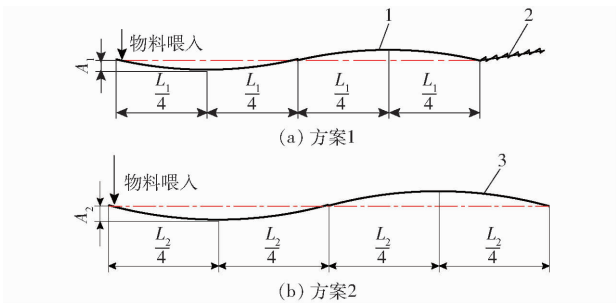


图 8 正弦曲线筛示意图
Fig. 8 Schematic diagrams of sinusoidal-shape screen
1. 正弦曲线筛Ⅰ 2. 尾筛 3. 正弦曲线筛Ⅱ

表明,方案2对应籽粒的含杂率较方案1略有降低,但其籽粒损失率高于方案1,见表5。

由图9可知,对于方案1,Ⅳ区域处筛面在进行杂余抛送时,由于上筛与尾筛过渡处呈V字型,且

表 5 不同方案试验结果
Tab. 5 Results of different scenarios %

方案	籽粒	清洁率	籽粒	损失率
	清洁率	标准差	损失率	标准差
1	97. 81	0. 33	1. 17	0. 20
2	97. 94	0. 19	1. 48	0. 25

此处玉米茎秆速度较大,易于排出,而玉米籽粒易于

沉降至过渡处,在清选筛的推移作用下,实现尾筛对脱出物的二次筛分。虽然造成少量杂余透筛,但有效降低了籽粒损失率,提高了清选装置的综合性能。方案 2 为无尾筛设计,脱出物在推送至Ⅳ区域处筛面时,籽粒占脱出物比例较小,筛面对脱出物各成分分层作用效果不显著,脱出物所受推移作用力强,籽粒在杂余的夹带作用下排出装置,造成籽粒损失。

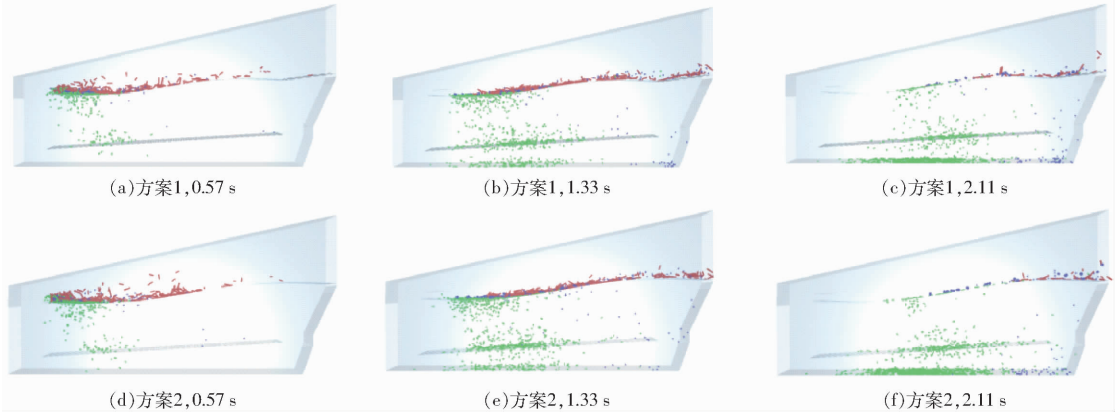


图 9 正弦曲线筛筛分物料仿真结果

Fig. 9 Simulation results of sinusoidal-shaped screen

综上,本文最终选定方案 1,即正弦曲线筛面上加装尾筛,定义上筛面控制方程为

$$y_0 = A \sin \left(\frac{2\pi}{L} \left(x_0 + \frac{2n+1}{2} \right) \right) \quad (n \in \mathbf{Z}, x_0 \in [0, L]) \quad (17)$$

式中 A ——筛形系数,mm n ——任意整数
 L ——筛面纵向长度,mm

对筛面控制方程进行求导得

$$y'_0 = \frac{2\pi}{L} A \cos \left(\frac{2\pi}{L} \left(x_0 + \frac{2n+1}{2} \right) \right) \quad (n \in \mathbf{Z}, x_0 \in [0, L]) \quad (18)$$

