

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.011

花生捡拾收获机三风系风选系统流场数值模拟与试验

王伯凯^{1,2} 于昭洋^{1,2} 胡志超^{1,2} 曹明珠^{1,2} 张鹏^{1,2} 王冰^{1,2}

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部现代农业装备重点实验室, 南京 210014)

摘要: 受复杂作业环境影响,轴流式花生捡拾收获机的风选过程存在风选损失率高、含杂率高等问题,通过开展不同条件下的数值仿真试验,分析了4种颗粒的速度、位移及轨迹变化情况,确立了由横流风机、主离心风机、副离心风机组配的三风系风选系统的工作参数及其范围,并基于Box-Behnken的中心组合设计理论,以横流风机转速、吸秧高度、吸杂高度三因素作为影响因子,开展响应面试验研究,分析各因素对风选损失率和含杂率的影响并对影响因素进行优化。试验结果表明:风选损失率影响由大到小为吸杂高度、横流风机转速、吸秧高度;含杂率影响由大到小为横流风机转速、吸杂高度、吸秧高度,求解的最优参数组合为:横流风机转速1 508 r/min、吸秧高度181 mm、吸杂高度211 mm,对应的风选损失率为1.52%、含杂率为1.01%,比优化前分别降低了1.42、1.26个百分点。

关键词: 花生收获机; 多风系风选系统; 数值模拟

中图分类号: S225.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0103-12 OSID: 

Numerical Simulation and Experiment of Flow Field in Three Air Systems of Air Separation System of Peanut Pickup Harvester

WANG Bokai^{1,2} YU Zhaoyang^{1,2} HU Zhichao^{1,2} CAO Mingzhu^{1,2} ZHANG Peng^{1,2} WANG Bing^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China
2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: There were some problems during peanut picking and harvesting, such as high loss rate and high impurity rate, which affected the harvest quality and increased the harvest cost. In view of the problems of high loss rate and high impurity content in process of axial peanut harvester, according to the physical characteristics and air flow characteristics of various types of particles in peanut pod mixture, a winnowing system was designed. The motion state of four kinds of particles in air separation space were simulated and analyzed by Fluent-EDEM coupling analysis. Through numerical simulation experiments under different conditions, the working parameters and scope of winnowing system were established. Based on Box-Behnken's central combination design theory, response surface experiment was carried out to analyze the influence of various factors on winnowing loss rate and impurity rate and influencing factors. The experimental results showed that the significant order of influence of air separation loss rate was impurity suction height, cross-flow fan speed and seedling suction height. The remarkable order of impurity content was cross-flow fan speed, impurity suction height and seedling suction height. The optimal parameter combination was as follows: cross-flow fan speed of 1 508 r/min, seedling suction height of 181 mm and impurity suction height of 211 mm, and the corresponding air separation loss rate and impurity content were 1.52% and 1.01%. Compared with that before optimization, it was decreased by 1.42 percentage points and 1.26 percentage points, respectively. The research results could provide reference for the research of air separation system of peanut picking and harvesting machine. This experiment was based on the air separation system of axial-flow peanut full-feeding harvester, and the experiment object was only "Shanhua 9". It was suggested that the performance of different peanut varieties and harvesting equipment with different structures should be discussed in depth.

Key words: peanut harvester; multi-fan air separation system; numerical simulation

收稿日期: 2020-10-16 修回日期: 2021-08-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(51905282)、江苏省自然科学基金项目(BK2019140)和国家现代农业产业技术体系项目(CARS-13)
作者简介: 王伯凯(1987—),男,助理研究员,主要从事智能农机装备和虚拟仿真技术研究,E-mail: wangbokai219@163.com
通信作者: 胡志超(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究,E-mail: nfzhongzi@163.com

0 引言

花生是我国重要的油料作物和食品原料^[1-4],对于保障国家油料和食物供给安全具有战略意义。联合国粮农组织(FAO)统计数据显示,2019 年中国花生种植面积 $4.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$,居世界第 2 位;产量 $1.75 \times 10^7 \text{ t}$,居世界第 1 位。但当前我国大部分花生种植区收获方式仍以半机械化和人工收获为主^[5-9],强度大、效率低,严重制约花生生产,花生捡拾收获装备可对挖掘收获后摊铺田间的花生植株进行高效捡拾收获,经济便捷。但花生捡拾收获过程中风选环节仍然存在风选损失率高、含杂率高等问题,影响收获质量,增加收获成本。

国外学者针对农作物风选进行了大量研究。CLEARY 等^[10]利用三维离散元法对垂直振动筛的筛分过程进行了研究,并以仿真数据为基础分析了其透筛机理;MEKONNEN 等^[11]针对水稻联合收获机,应用 CFD 软件对风机气流开口对作业机清选性能影响效果进行了模拟与试验验证。近年来,国内学者对该方面的研究也较为深入^[12]。高连兴等^[13]运用振动筛与双风口气吸组合式清选原理,对新型花生摘果机的清选系统进行了性能试验和优化,确定了最佳结构参数和工作参数。王东伟等^[14]针对研发的自走式花生联合收获机清选系统进行了理论计算与田间试验,确定了影响清选质量的最优结构参数和工作参数。于昭洋等^[15]设计了一种无阻滞的花生清选机构,对解决含杂率高、损失率高问题取得重要进展。但目前针对轴流式花生捡拾收获机,从风选流场数值模拟方面对风选质量进行的研究较少。

针对轴流式花生捡拾收获机收获过程中存在风选损失率高、含杂率高等问题,依据花生荚果混合物中各型颗粒的物理特性和空气流动特性,本文设计一种多风系组配的风选系统,通过对风选系统进行流场数值模拟与试验,实现荚果、长茎秆、短茎秆、土杂的高效高质分离和稳定均匀清选,以期花生捡拾收获机风选系统的研究提供参考。

1 总体结构与风选系统设计

1.1 各型颗粒的基本特性

荚果混合物成分主要有荚果、长茎秆、短茎秆、土杂等,为合理设计风选系统,随机选取荚果、长茎秆、短茎秆、土杂样本 200 个,分别测量每个样本主要物理特性参数,其各成分经测量:荚果平均三轴尺寸(长×宽×高)为 $37.2 \text{ mm} \times 10.6 \text{ mm} \times 9.8 \text{ mm}$,长茎秆平均尺寸(长×直径)为 $102.8 \text{ mm} \times 3.7 \text{ mm}$,

短茎秆平均尺寸(长×直径)为 $39.8 \text{ mm} \times 3.4 \text{ mm}$,土杂平均三轴尺寸(长×宽×高)为 $3.6 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm} \times 5.1 \text{ mm}$,各颗粒其它基本物性参数如表 1 所示。

表 1 各型颗粒的基本物理特性参数
Tab.1 Basic physical properties of various types of particles

参数	荚果	长茎秆	短茎秆	土杂
含水率/%	19.2	22.5	20.7	16.2
质量百分比/%	47.3	22.7	20.4	9.6
悬浮速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	9.2~13.4	7.5~8.8	4.6~6.1	2.2~4.3

1.2 试验台总体配置方案

针对轴流式花生捡拾收获机的作业原理及结构特点,结合花生荚果混合物中各型颗粒的物理特性和空气流动特性,设计由横流风机、主离心风机、副离心风机有序组配的三风系风选系统,并将其配置于自行研制的轴流式捡拾收获机上,构建自走式田间收获试验台(图 1),该试验台主要由捡拾机构、螺旋输送机、风选系统、提升装置、底盘系统等组成,试验台可进行风选系统结构参数、作业参数的优化试验。

