

纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验

樊晨龙 崔 涛 张东兴 杨 丽 田聪聪 钟翔君

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对传统纵轴流联合收获机清选系统单层筛架在作业过程中存在大喂入量下损失率和含杂率高等问题,设计了一种结构紧凑、清选能力强、清选效果好的双层振动清选装置,提出了双层异向独立振动的玉米籽粒清选方式,分析确定了筛面和物料的运动规律、清选筛和双风道的结构参数以及传动机构的运动参数。以籽粒含杂率、籽粒损失率和分布比例为评价指标,对曲柄转速进行单因素试验,确定最佳工作参数为上曲柄转速 220 r/min、下曲柄转速 190 r/min;选取上筛曲柄长度和下筛曲柄长度为试验因素,进行了两因素三水平正交试验,确定较优组合为:上、下筛曲柄长度分别为 50 mm 与 40 mm。在较优水平组合下,以 8 kg/s 的喂入量进行验证试验,试验结果表明籽粒损失率为 0.45%,籽粒含杂率为 0.76%,籽粒分布比例为 1.92%,清选效果较好,能满足清选性能要求。

关键词: 玉米籽粒收获机;清选装置;双层异向清选筛;设计

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0239-10

Design and Experiment of Double-layered Reverse Cleaning Device for Axial Flow Combine Harvester

FAN Chenlong CUI Tao ZHANG Dongxing YANG Li TIAN Congcong ZHONG Xiangjun
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Due to the existing problems of high loss rate and impurity rate when corn grains are directly harvested by the cleaning device of vertical flow threshing device with high feed volume, a double-layer vibration system with compact structure, strong cleaning ability, good cleaning effect and high reliability was designed. A double-layered independent vibrating cleaning method of corn grain was proposed. The movement law of screen surface and material was determined through analysis, the structural parameters of cleaning screen and double air duct and motion parameters of the transmission mechanism were obtained. Based on three evaluation indicators of the grain impurity rate, grain loss rate and distribution ratio, single-factor tests were conducted on the crank speed to determine the best operating parameters with upper and lower crank speeds of 220 r/min and 190 r/min, respectively. With two factors of crank length of upper and lower screen and three levels of 40 mm, 45 mm and 50 mm, the orthogonal test was carried out to acquire the optimal cleaning results that the crank lengths of upper and lower screen were 50 mm and 40 mm, respectively. Finally, under the above experimental conditions, the results showed that the grain loss rate, grain impurity ratio and grain distribution ratio were 0.45%, 0.76% and 1.92%, respectively, when the feed rate was 8 kg/s, and the cleaning effect of the device was better, which can meet the cleaning performance requirements.

Key words: corn gains harvester; cleaning device; double-layered reverse cleaning device; design

0 引言

清选装置是纵轴流联合收获机的重要工作部

件,对整机工作性能和谷物籽粒的净度有重要影响^[1-3]。玉米籽粒清选装置依靠风力将脱粒分离装置产生的脱出物中短碎玉米芯、轻杂物以及破碎、不

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300300)和国家现代玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)

作者简介: 樊晨龙(1994—),男,博士生,主要从事农业机械装备及自动化研究,E-mail: 343757368@qq.com

通信作者: 崔涛(1985—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与计算机测控研究,E-mail: cuitao850919@163.com

饱满籽粒清除^[4-8],经清选的籽粒含杂率和损失率不能超过国家相关标准规定。传统纵轴流联合收获机脱粒性能强,但清选装置负荷大,难以发挥纵轴流联合收获机大喂入量、高生产率的特点^[9]。近几年,国内市场已经出现了多种结构新颖的脱粒清选装置,在大喂入量作业过程中,从单层清选筛清选效果来看,尺寸小的杂物和玉米种子一起排出,仍存在着含杂率和损失率偏高的问题^[10]。解决现存问题对推进玉米产业的发展具有重要意义。

相关领域的专家对玉米籽粒脱粒风筛式清选装置进行了大量研究并取得了一定进展。东北农业大学王立军等^[11]对玉米贝壳清选筛筛体进行 CFD-DEM 仿真,并对其回归数学模型进行多目标优化,发现筛孔高度对振动筛筛分效率和籽粒清洁率有较大影响;沈阳农业大学高连兴等^[12]根据花生荚果混合物料各成分漂浮速度的差异,提出前、后两个吸风口与振动筛组合,结构优化后籽粒含杂率和损失率都有所降低;河南科技大学周学建等^[13]以水稻为清选对象,提出偏置型旋风分离清选装置,显著降低了籽粒损失率;江苏大学唐忠等^[14]利用绘制等速线的方法得出水稻清选装置气流流速为零的点(涡心),发现涡心位置变化对清选清洁率和损失率有较大影响。国内研究的联合收获机清选装置大部分针对水稻、小麦等谷物,玉米籽粒外形不规则,且玉米脱出物中存在玉米芯等有别于茎秆的杂质,在清选装置内部的运动规律不同于小麦、水稻的清选运动规律,并且存在喂入量较小,严重限制了收获的效率^[15];玉米清选装置研究侧重于进出口气流大小、清选筛筛孔形状等,清选筛振幅和振动频率对清选效果的影响规律研究较少。

针对大喂入量纵轴流联合收获机清选装置含杂率和损失率高等问题,依据玉米脱出物各组成成分的物理特性,本文设计一种满足纵轴流大喂入量的蜗型双风道、双层异向独立振动、具有较强分离能力的玉米清选装置,以实现玉米籽粒稳定高效的清选,为玉米纵轴流脱粒分离装置推广和使用提供参考。

1 双层异向清选装置设计

1.1 清选装置结构

该清选装置由上清选筛、阶梯抖动板、传动机构、电机、离心风机、清选接料室、机架、下清选筛等组成。上清选筛和下清选筛为上下平行布置,采用双边驱动,防止振动时扭转;抖动板通过连杆与上清选筛连接,上摇臂驱动连杆,从而使上清选筛和抖动板振动。下清选筛通过连杆与下摇臂连接,下摇臂

摆动使下清选筛振动。上下摇臂分别与上下两个偏心轮连接,上下两个偏心轮分别由不同的电机驱动。双风道蜗型风机位于上下清选筛后方,第 1 风道和第 2 风道分别对下清选筛和上清选筛的物料进行分离。清选风机由电机驱动。接料室布置在下清选筛的下方。其结构如图 1 所示。