由倾角 $\alpha = \delta + \arctan y'_0$,可得 $y'_0 \in [-0.114, 0.114]$,将 $L = 1\,360\text{ mm}$ 代入式(18),经计算后可得对应筛形系数 $A = 24.69\text{ mm}$ 。

《农业机械设计手册》中的筛面倾角规定仅针对平面筛,当前尚未有曲面筛倾角设计规定。为确定筛形系数因素范围,设定清选装置入口气流速度为 12.8 m/s ,气流方向角为 25° ,进行筛形系数单因素试验,结果见表 6。

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析,可知筛形系数对籽粒清洁率和籽粒损失率影响显著,可得筛形系数与籽粒清洁率、籽粒损失率间回归模型分别为

$$y_1 = 94.08 + 0.26x_1 - 4.46 \times 10^{-3}x_1^2 \quad (19)$$
$$y_2 = 1.64 - 0.02x_1 \quad (20)$$

由式(19)、(20)可知,随着筛形系数的增大,籽粒清洁率先增大后减小,籽粒损失率呈逐步减小的

趋势。为达到籽粒清洁率为 97% 的收获要求,设定筛形系数分别为 15.18、43.11 mm,对应籽粒损失率分别为 1.34%、0.78%,均满足 GB/T 21962 要求。

表 6 筛形系数单因素试验结果
Tab. 6 Results of single-factor test on coefficient of screen

筛形系数	籽粒清洁率	清洁率	籽粒损失率	损失率
x_1/mm	$y_1/\%$	标准差/ $\%$	$y_2/\%$	标准差/ $\%$
5	95.39	0.41	1.53	0.21
10	96.13	0.47	1.41	0.17
15	96.84	0.24	1.29	0.14
20	97.29	0.30	1.10	0.16
25	97.81	0.33	1.17	0.20
30	98.07	0.27	1.04	0.10
35	97.59	0.35	0.89	0.25
40	97.27	0.27	0.72	0.18
45	96.61	0.29	0.57	0.11

3 正弦曲线筛仿真试验

3.1 仿真试验设计

依据实际清选作业工况与仿真分析结果,选取筛形系数 x_1 、入口气流速度 x_2 、气流方向角 x_3 为试验因素;参照玉米收获机质量评价技术规范和国家标准 GB/T 21962 规定,选定籽粒清洁率 y_1 和籽粒损失率 y_2 为评价指标。结合筛面理论分析与单因素试验结果,设定试验因素编码,见表 7。采用三因素五水平二次正交旋转组合设计安排试验,每组试验重复 3 次。

表 7 试验因素编码

Tab.7 Factors and codes of test

编码	因素		
	筛形系数	入口气流速度	气流方向角
	x_1/mm	$x_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$x_3/(\text{ }^\circ)$
-1.682	15.00	9.60	20.00
-1	20.68	10.90	22.03
0	29.00	12.80	25.00
1	37.32	14.70	27.97
1.682	43.00	16.00	30.00

3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析,得到籽粒清洁率 y_1 与籽粒损失率 y_2 的回归方程,并进行显著性检验。

3.2.1 籽粒清洁率

经试验数据分析及拟合后可知:试验整体模型极显著 ($P < 0.01$), x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 对籽粒清洁率影响均显著,其他各项不显著。各因素对籽粒清洁率影响的主次顺序为: x_1 、 x_2 、 x_3 。将不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项,进行方差分析后可得各因素对籽粒清洁率 y_1 影响的回归方程

$$y_1=40.54+6.47x_2+0.62x_3+0.14x_1+6.94\times10^{-3}x_1x_2+5.46\times10^{-3}x_1x_3-6.44\times10^{-3}x_1^2-0.23x_2^2-0.01x_3^2$$

(21)