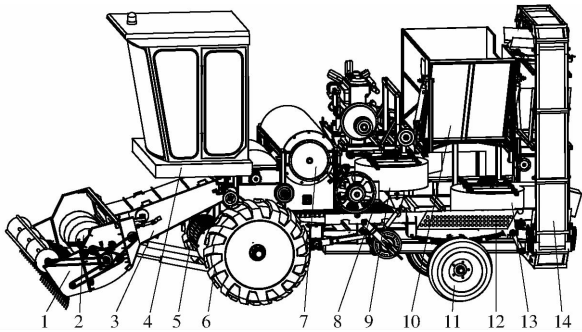


图 1 多风系清选试验台总体结构简图

Fig.1 General structure diagram of multi-fan air cleaning experiment platform

1. 捡拾机构 2. 螺旋输送机 3. 输送槽 4. 驾驶室 5. 横流风机 6. 驱动轮 7. 摘果装置 8. 上筛 9. 主离心风机 10. 集果箱 11. 后轮 12. 下筛 13. 副离心风机 14. 提升装置

1.3 风选系统结构及工作机理

风选系统结构如图 2 所示,主要由横流风机、主离心风机、副离心风机、上筛及下筛组成。上筛通过连杆与下筛连接,做往复运动。三风机呈前、中、后斜错位布置,横流风机位于上筛前,宽度略大于上筛前端宽度,主离心风机位于上筛后上方,副离心风机位于下筛后上方,三风机形成三风系清选,其多向气流可以增加果杂的分离程度,能在减小含杂率条件下降低风选损失率,确保花生收获时高效低损清选。

风选系统相关工作参数如表 2 所示,风选系统工作原理如图 3 所示,工作时,上筛和下筛做往复运

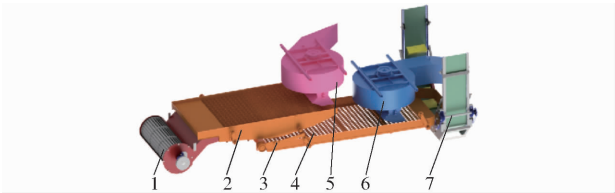


图 2 风选系统结构简图

Fig. 2 Structure schematic of air separation system

1. 横流风机 2. 上筛 3. 连杆 4. 下筛 5. 主离心风机 6. 副离心风机 7. 提升装置

表 2 风选系统相关工作参数

Tab. 2 Relevant working parameters of air separation system

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 420×1 100×1 350
主离心风机转速/(r·min ⁻¹)	1 450
副离心风机转速/(r·min ⁻¹)	1 200
横流风机风口倾角/(°)	40
筛面倾角/(°)	5.6
振动筛振幅/mm	5
筛子振动频率/Hz	4.5

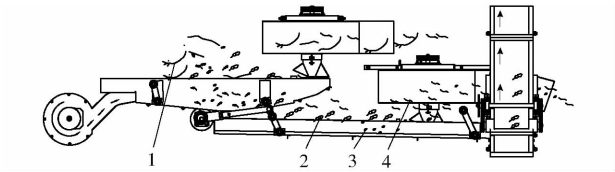


图 3 风选系统工作原理图

Fig. 3 Schematic of air separation system

1. 长茎秆 2. 荚果 3. 土杂 4. 短茎秆

动,三风机在传动机构作用下运转。从摘果装置凹板落下的花生荚果混合物分两路运动:一是长茎秆(长度大于 75 mm)受上筛阻挡停留在上筛上,并在横流风机吹送下向后运动,当运动至主离心风机负压吸附范围内时,被吸杂口吸入,从排杂口排出;二是荚果、短茎秆、土杂在主离心风机和下筛的吹抛作用下分散、分层后,短茎秆运动至副离心风机负压吸附范围内时,被吸杂口吸入,从排杂口排出;土杂则在重力作用下穿过下筛孔,落至下方;荚果则继续沿筛体方向运动。此过程中三风系形成的多向气流增加脱出物的分离程度,有利于提升清选效果。

2 关键部件结构设计

2.1 清选筛设计

2.1.1 清选筛尺寸确定

该风选系统配置上筛和下筛,其中上筛面积对喂入量影响较大,确定合适的上筛筛面尺寸,对实现清选筛高效顺畅清选作业具有重要意义。上筛筛面尺寸与喂入量满足条件^[16]

$$L_1B_1=\frac{Q_s}{q_s}$$

(1)

式中 L_1 ——筛面长度,mm
 B_1 ——筛面宽度,mm
 Q_s ——最大喂入量,kg/s
 q_s ——清选筛单位面积可承担的喂入量,取 3 kg/(s·m²)

根据荚果混合物实际落料的宽度确定筛面宽度 B_1 为 1 000 mm,为实现高效清选,选取最大喂入量 6 kg/s,得 L_1 为 2 000 mm。上、下筛为上下平行布置,均为板状筛面,根据 4 种颗粒的基本尺寸确定上筛筛孔为 30 mm×70 mm 的长孔,下筛筛孔为直径 6 mm 的圆孔。

2.1.2 清选筛工作参数

清选筛的主要工作参数包括振动频率、振幅、振动方向角、筛面倾角,各参数对颗粒在筛面上的跳动状态影响很大,根据清选筛运动机理,各参数满足条件^[17]

$$f_z=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{gk_z\cos\alpha_1}{A_1\sin\delta_1}}$$

(2)

式中 f_z ——振动频率,Hz
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s²
 k_z ——抛射强度
 α_1 ——筛面倾角,(°)
 δ_1 ——振动方向角,取 45°
 A_1 ——筛面振幅,m

k_z 对筛面物料的透筛有直接影响,平面筛抛射强度一般为 2.5~4.0,考虑荚果混合物的物理尺寸、含水率、摩擦力,抛射强度越大,损失率越高, k_z 设计为 2.5;农用平面筛倾角一般在 -10°~10°之间^[18],倾角越大,颗粒在筛体的运动时间越短,结合前期试验,两筛面倾角均设为 5.6°; A_1 增大,筛孔堵塞现象将会大大降低,也有利于分层,考虑上下筛与主、副离心风机吸杂口的距离,并参照文献[15], A_1 设计为 0.008 m,因此,确定 $f_z=10$ Hz。

2.2 横流风机设计

横流风机结构如图 4 所示,主要由蜗舌、风机叶片、带轮、侧板、出风口等组成。其作用是对进入风选系统的荚果混合物以稳定风压吹散,并将长茎秆、短茎秆分别吹向主离心风机和副离心风机的负压吸附范围内,并与荚果分散、脱离。

风选系统配置如图 5 所示,主要参数包括风机倾角、出风口高度、出风口宽度、叶轮个数及转速。

横流风机出风口倾角与高度决定了出风口吹风面积,也影响了颗粒的分散程度,根据几何关系,两者满足条件^[18]

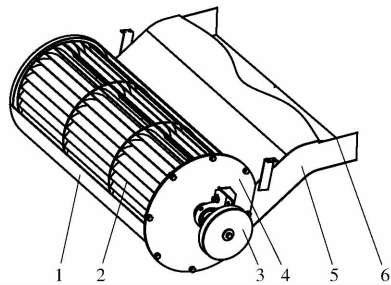


图 4 横流风机结构简图

Fig. 4 Schematic of air separation system configuration structure

1. 蜗舌 2. 风机叶片 3. 带轮 4. 侧板 5. 外壳 6. 出口风

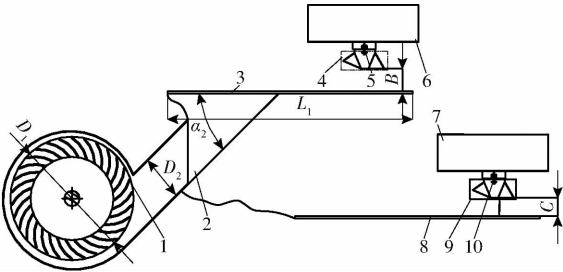


图 5 风选系统配置简图

Fig. 5 Schematic diagram of air separation system

1. 叶轮 2. 出风口 3. 上筛 4. 上调节螺栓 5. 吸秧口 6. 主离心风机蜗壳 7. 副离心风机蜗壳 8. 下筛 9. 下调节螺栓 10. 吸杂口

$$D_2 = k_1 L_1 \sin \alpha_2 \tag{3}$$

式中 D_2 ——出风口高度, mm
 k_1 ——系数, 取 0. 4
 α_2 ——出风口倾角, ($^\circ$)