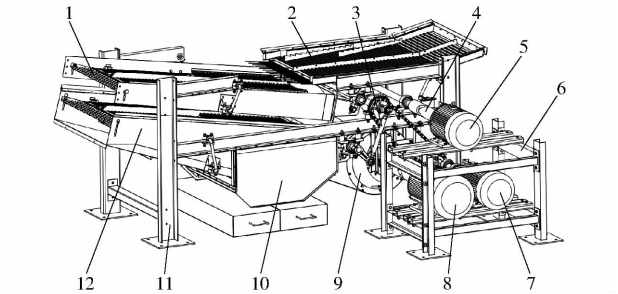


图 1 清选装置结构示意图

Fig. 1 Schematic of cleaning device

- 1. 上清选筛总成 2. 阶梯抖动板 3. 下清选筛曲柄传动机构
- 4. 上清选筛曲柄传动机构 5. 上清选筛驱动电机 6. 电机机架
- 7. 下清选筛驱动电机 8. 离心风机电机 9. 离心风机 10. 清选接料室
- 11. 清选主体机架 12. 下清选筛总成

1.2 清选筛工作原理

双层异向清选装置采用蜗型双风道、双层独立振动的方式实现玉米脱出物的分离清选,上、下筛振动方向如图 2 所示。在曲柄机构驱动下,上、下摇臂以 ω_1 和 ω_2 的角速度来回摆动,使阶梯抖动板、上清选筛和下清选筛纵向往复运动。双风道离心风机在上、下筛处分别产生高、低速气流区。玉米籽粒混合物落入抖动板上时,阶梯抖动板将混合物向前摆动至上筛面。玉米籽粒含水率为 25% 时,玉米芯含水率为 51%;玉米籽粒密度为 1.36 g/cm^3 ,玉米芯密度为 0.39 g/cm^3 。玉米籽粒与玉米芯等杂余的容重不同。利用玉米籽粒和杂余的空气动力特性不同和几何-尺寸的差异,在上筛摆动和高速气流的综合作用下,将大部分苞叶、灰尘等吹出装置外。通过上筛筛分的混合物落到下筛上,在下筛摆动和低速气流的综合作用下,玉米芯等较轻杂余被筛分,最终清选接料室获得纯净玉米籽粒,完成清选。上筛架与下筛架的传动机构相互独立,且两筛架初始振动相位角相差 180° ,两层筛架能以不同的振幅和振动频率反向振动,即异向振动,以平衡相互之间的振动,减

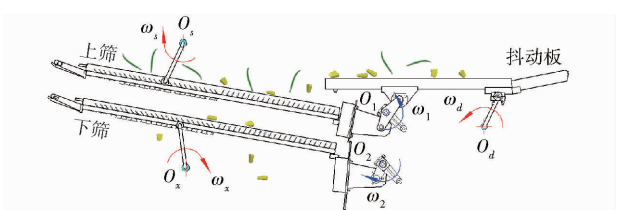


图 2 清选筛上、下筛运动原理图

Fig. 2 Schematic of upper and lower screen motion

小整机振动。双层异向清选增大清选面积,提高清选能力,满足大喂入量下的玉米籽粒清选要求。

2 清选装置主要部件设计

2.1 清选筛设计

2.1.1 筛面运动规律

如图 2 所示,该清选机构为曲柄连杆-摇杆机构,筛上各点的运动轨迹、加速度等不相同,筛面的位移公式为

$$S = \lambda \sin \varphi \tag{1}$$

其中 $\varphi = \omega t$ (2)

式中 S ——筛面位移

λ ——工作面沿振动方向振幅

ω ——振动角速度 t ——时间

φ ——振动相位角

由上述分析可得,筛面做的是简谐振动,在筛体运动过程中,这种振动可以使筛面的物料产生上下滑移、抛掷的运动^[16]。

2.1.2 物料在清选装置中的运动分析

物料在清选装置中主要受到风机的风力、重力和筛面作用力的影响,运动形式主要为相对静止、正向滑动、反向滑动、抛掷运动。其中相对静止形式对于物料的筛分和输送为无效的运动形式,其他 3 个运动形式都能完成物料的筛分、输送等工作^[17]。为了分析物料在清选装置中的运动情况,将物料看作筛面上的一段物料元,该物料元是整个均匀物料群的一部分,具备整个物料群的运动特征。其次,综合考虑风力、重力和筛面作用力对物料的影响,探求运动规律。

在清选装置工作时,物料被筛面抛起后,物料受到重力和气流风力叠加作用^[18],受力作用如图 3 所示。

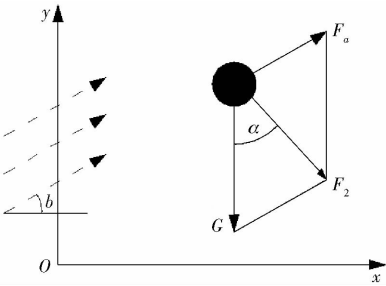


图 3 物料受重力和风力叠加作用示意图
Fig.3 Schematic of material superimposed by gravity and wind

物料在被抛起后受到重力 G 和风力 F_a 叠加作用,将两力合成为 F_2 ,气流对物料作用的风力为

$$F_a = mk_p v^2 = m \frac{g}{v_p^2} v^2 \tag{3}$$

式中 m ——物料质量,kg

k_p ——漂浮系数

v_p ——漂浮速度,m/s

v ——气流相对于质点的速度,m/s

g ——重力加速度,m/s²

风力 F_a 的方向与气流速度 v 相同^[19-20],重力 G 和风力 F_a 的矢量和 F_2 的计算公式为

$$F_2 = m \left(\frac{g}{v_p^2} vv' + g' \right) \tag{4}$$

式中 v' ——物料相对气流的速度,m/s

g' ——重力相对气流的加速度,m/s²

由式(3)、(4)可知,物料所受的场力 F_2 与物料的漂浮系数 k_p 、物料相对于气流场的速度有关,对于玉米籽粒、茎秆、苞叶、芯轴等不同的物料,它们的场力均不相同。依据玉米脱出物的特性,可以通过在上、下筛处设计不同的气流流速区来分离玉米脱出物。