当气流方向角为 25° 时,筛形系数与入口气流速度两因素间存在交互作用,见图 10a。随筛形系数增大,籽粒清洁率先提高后降低,其较优筛形系数

范围为 23.50 ~ 33.70 mm;入口气流速度增大,籽粒清洁率随之提高,其较优气流速度范围为 12.62 ~ 14.71 m/s。当入口气流速度一定时,随着筛形系数增大,Ⅰ区域处筛面对脱出物推移能力增强,有效降低了该区域处脱出物的堆积,易于脱出物各成分分离,经Ⅱ、Ⅲ区域籽粒大量透筛后,Ⅳ区域筛面实现对杂余的快速抛送,籽粒清洁率提高;当筛形系数大于某一值时,杂余从Ⅱ、Ⅲ区域筛面推移至Ⅳ区域筛面所需时间增加,致使杂余在Ⅱ、Ⅲ区域处大量透筛,籽粒清洁率降低。清选筛在筛分玉米脱出物过程中,脱出物在筛面激励作用下,装置内气流作用力可实现杂余向筛后推移抛送^[19-20]。因而,当筛形系数一定时,入口气流速度越大,气流对杂余的推移能力增强,降低了杂余的透筛几率,籽粒清洁率提高。

当入口气流速度为 12.80 m/s 时,气流方向角与筛形系数两因素间存在交互作用,见图 10b。气流方向角增大,籽粒清洁率随之提高,其较优气流方向角范围为 $23.10^\circ \sim 27.97^\circ$;随筛形系数增大,籽粒清洁率先提高后降低,其较优筛形系数范围为 24.30 ~ 34.25 mm。当筛形系数一定时,随着气流方向角的增大,杂余所受气流作用力在竖直方向上的分量增大,提高了杂余跃起几率,降低杂余与筛面接触次数,杂余透筛几率降低,籽粒清洁率提高。当气流方向角一定时,随着筛形系数增大,在气流的配合下,Ⅰ区域处筛面可实现脱出物快速向筛后推移、均布,易于脱出物各成分分离,籽粒沉降至杂余下部,降低杂余透筛几率,籽粒清洁率提高;当筛形系数超过一

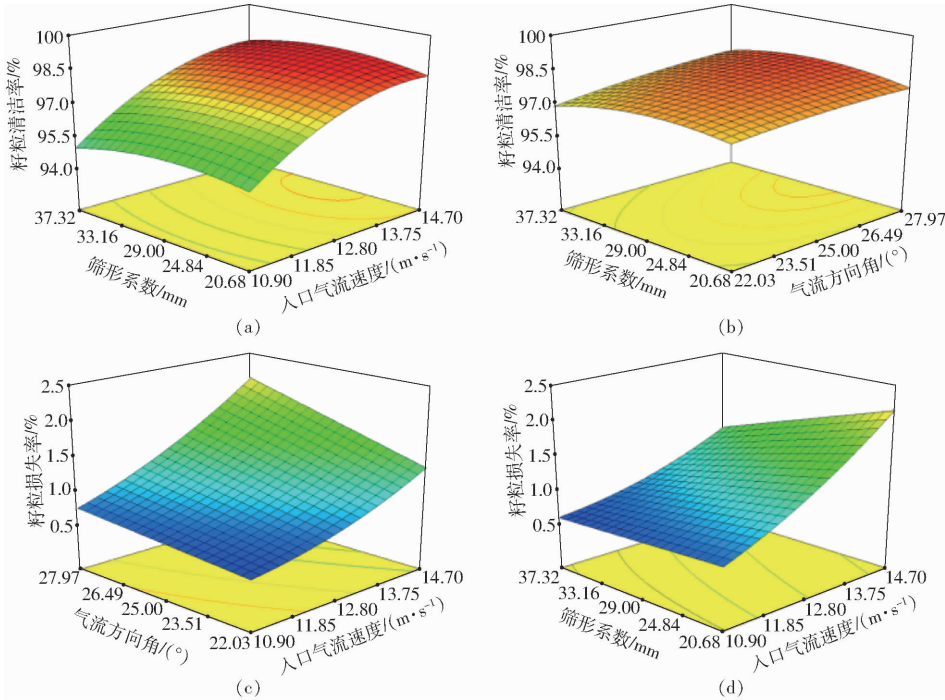


图 10 各因素对性能指标影响的响应曲面

Fig.10 Response surfaces of factors on various indexes

定值时,易造成脱出物在Ⅱ、Ⅲ区域处筛面上往复滑移,杂余难以推移至筛后,籽粒清洁率降低。

3.2.2 籽粒损失率

经试验数据分析及拟合后可知:试验整体模型极显著($P<0.01$), x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_2x_3 、 x_2^2 对籽粒损失率影响均显著,其他各项不显著。各因素对籽粒损失率影响的主次顺序为: x_2 、 x_1 、 x_3 。将不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项,进行方差分析后可得各因素对籽粒损失率 y_2 影响的回归方程