根据《农业机械设计手册》, 出风口倾角 α_2 一般不超过 45° , 结合整体结构配置, 设计 $\alpha_2 = 40^\circ$, 则由式(3)可得出风口高度 $D_2 = 480$ mm。

荚果混合物透过上筛进入清选室后, 为使其充分吹散、分离, 横流风机所需风量满足方程

$$Q_1 = \frac{k_2 Q_t}{\mu_1 \rho} \tag{4}$$

式中 Q_1 ——所需风量, m^3/s
 k_2 ——秧杂占比, %
 Q_t ——喂入量, kg/s
 μ_1 ——杂质气流的混合浓度比, 取 0. 3
 ρ ——空气密度, 取 $1. 29 \text{ kg}/\text{m}^3$

透筛混合物中主要杂质是短茎秆和土杂, 通过前期试验可得混合物中短茎秆、土杂占比一般为 25%, 喂入量 Q_t 为 $2. 5 \text{ kg}/\text{s}$, 因此, 所需风量 Q_1 为 $1. 6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

荚果混合物中各型颗粒的物理特性和空气流动特性不同, 为使荚果、短茎秆、土杂高效高质分离, 横流风机出风口气流速度应满足

$$\begin{cases} v_h = \frac{1\,000 Q_1}{D_2 B_2} \\ v_h \sin \alpha_2 < \lambda_1 v_j \end{cases} \tag{5}$$

式中 v_h ——横流风机出口风速, m/s
 B_2 ——横流风机出口宽度, m
 λ_1 ——安全系数, 取 0. 9
 v_j ——荚果最小悬浮速度, 取 $9. 2 \text{ m}/\text{s}$

根据式(4)、(5)确定 $B_2 = 0. 32 \text{ m}$, 并根据目前谷物联合收获机横流风机转速一般为 $1\,100 \sim 1\,200 \text{ r}/\text{min}$ 时, 谷粒清洁度可达 98% 以上, 由于花生荚果混合物中各型颗粒的悬浮速度、颗粒质量大于谷物物料, 并结合试验测试, 将横流风机转速设为 $1\,400 \sim 1\,600 \text{ r}/\text{min}$ 。

通过以上参数, 参考深圳美风机电技术有限公司生产的 MFD60 型横流风机, 设计叶片数为 30, 叶片直径 $D_1 = 600 \text{ mm}$, 叶轮与壳体的间隙为 10 mm 。

2. 3 主、副离心风机设计

为实现风选系统上、下筛处产生均匀、稳定气流, 降低风选损失率和含杂率, 依据双层筛结构特点, 选择蜗型壳体离心风机。

主、副离心风机的结构如图 6 所示, 由于主、副离心风机的结构和工作原理相似, 仅对副离心风机参数进行设计, 主要参数包括吸秧高度 B 、吸杂高度 C 、副离心风机风压全压 h_f 及副离心风机转速 n_1 。



图 6 主、副离心风机结构简图

Fig. 6 Structure diagrams of two types of centrifugal fans

1. 吸杂口 2. 蜗壳 3. 悬架 4. 带轮 5. 主离心风机出口 6. 副离心风机出口 7. 风机叶片 8. 调节螺栓 9. 吸杂口 10. 驱动轴

为保证花生荚果混合物中短茎秆能够由下吸杂口吸入, 同时降低风选损失率, 根据流体力学理论, 应满足条件^[19]

$$\begin{cases} h_f = h_j + h_d \\ h_j = \frac{\xi l \rho v_x^2}{2 r_1 g} + \frac{\eta \rho v_x^2}{2 g} + \frac{\gamma \rho v_x^2}{2 g} \\ h_d = \frac{\rho v_x^2}{2 g} \\ \lambda_2 v_d \leq v_x \leq \lambda_3 v_j \end{cases} \tag{6}$$

式中 h_j ——静压, Pa h_d ——动压, Pa
 ξ ——气流摩擦因数, 取 0. 65
 v_x ——吸杂口风速, m/s
 l ——风道长度, 取 $1. 87 \text{ m}$

η ——管道对气流阻力系数,取 0.35^[20]
 γ ——风机进出口对气流的阻力系数,取 0.6^[20]
 r_1 ——风管水力半径,取 0.042 m
 λ_2 ——吸杂安全系数,取 1.2
 λ_3 ——荚果损失安全系数,取 0.95
 v_d ——短茎秆最大悬浮速度,取 6.8 m/s

由式(4)~(6)计算得出,副离心风机风压全压为 112~158 Pa。

副离心风机转速计算式为

式中 D ——副离心风机叶轮外径,一般在 250~1 000 mm 之间,取 720 mm
 ε ——计算系数,取 0.40

$$n_1 = \frac{60}{\pi D \sqrt{\varepsilon \rho}} \sqrt{h_f g} \tag{7}$$

由式(6)、(7)计算得副离心风机的转速为 1 219~1 447 r/min,为提高吸杂效率,同时考虑传动配置、降低功耗,设计副离心风机转速为 1 250 r/min。

通过查询风机性能曲线和离心风机性能表,选择 4-79 型离心风机。

由于主、副离心风机两者结构和作业原理基本相同,通过同样的分析过程设计主离心风机转速为 1 450 r/min。

3 数值模拟

果杂混合物中的荚果、长茎秆、短茎秆、土杂在风选空间的运动分布状态和相互作用极为复杂,是一个复杂的气体、颗粒两相流动系统,其中有气流对果杂混合物的运动状态的影响,也有果杂混合物对气流场的影响,还有果杂混合物自身交互作用的影响以及果杂混合物与筛面之间的相互碰撞的影响。传统力学计算方法无法实现对复杂颗粒场的准确分析,而 Fluent-EDDEM 耦合分析可对 4 种颗粒在风选空间运动状态进行仿真分析,确定影响风选质量的参数范围,并准确分析其运动状态,为风选装置的研究提供充分依据。

3.1 风选系统仿真模型

使用 Autodesk Inventor 对风选系统进行三维建模,导入到 ICEM 模块中构建网格模型,对清选室、主离心风机和副离心风机流体域采用多面体结构网格划分^[21],并划分边界层和 O-Block,网格数为 565 479,节点数为 96 475,并分别定义风选流体域各入口、出口(图 7)。

