

玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验

王立军 冯鑫 武振超 李瑞 崔友强 李义博  
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为降低筛分作业后籽粒损失率,同时保证籽粒清洁率,分析了玉米脱出物在气流场中运动状态,基于贝壳筛设计阶梯式筛体,并通过籽粒碰撞理论设计阶梯缓冲带,使籽粒在阶梯暂时“滞留”,减轻杂余对籽粒夹带作用。在筛面振幅 19 mm 条件下,采用 CFD-DEM 耦合仿真方法,以入风口气流速度、气流角、阶梯高度和筛面振动频率为试验因素,玉米籽粒清洁率和损失率为试验指标,进行二次正交旋转组合试验。通过响应曲面方法对试验结果进行分析,利用软件对回归数学模型进行优化。结果表明:当气流速度、气流角、阶梯高度和振动频率分别为 16 m/s、25°、8.36 mm 和 4.45 Hz 时,籽粒损失率和清洁率分别为 1.69% 和 98.8%,通过贯流风阶梯式振动筛台架试验验证了结果的准确性。通过对比试验得到,阶梯式贝壳筛作业后籽粒损失率降低为 2.12%,清洁率提高到 99.16%,清选性能得到提高。

**关键词:** 玉米联合收获机; 清选装置; 振动筛; 阶梯缓冲带

**中图分类号:** S225.5<sup>+</sup>1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0115-09

Design and Test of Stepped Vibrating Screen with Cross Air for Maize Harvester

WANG Lijun FENG Xin WU Zhenchao LI Rui CUI Youqiang LI Yibo  
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** To reduce the loss of maize and ensure certain cleanliness of maize after screening operations, the movement of maize mixture was analyzed in the airflow field, and the stepped screen body was designed based on shell screen. The stepped buffer zone was designed by analyzing the theory of maize's collision to temporarily retain grains in the stepper and reduce the effect on carrying maize from maize mixture and avoid maize accumulation in the ladder. However, maize debris directly went across the ladder. To make the screen amplitude as 19 mm, the computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) were coupled in the quadratic orthogonal rotational-combinational simulation tests. The factors were the inlet velocity and direction angle of airflow, height of the ladder and vibration frequency of screen. The indexes were the loss and cleanliness of maize grains collected. The test data were analyzed by the response surface method and the regression mathematical models were multi-objective optimized by using Design-Expert software. The results showed that the loss and cleanliness of maize were 1.69% and 98.8%, respectively, when the inlet velocity of airflow was 16m/s, the direction angle of airflow was 25°, the height of the ladder was 8.36 mm, and the vibration frequency of screen was 4.45 Hz. The performances met the requirements of corn harvest. The performance tests were done in the laboratory to verify the accuracy of the simulation results. The rate of maize loss was 2.12% and the cleanliness of maize grains collected was 99.16% after screening. Compared with the flat shell screen, the loss of maize grains across the stepped shell screen was reduced by 1.14 percentage points and the cleanliness of maize grains was increased by 1.98 percentage points. The cleaning performance of screen was improved.

**Key words:** maize harvester; cleaning device; vibrating screen; stepped buffer zone

0 引言

清选装置是谷物联合收获机的重要工作装置之

一,作为清选装置关键部件的振动筛体,可将不同混合物按粒度进行筛分,其筛分质量直接影响收获机械作业后清洁率、损失率和生产率等多项作业指

标<sup>[1-5]</sup>。为提高筛分性能,国内外学者针对筛面进行大量创新研究:为防止谷物堆积和堵塞,李菊等<sup>[6]</sup>设计非平面凸柱筛面,并通过筛分比较试验验证凸柱筛面对谷物透筛率的影响显著;杜家林<sup>[7]</sup>对比分析铸造筛面和复合结构条形筛面的结构特点,得出复合结构条形筛具有开孔率高、筛分效率高、耐磨性好等优点;马征等<sup>[8]</sup>研究了仿生非光滑筛面,探究了入风口角度和筛面形态对仿生非光滑和光滑清选筛面的影响,通过对比试验证明仿生非光滑筛面形态在筛孔近筛层内能够实现较好的减粘效果;DONG 等<sup>[9]</sup>采用 CFD 和 DEM 软件耦合技术对水流筛选条件下的煤炭筛分进行了计算机数值模拟,分析了水流速对筛分性能的影响规律;为提高振动筛的筛分性能,王立军等<sup>[10]</sup>采用 CFD-DEM 耦合方法通过试验得出最优贝壳筛筛体结构组合参数。

为降低籽粒损失率同时提高籽粒清洁率,本文以风筛式玉米清选装置为研究对象,提出贯流风阶梯式振动筛。通过 CFD-DEM 耦合方法进行二次正交旋转组合仿真试验<sup>[11-13]</sup>,使用 Design-Expert 软件分析气流速度、气流角、阶梯高度和筛面振动频率对玉米籽粒损失率和清洁率的影响规律,得出清选装置最佳作业参数,并通过台架试验验证仿真结果准确性。

1 阶梯振动筛筛分原理和理论分析

1.1 筛分原理

经玉米联合收获机脱粒作业后的玉米脱出物(包括玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆和少量其他杂余),于入料口落入清选装置内,通过筛面筛分和贯流风清选,完成籽粒与杂余分离。由于玉米脱出物物料特性的差异,玉米芯和玉米茎秆相比于玉米籽粒在单位时间内水平方向位移较大,经过振动筛多次抛起和运移,玉米芯和玉米茎秆夹带少量籽粒直接由振动筛第一阶梯运动到第二阶梯,如图 1 所示,阶梯缓冲带能够暂时“滞留”籽粒,以实现籽粒与杂余在筛上分离,减小杂余对籽粒夹带作用,使籽粒和杂余在阶梯处分层,减少玉米籽粒损失率,提高振动