$$y_2 = 5.93 + 0.11x_1 - 0.91x_2 - 0.25x_3 - 0.01x_1x_2 + 0.03x_2x_3 + 0.03x_2^2 \quad (22)$$

当筛形系数为29 mm时,入口气流速度和气流方向角两因素间存在交互作用,见图10c。气流方向角和入口气流速度增大,籽粒损失率随之增加,其较优入口气流速度范围为10.90~14.25 m/s,较优气流方向角范围为22.03°~26.49°。当入口气流速度一定时,随着气流方向角的增大,气流在竖直方向上分速度增大,籽粒在筛面上的停留时间减少,籽粒透筛几率降低,籽粒损失率增加;当气流方向角一定时,随着入口气流速度增大,玉米脱出物所受推移能力增大,籽粒在筛面上的停留时间过短,杂余对籽粒的裹挟作用增强,籽粒损失率增加。

当气流方向角为25°时,筛形系数与入口气流速度两因素间存在交互作用,见图10d。筛形系数增大,籽粒损失率随之降低,其较优筛形系数范围为24.84~37.32 mm;入口气流速度增大,籽粒损失率随之增加,其较优入口气流速度范围为10.90~14.25 m/s。当入口气流速度一定时,随着筛形系数增大,筛面Ⅱ、Ⅲ区域上各点切线与水平面夹角增大,增加了玉米脱出物在筛面的停留时间,玉米脱出物在筛分过程中进行多次“爬坡运动”,籽粒大量透筛,籽粒损失率降低。

3.3 参数优化

为获得振动筛最佳清选性能参数,根据清选装置实际工作条件及筛分性能要求选定优化的约束条件。利用Design-Expert 8.0.6软件的多目标优化算法进行参数优化。目标及约束函数为

$$\begin{cases} \max y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 20.68 \text{ mm} \leq x_1 \leq 37.32 \text{ mm} \\ 10.90 \text{ m/s} \leq x_2 \leq 14.70 \text{ m/s} \\ 22.03^\circ \leq x_3 \leq 27.97^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

优化结果为:当入口气流速度13.73 m/s,气流方向角23.86°,筛形系数32.35 mm时,振动筛籽粒

清洁率为98.26%,籽粒损失率为1.12%。

4 台架验证试验

为验证仿真试验优化结果准确性,根据优化结果加工正弦曲线筛。利用激光切割技术加工筛面两侧定形侧板,并安装筛面加强筋,以提高筛分稳定性。设定清选装置入口气流速度13.73 m/s、气流方向角24°、筛面振动频率为5.15 Hz、物料喂入量5 kg/s,分别对正弦曲线筛进行工作机理试验及性能对比试验,检验正弦曲线筛设计合理性。

4.1 正弦曲线筛工作机理试验

如图11所示,为验证正弦曲线筛工作机理,鉴于仿真试验中发现正弦曲线筛籽粒主要透筛区域为Ⅱ、Ⅲ区域,对清选装置内曲线筛Ⅱ、Ⅲ区域的玉米脱出物进行高速摄像试验,画面传输速度设定为600 帧/s。

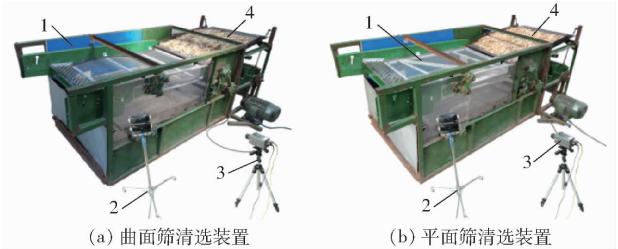


图 11 清选作业试验台

Fig. 11 Test beds of cleaning operation

1. 振动筛 2. 照明灯 3. 高速摄像机 4. 喂料装置

为在颗粒混杂的情况下准确追踪单个颗粒,对高速摄像图像进行方格阵列标定,方格阵列规格为24 mm×24 mm,并对方格进行横纵编号,以确定颗粒在不同时刻相对于各方格的位置。以平面筛为例,将筛上玉米籽粒作为追踪对象,如颗粒1在0.78 s时处于(11,20)格,0.81 s时处于(10.5,20.5)格,依次跟踪,如图12所示。