3.2 颗粒仿真模型

利用 EDEM 设置相关参数,对荚果、长茎秆、短茎秆、土杂进行颗粒造型(图 8),由于 4 种颗粒的形

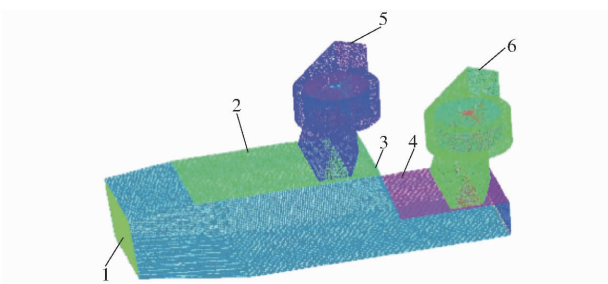


图 7 流场网格划分

Fig. 7 Mesh generation of flow field

1. 进风口 2. 上出风口 3. 中出风口 4. 后出风口 5. 前排风口 6. 后排风口

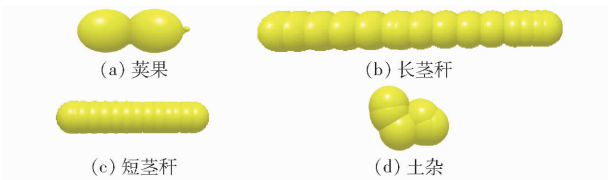


图 8 4 种颗粒造型

Fig. 8 Four kinds of particle modeling

状、尺寸、质量多样,为提高运算效率,将 4 种颗粒视为由尺寸不同的刚性体小球组合而成。各颗粒基本结构参数如表 3 所示,根据前期试验测定,荚果、长茎秆、短茎秆、土杂间动摩擦因数、静摩擦因数设置如表 4 所示。

表 3 各颗粒基本结构参数

Tab. 3 Basic structural parameters of each particle			
颗粒类型	小球数	长径比	球形度
荚果	9	2.13	0.69
长茎秆	30	15.32	0.32
短茎秆	17	10.79	0.40
土杂	8	1.54	0.57

表 4 各型颗粒间的动/静摩擦因数

Tab. 4 Friction coefficient between various types of particles				
颗粒类型	荚果	长茎秆	短茎秆	土杂
荚果	0.09/0.18			
长茎秆	0.09/0.18	0.09/0.18		
短茎秆	0.09/0.18	0.09/0.18	0.09/0.18	
土杂	0.08/0.17	0.08/0.17	0.09/0.18	0.06/0.15

3.3 耦合试验

3.3.1 参数设置

将划分后的网格导入 Fluent 中进行数值仿真分析,将相同的风选系统网格文件导入 Fluent 软件中进行流体模拟参数设置,由于风选系统内的流场是湍流流动和复杂边界层流动,湍流模型选 RNG $k-\epsilon$,求解算法采用 Phase Coupled Simple,耦合步长设为 0.01、步数设置为 300。空气粘度为 1.79×10^{-5} Pa·s,湍流强度设为 6%,压力梯度项采用 Presto

格式,数值求解算法采用非交错网格的 Simplec 算法,对流项采用 Quick 格式^[22-23]。

将风选系统仿真模型保存为 step 格式导入 EDEM 中。在 EDEM 中采用 Hertz Mindlin (no-slip) 接触模型,风选系统内固体材料均设置为 Q235 钢。其它参数如表 5 所示。然后连通 Fluent - EDEM 耦合接口,启动软件进行耦合模拟。

表 5 EDEM 模拟参数
Tab.5 EDEM simulation parameters

参数	荚果	长茎秆	短茎秆	土杂	钢
泊松比	0.32	0.30	0.30	0.25	0.30
剪切模量/Pa	1.2×10^8	1.2×10^8	1.2×10^8	1.2×10^8	2.0×10^{11}
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3 700	1 200	1 500	2 000	7 800
颗粒数量	无限制	无限制	无限制	无限制	
颗粒生成速率/($\text{个} \cdot \text{s}^{-1}$)	300	90	210	80	
颗粒直径/mm	9 ~ 20	6 ~ 10	1 ~ 5	5 ~ 10	
颗粒生成位置及方向	随机	随机	随机	随机	

3.3.2 单因素仿真试验

为确定不同参数的范围,进行单因素仿真试验。风选系统的颗粒流量设定为 2.5 kg/s,并依据实际作业过程中 4 种颗粒比例,换算荚果、长茎秆、短茎秆、土杂在颗粒工厂处的生成速率。主、副离心风机转速分别设定 1 450、1 250 r/min,并依据前期试验测试结果,吸秧高度 B(图 5)和吸杂高度 C(图 5)分别调整至公称高度 175、195 mm,横流风机转速设定 1 300、1 400、1 500、1 600、1 700 r/min 5 个水平进行耦合试验,仿真步长均为 1×10^{-6} s,仿真时间均为 5 s。

5 个水平的分离效果如图 9 所示,其中黄色表示荚果、绿色表示长茎秆、红色表示短茎秆、黑色表示土杂。仿真试验表明,当横流风机转速 A 小于 1 400 r/min 时,沿筛体方向风速和筛孔吹出的气流速度较小,大部分长茎秆呈团状聚集,分散、分层效果差,部分不能被吹至主离心风机的吸杂范围内,且对透过上筛的果杂混合物的分层、分散和吹送效果也不明显,容易造成筛孔堵塞;当横流风机转速 A 大于 1 600 r/min,由于筛孔吹出的气流速度过大,果杂混合物透筛率降低,造成果杂团状被吹走,荚果损失增大;当横流风机转速 A 为 1 400 ~ 1 600 r/min 时,果杂混合物分离、分层和迁移效果明显,长茎秆、短茎秆能较稳定地进入吸杂范围,荚果在气流中有规律运动,并能和土杂有效分离,表明前文横流风机转速范围合理。同样,保持横流风机转速和吸杂高度固定进行试验,结果表明,吸秧高度越小,长茎秆进入吸秧口的空间变小,导致部分长茎秆无法顺畅

吸入,确定最佳吸秧高度为 150 ~ 210 mm;同样,保持横流风机转速和吸秧高度固定,吸杂高度越小,气流速度变大,荚果风选损失率上升,吸杂高度越高,气流速度变小,吸杂效果变差,确定最佳吸杂高度为 170 ~ 230 mm。

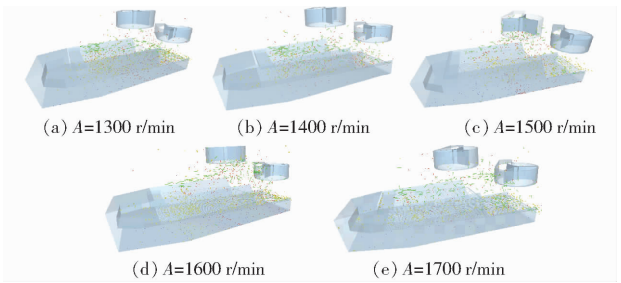


图 9 不同水平的仿真试验效果图
Fig.9 Simulation test renderings at different levels

3.4 结果与分析

3.4.1 气流速度分析

风选系统内不同区域气流速度决定了颗粒的运动状态,为研究方便,选取上筛前半部分上方 150、180、210 mm 处 3 个测量面的速度流场进行分析,各测量面 t 时刻速度流场如图 10 所示。从图 10 可以看出,3 个测量面均呈现沿 y 轴(机器直行反方向)方向总体呈波浪式递减的变化趋势,沿 x 轴速度分布均匀、总体速度区间分布类似的特点,不同在于 150 mm 测量面处,筛面上方沿 y 轴 200 ~ 275 mm 段由于位于筛孔边缘处,气流速度较低,为 1.0 ~ 3.5 m/s;筛面上方沿 y 轴 280 ~ 800 mm 段为气流主要作用区,气流速度较大,为 3.7 ~ 5.9 m/s,此区域荚果既可顺利透过上筛,部分短秸秆又可在上筛筛面被吹散;筛面上方沿 y 轴 800 ~ 1 000 mm 段产生低速区,气流速度有所下降,为 1.0 ~ 4.2 m/s,原因为受附近高速气流影响部分区域产生涡流;筛面上方 180 mm 测量面处,“高速区域”面积有所下降,主要区域速度呈现“高低交替”的波浪式特点,原因为筛孔对气流速度的影响;筛面上方 210 mm 测量面处,“高速区域”面积进一步下降,主要区域速度呈现“高低交替”的波浪式特点进一步显著,原因为筛孔对气流速度的影响随距离的增加进一步显现。