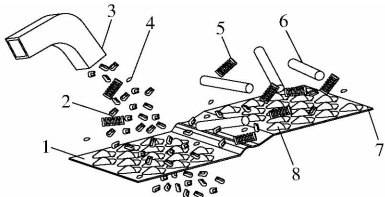


图 1 工作原理图  
Fig. 1 Working principle

1. 第一阶梯 2. 玉米籽粒 3. 入料口 4. 其他杂余 5. 玉米芯  
6. 玉米茎秆 7. 第二阶梯 8. 贝壳筛孔

筛的清选性能。  
1.2 理论分析  
分析玉米脱出物在清选装置中运动规律,如图 2 所示。对其被筛面抛出后状态进行受力分析<sup>[14]</sup>,有

$$\begin{cases} mg - F \sin \beta = ma_y \\ F \cos \beta = ma_x \\ mg > F \sin \beta \\ F = km u^2 \\ k = \frac{\rho \mu S}{m} \\ G = mg \end{cases} \quad (1)$$

式中  $F$ ——物料所受风力, N  
 $m$ ——脱出物质量, kg  
 $g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$   
 $G$ ——重力, N  
 $\beta$ ——气流角,  $(^\circ)$   
 $a_x$ ——水平方向加速度,  $\text{m/s}^2$   
 $a_y$ ——竖直方向加速度,  $\text{m/s}^2$   
 $S$ ——物体垂直于气流平面上投影面积,  $\text{m}^2$   
 $u$ ——气流速度,  $\text{m/s}$   
 $\rho$ ——空气密度,  $\text{kg/m}^3$   
 $k$ ——漂浮系数,  $\text{mm}^{-1}$   
 $\mu$ ——空气阻力系数

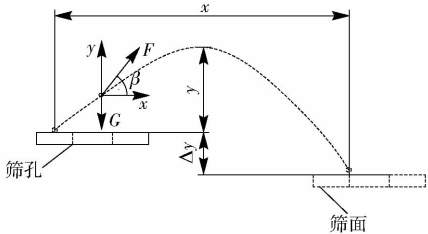


图 2 玉米脱出物受力分析图  
Fig. 2 Analysis diagram of stress of maize mixture

振动筛以正弦曲线运动进行筛分作业,在筛面运动一个周期内将玉米脱出物从筛面抛出的时间记为  $t_1$ ,与筛面下一次碰撞时间记为  $t_2$ ,分析其抛出距离。

$$y = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2a_y} \quad (2)$$

$$\Delta y = A \sin(\omega t_1) - A \sin(\omega t_2) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x &= v_0 \cos \alpha \left( \frac{v_0 \sin \alpha + \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + 2 \Delta y a_y}}{a_y} \right) + \\ &\frac{1}{2} a_x \left( \frac{v_0 \sin \alpha + \sqrt{v_0^2 \sin^2 \alpha + 2 \Delta y a_y}}{a_y} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $A$ ——筛面振幅, mm  
 $\omega$ ——筛面运动角速度,  $\text{rad/s}$   
 $\Delta y$ ——筛面位移, mm  
 $\alpha$ ——抛出物速度与水平方向的夹角,  $(^\circ)$

$v_0$ ——脱出物抛起初速度, m/s

$x$ ——从被筛面抛出与振动筛碰撞时玉米脱出物水平位移, m

$y$ ——从被筛面抛出与振动筛碰撞时玉米脱出物竖直位移, m

通过式(1)~(4)整理得出

$$\begin{cases} x = v_0 \cos \alpha \left[ \frac{mv_0 \sin \alpha}{mg - \rho \mu Su^2 \sin \beta} + \sqrt{\frac{m^2 v_0^2 \sin^2 \alpha}{(mg - \rho \mu Su^2 \sin \beta)^2} + \frac{2Am^2(\sin(\omega t_1) - \sin(\omega t_2))}{mg - \rho \mu Su^2 \sin \beta}} \right] + \\ \frac{\rho \mu Su^2 \cos \beta}{2m} \left[ \frac{mv_0 \sin \alpha}{mg - \rho \mu Su^2 \sin \beta} + \sqrt{\frac{m^2 v_0^2 \sin^2 \alpha}{(mg - \rho \mu Su^2 \sin \beta)^2} + \frac{2Am^2(\sin(\omega t_1) - \sin(\omega t_2))}{mg - \rho \mu Su^2 \sin \beta}} \right]^2 \\ y = \frac{mv_0^2 \sin^2 \alpha}{2(mg - \rho \mu Su^2)} \end{cases} \quad (5)$$

忽略脱出物中质量差异,脱出物中垂直于气流场的投影面积由大到小依次为:玉米茎秆、玉米芯、玉米籽粒,因此筛面抛出后脱出物水平和竖直位移由大到小依次为:玉米茎秆、玉米芯、玉米籽粒。

2 筛体设计

2.1 筛孔选择

振动筛筛体分为上筛和下筛。在上筛设计中为保证振动筛向后推移物料能力,减少玉米芯、玉米茎秆等杂质通过筛孔几率,不发生堵孔现象同时保证籽粒透筛能力,高效完成清选作业,采用贝壳筛作为清选装置上筛。贝壳筛筛孔长度、高度、筛孔间横向距离、纵向距离为 21.68、10.86、30.00、55.04 mm,下筛选取圆孔筛对籽粒精选,筛孔直径和横、纵间距分别为 15、17.5、30 mm<sup>[10]</sup>。

2.2 阶梯缓冲带设计

玉米籽粒法向碰撞恢复系数随着碰撞角增加而增加,玉米籽粒切向碰撞恢复系数随着碰撞角增加而减小<sup>[15]</sup>,应使玉米籽粒与阶梯缓冲带碰撞时产生较小碰撞角,使玉米籽粒与阶梯缓冲带碰撞后籽粒法向速度减小,能够稳定高效地落入阶梯缓冲带中且不发生大幅度跳动,通过下次振动筛抛起作用成功跃阶。