本文最终选定追踪了具有代表性的玉米籽粒(标号1、2、3)、玉米茎秆(定义长度小于36 mm的玉米茎秆为轻质玉米茎秆,定义长度大于等于36 mm的玉米茎秆为常规玉米茎秆)和玉米芯(定义1/4及以下的玉米芯为轻质玉米芯,定义1/4~1/2的玉米芯为常规玉米芯,定义大于等于1/2的玉米芯为重质玉米芯)。提取图像中不同时间的颗粒坐标位置,颗粒坐标提取时间间隔为20 帧,获得玉米脱出物整体运动状态及其在XY平面内的运动轨迹分别如图13和图14(黑色粗实线代表筛面位置)所示。

筛分0.57 s时,玉米脱出物在平面筛上仅被推送至Ⅱ区域,如图13a所示。筛分时间为1.33 s时,在平面筛的Ⅱ区域前端,脱出物开始出现堆积现象,见图13b,并伴随有大量籽粒及轻质玉米芯透过筛

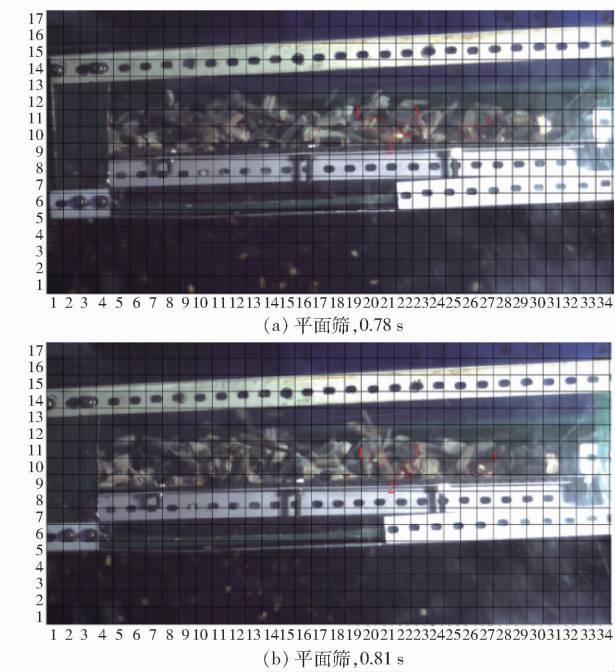


图 12 不同时刻玉米籽粒位置

Fig. 12 Locations of maize grains at different times

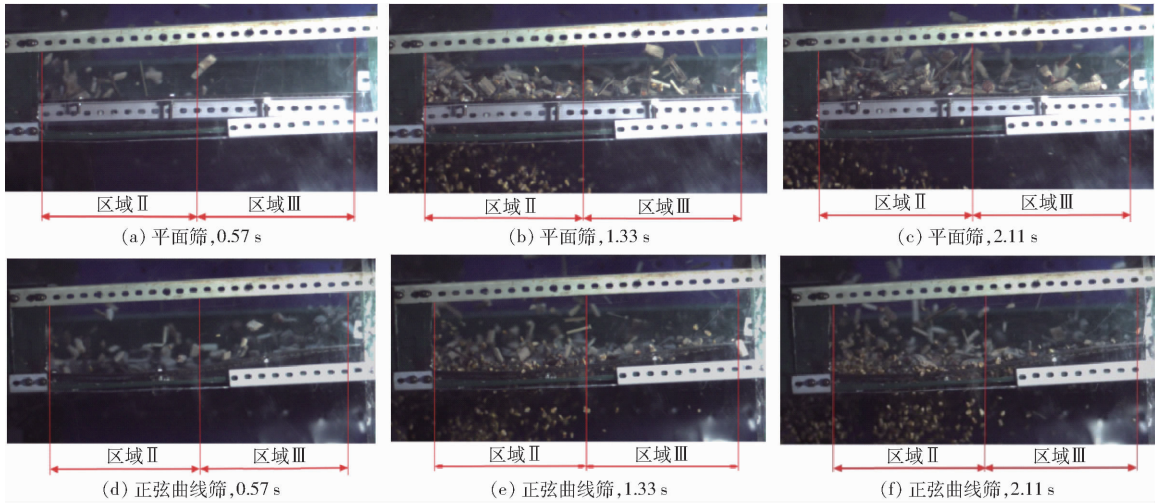


图 13 不同筛面上玉米脱出物运动状态

Fig. 13 Movement states of maize mixture on different screens

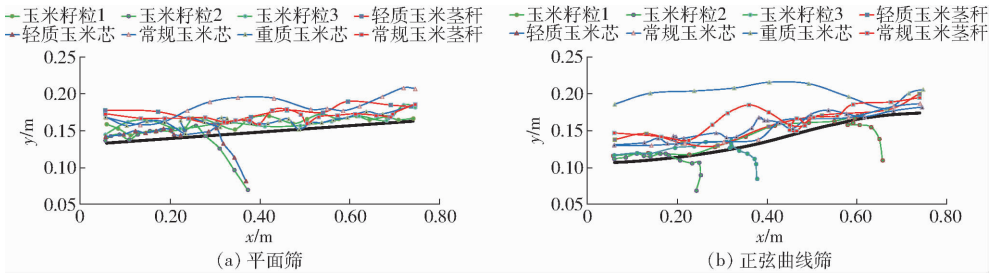


图 14 不同筛面上玉米脱出物在 XY 平面内运动轨迹

Fig. 14 Trajectories of maize mixture on different screens in XY plane