4 种颗粒平均速度变化如图 11 所示,长茎秆速度起伏较大,原因为受到上筛的振动和横流风机吹送形成的叠加效应,3.2 s 后经主离心风机吹出时,风速达到最大;短茎秆速度变化先起伏后平稳,原因为:0 ~ 1.5 s 内,受各颗粒物相互碰撞,速度变化不定,1.5 s 后受风场作用明显,速度相对平稳,在 2.2 s 经副离心风机吹出时,风速达到最大;荚果、土杂在 2 s 前速度相近,表明其可能聚合成团状,2 s 后,土杂速度渐趋向 0,表明其穿过下筛落至下方,

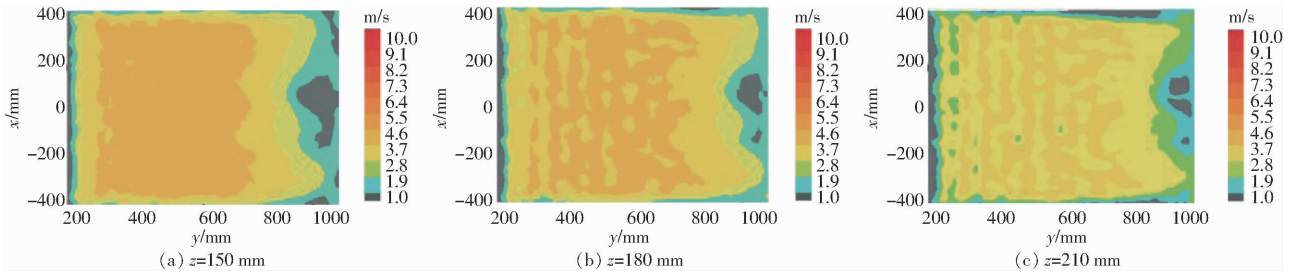


图 10 上筛上方各测量面气流速度

Fig. 10 Air flow velocity of each measuring surface above upper screen

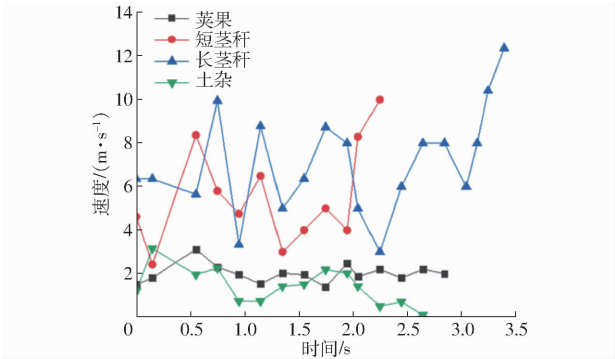


图 11 4 种颗粒平均速度变化曲线

Fig. 11 Mean velocity change curves of four kinds of particles

而荚果在风场和下筛的叠加作用下,速度继续呈波浪状变化。

3.4.2 颗粒轨迹分析

4 种颗粒位移变化曲线如图 12 所示,0~1 s 内,4 种颗粒位移变化相近,表明其呈团状;1 s 后,长茎秆受上筛阻挡,最先分离出去,2.5 s 后排出;1~1.5 s 内,短茎秆、荚果及土杂沿筛体方向位移仍相近,表明其未完全分开,1.5 s 后短茎秆迅速脱离,3 s 后排出,表明其受风场作用明显;2 s 后荚果、土杂距离变大明显,2 s 后土杂下穿下筛,与荚果分离,4 s 后荚果达到最远位置。

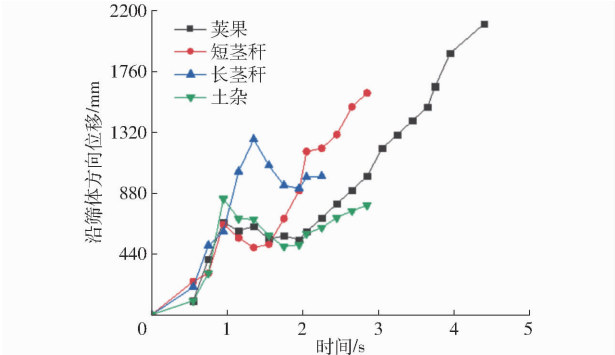


图 12 4 种颗粒位移变化曲线

Fig. 12 Displacement change curves of four kinds of particles

图 13 为随机选择 4 种颗粒进入清选空间后随时间变化轨迹迁移简图。运动初期,荚果在重力作用下下落,受上筛非孔区撞击后弹跳,后落下时透过上筛孔后落至下筛,然后在下筛和横流风机

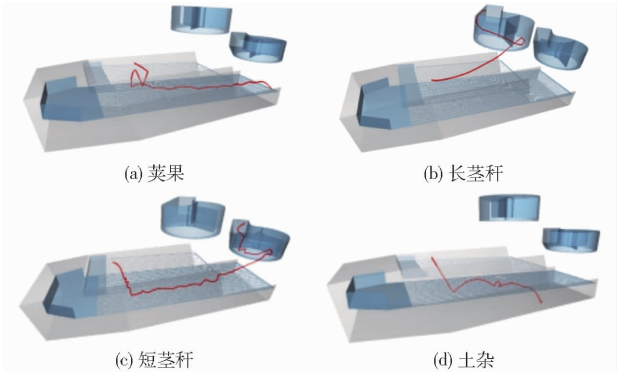


图 13 同一时刻相近区域各颗粒轨迹迁移简图

Fig. 13 Schematics of particle trajectory migration in similar areas at the same time

的振动吹送作用下向前做小波浪状前移运动;长茎秆先落至上筛后,由于尺寸较大无法通过上筛孔,后在上筛和横流风机的振动吹送作用下,往右上方运动,当运动至主离心风机的负压吸附区域,被吸入后经叶片击打抛送排出;短茎秆开始随荚果透过上筛后,在横流风机的吹送作用下运动至副离心风机的负压吸附区域,被吸入后经叶片击打抛送排出;土杂开始随荚果、短茎向前波浪式运动一段距离后,由于其尺寸最小,比重最大,在重力作用下透过下筛,落至下方,完成与荚果、短茎的分离。

风选系统中各颗粒速度、轨迹迁移及位移变化表明,4 种颗粒分离相对平顺,分离时间短而彻底,表明仿真所设置的风选系统振动频率和振幅、主离心风机转速、副离心风机转速合理,没有引起分离物料在筛面上的剧烈弹跳和分离不畅、分离不清。待仿真过程结束后对结果进行统计,获得数值模拟后的清选损失率为 1.63%,含杂率为 1.15%。

3.5 风选系统气流场试验验证

为保证模拟得到的气流速度分布规律具有参考价值,使用 TES1340 型热线风速仪(分辨率为 0.01 m/s)对上筛筛面与主离心风机吸秧口之间的测量面进行气流速度测定。将实测气流速度数据与模拟流场气流速度数据进行对比,验证仿真结果的可靠性。

采用布点法^[24],根据上筛、主离心风机结构参数,以上筛面前端中点为原点,选取荚果运动方向为 y 轴,荚果运动垂直方向为 x 轴,与筛面垂直方向为 z 轴。其中 z 轴方向150、180、210 mm即分别对应数值模拟中上筛面上方150、180、210 mm高度处的3个测量面,其中每个测量面上均匀分布了由 x 、 y 轴坐标交错构成的25个测点,通过整理测点气流速度数据,可以分析各测量面气流的分布规律,3个测量面共计75个测点,如图14所示。