玉米籽粒落入阶梯缓冲带时速度快、时间短,将其轨迹近似看为一条直线 MN,如图 3 所示,其中线段 OF 与 OE 分别为与水平面呈夹角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  ( $\theta_1 < \theta_2$ ) 的斜面  $S_1$ ,如图 4 所示。射线 CD 和 AB 分别为各自

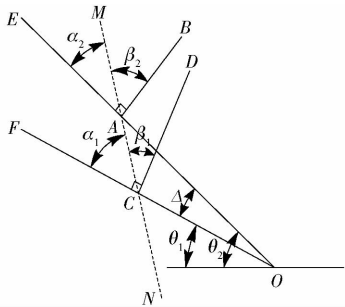


图 3 不同斜面碰撞角度分析图

Fig. 3 Analysis diagram of collision angles of different slopes

斜面法线。推导可知:  $\alpha_1 = \Delta + \alpha_2 > \alpha_2$ ,  $\beta_1 = 90^\circ - \alpha_1$ , 因此  $\beta_1 < \beta_2$ 。为确保玉米籽粒与阶梯缓冲带碰撞角较小,应设计较小  $\theta_4$ ,同时为防止籽粒回滑应保证斜面  $S_1$  与水平面呈一定角度,本文取  $\theta_4 = 10^\circ$ ;同理,为保证玉米籽粒与斜面  $S_3$  碰撞后落入阶梯缓冲带中,应使斜面  $S_3$  与水平方向夹角  $\theta_3$  较大,同时保证筛分过程中籽粒能够稳定运动到第二阶梯,  $\theta_3$  应小于振动筛振动方向角(取  $43.4^\circ$ ),因此本文取  $\theta_3 = 40^\circ$ 。

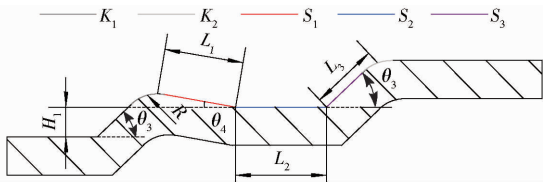


图 4 阶梯结构示意图

Fig. 4 Diagrams of stepper structure

为防止玉米籽粒与阶梯缓冲带碰撞时玉米籽粒发生翻转掉落,如图 4 所示,应使缓冲带中  $L_1 \geq H_0$  ( $H_0$  为玉米籽粒高度,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别为面  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  对应长度),本文选取  $L_1 = 12$  mm(玉米籽粒高度  $H_0$  范围为 8.208 ~ 11.099 mm)<sup>[15]</sup>;保证平面  $S_2$  能够容纳玉米籽粒,使籽粒与筛面充分接触使其下次被筛面抛起,设计阶梯缓冲带中平面  $S_2$  长度大于玉米籽粒侧卧长度,本文取  $L_2 = 12$  mm;在阶梯  $K_1$  和  $K_2$  处设计 5 mm 的倒圆角,防止玉米籽粒与筛面碰撞产生损伤;设计筛面厚度为 2 mm;阶梯最佳高度  $H_1$  通过后文优化试验得出。

为使玉米籽粒在阶梯处完成跃阶,阶梯在筛面的位置尤其重要,前期研究表明大部分玉米籽粒透筛位置位于下筛中后部<sup>[16]</sup>,因此本文设计阶梯距振动筛上筛前端整体筛面 2/3 处,此处大部分玉米籽粒已被筛分,剩余少量未透筛籽粒和杂余,籽粒间相互作用减少,易于籽粒跃阶。

3 仿真试验

3.1 颗粒模型建立

将玉米脱出物各成分按照实际比例进行设定,

其参数如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

表 1 玉米脱出物各类百分比

| Tab.1 Percentage parameters of maize mixture |          |       |        |
|----------------------------------------------|----------|-------|--------|
| 种类                                           | 类别       | 百分比/% | 总百分比/% |
| 玉米籽粒                                         | 锥形       | 54.6  | 73.3   |
|                                              | 球形       | 11.1  |        |
|                                              | 矩形       | 7.6   |        |
| 玉米茎秆                                         | 28 mm 圆柱 | 2.4   | 17.6   |
|                                              | 36 mm 圆柱 | 5.7   |        |
|                                              | 44 mm 圆柱 | 5.3   |        |
|                                              | 52 mm 圆柱 | 4.2   |        |
| 玉米芯                                          | 1/4 圆柱   | 4.4   | 8.7    |
|                                              | 1/2 圆柱   | 1.8   |        |
|                                              | 整个圆柱     | 2.5   |        |
| 杂质                                           |          | 1.4   | 1.4    |

以德美亚一号玉米为参考,通过 Pro/E 三维软件对脱出物中各成分进行三维建模,将模型导入 EDEM 软件中,以各脱出物三维模型轮廓为填充边界,确定每个小球直径和坐标完成小球填充,其模型如图 5 所示。

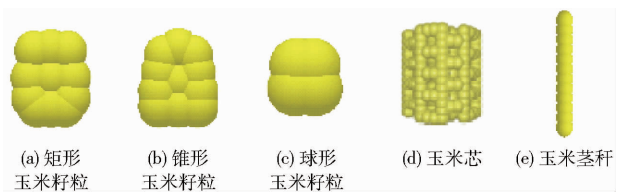


图 5 脱出物各成分三维模型图

Fig.5 3D models of each component of maize

3.2 清选装置几何模型建立

清选装置中上筛和下筛的长度均为 1 360 mm,筛厚 2 mm,筛面安装角 3.5°,上下筛相对距离为 280 mm,其筛面前端与入风口及后端与出风口的距离分别为 400 mm 和 250 mm,考虑到计算机运算能力,筛面宽度选取 150 mm 进行建模,运用 Pro/E 软

