

# 玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验

王立军 李义博 郑招辉 武振超 于泳涛 刘天华

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为满足不断提高的玉米产量对玉米收获机清选能力的要求,提高筛面利用率、籽粒清洁率,降低籽粒损失率,运用理论分析设计了一种能够在清选筛上部空间实现籽粒与杂余在竖直方向上分层、水平方向上分散的杂余抛送器。在竖直方向上,采用 CFD-DEM 耦合方法对玉米脱出物在杂余抛送器作用下的分层现象进行数值模拟。选取杂余抛送器的周向拨指数量、拨指回转半径、轴向相邻指间距、拨辊旋转角速度为试验因素,以水平方向上杂余被抛送水平位移、籽粒与杂余被抛送水平重叠位移为性能指标,设计四因素五水平中心组合试验。通过响应曲面方法对试验结果进行分析,并利用 Design-Expert 对回归数学模型进行多目标优化。结果表明:各因素对杂余被抛送水平位移影响由强到弱顺序为:周向拨指数量、拨辊旋转角速度、轴向相邻指间距、拨指回转半径;各因素对籽粒与杂余被抛送水平重叠位移影响由强到弱顺序为:周向拨指数量、轴向相邻指间距、拨辊旋转角速度、拨指回转半径。杂余抛送器优化参数为:周向拨指数量 8 个,拨指回转半径 80.18 mm,轴向相邻指间距 12.44 mm,拨辊旋转角速度 15.41 rad/s。在清选装置入口风速为 12.8 m/s、入口方向角为 25°条件下,清选装置入口玉米脱出物量为 5~7 kg/s 时,增设杂余抛送器的清选装置籽粒清洁率均值为 97.20%~98.74%,籽粒损失率均值为 1.65%~1.82%,满足玉米收获机清选装置在玉米脱出物大喂入量下的清选国家标准要求。

**关键词:** 玉米收获机;清选装置;杂余抛送器

**中图分类号:** S225.5<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0124-13

## Design and Experiment of Mechanism of Throwing Impurity in Cleaning Device of Maize Grain Harvester

WANG Lijun LI Yibo ZHENG Zhaohui WU Zhenchao YU Yongtao LIU Tianhua  
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to improve cleaning performance of air-and-screen cleaning device in maize harvester, the mechanism of throwing impurity, which was installed in the upper space of cleaning screen to make maize mixture disperse in the horizontal direction and layer in the vertical direction, was invented to meet requirements of the increasing feeding quantity. The CFD-DEM coupling method was used to simulate the delamination of maize mixture with the help of mechanism of throwing impurity in the vertical direction. The experimental factors were the numbers of raking finger in circumferential direction, the rotation radii of raking finger, the spacing between fingers axially and the angular velocity of roll, and the performance indexes were the horizontal displacement of impurity threw and the overlapping displacement of maize mixture in the horizontal direction. The quadratic orthogonal rotational-combinational simulation test was designed. The test data were analyzed by the response surface method, and the regression mathematical models were multi-objectively optimized by using Design-Expert. The results showed that the numbers of raking finger in the circumferential direction had the most significant effect on the horizontal displacement of impurity threw, followed by the angular velocity of roll, then the spacing between fingers axially, finally the rotation radii of raking finger and the numbers of raking finger in the circumferential direction had the most significant effect on the overlapping displacement of maize mixture in the horizontal direction, followed by the spacing between fingers axially, then the angular velocity of roll, finally the rotation radii of raking finger. The optimized parameters of the mechanism of throwing impurity were the numbers of raking finger in the circumferential direction, which was 8, the rotation

收稿日期: 2018-10-31 修回日期: 2019-01-02

**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

radii of raking finger of 80.18 mm, the spacing between fingers axially of 12.44 mm and the angular velocity of roll of 15.41 rad/s. Under the condition of inlet velocities of 12.8 m/s and direction angle of the inlet of  $25^\circ$ , when the feed quantity of maize mixture at the entrance of cleaning device was 5 ~ 7 kg/s, the cleaning rate of maize with mechanism of throwing impurity in cleaning device was 97.20% ~ 98.74% and the loss rate of maize was 1.65% ~ 1.82%, which can meet the requirements of technical specification for quality evaluation of screening under the condition of large feed quantity.

**Key words:** maize harvester; cleaning device; mechanism of throwing impurity

## 0 引言

清选装置是玉米籽粒收获机清选系统的重要组成部分,一般分为纯气流清选装置和风筛式清选装置。风筛式清选装置具有清选效率高、适应性强、籽粒清洁率高等特点,在当今玉米收获机械中应用广泛<sup>[1-3]</sup>。TBATABAIFAR等<sup>[4]</sup>研究了谷物在筛面上实现水平分散所需要的气流压力和流量,分析了在连续喂入情况下脱出物筛分时的运动状态;MAERTENS等<sup>[5]</sup>为了研究谷物在清选分离时不同组分形式的流动,通过引入合适的守恒定律和概率密度分布函数,建立了整体分析模型;LI<sup>[6]</sup>运用离散元法研究不同粒度颗粒在不同筛孔分层透筛时行为和分层透筛规律;王立军等<sup>[7]</sup>采用CFD-DEM耦合仿真方法模拟风筛式清选装置中玉米脱出物在振动筛筛面上的运动状况;赵杰文等<sup>[8]</sup>研究了在水平气流中籽粒、茎秆和其他脱出物的运动形式,确定了谷粒下落沿气流方向的分布函数;赵京华等<sup>[9]</sup>对茎秆在低速气流作用下的受力进行测定,分析了各因素对茎秆与籽粒分层分离的影响规律;成芳等<sup>[10]</sup>研究了风筛式清选装置结构和运动参数对清选能力的影响规律,建立了曲柄转速、风机转速和出风口倾角对籽粒清洁率和损失率的数学模型,获得了优化参数,并进行了验证。

随着玉米单产的逐年提高,为了达到清选装置籽粒高清洁率和低损失率的清选能力要求,目前文献中多数依靠改进风筛式清选装置中平面往复振动筛的运动或结构参数<sup>[11-13]</sup>。本文提出在风筛式玉米清选装置清选筛上部空间安装杂余抛送器,通过CFD-DEM耦合方法研究玉米脱出物在杂余抛送器作用下的运动,通过仿真试验确定杂余抛送器最佳结构,并通过台架试验进行验证。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 增设杂余抛送器的清选装置

增设杂余抛送器的清选装置主要由杂余抛送器、吊杆、连杆、曲柄、带座轴承、机架和清选筛组成,整机结构如图1所示。

增设杂余抛送器的清选装置通过杂余抛送器、

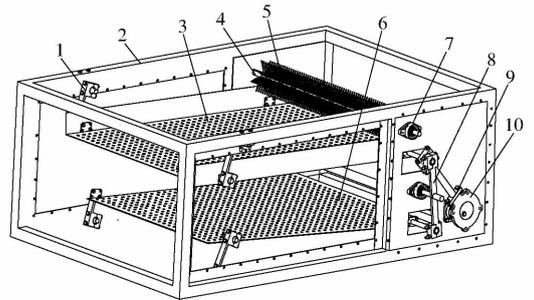


图1 增设杂余抛送器的清选装置结构图

Fig.1 Structure diagram of cleaning device with mechanism of throwing impurity

1. 上吊杆 2. 机架 3. 上圆孔筛 4. 杂余抛送器拨辊 5. 杂余抛送器拨指 6. 下圆孔筛 7. 带座轴承 8. 连杆 A 9. 连杆 B 10. 曲柄

风场和振动筛联合作用对玉米脱出物进行清选。杂余抛送器通过带座轴承套配在清选装置机架上,并与其相固接,其由直流电动机通过传动带带动拨辊工作,杂余抛送器上的拨指通过拨辊转动做回转圆周运动来完成对脱出物中杂余的抛送工作。风机和振动筛由直流电动机驱动,风机产生气流场将脱出物吹散,振动筛通过曲柄连杆机构周期往复运动完成对脱出物筛分工作。

### 1.2 杂余抛送器工作原理

如图2所示,杂余抛送器顺时针转动可对从物料抖动板落下的玉米脱出物进行初步清选,尺寸较大的茎秆和玉米芯在风场和拨指联合作用下被抛到振动筛的后部,而尺寸较小的籽粒与玉米芯从轴向相邻指间隙中漏出至振动筛筛面上。在整个清选过程中,杂余被持续抛起到玉米籽粒的上方,呈现垂直方向“分层”现象;玉米籽粒和杂余水平方向上向筛