综合筛面运动规律和物料在清选装置中的运动规律,为实现大喂入量下高效快速的清选工作,避免清选筛堵塞或清选后物料含杂率高,选用可调鱼鳞筛,如图 4 所示。

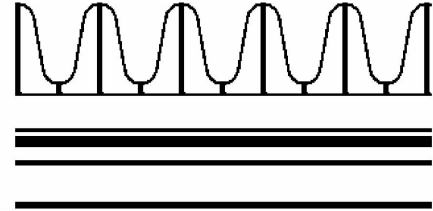


图 4 鱼鳞筛片示意图

Fig.4 Schematic of fish scale sieve

为了防止清选筛堵塞且得到纯净的籽粒,下筛的鱼鳞筛比上筛的鱼鳞筛的筛孔更密。鱼鳞筛开度为影响清选质量的主要参数,其开度相对于稻麦清选装置鱼鳞筛开度较大,为适应不同品种玉米籽粒的清选作业,通过试验验证,确定了上、下筛的鱼鳞筛开度范围为 10 ~ 30 mm。根据玉米脱出物的特性,上、下筛的开度不同,上筛处于气流高速区,对玉米脱出物进行粗选,除去茎叶、玉米茎秆等较大的杂余,开度较大;下筛对玉米进行细选,除去碎玉米芯等较小杂余,鱼鳞筛开度相对较小。

2.1.3 清选筛尺寸的确定

清选筛面积是影响喂入量的主要参数,为增大清选面积,满足大喂入量的清选要求,确定合适的筛面尺寸,对实现清选筛高效可靠的清选作业具有重要意义。清选筛面积可由进入清选装置的籽粒混合物 Q 确定,籽粒混合物与清选装置的喂入量有关。筛面宽度 B 与纵轴流脱粒滚筒落料宽度呈正相关,可根据脱粒滚筒直径确定筛面宽度 B ,筛面长度 L

计算公式为

$$L = \frac{Q_s}{Bq_s} = \frac{Q(1 - \delta k)}{Bq_s} \tag{5}$$

式中 Q ——机器喂入量,kg/s
 Q_s ——清选装置的籽粒混合物喂入量,kg/s
 δ ——秸草占籽粒总质量的比值
 k ——脱粒装置工作特性系数,一般取 0.6 ~ 0.9
 q_s ——清选筛单位面积可以承担的籽粒混合物喂入量,取 1.5 ~ 2.5 kg/(s·m²)

根据脱粒滚筒实际落料的宽度确定筛面宽度为 1 m,为实现大喂入量脱粒清选,选取最大喂入量 12 kg/s,取 q_s 为 2.4 kg/(s·m²),得 L 为 2.1 m。

上、下筛为上下平行布置,筛面尺寸相同,根据计算结果,选用可调鱼鳞筛尺寸为 1.8 m × 1 m、尾筛尺寸为 0.3 m × 1 m。

2.2 双风道风机设计

为实现清选装置上、下清选筛处产生高、低速气流区,遵循高速气流区保证清洁率、低速气流区保证最小吹出量的设计原则,依据双层筛架结构特点,选择蜗型壳体双风道离心风机,并对蜗型壳体的主要结构参数进行设计。双风道离心风机结构示意图如图 5 所示。

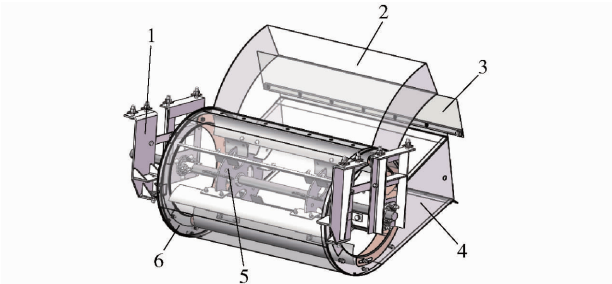


图 5 双风道离心风机结构示意图

Fig. 5 Schematic of double air duct centrifugal fan

1. 风机固定架 2. 第 2 风道 3. 隔板 4. 第 1 风道 5. 叶轮
6. 风机外壳

第 1、2 风道方向倾斜向上,两风道之间用薄板连接,防止籽粒混合物落入,其中第 2 风道作为影响双风道作业效果的主要部分。为实现高效率、高清洁率的作业效果,采用蜗壳型线结构对第 2 风道的各段截面积变化进行了设计,蜗壳的型线如图 6 所示。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为蜗壳四点处半径,将各点连接起来即为蜗壳的型线, D_1 、 D_2 分别为叶轮内、外径, S 为出风口高度。

(1) 蜗壳外形尺寸

现在吸入型风扇清选装置上的风扇叶轮外径 D_2 一般在 250 ~ 400 mm,取外径 D_2 为 320 mm,则图 6 中蜗壳外形设计半径计算式为

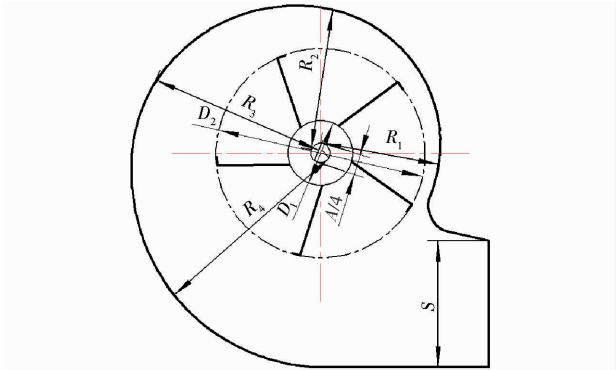


图 6 蜗壳型线图

Fig. 6 Spiral shell line diagram

$$R_1 = \frac{D_2}{2} + \frac{1}{8}A \tag{6}$$

$$R_2 = \frac{D_2}{2} + \frac{3}{8}A \tag{7}$$

$$R_3 = \frac{D_2}{2} + \frac{5}{8}A \tag{8}$$

$$R_4 = \frac{D_2}{2} + \frac{7}{8}A \tag{9}$$

式中 A ——螺线蜗壳扩展尺寸,一般为叶轮外径的 0.1 ~ 0.2 倍,取 48 mm
得到, $R_1 = 166$ mm、 $R_2 = 178$ mm、 $R_3 = 190$ mm、 $R_4 = 202$ mm。

(2) 出风口最大高度 S

为了提高上筛对玉米脱出物的分离能力,即增大风速度和风压,风机壳体设计为收口型。出风口高 S 一般为叶轮外径的 0.4 ~ 0.6 倍,本文取 0.5,得 $S = 160$ mm。