件对清选装置进行三维建模,其几何模型如图 6 所示。导入 Gambit 软件进行网格划分,对其流体区域进行网格划分,采用局部网格重构法作为动网格的更新计算方法。

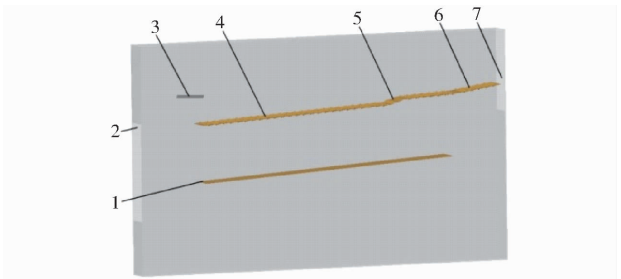


图 6 清选装置几何模型

Fig.6 Geometric model of cleaning device

1. 下筛 2. 入风口 3. 抖动板 4. 上筛 5. 阶梯缓冲带 6. 尾筛 7. 杂余出口

3.3 仿真参数设置

将各个材料力学参数和物料间接触属性进行设定,其参数如表 2 和表 3 所示<sup>[10]</sup>。

表 2 材料力学特性

| Tab.2 Mechanical properties of materials |      |          |                          |
|------------------------------------------|------|----------|--------------------------|
| 材料                                       | 泊松比  | 剪切模量/MPa | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
| 玉米籽粒                                     | 0.40 | 1.27     | 1 197                    |
| 玉米茎秆                                     | 0.42 | 1.00     | 112                      |
| 玉米芯                                      | 0.45 | 1.09     | 330                      |
| 筛面(钢)                                    | 0.30 | 700.00   | 7 800                    |

在 EDEM 中选取各个材料接触模型为 Hertz – Mindlin 无滑动模型。设定仿真装置振动筛的振幅为 19 mm,筛面振动频率为 4.45 ~ 5.85 Hz,上筛的振动方向角 136.6°,下筛的振动方向角 43.4°,上下筛面初始相位角均为 0°。EDEM 的时间步长是 Rayleigh 时间步长的 20%,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。

表 3 材料间接触属性

| Tab.3 Interaction properties of materials |           |           |          |            |           |          |            |         |           |
|-------------------------------------------|-----------|-----------|----------|------------|-----------|----------|------------|---------|-----------|
| 接触属性                                      | 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                                    | 0.01      | 0.01      | 0.01     | 0.01       | 0.01      | 0.01     | 0.01       | 0.01    | 0.01      |

3.4 颗粒工厂设置

在仿真装置喂入口处设置颗粒工厂,设定玉米脱出物一次批量喂入 5 kg,0 ~ 1 s 生成颗粒,依据不同玉米脱出物类型占喂入量的百分比,设置颗粒工厂中锥形、球形、矩形玉米籽粒个数分别为 1 147、199、135;28、36、44、52 mm 圆柱茎秆个数分别为 205、283、168、112;体积由小到大玉米芯个数分别为 272、

192、197。由于玉米脱出物的相互接触影响其下落速度,因此设定喂入口物料初速度为 0.1 ~ 0.7 m/s 内的随机值。

3.5 仿真试验过程

依据前文理论分析,通过单因素试验确定气流速度、气流角度、阶梯筛的阶梯高度、筛面振动频率为试验因素。根据 6 行玉米籽粒联合收获机田间作

业贯流风机转速范围(750 ~ 1 240 r/min),换算为气流速度  $u$  为 9.6 ~ 16 m/s,气流角  $\beta$  选取 $25^{\circ}$  ~  $30^{\circ}$ ,通过单因素试验确定阶梯高度  $H_1$ 和振动频率 $f$ 的范围分别为 5 ~ 10 mm 和 4.45 ~ 5.85 Hz。每个因素选取 5 个水平进行试验,试验指标为籽粒损失率  $y_1$ (%)、籽粒清洁率  $y_2$ (%)。设计二次正交旋转组合试验,试验因素编码如表 4 所示<sup>[17]</sup>。

3.5.1 筛分过程分析

图 7 为在气流速度 12.8 m/s、气流角  $27.5^{\circ}$ 、阶梯高度 7.5 mm 和振动频率 5.15 Hz 的条件下,筛分过程玉米脱出物运动状态,图中绿色、蓝色、红色颗粒分别为玉米籽粒、玉米芯和玉米茎秆。由图可见一部分玉米籽粒由阶梯筛第一阶梯清选出,剩余籽粒由第二阶梯再次筛分。大部分玉米脱出物杂质由

第一阶梯直接运动到第二阶梯,并由第二阶梯再次筛分作业后于杂余出口排出,阶梯缓冲作用减小了杂余对玉米籽粒的夹带作用,使籽粒与杂余在阶梯处水平分层。

表 4 因素编码  
Tab.4 Codes of experimental factors

| 编码 | 因素                           |                           |                  |                |
|----|------------------------------|---------------------------|------------------|----------------|
|    | 气流速度<br>$u/(m \cdot s^{-1})$ | 气流角<br>$\beta/(^{\circ})$ | 阶梯高度<br>$H_1/mm$ | 振动频率<br>$f/Hz$ |
| 2  | 16.0                         | 30.00                     | 10.00            | 5.85           |
| 1  | 14.4                         | 28.75                     | 8.75             | 5.50           |
| 0  | 12.8                         | 27.50                     | 7.50             | 5.15           |
| -1 | 11.2                         | 26.25                     | 6.25             | 4.80           |
| -2 | 9.6                          | 25.00                     | 5.00             | 4.45           |