如图 13d 所示。筛分时间从 1.33 s 增加至 2.11 s 时,在正弦曲线筛的 II、III 区域,玉米脱出物分布较为均匀,未出现脱出物堆积现象,如图 13e ~ 13f 所示,玉米脱出物各成分在正弦曲线筛上分离效果良好,各籽粒运动轨迹出现不同程度的往复滑移,直至

面,如图 14a 中的玉米籽粒 2 及轻质玉米芯的运动所示。由于玉米脱出物堆积对于气流有阻挡作用,III 区域处部分籽粒与杂余难以分离,导致部分籽粒运动轨迹与筛面无接触,籽粒无法透过筛面,如图 14a 中玉米籽粒 1 的运动。筛分 2.11 s 时,堆积的玉米脱出物被运移至 II 区域后端,脱出物对气流的阻挡作用降低,部分玉米籽粒及杂余被快速吹起,见图 13c,轻质杂余以及部分籽粒被直接推送至 IV 区域,虽然在一定程度上提高了籽粒清洁率,但同时减少了籽粒与筛面的碰撞次数,造成籽粒透筛几率的降低,如图 14a 中的玉米籽粒 3 及轻质玉米茎秆的运动所示。另外,在脱出物筛分过程中,由于部分玉米茎秆及玉米芯尺寸较大,编织筛孔尺寸不利于其透筛,因而,在筛面及气流的作用下,其被逐步推移至筛尾,如图 14a 中的常规玉米芯、重质玉米芯及常规玉米茎秆的运动轨迹所示。

筛分 0.57 s 时,玉米脱出物在正弦曲线筛上已被推送至 III 区域处,并有少量脱出物运动至 IV 区域,

透过筛面,如图 14b 中的玉米籽粒 2、3 的运动轨迹所示。少量竖直位移较大的籽粒到达 III 区域后,在筛面上出现籽粒“回弹”现象,经多次“爬坡运动”即可透过筛面,如图 14b 中的玉米籽粒 1 的运动,由此可知正弦曲线筛利于籽粒透筛。由于正弦曲线筛上