(3) 进气孔直径 D_0

该清选风机的壳体为双面进气,进气孔直径 D_0 一般为叶轮外径 D_2 的 0.65 ~ 0.8 倍,本文取 0.8,得 $D_0 = 256$ mm。

依据上述设计确定第 2 风道结构如图 7 所示。在清选装置工作时,抖动板将物料抖动到上清选筛时,由第 2 风道吹出的气流进行清选作业,第 2 风道的安装位置由清选装置所需风速方向确定。

2.3 清选筛传动机构设计

清选筛做纵向往复振动,其运动主要由曲柄-连

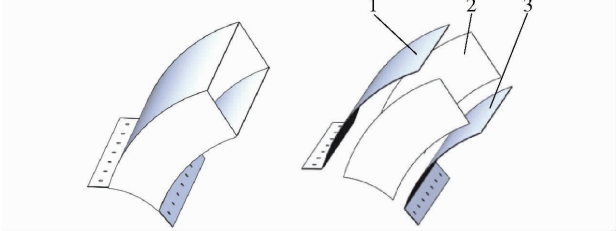


图 7 第 2 风道结构示意图

Fig. 7 Schematic of the second air duct

1. 风机固定架 2. 上风道 3. 隔板

杆机构控制,如图 8、9 所示。在曲柄机构驱动下,上、下摇臂来回摆动,使阶梯抖动板、上清选筛和下清选筛纵向往复运动。上筛架与下筛架的传动机构相互独立,两层筛架以不同的振幅和振动频率反向振动,减小整机振动。清选筛的振幅通过曲柄半径长度来调节,曲柄为偏心轮装置,其半径可通过更换偏心轮进行调整;振动频率由曲柄转速控制,可通过改变曲柄转速实现不同频率的振动。通过前期振幅和频率试验,预选 40、45、50 mm 3 个曲柄半径,曲柄转速 190 ~ 300 r/min,振幅和频率的最佳参数由后期试验进行验证确定。

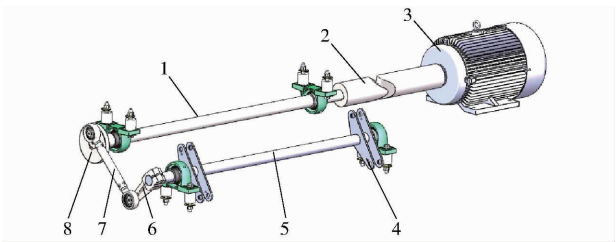


图 8 上筛架传动机构示意图
Fig. 8 Schematic of upper screen drive

1. 传动轴 2. 万向联轴器 3. 电机 4. 内摇臂 5. 摇臂轴
6. 外摇臂 7. 连杆 8. 曲柄

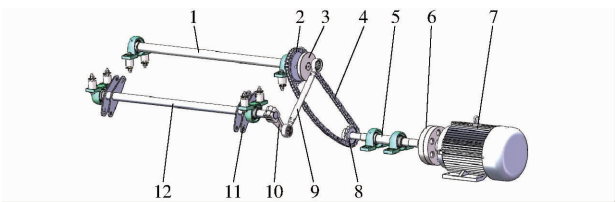


图 9 下筛架传动机构示意图
Fig. 9 Schematic of lower screen conveyor

1. 副传动轴 2. 从动链轮 3. 曲柄 4. 链条 5. 主传动轴
6. 弹性联轴器 7. 电机 8. 主动链轮 9. 连杆 10. 外摇臂
11. 内摇臂 12. 摇臂轴

3 清选装置运动仿真

3.1 仿真目的和清选装置模型

清选机构的结构参数和运动参数对筛体的运动状态都有影响,曲柄长度、曲柄转速、筛面倾角等都会影响上、下筛体运动状态。为了简化试验,探究对清选效果影响较大的因素,基于 ADAMS 对清选装置进行建模仿真。

清选装置仿真模型如图 10 所示,模型中主要由上筛架、下筛架、抖动板、曲柄、连杆和吊杆等组成,其中上筛架和下筛架用不同的曲柄、连杆控制,在仿真时可以实现两层筛架以不同的振动频率和振幅运动。

3.2 仿真运动分析

根据清选装置在 ADAMS 中的模型,建立该清选装置的机构简图,如图 11 所示。图中 AD 为抖动

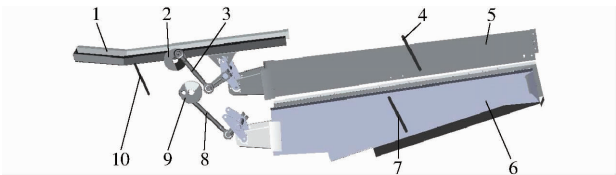


图 10 清选装置 ADAMS 模型示意图
Fig. 10 Schematic of ADAMS model for cleaning device

1. 抖动板 2. 上筛曲柄 3. 上筛连杆 4. 上筛吊杆 5. 上筛架
6. 下筛架 7. 下筛吊杆 8. 下筛连杆 9. 下筛曲柄 10. 前吊杆

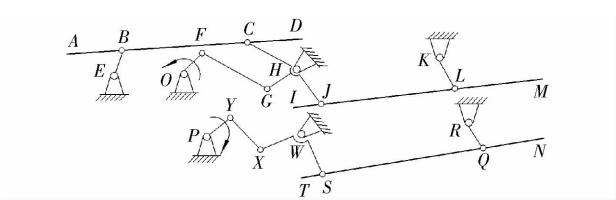


图 11 清选装置 ADAMS 模型机构简图
Fig. 11 Motion diagram of cleaning device by ADAMS model

板,IM 为上筛架,TN 为下筛架,OF 为上筛架曲柄, PY 为下筛架曲柄。

根据实际生产加工情况,机构中曲柄 OF 与曲柄 PY 长度有 40、45、50 mm 3 种,连杆 FG 长度为 308 mm,外摇臂 HG 为 139 mm,内摇臂 HJ 为 90 mm、HC 为 110 mm;抖动板 AB 为 451 mm、BC 为 576 mm、CD 为 393 mm,前吊杆 BE 为 213 mm,抖动板水平面倾角为 4°;上筛架 IJ 为 0 mm、JL 为 1312 mm、LM 为 695 mm,后吊杆 KL 为 250 mm,上筛架水平面倾角为 9°;连杆 YX 为 408 mm,外摇臂 XW 为 139 mm,内摇臂 WS 为 90 mm;下筛架 TS 为 0 mm,SQ 为 1 110 mm, QN 为 928 mm,后吊杆 RQ 为 250 mm,下筛架水平面倾角为 9°。清选机构仿真实验参数如表 1 所示。仿真结果如图 12 ~ 17 所示。