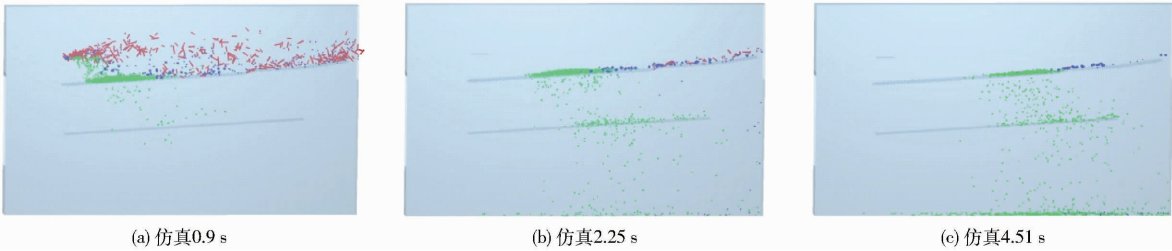


图 7 玉米脱出物筛分状态  
Fig.7 Screening status of maize mixture

3.5.2 籽粒跃阶过程分析

考虑到 4.7 ~ 5.2 s 时间段内,筛面上玉米籽粒开始大量抛离第一阶梯进行跃阶,对其在阶梯缓冲带中水平和竖直位移变化进行研究,如图 8 所示。以玉米籽粒离开第一阶梯时初始水平和竖直位置为坐标原点,由图可见籽粒水平位移随着时间的增加逐渐增加,说明籽粒在跃阶过程中持续向筛面后端运动,无籽粒堆积现象;通过阶梯缓冲带结构长度,计算得出籽粒成功跃阶最小水平位移为 50.14 mm,提取锥形、矩形、球形玉米籽粒在阶梯处水平位移为 50.14 mm 时所需时间分别为 4.992、5.099、5.004 s;锥形、矩形、球形玉米籽粒在筛面水平位移为 50.14 mm 时所需时间分别为 4.849、4.799、4.928 s。通过比较得出阶梯处锥形、矩形和球形玉米籽粒较

常规筛分作业籽粒所需时间分别增加 0.143、0.3、0.076 s,证明阶梯能够对籽粒实现暂时“滞留”;籽粒在阶梯处竖直方向上位移呈周期性变化,与常规筛面籽粒筛分过程中竖直方向位移变化规律一致,说明筛面在阶梯处具有稳定籽粒抛掷能力,且籽粒经筛面抛掷完成跃阶动作进行后续筛分作业。

3.6 试验结果分析

每组仿真试验均为在 1 s 内一次批量喂入 5 kg 玉米脱出物,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  为因素编码值,每组试验重复 5 次取平均值作为试验结果,其结果如表 5 所示。