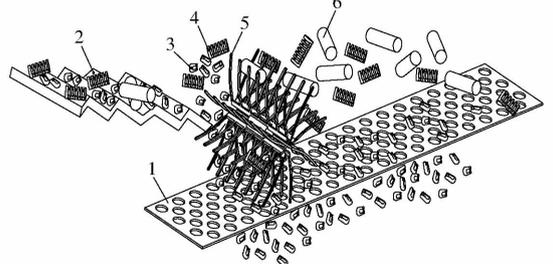


图2 杂余抛送器工作原理图

Fig.2 Working principle of mechanism of throwing impurity

1. 圆孔筛 2. 抖动板 3. 玉米籽粒 4. 玉米芯 5. 拨指 6. 玉米茎秆

后运动,呈现“分散”现象。杂余抛送器能够实现籽粒和杂余的初步分离,减少在风场作用下杂余对玉米籽粒的携带作用,降低玉米籽粒损失率;杂余被抛送至振动筛后部,使籽粒透筛几率变大,透筛时间变短,筛下籽粒清洁率提高。

## 2 玉米脱出物颗粒运动特性分析

玉米脱出物从抖动板落到旋转的杂余抛送器拨指上,随后玉米芯和茎秆被抛送至振动筛后部、籽粒漏至振动筛筛面进行透筛。为探究杂余抛送器对玉米脱出物颗粒在水平方向上被抛送位移的影响,建立脱出物颗粒运动学模型。整个玉米脱出物颗粒抛送过程可分为3个阶段:脱出物颗粒离开抖动板到达杂余抛送器拨指前的运动;脱出物颗粒在杂余抛送器拨指上的运动;脱出物颗粒被抛后在风场中的运动。

### 2.1 离开抖动板到达拨指前的运动分析

玉米脱出物颗粒离开抖动板运动到杂余抛送器拨指前,在风场中受力模型如图3所示,忽略颗粒所受空气阻力、颗粒之间的相互作用和其自旋性,颗粒仅受自身重力 $G$ 和风力 $F_w$ 作用<sup>[14]</sup>。

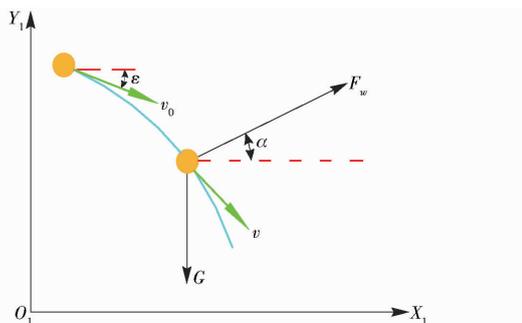


图3 玉米脱出物颗粒离开抖动板到达拨指前受力模型

Fig.3 Force model of maize mixture leaving tossing board before arriving at raking finger

玉米脱出物颗粒离开抖动板时的速度即进入清选装置的初始速度 $v_0$ 在 $X_1$ 和 $Y_1$ 方向的分速度分别为

$$v_{0X1} = v_0 \cos \varepsilon \quad (1)$$

$$v_{0Y1} = -v_0 \sin \varepsilon \quad (2)$$

式中  $\varepsilon$ ——颗粒离开抖动板时速度方向角, ( $^\circ$ )

玉米脱出物颗粒离开抖动板,运动时间 $t$ 后,速度为 $v$ ,其在 $X_1$ 和 $Y_1$ 方向的动力学微分方程分别为

$$m \frac{dv_{X1}}{dt} = F_w \cos \alpha \quad (3)$$

$$m \frac{dv_{Y1}}{dt} = F_w \sin \alpha - G \quad (4)$$

其中

$$F_w = k_p m u^2 \quad (5)$$

$$G = mg \quad (6)$$

$$k_p = \frac{g}{v_p^2} \quad (7)$$

式中  $m$ ——脱出物颗粒质量, kg

$g$ ——重力加速度,  $m/s^2$

$k_p$ ——漂浮系数,  $mm^{-1}$

$u$ ——气流速度,  $m/s$

$\alpha$ ——气流方向角, ( $^\circ$ )

$v_p$ ——漂浮速度,  $m/s$

对式(1)~(7)分析可知,在清选装置入口气流速度、气流方向角、脱出物颗粒自身漂浮速度一定时,颗粒离开抖动板到达拨指前的运动状态与其离开抖动板时的速度有关。

由文献[15]可知,通过CFD-DEM耦合仿真方法提取到玉米脱出物颗粒离开抖动板时竖直方向速度很小(小于0.1 m/s),水平速度为0.1~0.7 m/s。脱出物颗粒离开抖动板到达拨指前的运动轨迹如图4所示,颗粒进入清选装置的水平初速度决定其在水平方向位移,曲线1和曲线2代表水平初速度最小和最大杂余颗粒的运动轨迹。点 $P(L_p, 0)$ 为拨指指尖到振动筛筛面竖直距离最小点,该点为杂余颗粒是否能被拨指接住的临界位置。红色、绿色、蓝色颗粒分别代表玉米茎秆、玉米籽粒、玉米芯。

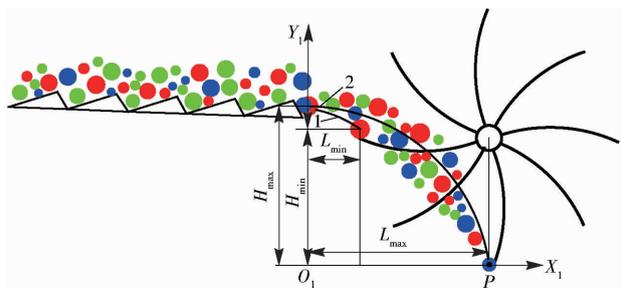


图4 脱出物颗粒离开抖动板到达拨指时运动示意图

Fig.4 Sketch of moving trajectory of maize mixture leaving tossing board before arriving at raking finger

脱出物颗粒以速度 $v_0$ 离开抖动板到达拨指前的运动学方程为

$$\begin{cases} L = v_0 t \cos \varepsilon + \frac{1}{2} \frac{dv_{X1}}{dt} t^2 \\ H = -v_0 t \sin \varepsilon + \frac{1}{2} \frac{dv_{Y1}}{dt} t^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $L$ ——颗粒离开抖动板到达拨指前在 $X_1$ 方向的位移, mm

$H$ ——颗粒离开抖动板到达拨指前在 $Y_1$ 方向的位移, mm

在清选装置入口气流速度为12.8 m/s、气流方向角为 $25^\circ$ 条件下,基于抖动板尾部高于上筛100 mm,振动筛振幅19 mm<sup>[15-16]</sup>,该过程脱出物颗粒竖直方向最小和最大位移分别为19 mm和

81 mm。通过公式(1)~(8)获得杂余颗粒离开抖动板到达拨指前最小和最大水平位移分别为  $L_{\min} = 70 \text{ mm}$ ,  $L_{\max} = 130 \text{ mm}$ 。

综上,为确保杂余抛送器拨指完全接住杂余颗粒,不发生漏撒,杂余抛送器轴心应安装在距离上筛竖直 100 mm,距离抖动板尾部水平 130 mm 位置。

## 2.2 在杂余抛送器拨指上的运动分析

当玉米脱出物颗粒离开抖动板运动到杂余抛送器拨指上,其在杂余抛送器拨指上的运动分为 2 个阶段:速度减小为 0 过程和加速运动到拨指指尖被抛出过程。脱出物颗粒在杂余抛送器拨指上减速和加速运动的受力模型如图 5 所示。在分析过程中不考虑脱出物颗粒之间的相互作用和空气阻力作用,图中以  $O_2X_2Y_2$  为定坐标系,以  $O'_2X'_2Y'_2$  为动坐标系,其中,动坐标轴  $O'_2Y'_2$  沿拨指方向向外为正并与拨指一起旋转。在拨指上运动的玉米脱出物颗粒受到重力  $G$ 、杂余抛送器拨辊旋转产生的离心力  $F_s$ 、拨指对其减速和加速时产生的摩擦力  $F_{f1}$  及  $F_{f2}$ 、拨指对其支持力  $F_N$ 、相对加速度产生的科氏力  $F_k$ 、风场对其产生的风力  $F_w$  作用<sup>[17-18]</sup>。