表 1 清选机构仿真实验参数
Tab.1 Parameter of clearing mechanism simulation experiment

水平	因素		
	曲柄转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	曲柄长度/ mm	筛面倾角/ ($^{\circ}$)
1	260	40	3
2	280	45	6
3	300	50	9

3.3 仿真结果分析

从仿真曲线中可看出,在相同比例变动下,曲柄转速和曲柄长度的变化对上清选筛和下清选筛的运动状态影响最大,筛面倾角的变化影响次之。

为定量测量各参数变化对上清选筛、下清选筛运动状态变化的影响,在仿真结果中,将 x、y 方向上的加速度最大值输出,并计算加速度对各参数变化的敏感度。敏感度是指参数变化一个单位时,筛体

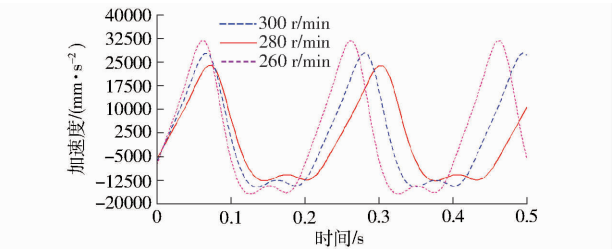


图 12 曲柄转速对上筛 x 方向加速度的影响
Fig. 12 Effect of crank speed on acceleration of upper screen in x direction

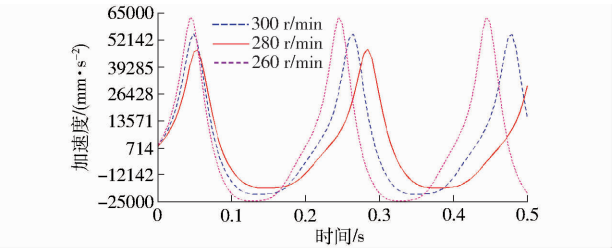


图 13 曲柄转速对下筛 x 方向加速度的影响
Fig. 13 Effect of crank speed on acceleration of lower screen in x direction

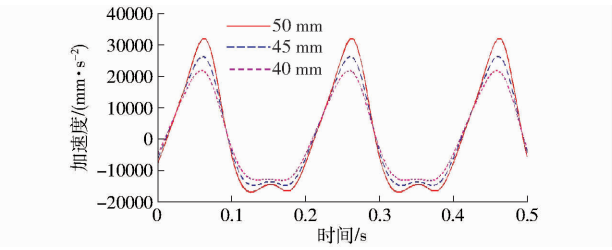


图 14 曲柄长度对上筛 x 方向加速度的影响
Fig. 14 Effect of crank length on acceleration of upper screen in the x direction

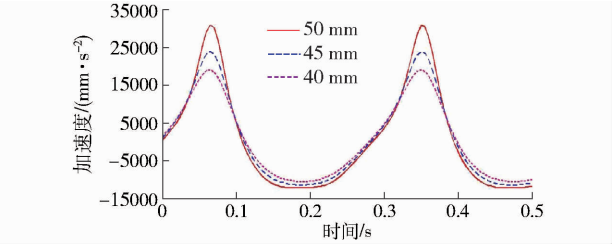


图 15 曲柄长度对下筛 x 方向加速度的影响
Fig. 15 Effect of crank length on acceleration of lower screen in x direction

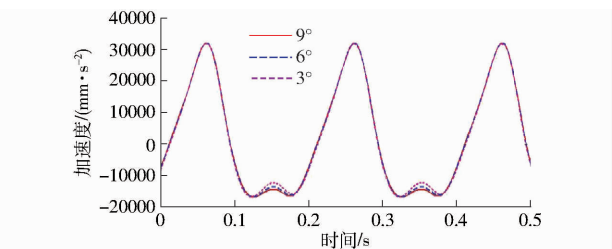


图 16 筛面倾角对上筛 x 方向加速度的影响
Fig. 16 Effect of crank inclination on acceleration of upper screen in x direction

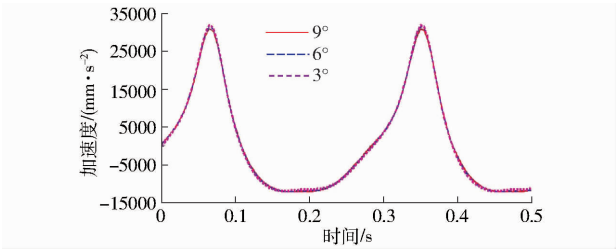


图 17 筛面倾角对下筛 x 方向加速度的影响
Fig. 17 Effect of crank inclination on acceleration of lower screen in x direction

加速度的变化量^[21]。用该指标来衡量参数变化对上筛、下筛加速度变化影响程度,如表 2、3 所示。

表 2 各因素对上筛加速度的敏感度分析 Tab. 2 Analysis of sensitivity of factors to upper screen acceleration			
因素	水平	$a_{x,max}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-2})$	敏感度
曲柄转速	1	23 854. 47	0. 222 7
	2	27 435. 14	
	3	32 761. 53	
曲柄长度	1	22 674. 14	1. 008 7
	2	26 878. 16	
	3	32 761. 53	
筛面倾角	1	32 432. 23	0. 002 5
	2	32 501. 32	
	3	32 560. 91	

表 3 各因素对下筛加速度的敏感度分析 Tab. 3 Analysis of sensitivity of factors to lower screen acceleration			
因素	水平	$a_{x,max}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-2})$	敏感度
曲柄转速	1	46 231. 23	0. 312 0
	2	53 001. 57	
	3	61 038. 53	
曲柄长度	1	18 363. 56	1. 516 1
	2	23 628. 45	
	3	31 026. 78	
筛面倾角	1	32 804. 47	0. 005 0
	2	32 959. 25	
	3	33 102. 87	