3.6.1 显著性分析

利用 Design-Expert 6.0 软件对试验结果进行分析,得到籽粒损失率和清洁率的回归方程,并检验其

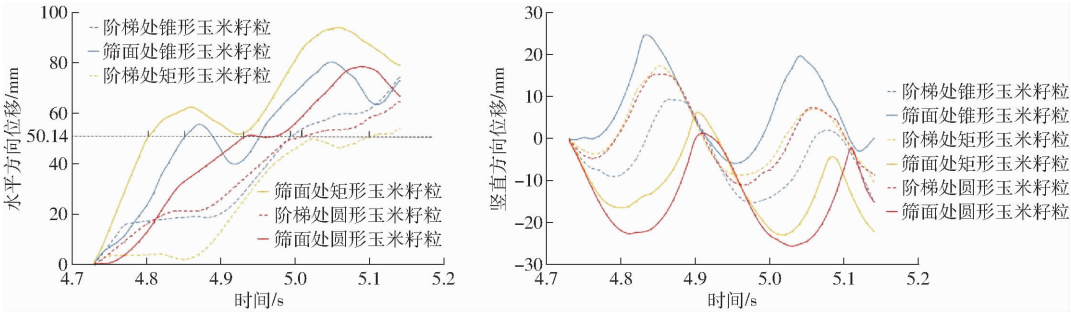


图 8 阶梯缓冲带中籽粒位移曲线  
Fig.8 Curves of maize displacement in stepped buffer zone

表 5 试验结果  
Tab.5 Experimental results

| 试验<br>序号 | 气流<br>速度<br>$x_1$ | 气流<br>角<br>$x_2$ | 阶梯<br>高度<br>$x_3$ | 振动<br>频率<br>$x_4$ | 损失<br>率 $y_1$ /<br>率标准<br>% | 损失<br>率标准<br>差 / % | 清洁率<br>$y_2$ /<br>率标准<br>% | 清洁<br>率标准<br>差 / % |
|----------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| 1        | -1                | -1               | -1                | -1                | 4.85                        | 0.24               | 96.33                      | 1.12               |
| 2        | 1                 | -1               | -1                | -1                | 4.58                        | 0.32               | 98.58                      | 1.32               |
| 3        | -1                | 1                | -1                | -1                | 6.05                        | 0.26               | 98.72                      | 0.96               |
| 4        | 1                 | 1                | -1                | -1                | 5.12                        | 0.31               | 98.69                      | 1.01               |
| 5        | -1                | -1               | 1                 | -1                | 2.10                        | 0.33               | 93.12                      | 0.93               |
| 6        | 1                 | -1               | 1                 | -1                | 3.55                        | 0.19               | 96.51                      | 0.91               |
| 7        | -1                | 1                | 1                 | -1                | 2.96                        | 0.19               | 95.73                      | 0.66               |
| 8        | 1                 | 1                | 1                 | -1                | 4.47                        | 0.23               | 98.75                      | 0.88               |
| 9        | -1                | -1               | -1                | 1                 | 4.67                        | 0.22               | 98.11                      | 1.23               |
| 10       | 1                 | -1               | -1                | 1                 | 6.97                        | 0.24               | 98.95                      | 0.54               |
| 11       | -1                | 1                | -1                | 1                 | 6.47                        | 0.32               | 98.98                      | 1.32               |
| 12       | 1                 | 1                | -1                | 1                 | 7.46                        | 0.21               | 98.98                      | 1.11               |
| 13       | -1                | -1               | 1                 | 1                 | 2.57                        | 0.19               | 95.48                      | 1.09               |
| 14       | 1                 | -1               | 1                 | 1                 | 4.96                        | 0.32               | 98.63                      | 1.32               |
| 15       | -1                | 1                | 1                 | 1                 | 4.07                        | 0.30               | 97.61                      | 1.00               |
| 16       | 1                 | 1                | 1                 | 1                 | 6.26                        | 0.22               | 98.50                      | 1.22               |
| 17       | -2                | 0                | 0                 | 0                 | 3.06                        | 0.31               | 95.97                      | 1.31               |
| 18       | 2                 | 0                | 0                 | 0                 | 6.41                        | 0.18               | 99.09                      | 1.13               |
| 19       | 0                 | -2               | 0                 | 0                 | 3.59                        | 0.28               | 96.37                      | 0.88               |
| 20       | 0                 | 2                | 0                 | 0                 | 6.46                        | 0.21               | 98.72                      | 0.81               |
| 21       | 0                 | 0                | -2                | 0                 | 6.97                        | 0.29               | 98.46                      | 0.79               |
| 22       | 0                 | 0                | 2                 | 0                 | 4.37                        | 0.23               | 95.07                      | 0.93               |
| 23       | 0                 | 0                | 0                 | -2                | 3.67                        | 0.27               | 97.28                      | 0.77               |
| 24       | 0                 | 0                | 0                 | 2                 | 6.36                        | 0.31               | 98.78                      | 1.11               |
| 25       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.20                        | 0.29               | 98.69                      | 1.19               |
| 26       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.25                        | 0.28               | 98.63                      | 1.21               |
| 27       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.27                        | 0.25               | 98.62                      | 1.20               |
| 28       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 4.85                        | 0.26               | 98.59                      | 1.16               |
| 29       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.26                        | 0.23               | 98.92                      | 1.43               |
| 30       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 4.76                        | 0.27               | 98.62                      | 1.71               |
| 31       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.26                        | 0.26               | 98.63                      | 1.60               |
| 32       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.32                        | 0.25               | 97.72                      | 1.21               |
| 33       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.71                        | 0.28               | 97.11                      | 0.88               |
| 34       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.82                        | 0.29               | 97.13                      | 0.91               |
| 35       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.09                        | 0.24               | 98.42                      | 1.21               |
| 36       | 0                 | 0                | 0                 | 0                 | 5.37                        | 0.25               | 98.61                      | 0.89               |

显著性。

通过对试验数据分析和拟合<sup>[18]</sup>可知:试验模型显著( $p < 0.01$ ),其中4个主效应对损失率指标影响均显著,气流速度和阶梯高度的交互项 $x_1x_3$ 、气流速度和振动频率的交互项 $x_1x_4$ 、气流速度的二次项 $x_1^2$ 对指标影响均显著,其余各项不显著。各因素对损失率贡献率主次顺序为: $x_1$ 、 $x_4$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 。将不显著项去除,得到各因素对损失率回归方程

$$y_1 = 5.65 + 0.68x_1 + 0.60x_2 - 0.85x_3 + 0.63x_4 + 0.34x_1x_3 + 0.38x_1x_4 - 0.18x_1^2 \quad (6)$$

通过对试验数据分析和拟合分析可知:试验模型显著( $p < 0.01$ ),其中4个主效应对清洁率指标影响均显著,气流速度和气流角度交互项 $x_1x_2$ 、气流速度和阶梯高度交互项 $x_1x_3$ 、阶梯高度二次项 $x_3^2$ 对指标影响均显著,其余各项不显著,各因素对清洁率贡献率主次顺序为: $x_3$ 、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_4$ 。将不显著项去除,得到各因素对清洁率回归方程

$$y_2 = 98.05 + 0.82x_1 + 0.62x_2 - 0.82x_3 + 0.49x_4 - 0.36x_1x_2 + 0.46x_1x_3 - 0.36x_3^2 \quad (7)$$

3.6.2 响应曲面分析

通过 Design-Expert 6.0 软件对数据处理,得到气流速度、气流角、阶梯高度和振动频率之间交互作用对损失率指标影响的响应曲面,如图 9a、9b 所示。

当气流角为 27.5°,振动频率为 5.15 Hz 时,阶梯高度一定条件下,随着气流速度增加损失率呈上升趋势,这是因为气流速度增加,气流对籽粒向后推移能力增强<sup>[19-20]</sup>,籽粒透筛几率变小,籽粒损失率升高。在气流速度一定条件下,随着阶梯高度增加损失率呈上升趋势,这是因为阶梯高度增加,其对籽粒“滞留”效果增强,杂余对籽粒夹带作用减弱,籽粒损失率降低。

当气流角为 27.5°,阶梯高度为 7.5 mm 时,振动频率处于低水平的条件下,损失率随气流速度的增大呈先增大后略下降趋势,这是因为在振动频率较低的情况下,筛面对脱出物抛起能力减弱,低水平的气流速度对玉米脱出物分离效果较低,气流速度增加导致筛面对籽粒和杂余向后推移能力增加,籽粒在筛面的跳动次数减小同时杂余对籽粒的夹带作用增强,籽粒透筛率降低、损失率增高,但当气流速度处于高水平的条件下,随着气流速度增加,气流场对籽粒和杂余的分离效果加强,杂余对籽粒的夹带作用变小,籽粒的损失率呈下降趋势;当振动频率处于高水平的条件下,籽粒损失率随气流速度的增加呈上升趋势,这是因为振动频率较大时,筛面对脱出物抛起能力变强,气流对脱出物清选效果增强,籽粒在筛面跳动次数减小、籽粒损失率增大。