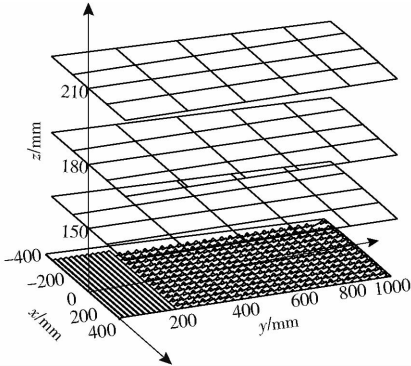


图 14 气流场测量点布置图

Fig. 14 Layout of measuring points of airflow field

各方向测量点位置为: x 轴方向测量点为-400、-200、0、200、400 mm; y 轴方向测量点为200、400、600、800、1 000 mm; z 轴方向测量点为150、180、210 mm。

通过分析数值模拟结果,筛面上方各测量面气流速度差异较为明显,因此实际测量时横流风机转速为1 600 r/min时,各测量点气流速度如表6所示。

表 6 各测量点气流速度

Tab. 6 Airflow velocity of measuring points		m/s				
z/mm	y/mm	x/mm				
		-400	-200	0	200	400
150	200	1.14	1.16	1.40	1.37	1.18
	400	1.84	4.94	6.01	4.71	3.22
	600	1.42	5.15	5.74	5.32	3.41
	800	1.63	3.53	3.37	3.96	1.74
	1 000	1.07	1.82	1.26	1.88	1.77
180	200	1.06	1.14	1.34	1.26	1.12
	400	1.72	3.93	4.12	4.32	2.85
	600	1.82	3.75	3.91	4.62	3.11
	800	0.91	3.83	4.02	3.95	1.63
	1 000	1.73	1.85	1.14	3.41	2.01
210	200	0.82	0.79	1.33	1.15	1.12
	400	1.64	3.28	3.68	3.34	2.26
	600	0.72	3.35	4.22	4.22	1.92
	800	0.72	3.22	3.13	3.41	0.62
	1 000	2.33	2.12	1.01	2.62	2.45

3个测量面总体呈现气流沿 y 轴对称均匀分布,同时沿 y 轴方向总体呈波浪式递减的变化趋势。

在 $z=150$ mm平面处, y 轴方向400~800 mm处存在一气流速度4~6 m/s的高风速区,同时 $y\geq 200$ mm处气流横向分布均匀,速度沿 y 轴对称,与图10a的气流速度分布规律一致; $z=180$ mm测量面处,高风速区的速度有所下降,呈现“高低交替”的波浪式特点,风速与图10b的气流速度分布规律一致; $z=210$ mm测量面处,高风速区的速度进一步下降,原因为筛孔对气流速度的影响随距离的增加进一步显现,与图10c的气流速度分布规律一致。

对比数值模拟和气流场试验结果可知,同工作参数下气流速度分布规律一致,可以判断数值模拟真实准确。但气流速度数值略有差异,产生差异的原因在于数值模拟过程是在不考虑气体压缩、气体粘性力以及假设整个流道密闭的条件下完成的,该状态下气流速度衰减比现场试验小^[24]。

4 田间试验

由风选系统气流场的数值模拟及验证试验得到了不同测量面气流速度的分布规律,并确定了能够产生理想流场的参数范围。为得到稳定数据,对上筛上方气流速度的分析是在静止状态下进行,具有一定局限性,因此进一步通过田间试验对前期研究进行补充。对比不同因素水平下的清选效果,研究机构动态下的实际清选效果,以得到风选系统的最佳工作参数组合。

4.1 试验条件与指标

4.1.1 试验条件

试验于2020年9月在山东省临沭县试验基地进行(图15)。试验花生品种为“山花9号”,单垄双行种植,垄距800 mm,株距275 mm,平均荚果产量0.45 kg/m²。试验前由挖掘机收获后铺放于田间。晾晒3 d后秧蔓含水率为22.67%,荚果含水率为19.82%,果柄含水率为20.25%,带果秧蔓平均长度为40 mm。果蔓总产量均值为10 kg/m²,蔓果比均值为1.2:1,试验地块面积为15 000 m²(100 m×150 m),土壤类型为壤土,土壤容重为1.4 g/cm³。

4.1.2 试验指标及测试方法

测试方法按国标GB/T 5262—2008进行。测试参照国家标准GB/T 5667—2008《农业机械生产试验方法》、农业行业标准NY/T 502—2016《花生收获机作业质量》和NY/T 2204—2012《花生收获机械质量评价技术规范》,测试内容主要包括风选损失率、含杂率。



图 15 田间试验现场
Fig.15 Field test site

4.2 性能试验

4.2.1 性能试验设计与方法

在前期单因素试验和理论分析基础上,选取横流风机转速 A 、吸秧高度 B 、吸杂高度 C 作为试验因素。田间试验中,主、副离心风机的转速设定与数值模拟和气流速度测定试验相同,分别为 1 450、1 250 r/min。试验以风选损失率 Y_1 、含杂率 Y_2 作为指标,开展三因素三水平正交试验^[25],试验因素与编码见表 7。

表 7 试验因素与编码

Tab.7 Factors and codes of experiment

编码	因素		
	横流风机转速	吸秧高度	吸杂高度
	$A/(r \cdot \min^{-1})$	B/mm	C/mm
-1	1 400	150	170
0	1 500	180	200
1	1 600	210	230

4.2.2 数据分析与处理

试验数据采用 Design-Expert 软件进行二次多项式回归分析,并利用响应面分析法对各因素相关性和交互效应的影响规律进行分析研究。

4.3 试验结果与分析

为获取较优参数组合,根据 Box - Behnken 试验原理设计三因素三水平分析试验,共包含 17 组试验,试验方案与结果如表 8 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为编码值。

4.4 回归模型的建立与检验

利用 Design-Expert 软件对表 8 中的数据开展多元回归拟合分析,建立 Y_1 、 Y_2 对 A 、 B 、 C 的响应面回归模型,并对回归方程进行方差分析^[26],如表 9 所示。 Y_1 、 Y_2 对 A 、 B 、 C 的响应面回归模型为

$$Y_1 = 1.64 + 0.1X_1 - 0.1X_2 - 0.6X_3 - 0.03X_1X_2 - 0.05X_1X_3 - 0.48X_1^2 + 0.29X_2^2 + 0.1X_3^2 \quad (8)$$

表 8 试验设计方案与结果

Tab.8 Experiment design scheme and response values

序号	因素			风选损失率	含杂率
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	0	1	-1	2.53	1.73
2	0	1	1	1.24	1.98
3	1	0	-1	1.93	1.95
4	-1	1	0	1.25	2.17
5	0	-1	1	1.53	1.82
6	-1	0	1	0.70	2.37
7	1	0	1	0.83	2.13
8	1	1	0	1.41	1.87
9	0	0	0	1.60	0.93
10	0	0	0	1.67	0.94
11	0	-1	-1	2.82	1.61
12	0	0	0	1.77	0.88
13	-1	0	-1	1.61	2.22
14	1	-1	0	1.68	1.75
15	-1	-1	0	1.39	2.02
16	0	0	0	1.59	0.81
17	0	0	1	1.56	0.79

$$Y_2 = 0.87 - 1.35X_1 + 0.07X_2 - 0.1X_3 - 0.008X_1X_2 + 0.008X_1X_3 + 0.01X_2X_3 + 0.73X_1^2 + 0.35X_2^2 + 0.57X_3^2 \quad (9)$$