由表 2、3 中仿真试验数据可得,各因素的敏感度由大到小依次为:曲柄长度、曲柄转速、筛面倾角。从敏感度可看出,曲柄长度和曲柄转速对上筛和下筛的加速度影响较大,筛面倾角影响较小,故将曲柄转速和曲柄长度作为后续试验设计的影响参数。

4 试验与分析

4.1 试验目的与材料

试验时间为 2017 年 11 月,试验地点为河北省邯郸市。试验装置为双层异向清选装置试验台,如图 18 所示。

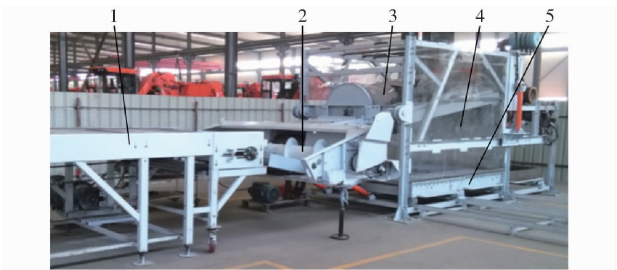


图 18 清选装置试验台

Fig. 18 Cleaning device test bench

1. 输送装置 2. 喂入装置 3. 脱粒装置 4. 清选装置 5. 接料装置

试验材料为郑单 958, 试验材料经过纵轴流式脱粒装置得到清选试验用料, 玉米籽粒含水率为 23.5%。

试验材料喂入量为 8 kg/s, 风机转速为 900 r/min, 鱼鳞筛开度为 15 mm。

本装置采用双层异向独立振动清选筛和双风道结构对玉米籽粒进行清选, 以籽粒含杂率 η_h 、籽粒损失率 η_s 和分布比例 k_f 作为评价指标, 考察本装置的工作性能^[22-24]。

玉米籽粒含杂率 η_h 为

$$\eta_h = \frac{m_2 + m_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \times 100\% \quad (10)$$

损失率 η_s 为

$$\eta_s = \frac{m_5}{m_1 + m_3 + m_5} \times 100\% \quad (11)$$

分布比例 k_f 为

$$k_f = \frac{m_3}{m_1} \times 100\% \quad (12)$$

其中, m_1 为籽粒接料盒中玉米籽粒质量, m_2 为杂余质量, m_3 为杂余接料盒中玉米籽粒质量, m_4 为杂余质量。将损失箱中的混合物收集, m_5 为去除其中的杂余得到的损失玉米籽粒质量。

4.2 试验结果与分析

为了验证上述理论分析的正确性, 寻求较优的参数组合, 对所选的 2 个参数分别进行单因素和正交试验, 考察对清选性能的影响, 上、下曲柄转速进行单因素试验, 上、下筛的曲柄长度进行两因素三水平试验。

4.2.1 上清选筛曲柄转速对清选性能的影响

上清选筛曲柄转速对清选性能影响的试验条件: 上清选筛曲柄长度 50 mm, 下清选筛曲柄长度 50 mm, 下清选筛曲柄转速 210 r/min。

试验结果如表 4 所示, 上清选筛曲柄转速对籽粒损失率、籽粒含杂率和籽粒分布比例的影响如图 19 所示。

表 4 上清选筛不同曲柄转速下的清选试验结果

Tab. 4 Cleaning test results at different speeds of upper screen

组号	上清选筛转速/ (r·min ⁻¹)	籽粒损失 率/%	籽粒含杂 率/%	籽粒分布 比例/%
1	220	0.67	0.28	3.75
2	240	0.78	0.31	3.44
3	260	0.93	0.45	3.41
4	280	1.08	0.47	3.13
5	300	1.09	0.51	3.10

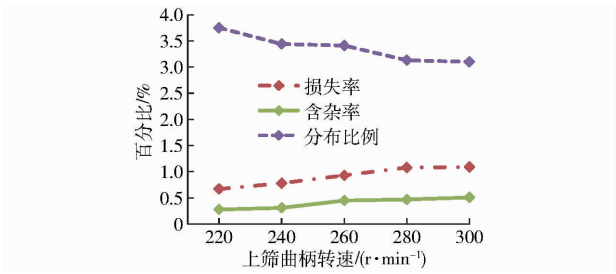


图 19 上清选筛曲柄转速对籽粒清选性能的影响

Fig. 19 Effect of crank speed on grain cleaning performance of upper screen

从表 4 和图 19 可知, 随着上清选筛曲柄转速的增大, 籽粒含杂率和籽粒损失率都有逐渐增大的趋势, 籽粒分布比例有减小的趋势。上清选筛曲柄转速从 220 r/min 到 300 r/min 时, 籽粒损失率增加 0.42 个百分点, 籽粒含杂率增加 0.23 个百分点, 籽粒分布比例下降 0.65 个百分点。随着上清选筛振动频率的提高, 筛面物料抛掷和滑行频率更高, 跳动更剧烈, 玉米籽粒穿过筛孔的机会减少, 较多的物料向筛子后方堆积, 筛子后方气流强度小, 物料所受风力较弱, 风选能力减小, 使籽粒含杂率上升。筛子尾部玉米籽粒的堆积, 使玉米籽粒更容易被吹出清选装置外, 导致籽粒损失率提高。籽粒分布比例变化幅度较小, 籽粒落入杂余接料盒与籽粒接料盒中的比例略微减小, 影响不明显。

4.2.2 下清选筛曲柄转速对清选性能的影响

下清选筛曲柄转速对清选性能影响的试验条件: 上清选筛曲柄长度 50 mm, 下清选筛曲柄长度 50 mm, 上清选筛曲柄转速 300 r/min。

试验结果如表 5 所示, 下清选筛曲柄转速对籽粒损失率、籽粒含杂率和籽粒分布比例的影响如图 20 所示。

从表 5 和图 20 可知, 随着下清选筛曲柄转速的增大, 籽粒含杂率、籽粒损失率和籽粒分布比例都有逐渐增大的趋势, 下清选筛曲柄转速从 190 r/min 到 270 r/min 时, 籽粒损失率增加了 0.75 个百分点, 籽粒含杂率增加了 0.16 个百分点, 籽粒损失率上升幅度显著, 籽粒含杂率上升幅度较小。随着下清选筛