各因素之间交互项作用对清洁率指标影响的响应曲面如图 9c、9d 所示。

当阶梯高度为 7.5 mm,振动频率为 5.15 Hz 时,在气流角一定的条件下,随着气流速度增加清洁率呈上升趋势,这是因为气流角一定的条件下,随着气流速度的增加,气流场对杂余的分离作用增强,籽粒清洁率变高。当气流速度在低水平的条件下,随着气流角的增加清洁率呈上升趋势,这是因为气流角的增加导致气流速度竖直向上的分速度增加,对杂

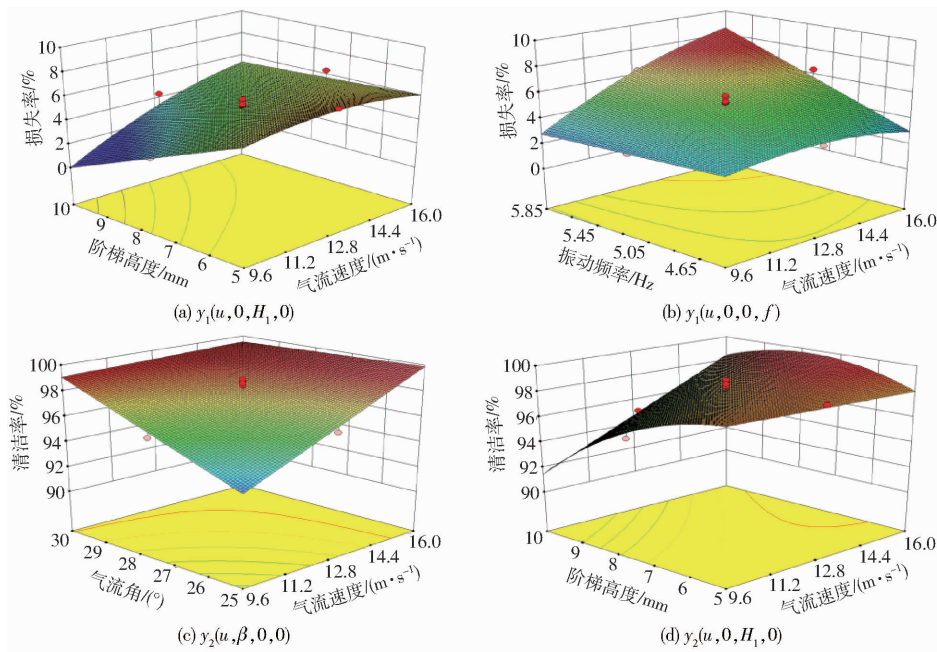


图 9 各因素对指标影响的响应曲面

Fig. 9 Response surfaces of influence of various factors on indicators

余抛起作用增强,使籽粒清洁率升高;在气流速度在高水平的条件下,随着气流角增加,清洁率呈下降趋势,这是因为气流角增大,气流速度水平方向的分速度变小,杂余向后推移能力减弱,在阶梯处由于脱出物间相互作用不能使其稳定向后推移导致杂余透筛,致使清洁率降低。

当气流角为 27.5°,振动频率为 5.15 Hz 时,在阶梯高度一定的条件下,随着气流速度增加籽粒清洁率呈上升趋势,这是因为气流速度的增加,气流场对杂余推移能力增强,籽粒清洁率增加。当气流速度处于低水平的条件下,随着阶梯高度增加,籽粒清洁率呈下降趋势,这是因为阶梯高度增加对阶梯后部振动筛气流的阻挡作用增强,筛子对杂余向后推移能力变弱,杂余透筛几率增加,籽粒清洁率变低。当气流速度处于高水平的条件下,随着阶梯高度的增加,籽粒清洁率呈先上升后下降趋势,这是因为当气流速度较高时,随着阶梯高度增加,阶梯对气流沿出风口方向的导向作用变强,杂余受到筛上气流场的作用增强,籽粒清洁率变高,当阶梯高度增加到一定程度时,气流在阶梯处被阻挡,杂余受到筛上气流场的作用减弱,籽粒清洁率变低。

3.6.3 参数组合最优方案

为得到阶梯筛最佳筛分作业参数,利用 Design-Expert 6.0 软件对指标回归模型进行约束优化求解,在各因素满足试验范围条件的情况下,限定籽粒清洁率和损失率不低于国家标准,建立参数化数学模型

$$\begin{cases} \min y_1 \\ \max y_2 \\ 9.6 \text{ m/s} \leq u \leq 16 \text{ m/s} \\ 25^\circ \leq \beta \leq 30^\circ \\ 5 \text{ mm} \leq H_1 \leq 10 \text{ mm} \\ 4.45 \text{ Hz} \leq f \leq 5.85 \text{ Hz} \end{cases} \quad (8)$$

优化结果为:当气流速度为 16 m/s,气流角 25°,阶梯高度 8.36 mm,振动频率 4.45 Hz 时,籽粒损失率为 1.69%,清洁率为 98.8%,指标均满足国家标准要求。

4 试验验证

对原有东北农业大学贯流式风筛清选装置试验台架进行改装,使其与 6 行玉米籽粒联合收获机清选装置保持一致,且试验参数均在 6 行玉米籽粒联合收获机可调范围内,如图 10 所示。根据优化结果加工 8.36 mm 阶梯高度筛体,通过风机和振动筛的驱动变频器、风机角度调节板调节气流速度、振动频率、气流角分别为 16 m/s、4.45 Hz、25°,与优化条件一致。称量不同类型玉米脱出物的质量然后均匀混合,试验前将脱出物均铺在抖动板上,每组试验在 5 s 持续喂入 25 kg 玉米脱出物,以保证喂入量为 5 kg/s。

试验参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机试验方法》,每组试验重复 5 次,并对其数据进行均值化处理,得到筛分后籽粒损失率为 2.12%,清洁率为 99.16%,其与仿真优化结果的相差分别为 0.43 个百分点和 0.36 个百分点。并与平面筛进