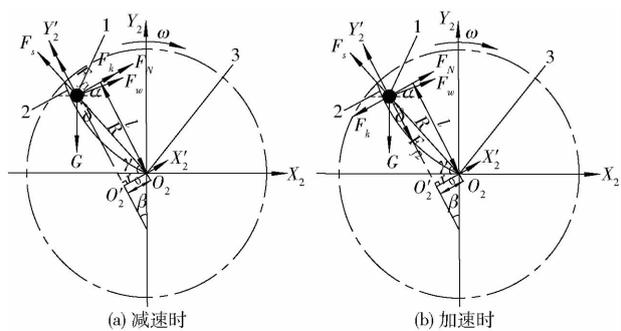


图 5 玉米脱出物颗粒在拨指上受力示意图

Fig. 5 Force diagrams of maize mixture on raking finger

1. 玉米脱出物颗粒 2. 杂余抛送器拨指 3. 杂余抛送器拨辊

通过对玉米脱出物颗粒进行受力分析,得其在减速时沿  $O'_2Y'_2$  轴方向的受力平衡方程为

$$m \frac{d^2 l}{dt^2} = F_s \cos \delta + F_{f1} - F_w \sin(\beta - \alpha) - G \cos \beta \quad (9)$$

玉米脱出物颗粒在加速时沿  $O'_2Y'_2$  轴方向的受力平衡方程为

$$m \frac{d^2 l}{dt^2} = F_s \cos \delta - F_w \sin(\beta - \alpha) - G \cos \beta - F_{f2} \quad (10)$$

$$\text{其中} \quad F_s = m \omega^2 R \quad (11)$$

$$F_k = 2m\omega \frac{dl}{dt} \quad (12)$$

$$F_{f1} = fN_1 = f(G \sin \beta + F_s \sin \delta - F_k - F_w \cos(\beta - \alpha)) \quad (13)$$

$$F_{f2} = fN_2 = f(G \sin \beta + F_s \sin \delta + F_k - F_w \cos(\beta - \alpha)) \quad (14)$$

由图 5 可知

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \gamma - \delta \quad (15)$$

$$r_0 = R \sin \delta \quad (16)$$

$$l = R \cos \delta \quad (17)$$

$$\gamma = \omega t \quad (18)$$

式中  $\omega$ ——杂余抛送器拨辊旋转角速度, rad/s

$N_1, N_2$ ——脱出物颗粒减速和加速时对拨指正压力, N

$R$ ——拨指运动回转半径, mm

$l$ ——脱出物颗粒在  $Y'_2$  方向径向位移, mm

$f$ ——摩擦因数

$\beta$ ——重力与拨指间夹角, ( $^\circ$ )

$\gamma$ ——拨指的转角, ( $^\circ$ )

$\delta$ ——离心力与拨指间夹角, ( $^\circ$ )

$r_0$ ——两坐标原点  $O_2, O'_2$  距离, mm

联立公式(9)~(18)得出玉米脱出物颗粒在杂余抛送器拨指上减速和加速时运动方程为

$$\frac{d^2 l}{dt^2} + 2f\omega \frac{dl}{dt} - \omega^2 R \cos \delta = j \sin(\omega t) + q \cos(\omega t) \pm \omega^2 f R \sin \delta \quad (19)$$

$$\text{其中} \quad j = k_\rho u^2 (\sin(\delta + \alpha) \mp f \cos(\delta + \alpha)) - g(\cos \delta \pm f \sin \delta) \quad (20)$$

$$q = k_\rho u^2 (\cos(\delta + \alpha) \pm f \sin(\delta + \alpha)) + g(\sin \delta \mp f \cos \delta) \quad (21)$$

式中“ $\pm, \mp$ ”上、下符号分别代表颗粒在杂余抛送器拨指上减速和加速状态参数符号。

由上述分析可知,当玉米脱出物颗粒在拨指某一位置时,所受风力、气流方向角、离心力与拨指间夹角一定,其在拨指上的运动与以下因素有关:拨辊旋转角速度、拨指运动回转半径、脱出物颗粒在拨指上运动时间等。玉米脱出物颗粒在拨指上的运动进一步影响其被抛出后在风场中的运动,进而影响脱出物颗粒在水平方向上的位移。

## 2.3 被抛后在风场中的运动分析

玉米脱出物颗粒从拨指上被抛出后,忽略其所受空气阻力及自身旋转引起周围气流变化,其在风场与重力场联合作用下在振动筛上部空间做类似斜抛运动,运动轨迹如图 6 所示。其中,  $A$  点为脱出物颗粒被抛射点,  $B$  点为脱出物颗粒运动最高点,  $H$  点为脱出物颗粒与筛面初次接触点。

玉米脱出物颗粒从  $A$  点运动到  $B$  点过程中,其运动学方程为

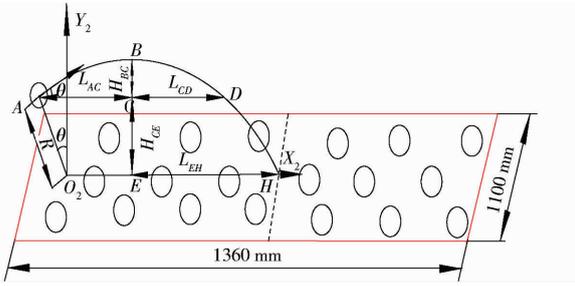


图6 玉米脱出物颗粒被抛后运动轨迹示意图

Fig. 6 Sketch of moving trajectory of maize mixture thresh

$$\begin{cases} F_w \sin\alpha - mg = ma_{Y2} \\ v_1 = \omega R \\ v_1 \sin\theta = a_{Y2} t \\ (v_1 \sin\theta)^2 = 2a_{Y2} H_{AB} \\ F_w \cos\alpha = ma_{X2} \\ L_{AB} = v_1 t \cos\theta + \frac{1}{2} a_{X2} t^2 \end{cases} \quad (22)$$

玉米脱出物颗粒从 B 点运动到 H 点过程中,其运动学方程为

$$\begin{cases} mg - F_w \sin\alpha = ma_{Y2} \\ v_{HY2}^2 = 2a_{Y2} (H_{AB} + H_{DH}) \\ v_{HY2} = a_{Y2} t \\ v_{BX2} = v_1 \cos\theta + a_{X2} t \\ L_{BH} = v_{BX2} t + \frac{1}{2} a_{X2} t^2 \end{cases} \quad (23)$$

式中  $a_{Y2}$ ——脱出物颗粒在  $Y_2$  方向加速度,  $m/s^2$

$v_1$ ——颗粒在拨指上被抛出时初速度,  $m/s$

$\theta$ ——脱出物颗粒最佳抛射角,  $(^\circ)$

$L_{AB}$ ——A 至 B 水平方向位移,  $mm$

$L_{BH}$ ——B 至 H 水平方向位移,  $mm$

$H_{AB}$ ——A 至 B 竖直方向位移,  $mm$

$H_{DH}$ ——D 至 H 竖直方向位移,  $mm$

$a_{X2}$ ——脱出物颗粒在  $X_2$  方向加速度,  $m/s^2$

$v_{HY2}$ ——脱出物颗粒在 H 点  $Y_2$  方向速度,  $m/s$

$v_{BX2}$ ——脱出物颗粒在 B 点  $X_2$  方向速度,  $m/s$

拨指抛送杂余的水平位移越远,籽粒透筛的几率就越大,虽然大部分籽粒通过拨指间隙漏至振动筛上实现透筛,仍有籽粒会被拨指抛送到出料口,导致籽粒损失率增加,因此应为这些籽粒留有一定水平距离保证其能够透筛。当入口气流速度为  $12.8 m/s$ ,气流方向角为  $25^\circ$  时,玉米籽粒在  $X_2$  方向速度最大值达到  $2.12 m/s$  仅需  $0.35 s$ <sup>[19-20]</sup>,参考玉米收获机中振动筛筛长为  $1360 mm$ ,结合籽粒在筛面运动学分析,本文取振动筛筛面长度  $1/2$  作为被抛玉米脱出物颗粒在水平方向运动的最大位移 ( $L_{AH} = L_{AC} + L_{EH} = 680 mm$ )。联立公式(5)~(7)、

(22)、(23) 得出脱出物颗粒从被抛点 A 至与筛面初次接触点 H 水平位移为

$$L_{AH} = \left( v_0 \cos\theta + \frac{k_p u^2 \cos\alpha v_0 \sin\theta}{k_p u^2 \sin\alpha - g} \right) \cdot \sqrt{\frac{2(g - k_p u^2 \sin\alpha) \left[ \frac{v_0^2 \sin^2\theta}{2(k_p u^2 \sin\alpha - g)} + H_{CE} \right]}{g - k_p u^2 \sin\alpha}} + \frac{v_0^2 \sin\theta [2\cos\theta(k_p u^2 \sin\alpha - g) + k_p u^2 \sin\theta \cos\alpha]}{2(k_p u^2 \sin\alpha - g)} + \frac{k_p u^2 \cos\alpha \left[ \frac{v_0^2 \sin^2\theta}{2(k_p u^2 \sin\alpha - g)} + H_{CE} \right]}{g - k_p u^2 \sin\alpha} \quad (24)$$