脱出物分布较为均匀,对气流阻挡作用较小,尺寸较大的杂余受风力作用较强,同时尺寸较小的玉米芯及玉米茎秆更易与玉米籽粒分离,实现杂余向筛后快速运动,如图 14b 中的轻质、常规、重质玉米芯及轻质、常规玉米茎秆的运动。通过与平面筛上玉米芯及玉米茎秆轨迹对比可知,玉米芯及玉米茎秆在正弦曲线筛Ⅱ、Ⅲ区域的运动时间相较平面筛减少 7.70%~28.57%,具有较优的除杂能力。

4.2 正弦曲线筛筛分性能

为验证正弦曲线筛筛分性能,参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》进行试验,每组试验重复 5 次,试验结果见表 8。正弦曲线筛清选装置筛分后的籽粒清洁率较平面筛提高 2.45 个百分点,籽粒损失率降低 0.79 个百分点,装置性能得到提高。

表 8 台架试验结果

Tab.8 Results of bench tests

%

类型	清洁率	清洁率标准差	损失率	损失率标准差
曲面筛	98.07	0.83	1.16	0.25
平面筛	95.62	0.56	1.95	0.19

5 结论

- (1)通过筛上颗粒受力分析,得出筛上颗粒运动状态与筛面方程 $f(x)$ 之间的关系。通过对比平面、凸面、凹面编织筛性能,确定 3 种筛面不同区域筛分特点,提出一种正弦曲线筛面。
- (2)建立各因素与指标间回归数学模型,获得正弦曲线筛清选装置最优参数组合为:筛形系数 32.35 mm,入口气流速度 13.73 m/s,气流方向角 23.86°。
- (3)利用高速摄像技术验证了正弦曲线筛工作机理,表明Ⅱ、Ⅲ区域为正弦曲线筛籽粒透筛主区域,正弦曲线筛可实现对杂余的快速推移,增加籽粒透筛机率。
- (4)通过台架试验验证了优化结果的准确性,并确定正弦曲线筛清选装置的籽粒清洁率可达 98.07%,籽粒损失率可降为 1.16%。表明所设计的正弦曲线筛工作性能满足国家筛分质量评价技术规范要求。

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] 郝俊发,韩增德,刘贵明,等. 玉米脱粒机清选装置的研究现状及发展趋势[J]. 安徽农业科学,2016,44(5):322-324,330.
HAO Junfa, HAN Zengde, LIU Guiming, et al. Research status and development trend of cleaning device of corn thresher [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2016,44(5):322-324,330. (in Chinese)

[3] 孙国建,李耀明,徐立章. 风筛式清选装置中离心风机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究,2014,36(1):242-246.
SUN Guojian, LI Yaoming, XU Lizhang. Applications and researches of the centrifugal fan in the air-and-screen cleaning device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(1):242-246. (in Chinese)

[4] 李洪昌,李耀明,唐忠. 风筛式清选装置清选性能试验研究[J]. 中国农机化,2010(6):54-57.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong. Test study on cleaning performance of air-and-screen cleaning mechanism [J]. Chinese Agricultural Mechanization,2010(6):54-57. (in Chinese)

[5] CLEARY P W, SINNOTT M D, MORRISON R D. Separation performance of double deck banana screens—part 2: quantitative predictions [J]. Minerals Engineering, 2009,22(14):1230-1244.

[6] FERNANDEZ J W, CLEARY P W, SINNOTT M D, et al. Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens[J]. Minerals Engineering, 2011,24(8):741-753.

[7] 杨忠高. 弧形筛分级理论与参数研究[J]. 北京钢铁学院学报,1981(3):9-17.
YANG Zhonggao. Research on classification theory and parameters of curved sieve [J]. Journal of Beijing Iron and Steel University,1981(3):9-17. (in Chinese)

[8] 张正,王清印,王印庚,等. 弧形筛及生物净化池净化陆基工厂化海水养殖废水的效果[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊 2):176-181.
ZHANG Zheng, WANG Qingyin, WANG Yingeng, et al. Effluent purification effect of system in sieve bend combined with four grade biological cleansing ponds in industrialized mariculture[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(Supp.2):176-181. (in Chinese)

[9] 曹丽英,张跃鹏,张玉宝,等. 筛片参数优化对饲料粉碎机筛分效率的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(22):284-288.
CAO Liying, ZHANG Yuepeng, ZHANG Yubao, et al. Influence of screen parameters optimization on screening efficiency of feed hammer mill[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(22):284-288. (in Chinese)