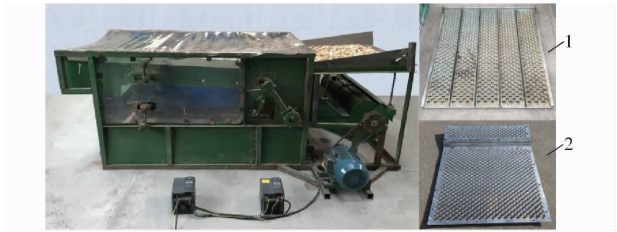


图 10 试验装置

Fig. 10 Experiment device

1. 平面贝壳筛 2. 阶梯贝壳筛

行对比,平面筛筛分后籽粒损失率为 3.26%,清洁率为 97.18%。

在筛孔率均为 43% 的条件下,与平面贝壳筛进行性能对比试验,试验结果如表 6 所示。相比于平面贝壳筛,阶梯式贝壳筛作业后籽粒损失率降低 1.14 个百分点,清洁率提高 1.98 个百分点,清选性能得到提高。

### 5 结论

(1)通过对筛上气流场中玉米脱出物抛出距离进行理论分析,得到阶梯筛设计依据。

(2)基于籽粒与斜面的碰撞理论设计籽粒阶梯

表 6 台架试验结果  
Tab. 6 Bench test results

| 序号  | 平面筛   |       | 阶梯筛   |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|
|     | 清洁率/% | 损失率/% | 清洁率/% | 损失率/% |
| 1   | 97.75 | 3.53  | 99.51 | 1.99  |
| 2   | 96.56 | 3.09  | 98.48 | 2.36  |
| 3   | 96.73 | 3.10  | 99.71 | 1.87  |
| 4   | 97.13 | 3.11  | 98.84 | 2.15  |
| 5   | 97.73 | 3.47  | 99.26 | 2.23  |
| 均值  | 97.18 | 3.26  | 99.16 | 2.12  |
| 标准差 | 0.49  | 0.20  | 0.45  | 0.17  |

缓冲带,使籽粒在阶梯处能够实现暂时“滞留”,杂余直接跃阶,实现籽粒对杂余水平分层,延缓籽粒向后推移运动,降低筛分后籽粒损失率。

(3)在筛面振幅为 19 mm 条件下,通过二次正交旋转组合试验,得到气流速度、气流角度、阶梯高度和振动频率分别为 16 m/s、25°、8.36 mm 和 4.45 Hz 时,籽粒损失率为 1.69%,清洁率为 98.8%,并通过台架性能试验验证了阶梯式振动筛性能。通过与平面贝壳筛的对比试验得出,阶梯式贝壳筛作业后籽粒损失率降低 1.14 个百分点,清洁率提高 1.98 个百分点,清选性能得到提高。

### 参 考 文 献

1 柴宗文,王克如,郭银巧,等. 玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系[J]. 中国农业科学,2017,50(11):2036-2043.  
CHAI Zongwen, WANG Keru, GUO Yinqiao, et al. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content[J]. China Agricultural Sciences,2017,50(11):2036-2043. (in Chinese)

2 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)

3 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)

4 任述光,谢方平,王修善,等. 4LZ-0.8 型水稻联合收割机清选装置气固两相分离作业机理[J]. 农业工程学报,2015,31(12):16-22.  
REN Shuguang, XIE Fangping, WANG Xiushan, et al. Gas-solid two-phase separation operation mechanism for 4LZ-0.8 rice combine harvester cleaning device[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(12):16-22. (in Chinese)

5 张敏,金诚谦,梁苏宁,等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(24):8-15.  
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(24):8-15. (in Chinese)

6 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)

7 杜家林. 复合结构条形筛面与铸造筛面[J]. 矿山机械,1990(11):39-41.

8 马征,李耀明,徐立章. 仿生非光滑筛面近筛层微观气流场研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):74-77,9.  
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Micro flow field on adjacent screen of bionic nonsmooth cleaning screen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):74-77,9. (in Chinese)

9 DONG K J, YU A B. Numerical simulation of the particle flow and sieving behavior on sieve bend/low head screen combination [J]. Minerals Engineering,2012,31:2-9.

10 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. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160916&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.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.

- 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. (in Chinese)
- 11 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM – CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43–51. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171106&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171106&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006.
- HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM – CFD [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43–51. (in Chinese)
- 12 马秋成, 雷林韬, 卢安舸, 等. 基于 CFD – DEM 耦合的莲子壳仁分离装置优化与试验分析 [J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 87–91.
- MA Qiucheng, LEI Lintao, LU Ange, et al. Simulation optimization and test of pneumatic separating device for lotus seed shell and kernel base [J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 87–91. (in Chinese)
- 13 蒋恩臣, 孙占峰, 潘志洋, 等. 基于 CFD – DEM 收获机分离室内谷物运动模拟与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 117–122. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140418&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140418&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.018.
- JIANG Enchen, SUN Zhanfeng, PAN Zhiyang, et al. Numerical simulation based on CFD – DEM and experiment of grain moving laws in inertia separation chamber [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 117–122. (in Chinese)
- 14 刘兴博, 叶彤, 杨金砖. 籽粒玉米收获机脱出物空气动力学特性分析及清选方法 [J]. 农机使用与维修, 2014(7): 17–18.
- 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 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150918&journal\\_id=jcsam](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.
- 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. (in Chinese)
- 17 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.
- 18 吕金庆, 王英博, 李紫辉, 等. 加装导流板的舀勺式马铃薯播种机排种器性能分析与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 19–28.
- LÜ Jinqing, WANG Yingbo, LI Zihui, et al. Performance analysis and experiment of cup-belt type potato seed-metering device with flow deflector [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 19–28. (in Chinese)
- 19 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120217&journal\\_id=jcsam](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.
- LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79–84. (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)