式中  $H_{CE}$ ——C 至 E 竖直方向位移,  $mm$

将相应数据代入公式(24)中,得出被抛脱出物颗粒在水平方向从 A 点运动到 H 点,即运动最大位移条件下,拨指运动回转半径 R 与最佳抛射角  $\theta$  关系式为

$$L_{AH} = 1.414 \sqrt{34.56(R\sin\theta + 0.0316)^2 + R\cos\theta} - 12.41R\cos\theta + 11.26R\sin\theta + R^2 \sin\theta (69.12\cos\theta + 178.18\sin\theta) + 0.418 \quad (25)$$

## 2.4 拨指曲线设计

拨指曲线可以看作是由无数个脱出物颗粒最佳抛射点集合形成的线条,其方程为颗粒最佳抛射点横纵坐标的函数方程。最佳抛射点为玉米脱出物任意颗粒落到拨指上任意位置,在水平方向均能达到最大位移  $L_{AH} = 680 mm$  时,颗粒在拨指上的抛射位置坐标如图6所示。在坐标系  $O_2 X_2 Y_2$  中,脱出物颗粒最佳抛射点坐标  $A(x, y)$ ,其中  $x = R\sin\theta$ ,  $y = R\cos\theta$ 。假设脱出物颗粒所受风力保持不变,拨指某一回转半径 R 和该回转半径下的颗粒最佳抛射角  $\theta$  决定颗粒最佳抛射点坐标和水平方向上加速运动的位移。将脱出物颗粒最佳抛射点横、纵坐标  $x = R\sin\theta$ 、 $y = R\cos\theta$  代入到公式(25)中,得到拨指曲线方程为

$$178.18x^2 + 11.26x - 12.41y + 69.12xy + 1.414 \sqrt{34.56(x + 0.0316)^2 + y} - 0.262 = 0 \quad (26)$$

## 3 仿真试验

### 3.1 增设杂余抛送器的清选装置模型

6 行玉米收获机中风筛式清选装置主要结构参数为:长度  $1850 mm$ ,高度  $925 mm$ ,宽度  $1100 mm$ ,清选装置内振动筛上筛和下筛均为圆孔筛,尾筛为贝壳筛,上筛、下筛长度均为  $1360 mm$ ,尾筛长度  $280 mm$ ,筛体厚度  $2 mm$ ,尾筛筛面安装倾角为

3.5°,上筛的振动方向角为 136.6°,下筛的振动方向角为 43.4°。原有风筛式清选装置中抖动板为阶梯板,其与水平面夹角为 1.74°,阶梯板尾部与上筛面垂直距离约 75 mm。根据文献[16]要求,抖动板尾部高于上筛面距离最大为 100 mm。

在一定情况下,物料喂入口越高,越有利于更多的杂余被抛送至振动筛后部,现将增设杂余抛送器的清选装置中抖动板位置调整到距离上筛面 100 mm 处,抖动板与水平面夹角保持不变。考虑计算机运算能力,清选装置宽度选取 100 mm 进行建模,其物理模型如图 7 所示。运用 CATIA 软件对增设杂余抛送器的清选装置进行三维建模,将其保存为 IGS 格式并导入 Gambit 软件进行网格划分,运用局部网格重构法作为动网格 (Moving mesh) 的更新计算方法。

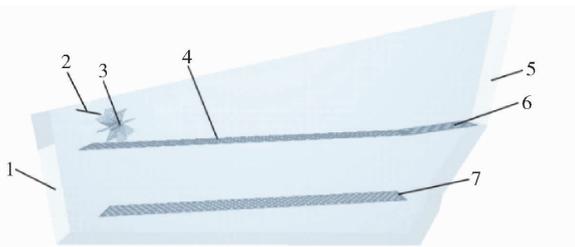


图 7 增设杂余抛送器的清选装置模型

Fig. 7 Model of cleaning device with mechanism of throwing impurity

- 1. 气流入口 2. 抖动板 3. 杂余抛送器 4. 上圆孔筛 5. 杂余出口
- 6. 贝壳尾筛 7. 下圆孔筛

### 3.2 玉米脱出物成分及其模型

玉米脱出物的成分以及各成分的质量分数如图 8 所示<sup>[21]</sup>。以德美亚 1 号为参考,利用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,在 CATIA 软件中将颗粒模型云点图转化为 IGS 格式,导入到 EDEM 软件中进行小球填充,玉米脱出物实体及模型如图 9 所示。

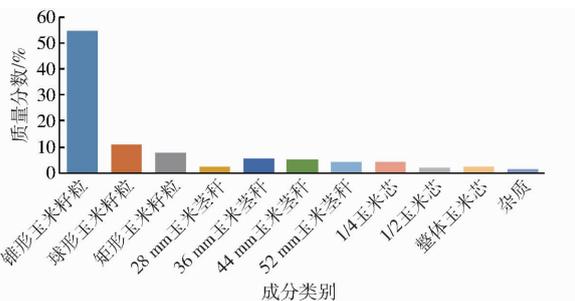


图 8 玉米脱出物各成分质量分数

Fig. 8 Percentage diagram of various components in maize mixture

### 3.3 仿真参数设置

本研究采用 CFD-DEM 耦合的方法,设定各材料力学特性及各材料间接触属性如表 1 和表 2 所示<sup>[15]</sup>。在 EDEM 中各材料接触模型选用 Hertz-



图 9 玉米脱出物实体及模型

Fig. 9 Models of maize particles, cob and stalk

Mindlin (no-slip) 无滑动模型,设定增设杂余抛送器的清选装置中振动筛振动频率为 5.15 Hz,振幅为 19 mm,清选装置入口脱出物量分别为 5、6、7 kg/s。由于原装置入口气流速度范围为 9.6 ~ 16 m/s,取其速度中心值  $u = 12.8$  m/s 作为本研究清选装置入口气流速度。为保证风机入口气流流速最大,本文取风机入口导风板角度为 25°。EDEM 中时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。

表 1 材料力学特性参数

Tab. 1 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
拨指(钢)	0.30	700.00	7 800

表 2 材料间接触属性参数

Tab. 2 Interaction properties of different materials

材料	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
玉米籽粒-玉米籽粒	0.31	0.79	0.01
玉米籽粒-玉米茎秆	0.27	0.71	0.01
玉米籽粒-玉米芯	0.25	0.68	0.01
玉米籽粒-筛面(钢)	0.54	0.48	0.01
玉米茎秆-玉米茎秆	0.21	0.65	0.01
玉米茎秆-玉米芯	0.22	0.68	0.01
玉米茎秆-筛面(钢)	0.29	0.62	0.01
玉米芯-玉米芯	0.22	0.78	0.01
玉米芯-筛面(钢)	0.33	0.70	0.01
玉米籽粒-拨指(钢)	0.54	0.48	0.01
玉米茎秆-拨指(钢)	0.29	0.62	0.01
玉米芯-拨指(钢)	0.33	0.70	0.01

### 3.4 杂余抛送器性能指标的选取

玉米籽粒与尺寸较小的玉米芯从杂余抛送器拨指间隙中漏到振动筛筛面上,尺寸较大的杂余被抛送至振动筛后部,可实现籽粒和杂余的初步分离,减少杂余对籽粒的携带作用。水平方向上杂余被抛送得越远,其在振动筛上透筛的几率就越小,玉米籽粒

透筛的几率就越大,玉米籽粒清洁率就越高。杂余与籽粒在水平方向上运动重叠的位移越小,杂余对籽粒的携带作用越小,玉米籽粒损失率就越低。因此,本文以杂余被抛送水平位移  $y_1$  (mm)、杂余与籽粒被抛送水平位移重叠量  $y_2$  (mm) 作为杂余抛送器结构设计的直接指标。玉米籽粒清洁率和损失率作为增设杂余抛送器的清选装置与未加杂余抛送器清选装置对比的间接性能指标。

### 3.5 单因素仿真试验

基于玉米脱出物颗粒在杂余抛送器拨指上运动分析,开展以杂余抛送器周向拨指数量、拨指回转半径、轴向相邻指间距、拨辊旋转角速度的单因素试验,试验以杂余被抛送水平位移、杂余与籽粒被抛送水平位移重叠量为清选性能评价指标,寻求各因素对杂余抛送器清选性能的影响规律<sup>[22-25]</sup>。单因素试验各因素所取水平以预试验结果为依据,如表3所示。在进行单因素试验时,其他因素水平选取范围中心值。