[10] 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 screen[J]. Machine Design and Research, 2016,32(1):150-154,158. (in Chinese)

[11] 邓嘉鸣,沈惠平,李菊,等. 三维并联振动筛设计与实验[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):342-346,328. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131157&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.057. (in Chinese)
- [12] 张传根. 玉米籽粒收获机清选筛体结构的优化研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
ZHANG Chuangen. Structural optimization of the cleaning screen for maize grain harvester[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2016. (in Chinese)
- [13] WANG Lijun, DING Zhenjun, MENG Shuang, et al. Kinematics and dynamics of a particle on a non-simple harmonic vibrating screen[J]. Particuology, 2017, 32: 167-177.
- [14] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2):79-84.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120217&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017. (in Chinese)
- [15] 周文秀. 玉米籽粒的物理力学特性研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
ZHOU Wenxiu. The physical and mechanical properties research of corn grain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [16] COŞKUN M B, YALÇIN I, ÖZARSLAN C. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4): 523-528.
- [17] 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(6):185-195.
- [18] WANG Lijun, ZHOU Wenxiu, DING Zhenjun, 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.
- [19] 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 Chuangen, 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)
- [20] 杜小强,肖梦华,胡小钦,等. 贯流式谷物清选装置气固两相流数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(3):27-34.
DU Xiaoqiang, XIAO Menghua, HU Xiaoqin, et al. Numerical simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in cross-flow grain cleaning device [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(3):27-34. (in Chinese)

(上接第 89 页)

- [20] 陈建能,王英,黄前泽,等. 钵苗移栽机变形椭圆齿轮行星系植苗机构优化与试验[J]. 农业工程学报,2013,44(10):52-57.
CHEN Jianneng, WANG Ying, HUANG Qianze, et al. Optimization and test of transplanting mechanism with planetary deformed elliptic gears for potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAE,2013,44(10):52-57. (in Chinese)
- [21] 马良,石宁. 齿轮-五杆组合机构运动学特征仿真分析[J]. 西安科技大学学报,2013,33(6):727-730.
MA Liang, SHI Ning. Gear-5-bar combination mechanism's kinematics characteristic simulation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2013,33(6):727-730. (in Chinese)
- [22] 李学刚,黄永强,冯丽艳. 平面五杆机构双曲柄存在的充要条件研究[J]. 机械科学与技术,2005,24(1):51-53.
LI Xuegang, HUANG Yongqiang, FENG Liyan. Study of the sufficient and necessary conditions for existence of double crank of planar five-bar mechanism [J]. Mechanical Science and Technology,2005,24(1):51-53. (in Chinese)
- [23] 李团结,曹惟庆,褚金奎. 齿轮-五杆机构轨迹综合的连续法[J]. 西安理工大学学报,1999,15(4):76-79.
LI Tuanjie, CAO Weiqing, CHU Jinkui. Synthesis of path generation of the geared five-bar mechanism by continuation method [J]. Journal of Xi'an University of Technology,1999,15(4):76-79. (in Chinese)
- [24] PRIMROSE E J F, FREUDENSTEIN F. Geared five-bar motion' part 2-arbitrary commensurate gear ratio minus[J]. Journal of Applied Mechanics,1963,30(2):170-175.
- [25] YU H, YUAN Z, GLIMARTIN M J, et al. Modelling and control of a slider hybrid seven-bar system [C] // International Association of Science and Technology for Development (IASTED) International Conference on Robotice and Applications, 1999:319-323.
- [26] YU H. Modelling and control of hybrid machine systems—a five-bar mechanism case[J]. International Journal of Automation and Computing,2006,3:235-243.
- [27] 俞高红,陈志威,赵匀,等. 椭圆-不完全非圆齿轮行星系蔬菜钵苗取苗机构的研究[J]. 机械工程学报,2012,48(13):32-39.
YU Gaohong, CHEN Zhiwei, ZHAO Yun, et al. Study on vegetable plug seedling pick-up mechanism of planetary gear train with ellipse gears and incomplete non-circular gear[J]. Journal of Mechanical Engineering,2012,48(13):32-39. (in Chinese)