表 5 下清选筛不同曲柄转速下的清选试验结果

Tab.5 Cleaning test results at different speeds of lower screen				
组号	下清选筛转速/ (r·min ⁻¹)	籽粒损失 率/%	籽粒含杂 率/%	籽粒分布 比例/%
1	190	0.79	0.28	3.03
2	210	1.09	0.31	3.29
3	230	1.47	0.32	4.95
4	250	1.55	0.44	5.79
5	270	1.54	0.44	5.89

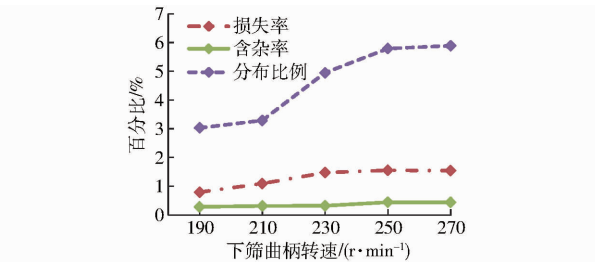


图 20 下清选筛曲柄转速对籽粒清选性能的影响
Fig.20 Effect of crank speed on grain cleaning performance of lower screen

振动频率的提高,落到下清选筛的玉米籽粒跳动、翻滚剧烈,容易在下清选筛尾部堆积,被排出装置外,使籽粒含杂率和籽粒损失率增加;落入杂余接料盒中的比例较大,使籽粒分布比例上升。

表 7 方差分析

Tab.7 Variance analysis result							
来源	因变量	第Ⅲ类平方和/%	自由度	平均值平方/%	F	P	显著性
上清选筛曲柄长度	籽粒损失率	0.052	2	0.026	26.807	0.005	**
	籽粒含杂率	0.007	2	0.004	0.112	0.896	
	籽粒分布比例	0.085	2	0.042	0.881	0.482	
下清选筛曲柄长度	籽粒损失率	0.031	2	0.016	16.102	0.012	*
	籽粒含杂率	0.077	2	0.039	1.239	0.381	
	籽粒分布比例	1.696	2	0.848	17.591	0.010	*
误差	籽粒损失率	0.004	4	0.001			
	籽粒含杂率	0.125	4	0.031			
	籽粒分布比例	0.193	4	0.048			
总计	籽粒损失率	6.813	9				
	籽粒含杂率	3.191	9				
	籽粒分布比例	60.395	9				
校正后总计	籽粒损失率	0.088	8				
	籽粒含杂率	0.209	8				
	籽粒分布比例	1.974	8				

注: * 表示 $P < 0.05$, 影响显著; ** 表示 $P < 0.01$, 影响极显著。

由方差分析可知,上清选筛曲柄长度对籽粒损失率影响极其显著,对籽粒含杂率和籽粒分布比例影响不显著,下清选筛曲柄长度对籽粒损失率和籽粒分布比例影响显著,对籽粒含杂率影响不显著。

从表 7 和上、下清选筛曲柄长度对清选效果的

4.2.3 曲柄长度对清选性能的影响

上清选筛曲柄长度和下清选筛曲柄长度分别设置 40、45、50 mm 3 个水平,按两因素三水平安排试验。

试验结果如表 6 所示,方差分析如表 7 所示,上、下清选筛曲柄长度对籽粒损失率、籽粒含杂率和籽粒分布比例的影响如图 21 所示。

表 6 上清选筛曲柄长度和下清选筛曲柄长度组合试验结果
Tab.6 Test result of combination of upper screen length and lower screen length

组号	上、下清选筛 曲柄长度/mm	籽粒损失 率/%	籽粒含杂 率/%	籽粒分布 比例/%
1	(40,40)	0.91	0.31	2.15
2	(45,40)	0.84	0.47	2.06
3	(50,40)	0.76	0.76	1.83
4	(40,45)	0.91	0.71	2.76
5	(45,45)	0.77	0.77	2.47
6	(50,45)	0.75	0.64	2.43
7	(40,50)	1.08	0.62	3.11
8	(45,50)	0.92	0.46	2.78
9	(50,50)	0.84	0.44	3.34

根据表 6 的试验结果,采用 SPSS 数据处理软件,对数据进行多变量一般线性模型分析^[25],设定显著性水平为 0.05,可得到方差分析如表 7 所示。

影响可知,上清选筛曲柄长度与籽粒损失率有较显著的线性关系,当上清选筛曲柄长度由 40 mm 变到 50 mm,下清选筛曲柄长度为 40、45、50 mm 时,籽粒损失率降幅逐渐增大,分别下降了 0.15 个百分点、0.16 个百分点和 0.24 个百分点。其中,下清选筛

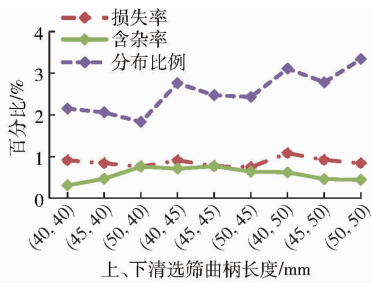


图 21 上、下清选筛曲柄长度对籽粒清选性能的影响

Fig. 21 Effect of crank length on grain cleaning performance of upper and lower screen

曲柄长度为 40 mm 时,籽粒含杂率上升了 0.45 个百分点;下清选筛曲柄长度为 45 mm 时,籽粒含杂率变化很小;下清选筛曲柄长度为 50 mm 时,籽粒含杂率减少了约 0.22 个百分点,即下清选筛曲柄长度为 45 mm 时,籽粒含杂率较大。随着上清选筛曲柄长度的增大,籽粒分布比例有减小的趋势。

下清选筛曲柄长度与籽粒损失率线性关系不显著,当下清选筛曲柄长度由 40 mm 变到 50 mm,上清选筛曲柄长度为 40、45、50 mm 时,籽粒损失率分别上升了 0.03 个百分点、0.08 个百分点、0.08 个百分点,变化幅度较小,下清选筛曲柄长度对籽粒损失率的影响较小。籽粒含杂率变化规律不明显。随着下清选筛曲柄长度的增大,籽粒分布比例有增大的趋势,且二者线性关系较为显著。

按照损失率较低、兼顾含杂率和分布比例较小

的原则,确定上清选筛曲柄长度 50 mm、下清选筛曲柄长度 40 mm 为较优组合。在该条件下本清选装置籽粒损失率为 0.45%,籽粒含杂率为 0.76%,籽粒分布比例为 1.92%,满足设计要求。