表3 单因素试验因素水平

Tab.3 Experimental factors and levels

水平	因素			
	周向拨指数量/个	拨指回转半径/mm	轴向相邻指间距/mm	拨辊旋转角速度/(rad·s <sup>-1</sup> )
1	4	65	9	10
2	5	70	10	12
3	6	75	11	14
4	7	80	12	16
5	8	85	13	18
6	9	90	14	20
7	10	95	15	22

#### 3.5.1 周向拨指数量

为使从抖动板抖落下的杂余能被拨指接住不发生漏抛,周向拨指数量不能排布太少。为减小小拨指与玉米籽粒间刚性碰撞而导致玉米籽粒损伤以及从轴向拨指间隙中漏出几率减小,周向拨指数量不能分布太多。现将周向拨指数量设置为4~10个。通过单因素试验可得:周向拨指数量从6个增加到10个,杂余被抛送水平位移范围为205~700 mm,杂余被抛送水平位移随周向拨指数量增加逐渐增大,但周向拨指数量从8个增加到10个时,递增幅度较小;籽粒与杂余水平位移重叠量为-35~35 mm,两者水平位移重叠量随周向拨指数量增加呈先减小后增大趋势,如图10所示。当周向拨指数量小于6个时,杂余被抛送水平位移较小且存在杂余与籽粒水平位移重叠现象,拨指对杂余的抛送作用减弱。因此,将周向拨指数量设置为6~10个。

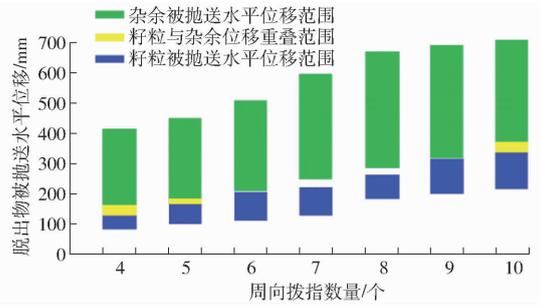


图10 不同周向拨指数量时玉米脱出物被抛送水平位移  
Fig.10 Horizontal displacement of maize mixture threw under different numbers of raking finger in circumferential direction

#### 3.5.2 拨指回转半径

为保证拨指完全接住玉米脱出物颗粒,不发生漏撒现象,拨指回转半径应大于脱出物颗粒在水平方向的最大位移与最小位移之差,即  $R \geq L_{\max} - L_{\min} = 60$  mm。拨指曲线形状由参数化方程(26)定义(以拨指曲线在直角坐标系第二象限为例),根据预试验结果,确定拨指回转半径范围60~90 mm;参照最佳抛射点定义,由拨指回转半径  $R$  与最佳抛射点  $A(x, y)$  关系,可得拨指回转半径在60~90 mm时,拨指具体形状( $R_{60}$ 、 $R_{65}$ 、 $\dots$ 、 $R_{90}$ 分别表示拨指回转半径60、65、 $\dots$ 、90 mm)如图11所示。

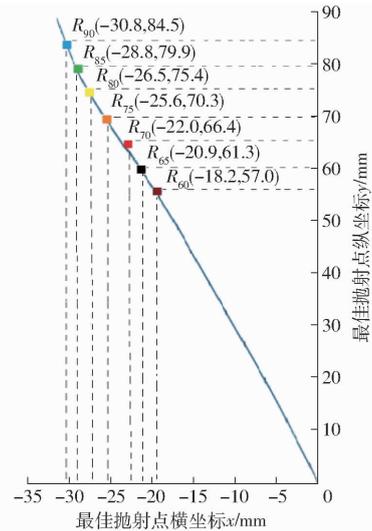


图11 玉米脱出物颗粒最佳抛射点示意图

Fig.11 Diagram of the best position for throwing maize mixture

通过拨指回转半径单因素试验可得:拨指回转半径在70~90 mm区间内,拨指对杂余的水平抛送位移范围为170~670 mm,杂余水平抛送位移随拨指回转半径增大先增后减;籽粒与杂余水平位移重叠量为-45~39 mm,两者水平位移重叠量先减后增。当拨指回转半径在其它情况下,杂余被抛送水平位移较小且杂余与籽粒水平位移重叠量较大,如图12所示。因此,将杂余抛送器回转半径范围设置

为 70 ~ 90 mm。

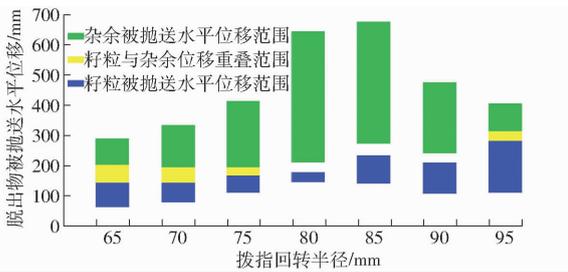


图 12 不同拨指回转半径时玉米脱出物被抛送水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of maize mixture threw under different rotation radii of raking finger

### 3.5.3 轴向相邻指间距

在玉米脱出物中,玉米籽粒形状主要分为球形、矩形、锥形<sup>[26]</sup>。3种玉米籽粒立体尺寸主要集中在 9 ~ 15 mm。保证籽粒能够顺利从周向相邻拨指间隙漏出,即立体尺寸最大的颗粒漏出其它形状的颗粒便可顺利漏出。通过单因素试验可得:轴向相邻指间距从 11 mm 增加到 15 mm,杂余被抛送水平位移从 697 mm 减小到 165 mm,杂余被抛送水平位移随轴向相邻指间距增大而逐渐减小,变化趋势较缓;籽粒与杂余水平位移重叠量为 -45 ~ 30 mm,其随轴向相邻拨指间距增大呈先减小后增大趋势,如图 13 所示。在轴向相邻指间距小于 11 mm 时,杂余虽抛送水平距离较远,但籽粒与杂余水平重叠位移较大,杂余对籽粒携带作用较大,籽粒损失率增大。综上,轴向相邻指间距范围设置为 11 ~ 15 mm。

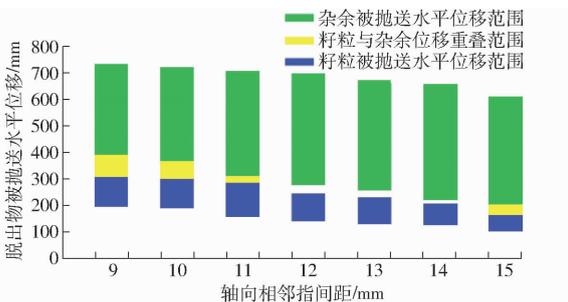


图 13 不同轴向相邻指间距时玉米脱出物被抛送水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement of maize mixture threw under different spacings between raking fingers

### 3.5.4 拨辊旋转角速度

当拨指指尖最小线速度大于筛面水平方向最大速度时,有利于将玉米脱出物颗粒向筛后抛送<sup>[27]</sup>。清选装置中平面往复振动筛面水平方向速度范围为 -0.96 ~ 1.12 m/s<sup>[26]</sup>,故拨指指尖线速度应大于上述筛面水平速度最大值 1.12 m/s。当拨指指尖线速度大于 1.12 m/s,拨指回转半径  $R = 80$  mm 为中心值时,根据拨指指尖线速度表达式  $v_1 = \omega R$ ,所对应的拨辊旋转角速度应大于 14 rad/s。为更加全面地

获得拨指旋转角速度对被抛脱出物水平位移的影响,根据预试验结果扩大拨辊旋转角速度范围至 10 ~ 22 rad/s。

通过拨辊旋转角速度单因素试验可得:拨辊旋转角速度在 12 ~ 20 rad/s 区间内,拨指对杂余的水平抛送位移范围为 165 ~ 650 mm,随着拨辊旋转角速度的增大,杂余被抛送水平位移呈先增大后减小趋势,籽粒与杂余在水平方向位移重叠量为 -68 ~ 44 mm,随着拨辊旋转角速度的增大,呈现先减小后增大趋势,如图 14 所示;当拨辊旋转角速度小于 12 rad/s 或大于 20 rad/s 时,杂余被抛送水平位移较小且籽粒与杂余水平位移重叠量较大,籽粒透筛几率减小,杂余对籽粒携带作用增强,使籽粒清洁率减小、损失率增大。因此将拨辊旋转角速度设置为 12 ~ 20 rad/s。

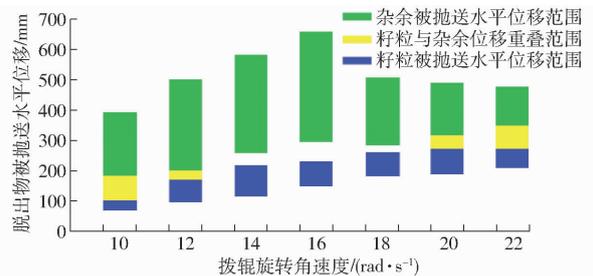


图 14 不同拨辊旋转角速度时玉米脱出物被抛送水平位移

Fig. 14 Horizontal displacement of maize mixture threw at different angular velocities of roll