由表 9 可知,风选损失率 Y_1 、含杂率 Y_2 的 P 值均小于 0.05,表明 2 个模型影响极显著。且决定系数 R^2 分别为 0.982 9、0.995 6,表明 98% 以上的响应值均可以由这 2 个模型解释。失拟项 P 值均大于 0.05,失拟不显著,因此,该模型可以预测风选系统的工作参数。根据两模型各因素回归系数,可得到各因素对风选损失率的影响由大到小为 C 、 A 、 B ,即吸杂高度、横流风机转速、吸秧高度;各因素对含杂率的影响由大到小为 A 、 C 、 B ,即横流风机转速、吸杂高度、吸秧高度。

4.5 模型交互项解析

根据表 9 结果,考察横流风机转速 A 、吸秧高度 B 及吸杂高度 C 交互作用对各性能指标的影响,并利用 Design-Expert 软件绘制响应面图。

4.5.1 交互因素对风选损失率的影响分析

交互因素对风选损失率 Y_1 响应曲面如图 16 所示。图 16a 表明风选损失率随横流风机转速 A 的增大先增大后减小,受吸秧高度 B 影响较小;图 16b 表明风选损失率随横流风机转速 A 的增大先增大后减小,同时,增大吸杂高度 C 明显有助于减小风选损失率;图 16c 表明增大吸秧高度 B 和吸杂高度 C 有助于减小风选损失率。

表 9 回归方程方差分析

Tab. 9 Variance analysis of regression equation

方差来源	风选损失率 Y_1				含杂率 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	4. 17	9	44. 75	<0. 000 1	4. 81	9	176. 83	<0. 000 1
A	0. 101 3	1	9. 78	0. 016 7	0. 145 8	1	48. 20	0. 000 2
B	0. 122 5	1	11. 83	0. 010 8	0. 037 8	1	12. 50	0. 009 5
C	2. 63	1	254. 25	<0. 000 1	0. 078 0	1	25. 79	0. 001 4
AB	0. 004 2	1	0. 407 9	0. 543 4	0. 000 2	1	0. 074 4	0. 792 9
AC	0. 009 0	1	0. 871 3	0. 381 7	0. 000 2	1	0. 074 4	0. 792 9
BC	0. 000 1	1	0. 000 1	1. 000 0	0. 000 4	1	0. 132 2	0. 726 9
A^2	0. 986 3	1	95. 23	<0. 000 1	2. 26	1	746. 84	<0. 000 1
B^2	0. 326 6	1	31. 53	0. 000 8	0. 515 8	1	170. 51	<0. 000 1
C^2	0. 054 2	1	5. 24	0. 055 9	1. 34	1	444. 33	<0. 000 1
残差	0. 072 5	7			0. 021 2	7		
失拟	0. 044 2	3	2. 09	0. 244 9	0. 002 6	3	0. 184 6	0. 901 7
误差	0. 028 3	4			0. 018 6	4		
总和	4. 84	16			0. 04	16		

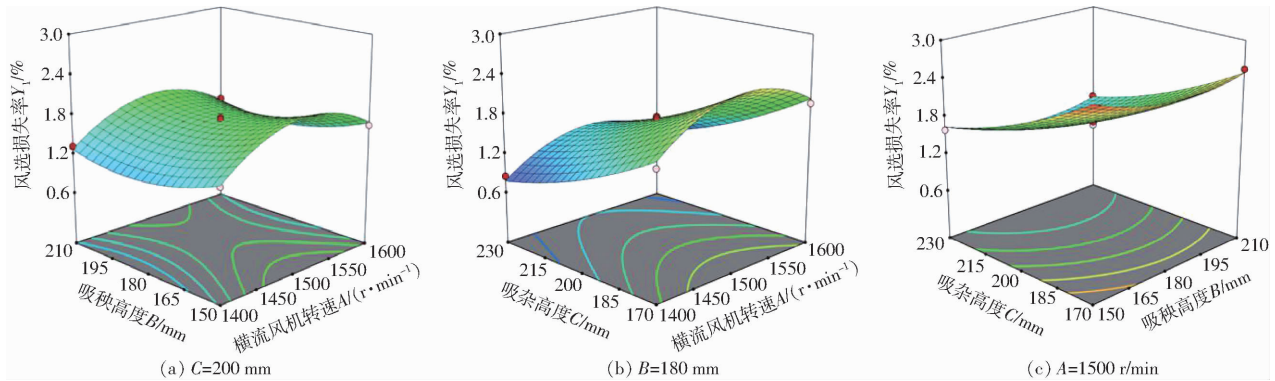


图 16 因素交互作用对风选损失率影响的响应面

Fig. 16 Response surface of interactive factors to loss rate of air separation

4. 5. 2 交互因素对含杂率的影响分析

交互因素对含杂率 Y_2 响应曲面如图 17 所示。图 17a 表明含杂率随横流风机转速 A 的增大先迅速减小后迅速增大,随吸秧高度 B 的增大先减小后缓慢增大,变化程度较小;图 17b 表明含杂率随横流风机转速 A 的增大先迅速减小后迅速增大,含杂率随吸杂高度 C 的增大先迅速减小后迅速增大;图 17c 表明含

杂率随吸秧高度 B 的增大先减小后增大,含杂率随吸杂高度 C 的增大先减小后增大。

4. 6 风选系统参数优化

依据上述试验结果分析,为进一步提升风选系统作业性能,在各试验因素水平约束条件下,将风选损失率 Y_1 、含杂率 Y_2 最小值作为优化指标,建立性能指标全因子二次回归方程,进行目标优化与最优

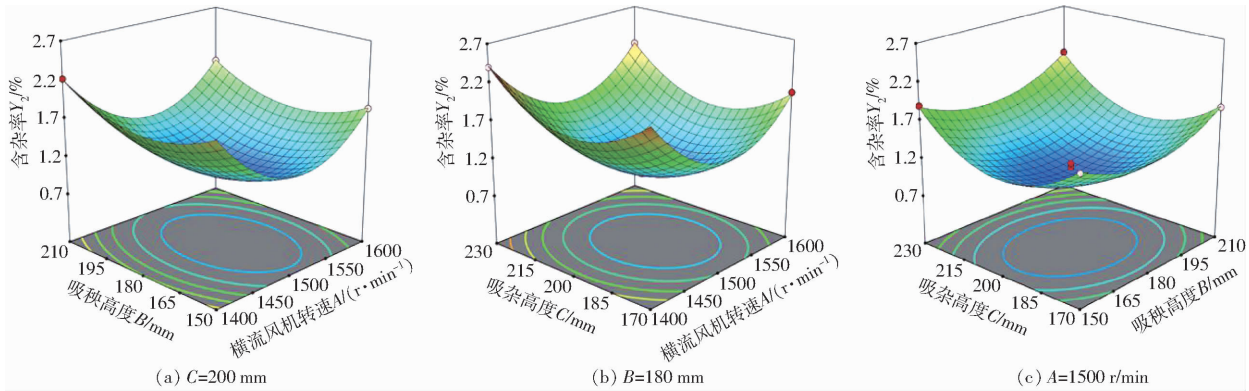


图 17 因素交互作用对含杂率影响的响应面

Fig. 17 Response surface diagrams of interaction factors to impurity content

工作参数确定：

$$\begin{cases} \min Y_1(A, B, C) \\ \min Y_2(A, B, C) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 1\,400\text{ r/min} \leq A \leq 1\,600\text{ r/min} \\ 150\text{ mm} \leq B \leq 210\text{ mm} \\ 170\text{ mm} \leq C \leq 230\text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