5 结论

(1)提出了双层异向独立振动、结合蜗壳型线双风道方式进行玉米籽粒清选的方法,显著降低纵轴流式玉米收获机作业过程的籽粒损失率和含杂率,清选装置清洁度高、清选损失小、适应性强。

(2)在 ADAMS 中建模,对清选装置的曲柄长度、曲柄转速和筛面倾角等因素进行了仿真试验,结果表明,曲柄转速和曲柄长度的变化对上、下清选筛的加速度影响较大。

(3)采用纵轴流脱粒清选试验台进行试验研究,通过单因素和正交试验,探讨了上清选筛曲柄转速、下清选筛曲柄转速、上清选筛曲柄长度和下清选筛曲柄长度对清选性能的影响规律,得到了较优的参数组合:上清选筛曲柄转速和下清选筛曲柄转速分别为 220 r/min 和 190 r/min,上清选筛曲柄长度和下清选筛曲柄长度分别为 50 mm 和 40 mm。在最优组合下进行了验证试验,结果表明,籽粒损失率为 0.45%,籽粒含杂率为 0.76%,籽粒分布比例为 1.92%,满足清选装置对试验性能的要求。

参 考 文 献

- 宗望远,廖庆喜,黄鹏,等.组合式油菜脱粒装置设计与物料运动轨迹分析[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊2):41-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.009.
ZONG Wangyuan, LIAO Qingxi, HUANG Peng, et al. Design of combined rape threshing device and analysis of rape cane movement trail[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (Supp. 2): 41-46. (in Chinese)
- 徐立章,李耀明,王成红,等.切纵流双滚筒联合收获机脱粒分离装置[J/OL].农业机械学报,2014,45(2):105-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140218&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.018.
XU Lizhang, LI Yaoming, WANG Chenghong, et al. A combinational threshing and separating unit of combine harvester with a transverse tangential cylinder and an axial rotor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 105-108. (in Chinese)
- 李耀明,王成红,徐立章,等.切纵流联合收获机脱粒分离装置田间试验与参数优化[J/OL].农业机械学报,2014,45(11):111-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.017.
LI Yaoming, WANG Chenghong, XU Lizhang, et al. Parameter optimization and field test of threshing and separation device in tangential longitudinal combine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 111-116. (in Chinese)
- 陈霓,黄东明,陈德俊,等.风筛式清选装置非均匀布气流清选原理与试验[J].农业机械学报,2009,40(4):73-77.
CHEN Ni, HUANG Dongming, CHEN Dejun, et al. Theory and experiment on non-uniform air-flow cleaning of air-screen cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):73-77. (in Chinese)
- 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(12):217-221.
CHENG Fang, WANG Jun. Test study on the flow field above surface of the air and screen cleaning mechanism[J]. Transactions of

- the CSAE, 1998, 14(12):217-221. (in Chinese)
- 6 贾晶霞,刘俊峰,杨欣,等. 振动筛分性能的影响因素及分析[J]. 河北农业大学学报,2003,26(1):86-89.
JIA Jingxia, LIU Junfeng, YANG Xin, et al. The analysis on the influence factors of vibrating sieve property[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2003, 26(1): 86-89. (in Chinese)
- 7 李耀明,王智华,徐立章,等. 油菜脱出物振动筛分运动分析及试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(9):111-114.
LI Yaoming, WANG Zhihua, XU Lizhang, et al. Motion analysis and experimental research of rape extractions on vibration sieve[J]. Transaction of the CSAE, 2007, 23(9): 111-114. (in Chinese)
- 8 李杰,闫楚良,杨方飞. 联合收割机振动筛的动态仿真与参数优化[J]. 吉林大学学报(工学版),2006,36(5):701-704.
LI Jie, YAN Chuliang, YANG Fangfei. Dynamic simulation and parameter optimization of the combine harvester vibration sieve[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(5): 701-704. (in Chinese)
- 9 张义峰,赵妍,衣淑娟,等. 纵轴流风筛式清选装置参数的试验研究[J]. 农机化研究,2010,32(8):146-149,157.
- 10 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)
- 11 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.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.
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)
- 12 高连兴,李献奇,关萌,等. 双吸风口振动式花生荚果清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):110-117.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150316&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.016.
GAO Lianxing, LI Xianqi, GUAN Meng, et al. Design and test on cleaning device of peanut pods with double air-suction inlets with vibration screen[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 110-117. (in Chinese)
- 13 周学建,袁华杰,闫卫红,等. 联合收获机吸杂口偏置型旋风分离清选装置试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):80-85,159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140813&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.013.
ZHOU Xuejian, YUAN Huajie, YAN Weihong, et al. Performance experiment on cyclone separating device based on off-centered inlet scoop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 80-85, 159. (in Chinese)
- 14 唐忠,李耀明,李洪昌,等. 联合收获机风筛式清选装置清选室内涡流试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12):62-66.
TANG Zhong, LI Yaoming, LI Hongchang, et al. Analysis on the eddy current of the air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 62-66. (in Chinese)
- 15 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. 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)
- 16 王庆祝,赵金川,刘荣昌,等. 高速气流清选农作物籽粒的机理探讨[J]. 河北职业技术师范学院学报,2002,16(4):44-48.
- 17 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 18 李骅. 风筛式清选装置设计理论与方法研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.
LI Hua. Research of modern design method for air-and-screen cleaning device[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 19 田荣钢,林君堂,王海龙,等. 玉米收获机输送清选系统的研究设计[J]. 农机化研究,2012,34(6):93-96.
TIAN Ronggang, LIN Juntang, WANG Hailong, et al. Study and design of conveying and cleaning system of corn harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(6): 93-96. (in Chinese)
- 20 吴守一. 农业机械学(下册)[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- 21 王志华. 基于 ADAMS 的油菜收获机清选装置的虚拟设计与试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2003.
WANG Zhihua. Virtual design of cleaning plant of cole harvester based on ADAMS and test research[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2003. (in Chinese)
- 22 镇江农学院. 农业机械学(下册)[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- 23 SIMONYAN K, YILJEP Y, MUDIARE O. Modeling the cleaning process of a stationary sorghum thresher[J]. Agricultural Engineering International, 2006(8): 1-17.
- 24 FRELTAG D R. Dimensional analysis of performance of pneumatic tires on sand[J]. Transactions of ASABE, 1968, 3(3): 51-68.
- 25 袁志发,周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000.