## 3.6 多因素仿真试验

### 3.6.1 试验设计

依据单因素试验确定杂余抛送器周向拨指数量  $x_1$ 、拨指回转半径  $x_2$ 、轴向相邻指间距  $x_3$ 、拨辊旋转角速度  $x_4$  为试验因素,以杂余被抛送水平位移  $y_1$ 、杂余与籽粒水平位移重叠量  $y_2$  为试验指标,杂余被抛送水平位移  $y_1$  计算公式为

$$y_1 = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (27)$$

式中  $X_i$ ——第  $i$  个杂余水平方向上被抛送位移, mm

$n$ ——水平方向上杂余数量

采用四因素五水平中心组合设计安排试验,试验因素编码如表 4 所示。

### 3.6.2 玉米脱出物被抛送过程

图 15 为在周向拨指数量 8 个、轴向相邻指间距 13 mm、拨指回转半径 80 mm、拨辊旋转角速度 16 rad/s 条件下,玉米脱出物在杂余抛送器抛送作用下的运动状态,图中红色、绿色、蓝色颗粒分别表示玉米茎秆、玉米籽粒和玉米芯。在时间为 0.35 s

表4 试验因素编码

Tab.4 Experimental factors and codes

编码	因素			
	周向拨指数量 $x_1$ /个	拨指回转半径 $x_2$ /mm	轴向相邻指间距 $x_3$ /mm	拨辊旋转角速度 $x_4$ /(rad·s <sup>-1</sup> )
2	6	70	11	12
1	7	75	12	14
0	8	80	13	16
-1	9	85	14	18
-2	10	90	15	20

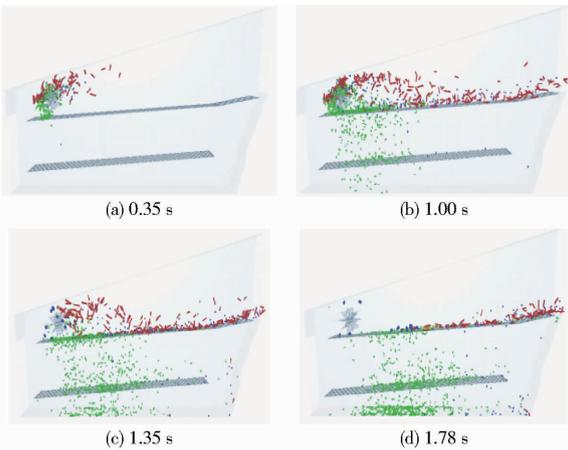


图15 玉米脱出物在杂余抛送器下被抛送状态  
Fig.15 Status of maize mixture throw with help of mechanism of throwing impurity

时,脱出物在杂余抛送器作用下实现了初步分离,玉米籽粒从轴向相邻指间隙中漏出至振动筛上开始透筛,杂余在拨指抛扬作用下开始向筛后运动;在时间1.00~1.35 s内,籽粒和杂余在振动筛上呈现“垂直分层、水平分散”效果最为明显,如图15b所示。在时间为1.78 s时,大部分籽粒已经完成透筛,小部分籽粒与杂余在水平方向上运动位移存在重叠且重叠位移较小。杂余抛送器使杂余对籽粒的携带作用减小,从而籽粒损失率减小;使籽粒透筛几率增大,从而籽粒清洁率增大。

3.6.3 试验结果分析

(1) 杂余被抛送水平位移回归模型与响应面分析  
使用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据分析

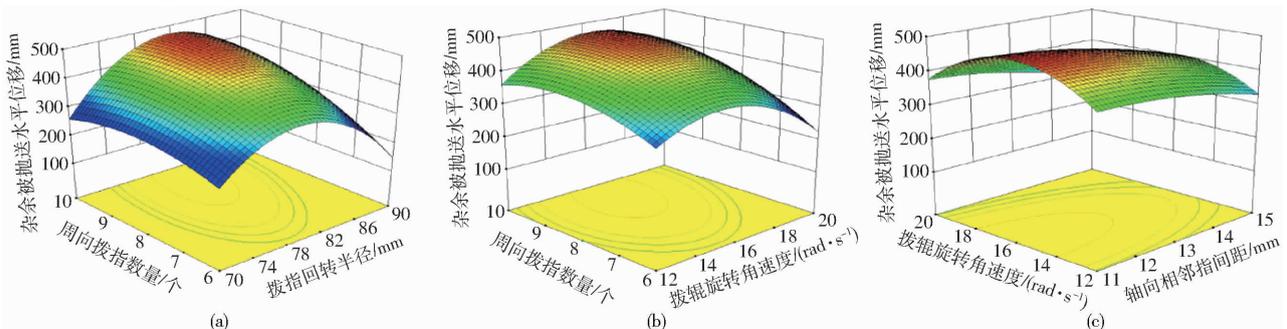


图16 各因素对杂余被抛送水平位移的响应曲面

Fig.16 Response surfaces of all factors on horizontal displacement of maize impurity throw

及拟合后可知:模型显著性检验  $F$  值为 1 114.86,  $p$  值小于 0.000 1,该模型极显著;失拟项  $p = 0.460 5 > 0.05$ ,残差项不显著,该回归模型成立。 $x_1 x_2$ 、 $x_1 x_4$ 、 $x_3 x_4$ 对指标影响均显著,其余交互项对其不显著。各因素对杂余被抛送水平位移影响由强到弱的顺序为: $x_1$ 、 $x_4$ 、 $x_3$ 、 $x_2$ 。进行方差分析后可得各因素对杂余被抛送水平位移的回归数学模型为

$$y_1 = 461.25 + 26.29x_1 - 1.87x_2 - 19.96x_3 - 8.04x_4 + 11.56x_1x_2 + 6.94x_1x_4 - 1.69x_3x_4 - 11.14x_1^2 - 41.51x_2^2 - 4.39x_3^2 - 24.14x_4^2 \quad (R^2 = 0.998) \quad (28)$$

各因素对杂余被抛送水平位移的响应曲面如图16所示。由图16a可知,当拨辊旋转角速度为16 rad/s,轴向相邻指间距为13 mm时,在周向拨指数量一定的条件下,杂余被抛送水平位移随拨指回转半径增大呈先增大后减小趋势。这是因为随着拨指回转半径增大,拨指对杂余抛送作用增强,杂余被抛出时速度增大,在做类似斜抛运动的水平分速度变大,杂余在水平方向上被抛送位移变大,但是,当拨指回转半径处于高水平时,杂余被抛出时速度变大,做类似斜抛运动的竖直分速度变大,杂余被抛竖直位移变大,由于风筛式清选装置空间结构限制,导致杂余极易撞到清选装置上顶板而反弹到清选装置的振动筛上,不能做完整类似斜抛运动,水平位移减小。

由图16b可知,在轴向相邻指间距为13 mm,拨指回转半径为80 mm,周向拨指数量一定的条件下,拨辊旋转角速度处于12~16 rad/s区间内,杂余被抛送水平位移随拨辊旋转角速度的增大而增大;拨辊旋转角速度处于16~20 rad/s区间内,杂余被抛送水平位移随拨辊旋转角速度的增大有减小的趋势。这是因为拨辊旋转角速度处于低水平时,随着拨辊旋转角速度的不断增大,拨指对杂余抛送作用增强,杂余被抛出时的线速度增大,杂余在做类似斜抛运动的水平分速度、水平位移变大,故杂余被抛送水平位移与拨辊旋转角速度呈正相关;拨辊旋转角

速度处于高水平时,随着拨辊旋转角速度增大,杂余被抛甩的竖直高度就越大,碰到清选室上顶板的几率就越大,不能做完整加速运动的杂余水平位移减小。

由图 16c 可知,在周向拨指数量为 8 个,拨指回转半径为 80 mm,无论拨辊旋转角速度处于低水平还是高水平,杂余被抛送水平位移均随轴向相邻指间距增大而减小。这是因为随着轴向相邻指间距增大,部分杂余将从相邻指间隙中漏出,拨指对其抛扬几率和强度均变小,未能被拨指抛送的杂余水平位移减小;其他条件不变,在轴向相邻指间距一定时,杂余被抛送水平位移随拨辊旋转角速度增大呈先增大后减小趋势。