利用 Design-Expert 自带约束条件优化求解模块,可求得满足约束条件的最小风选损失率 Y_1 、含杂率 Y_2 的最优参数组合。求解的最优参数组合为：横流风机转速 1 507.7 r/min、吸秧高度 181.3 mm 及吸杂高度 210.7 mm,对应的风选损失率为 1.45%、含杂率为 0.98%。

由于实际工作参数很难调整到理论求解的优化值,选择一组接近优化值的参数进行田间试验验证,参数值为：横流风机转速 1 508 r/min、吸秧高度 181 mm 及吸杂高度 211 mm。试验于 2020 年 9 月在相同地点采用相同的测试方法进行,风选损失率、含杂率平均值分别为 1.52%、1.01%。与花生捡拾收获机单风道风机单层振动筛风选系统常用的一组

参数收获同等条件下的花生进行对比,优化的风选损失率、含杂率分别降低了 1.42、1.26 个百分点,综合性能明显改善。

5 结论

(1)在分析试验台工作原理的基础上,进行了风选系统关键部件的结构设计及理论分析,利用 Fluent-EDEM 耦合分析实现对 4 种颗粒在风选空间中的运动状态进行了仿真试验,分析了各颗粒速度、位移及轨迹变化情况,确定了横流风机转速、吸秧高度、吸杂高度对风选质量的影响程度,并确定各因素的参数范围。

(2)基于 Box-Behnken 的中心组合设计理论,进行风选系统工作参数优化,试验结果表明：风选损失率影响主次顺序为横流风机转速、吸杂高度、吸秧高度；含杂率影响主次顺序为吸杂高度、吸秧高度、横流风机转速,求解的最优参数组合为：横流风机转速 1 508 r/min、吸秧高度 181 mm 及吸杂高度 211 mm,对应的风选损失率为 1.52%、含杂率为 1.01%。比优化前分别降低了 1.42、1.26 个百分点。

参 考 文 献

[1] 刘娟,汤丰收,张俊,等. 国内花生生产技术现状及发展趋势研究[J]. 中国农学通报,2017,33(22):13-18.
LIU Juan, TANG Fengshou, ZHANG Jun, et al. Current status and development trends of peanut production technology in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(22): 13-18. (in Chinese)

[2] 王伯凯,吴努,胡志超,等. 国内外花生收获机械发展历程与发展思路[J]. 中国农机化,2011(4):6-9.
WANG Bokai, WU Nu, HU Zhichao, et al. Experience and thought of development of peanut harvesting mechanization at home and abroad [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(4): 6-9. (in Chinese)

[3] 高连兴,陈中玉,CHEN Charles,等. 美国花生收获机械化技术衍变历程及对中国的启示[J]. 农业工程学报,2017, 33(12):1-9.
GAO Lianxing, CHEN Zhongyu, CHEN Charles, et al. Development course of peanut harvest mechanization technology of the United States and enlightenment to China [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 1-9. (in Chinese)

[4] 吕小莲,王海鸥,张会娟,等. 国内花生机械化收获的现状与研究[J]. 农机化研究,2012,34(6):245-248.
LÜ Xiaolian, WANG Haiou, ZHANG Huijuan, et al. Research and situation on peanut machinery harvesting in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(6): 245-248. (in Chinese)

[5] JAIME CUAUHEMOC NEGRETE. Current status and strategies for harvest mechanization of peanut in Mexico [J]. SSRG International Journal of Agriculture & Environmental Science (SSRG-IJAES), 2015, 2(1): 7-15.

[6] 中华人民共和国农业部. 中国农业机械化年鉴[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2016.

[7] 徐继康,杨然兵,李瑞川,等. 半喂入花生收获机除膜摘果装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 88-93.
XU Jikang, YANG Ranbing, LI Ruichuan, et al. Design and experiment of film removing and peanut picking device for half-feeding harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 88-93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s115&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.015. (in Chinese)

[8] 王艳. 中国花生主产区比较优势研究[D]. 南京:南京农业大学,2013.
WANG Yan. Study on the comparative advantage of Chinese groundnut in main producing areas [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[9] 胡志超,彭宝良,尹文庆,等. 4LH2 型半喂入自走式花生捡拾收获机的研制[J]. 农业工程学报,2008,24(3):148-153.
HU Zhichao, PENG Baoliang, YIN Wenqing, et al. Design of 4LH2 type half-feed and self-propelled peanut combine [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 148-153. (in Chinese)

[10] CLEARY P W, SAWLEY M L. DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge [J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26(2): 89-111.

[11] MEKONNEN G G, JOSSE D B, MARTINE B. Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester: computational and experimental study [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 247-256.

- [12] 王立军,宋良来,冯鑫,等.谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J/OL].农业机械学报,2021,52(6):1-17. WANG Lijun, SONG Lianglai, FENG Xin, et al. Research status and development analysis of screening devices of grain combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6):1-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210601&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.001. (in Chinese)
- [13] 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. 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. 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. (in Chinese)
- [14] 王东伟,尚书旗,韩坤,等.4HJL-2型花生捡拾摘果联合收获机的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(11):27-36. WANG Dongwei, SHANG Shuqi, HAN Kun, et al. Design and test of 4HJL-2 harvester for peanut picking-up and fruit-picking[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11):27-36. (in Chinese)
- [15] 于昭洋,胡志超,曹明珠,等.切流式花生全喂入联合收获机清选机构设计[J].农业工程学报,2019,35(9):29-37. YU Zhaoyang, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of cleaning device of tangential flow and whole-feed peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9):29-37. (in Chinese)
- [16] 戴飞.胡麻脱粒物料分离清选机理与关键技术研究[D].兰州:甘肃农业大学,2020. DAI Fei. Study on the separating-cleaning mechanism and key technology of flax threshing material[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [17] 王宏.大型变直线轨迹等厚筛的结构动力学和动态设计研究[D].徐州:中国矿业大学,2015. WANG Hong. Study on the structural dynamics and dynamic design of the large varied-line-trajectory equal-thickness vibrating screen[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] 戴飞,付秋峰,赵武云,等.双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2021,52(4):117-125,247. DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):117-125, 247. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210412&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.012. (in Chinese)
- [20] 刘正怀,郑一平,王志明,等.微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(7):102-108. LIU Zhenghuai, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):102-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150716&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.016. (in Chinese)
- [21] 李洪昌,李耀明,唐忠,等.风筛式风选系统振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J/OL].农业机械学报,2012,43(2):79-84. LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120217&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn1000-1298.2012.02.017. (in Chinese)
- [22] 廖庆喜,杨波,李旭,等.内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2012,43(4):51-54. LIAO Qingxi, YANG Bo, LI Xu, et al. Simulation and experiment of inside-filling air-blow precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):51-54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120411&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.011. (in Chinese)
- [23] 孙舒畅.基于 DEM-CFD 耦合的气吸式玉米精密排种器工作过程仿真分析[D].长春:吉林大学,2016. SUN Shuchang. Simulation analysis of working process of air suction corn precision seed-metering device based on DEM-CFD coupling method[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [24] 王晗昊,李耀明,徐立章,等.再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(20):84-92. WANG Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20):84-92. (in Chinese)
- [25] 杨松梅,颜利民,莫毅松,等.随动式残膜回收机风选系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(12):109-115. YANG Songmei, YAN Limin, MO Yisong, et al. Design and experiment on collecting device for profile modeling residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):109-115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181213&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.013. (in Chinese)
- [26] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等.气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):75-86,139. JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):75-86, 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)