(2) 杂余与籽粒被抛送水平位移重叠量回归模型与响应面分析

经试验数据分析及拟合后可知:模型显著性检验  $F$  值为 152.46,  $p$  值小于 0.0001,该模型极显著;失拟项  $p = 0.4071 > 0.05$ ,残差项不显著,说明该回归模型成立。 $x_1, x_2, x_1x_3, x_1x_4$  对指标影响均显著。各因素对被抛籽粒与杂余水平重叠位移影响由强到弱的顺序为: $x_1, x_3, x_4, x_2$ 。进行方差分析后可得各因素对杂余与籽粒被抛送水平位移重叠量回归数学模型为

$$y_2 = -59.83 + 12.04x_1 - 2.88x_2 + 4.12x_3 + 9.54x_4 + 3.19x_1x_2 + 6.19x_1x_3 + 7.94x_1x_4 + 10.07x_1^2 + 19.20x_2^2 + 8.45x_3^2 + 12.57x_4^2 \quad (R^2 = 0.986) \quad (29)$$

所得各因素对杂余与籽粒被抛送水平位移重叠量的响应曲面如图 17 所示。由图 17a 可知,在拨辊旋转角速度为 16 rad/s,轴向相邻指间距为 13 mm,拨指回转半径一定的条件下,随着周向拨指数量增多籽粒与杂余水平重叠位移呈现先减小后增大趋势。这是因为当周向拨指数量较少时,杂余抛送器拨指不能全部接住从抖动板上抖落的玉米脱出物,使部分脱出物不能受到杂余抛送器拨指抛送作用而直接运动到振动筛筛面上,籽粒和杂余未能完成杂

余抛送器初步清选,两者水平运动位移存在较大重叠;当周向拨指数量较多时,杂余抛送器拨指对杂余抛扬作用加强,但是部分籽粒会在杂余抛送器拨指抛扬或碰撞作用下运动到振动筛后部,致使与被拨指抛送的杂余产生“汇合”,杂余对籽粒携带作用增强,两者水平重叠位移变大。

如图 17b 所示,在拨辊旋转角速度为 16 rad/s,拨指回转半径为 80 mm,周向拨指数量一定的条件下,籽粒与杂余水平重叠位移随轴向相邻指间距的增大呈现先减小后增大的趋势。这是因为当轴向相邻指间距较小时,拨指对杂余和籽粒的抛扬作用均加强,玉米籽粒未能通过轴向相邻指间隙漏至振动筛上,而是在拨指的抛扬作用下同杂余一起抛掷到振动筛后部,杂余对籽粒的携带作用变强,因此,两者的水平方向重叠位移变大;当轴向相邻指间距较大时,拨指对杂余和籽粒的抛扬作用减弱,部分杂余未能到达拨指指尖位置就从轴向相邻指间隙中漏出或者被抛出,其不能作完整的类似斜抛运动,水平位移减小,杂余和籽粒的水平位移重叠量将增大,杂余对籽粒携带作用变强,籽粒损失率增大。

如图 17c 所示,在轴向相邻指间距为 13 mm,拨指回转半径为 80 mm,周向拨指数量一定的条件下,籽粒与杂余水平重叠位移均随拨辊旋转角速度的增大先减小后增大。这是因为当拨辊旋转角速度较小时,杂余在水平方向上做匀加速直线运动的初速度变小,杂余向筛后运动的能力减弱,水平位移将减小,同时,从轴向相邻指间隙中漏出的籽粒在振动筛振动作用下向筛后移动,两者汇聚相互作用,杂余携带籽粒向后移动,因此重叠位移较大;当拨辊旋转角速度较大时,杂余在竖直方向做匀减速的初速度变大,杂余向上的抛送位移也将增大,风筛式清选装置的内部空间限制了杂余向上运动,使其碰撞至顶板上被反弹至振动筛上,阻挡籽粒向筛后运动,使籽粒透筛几率减小,杂余被抛送的能力减弱。

### 3.7 参数优化

为使杂余抛送器抛扬性能达到最优,利 Design-

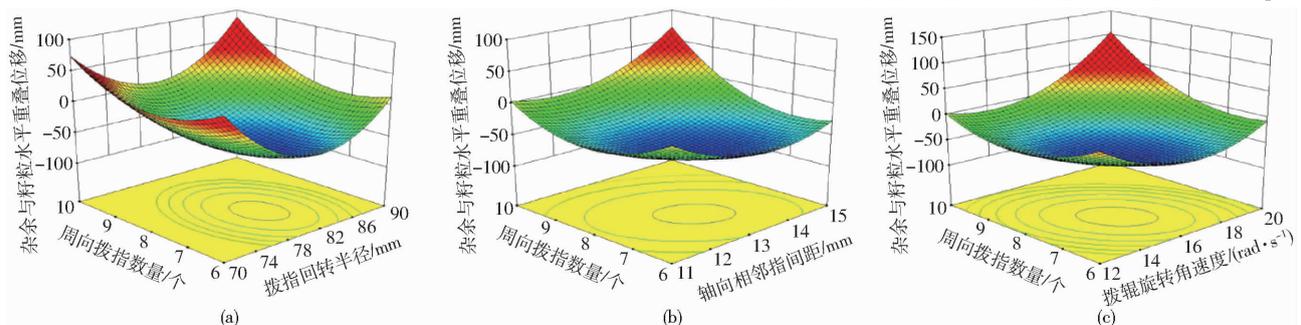


图 17 各因素对杂余与籽粒被抛送水平位移重叠量的响应曲面

Fig. 17 Response surfaces of all factors on overlapping displacement between maize particles and impurity

Expert 8.0.6 软件对试验参数进行优化,在各因素满足试验范围条件下,限定玉米籽粒清洁率和损失率均满足国家标准,建立其约束数学模型为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ \min y_2 \\ \text{s. t.} \end{cases} \begin{cases} 6 \text{ 个} \leq x_1 \leq 10 \text{ 个} \\ 70 \text{ mm} \leq x_2 \leq 90 \text{ mm} \\ 11 \text{ mm} \leq x_3 \leq 15 \text{ mm} \\ 12 \text{ rad/s} \leq x_4 \leq 20 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (30)$$

通过仿真优化得杂余抛送器抛扬性能最优参数组合:周向拨指数量 8 个,拨指回转半径 80.18 mm,轴向相邻指间距 12.44 mm,拨辊旋转角速度 15.41 rad/s,此条件下,籽粒损失率为 1.4%,清洁率为 99.21%,均满足玉米清选国家标准要求。

## 4 台架试验

基于杂余抛送器拨指曲线及仿真优化参数结果,加工周向拨指数量为 8 个、拨指回转半径取整为 80.0 mm、轴向相邻指间距近似为 12.5 mm 的杂余抛送器。改进贯流式风筛清选装置试验台架,使其与 6 行玉米收获机清选装置保持一致,如图 18 所示。通过调节控制杂余抛送器、振动筛和贯流风机的变频器、风机角度调节板,使杂余抛送器旋转角速度、振动筛振动频率、入口气流速度和入口气流方向角与所优化参数保持一致。

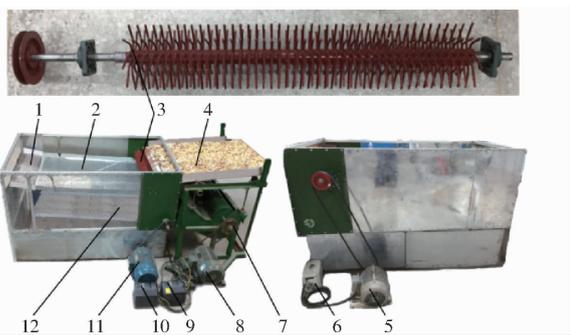


图 18 试验装置

Fig. 18 Experiment device

1. 贝壳尾筛 2. 圆孔上筛 3. 杂余抛送器 4. 抖动板 5. 杂余抛送器电机
6. 杂余抛送器变频器 7. 贯流风机 8. 贯流风机电机
9. 贯流风机变频器 10. 振动筛变频器 11. 振动筛电机
12. 圆孔下筛

依据玉米脱出物各成分比例,称量玉米脱出物各成分然后均匀混合,试验前将脱出物均匀铺在抖动板上,每组试验在 5 s 内连续喂入 25、30、35 kg 玉米脱出物,以保证清选装置入口脱出物量为 5、6、7 kg/s。试验参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机试验方法》进行,每组试验重复 5 次,并对数据进行均值化处理。

当清选装置入口脱出物量为 5 kg/s 时,增设杂余抛送器的清选装置与未加杂余抛送器清选装置进行性能对比试验,结果如表 5 所示。未加杂余抛送器的清选装置籽粒清洁率均值为 97.08%,籽粒损失率均值为 2.26%;增设杂余抛送器的清选装置籽粒清洁率均值为 98.74%,籽粒损失率均值为 1.65%。籽粒清洁率增加了 1.66 个百分点,籽粒损失率降低了 0.61 个百分点。

表 5 台架试验结果

Tab. 5 Results of tests

序号	增设杂余抛送器清选装置		未加杂余抛送器清选装置	
	清洁率	损失率	清洁率	损失率
1	98.72	1.96	97.00	2.35
2	99.32	1.33	96.64	1.99
3	97.97	1.52	97.32	2.25
4	99.10	1.78	97.66	2.54
5	98.60	1.66	96.79	2.16
均值	98.74	1.65	97.08	2.26
标准差	0.47	0.22	0.37	0.18

在相同试验条件下,当清选装置入口脱出物量为 6 kg/s 时,未加杂余抛送器的清选装置籽粒清洁率均值为 96.52%,籽粒损失率均值为 2.40%,增设杂余抛送器的清选装置籽粒清洁率均值为 97.91%,籽粒损失率均值为 1.74%;当清选装置入口脱出物量为 7 kg/s 时,未加杂余抛送器的清选装置籽粒清洁率均值为 96.23%,籽粒损失率均值为 2.52%,增设杂余抛送器的清选装置籽粒清洁率均值为 97.20%,籽粒损失率均值为 1.82%,其满足清选装置在大喂入量下玉米清选国家标准要求。

## 5 结论

(1) 杂余抛送器使尺寸较小的籽粒和玉米芯从轴向相邻指间隙中漏至振动筛筛面上,茎秆和尺寸较大的玉米芯被抛到振动筛的后部,实现籽粒与杂余在水平方向上分散;玉米脱出物在杂余抛送器作用下的“杂余在上,籽粒在下”规律十分明显,实现垂直方向上分层。

(2) 通过 CFD-DEM 耦合仿真试验,获得杂余抛送器参数分别与杂余被抛送水平位移、杂余与籽粒被抛送水平位移重叠量的回归数学模型,通过参数优化确定杂余抛送器抛扬最优性能参数组合为:周向拨指数量 8 个,拨指回转半径 80.18 mm,轴向相邻指间距 12.44 mm,拨辊旋转角速度 15.41 rad/s。

(3) 在清选装置入口风速为 12.8 m/s、入口方向角为 25°条件下,当清选装置入口玉米脱出物量为 5~7 kg/s 时,未加杂余抛送器清选装置籽粒清洁

率均值为 96.23% ~ 97.08%, 籽粒损失率均值为 2.26% ~ 2.52%, 增设杂余抛送器的清选装置籽粒清洁率均值为 97.20% ~ 98.74%, 籽粒损失率均值为 1.65% ~ 1.82%。

## 参 考 文 献

- [1] 宁新杰,金诚谦,印祥,等. 谷物联合收割机风筛式清选装置研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报,2018,39(9): 5-10.  
NING Xinjie, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Research status and development trend of air-and-screen cleaning device for cereal combine harvesters[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018,39(9):5-10. (in Chinese)
- [2] 刘凡一. 清选装置中小麦颗粒和短茎秆离散元建模研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.  
LIU Fanyi. Discrete element modelling of the wheat particles and short straw in cleaning devices[D]. Yangling: Northwest A&F University,2018. (in Chinese)
- [3] 张舰. 基于离散元法的曲柄连杆机构振动筛筛分模拟与试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.  
ZHANG Jian. Numerical simulation and experiment of crank link organization vibration screener based on discrete element method[D]. Yangling: Northwest A&F University,2018. (in Chinese)
- [4] TBATABAIFAR A, PERSSON S P E. Layer break up and particle movement on a chaffer sieve[J]. Transactions of ASAE, 1995, 37(5): 1305-1313.
- [5] MAERTENS K, DE BAERDEMAEKER J, RAMON H, et al. pH-power and machinery: an analytical grain flow model for a combine harvester, part I: design of the model[J]. J. Agric. Engng. Res.,2001,79(1):55-63.
- [6] LI J. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening-effect of particle bed depth[J]. Food and Bioproducts Processing,2002,80(2):109-117.
- [7] 王立军,李洋,梁昌,等. 贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):122-127.  
WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Motion law of maize mixture in cross air-and-screen cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):122-127. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150918&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150918&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.018. (in Chinese)
- [8] 赵杰文,陆仲华. 单风道鼠笼筛清选装置的研究及其应用[J]. 农业机械学报,1992,23(1):39-44.  
ZHAO Jiewen, LU Zhonghua. Research on single channel squirrel-cage sieve cleaning unit and its application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1992,23(1):39-44. (in Chinese)
- [9] 赵京华,赵学笃,张振京,等. 谷茎的空气动力特性研究[J]. 农业机械学报,1990,21(2):80-83.  
ZHAO Jinghua, ZHAO Xuedu, ZHANG Zhenjing, et al. Aerodynamic properties of grain and straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1990,21(2):80-83. (in Chinese)
- [10] 成芳,王俊. 风筛式清选装置主要参数的试验研究[J]. 农业工程学报,1998,14(4):217-221.  
CHENG Fang, WANG Jun. Test study on main parameters of air-and-screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the CSAE,1998,14(4):217-221. (in Chinese)
- [11] 高晓容. 东北地区玉米主要气象灾害风险评估研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.  
GAO Xiaorong. Study on the risk assessment of the main meteorological disasters for maize in Northeast China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology,2012. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 李耀明,赵湛,陈进,等. 风筛式清选装置上物料的非线性运动规律[J]. 农业工程学报,2007,23(11):142-147.  
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(11):142-147. (in Chinese)
- [14] 王立军,冯鑫,武振超,等. 玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):115-123. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181013&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181013&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.013. (in Chinese)
- [15] 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](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)
- [16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [17] 胡瑞谦. 质点在绕水平轴等速旋转平面型叶片上运动的分析[J]. 农业机械学报,1980,11(4):62-72.  
HU Ruiqian. The motive analysis of particle which is on the blade of plane type, the blade rotate round a horizontal axle with constant angular velocity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1980,11(4):62-72. (in Chinese)

- [18] 蔡维克. 质点在绕水平轴等速旋转一般柱面型叶片上运动的微分方程[J]. 四川工业学院学报, 1984(2): 71-76.
- [19] 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)
- [20] 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](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)
- [21] 王立军, 彭博, 宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 90-96.  
WANG Lijun, PENG Bo, SONG Huiqiang. Cleaning of maize mixture based on polyurethane rubber sieve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 90-96. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180711&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180711&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.011. (in Chinese)
- [22] 许振冻. 基于拨禾指式玉米收获机的行距适应性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.  
XU Zhendong. Research on adaptability of row spacing based on corn harvester with finger wheel[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [23] 江立凯. 覆草冬种马铃薯收获机的研制[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.  
JIANG Likai. The development of harvesting machine for straw mulching winter planting potato[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [24] 冀牧野. 油菜联合收获机梳脱式割台设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.  
JI Muye. Design and experimental on stripping cutting table of rape combine harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [25] 杨然兵, 杨红光, 尚书旗, 等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 119-126.  
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119-126. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160717&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160717&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.

(上接第 76 页)

- [20] 胡童, 齐新丹, 李骅, 等. 国内外蔬菜播种机的应用现状与研究进展[J]. 江西农业学报, 2018, 30(2): 87-92.  
HU Tong, QI Xindan, LI Hua, et al. Application status and research progress of vegetable seeder in China and foreign countries[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(2): 87-92. (in Chinese)
- [21] 张顺, 夏俊芳, 周勇, 等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器排种性能分析与田间试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 14-23.  
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Field experiment and seeding performance analysis of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 14-23. (in Chinese)
- [22] 刘文忠, 赵满全, 王文明, 等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 133-138.  
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 133-138. (in Chinese)
- [23] 谢海军, 李志伟, 张静. 气力滚筒式小粒圆形种子排种器孔口结构仿真分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(7): 31-35, 41.  
XIE Haijun, LI Zhiwei, ZHANG Jing. Simulation analysis of suction hole of pneumatic roller-type seeder for small-size seed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 31-35, 41. (in Chinese)
- [24] 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 玉米种子分级处理对气力式精量排种器播种效果的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 109-113.  
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Effects of maize seed grading on sowing quality by pneumatic precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 109-113. (in Chinese)
- [25] 张芙娴, 郭占斌. 基于 CFD 的 2BM-4 型气吸式排种器气流场分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2017, 29(5): 95-98.  
ZHANG Fuxian, GUO Zhanbin. Analysis of 2BM-4 gas suction seed metering device airflow field based on CFD[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017, 29(5): 95-98. (in Chinese)