

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.010

# 蔬菜种子风力筛选机分离室气固两相流模拟与试验

黄震宇 李腾 喻志成 朱成刚 赵春宇

(上海交通大学仪器科学与工程系, 上海 200240)

**摘要:** 分离室作为蔬菜种子风力筛选机的重要组成部分,其风机频率和风门开度对种子筛选分离的质量有着重要的影响。利用 Fluent 软件的 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和 DPM 离散相模型,仿真了物料在分离室中的运动过程。用多项式拟合法分析了仿真结果,获得工作参数(风机频率和风门开度)与清选性能(清洁率和损失率)的关系。在此基础上,对清洁率和损失率进行运算,得到清选效率,该指标全面综合地反映了不同工况下清选效果的优劣。由清选效率的三维图及其等值线图能够便捷地分析分离室的最优工作参数。通过以上方法,得到上海青种子、菠菜种子和小白菜种子最优工作参数。分别是风机频率 35 Hz、风门开度 75%;风机频率 42 Hz、风门开度 80%;风机频率 36 Hz、风门开度 80%,对应的清选效率分别是 88%、84% 和 88%。设计实机验证试验,比较了不同工况下清选性能的仿真结果与试验结果,二者吻合度较高,证明了分离室气固两相流模型的可靠性。

**关键词:** 蔬菜种子; 风力筛选机; 分离室; 气固两相流

中图分类号: S223.1<sup>+</sup>2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)05-0070-07

## Simulation and Experiment of Gas-solid Two-phase Flows in Separation Chamber of Air-screening Machine for Vegetable Seeds

Huang Zhenyu Li Teng Yu Zhicheng Zhu Chenggang Zhao Chunyu

(Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Separation chamber is an important part of the seed air-screening machine, and therefore the values of its fan frequency and air outlet magnitude have significant effects on the quality of seed separation. The RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model and the DPM discrete phase model were adopted to simulate the separation process of seeds in the separation chamber. Then, the simulation results were analyzed by means of polynomial fitting, and the relationship between the working parameters, i. e. fan frequency and air outlet magnitude, and the cleaning performance, i. e. cleaning rate and loss rate were acquired. Based on this relationship, cleaning efficiency can be determined by calculating cleaning rate and losing rate, which synthetically reflects the quality of cleaning effect under different working conditions. It is convenient to analyze optimal working parameters of separation chamber by 3D map and contour map of the cleaning efficiency. By this means, the optimal working parameters of the fan frequency and air outlet magnitude for Chinese cabbage seeds, spinach seeds and pakchoi seeds, were obtained, which are 35 Hz and 75%, 42 Hz and 80%, 36 Hz and 80%, respectively. The values of corresponding cleaning efficiency are 88%, 84% and 88%. The verification test of Chinese cabbage seeds in the real machine was designed, by comparing the cleaning performance of simulation with test, found that the results of simulation and test were consistent, which proves reliability of gas-solid two-phase flows model in separation chamber. The study provides reference for design and optimization of the separation chamber of seed air-screening machine.

**Key words:** vegetable seeds; air-screening machine; separation chamber; gas-solid two-phase flows

收稿日期: 2015-10-29 修回日期: 2015-12-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA10A505)

作者简介: 黄震宇(1975—),男,副教授,主要从事农业物联网研究,E-mail: bighuang@sjtu.edu.cn

通信作者: 赵春宇(1971—),男,副教授,主要从事智能化种子成套处理系统研究,E-mail: zhaocy@sjtu.edu.cn

## 引言

分离室是风力筛选机的重要组成部分,其分离效果主要受风机频率和风门开度的影响。研究两者对清选性能的影响,对于种子风力筛选机分离室的设计与优化有重要意义。

涉及流场的研究,传统方法是通过实机试验,但此法因成本高、周期长等不足,已无法适应目前的研究要求<sup>[1]</sup>。近年来,随着计算机性能的提高和 CFD 软件的发展,数值模拟技术已成为研究流场的重要工具<sup>[2]</sup>,也越来越多地应用于农机设备的设计和优化<sup>[3-6]</sup>。

SHUKLA 等<sup>[7]</sup>使用 CFD 单相流技术,比较了不同仿真模型对旋风分离器流场的模拟效果。ENDALEW 等<sup>[8-9]</sup>使用 CFD 两相流方法,研究了风送式果园喷雾机的三维模型,利用该模型对喷雾气流速度的分布进行了预测。CHU 等<sup>[10]</sup>利用 CFD-DEM 技术,对旋风分离器的气固流动情况进行了模拟。敬志臣等<sup>[11]</sup>利用 Fluent 中 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和 DPM 离散相模型,研究了联合收获机中清选筒的流场分布和颗粒运动,优化了工作参数。

目前,农业工程领域所涉及的两相流研究对象,主要集中在喷雾机模型和旋风分离器模型,几何结构较为简单,离散相单一,研究分析也以单因素为主。本文利用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和 DPM 离散相模型,对分离室工作过程进行气固两相流模拟。研究不同工作参数对两种颗粒清选性能的影响。使用多项式拟合法求解最佳工作参数。并通过实机试验验证仿真模型的可靠性,以期对类似结构的清选系统的设计、优化提供科学的理论参考。

## 1 工作原理与仿真模型

### 1.1 分离室工作原理

分离室工作原理如图 1 所示,连接在风门处的离心风机产生负压,空气主要由入风口进入分离室,物料与少量空气从入料口进入分离室,高速的空气将物料提升至主腔体。挡板防止物料因速度过快而直接逸出分离室。因为物料中各成分悬浮速度不同,所以轻杂质通过风门被吸出分离室,而种子和重杂质会沉积在出料口区域,达到一定量后自动排出。

### 1.2 建模与网格划分

本文使用 Workbench 集成的 DesignMolder 软件建模。仿真建模尺寸与实机比例为 1:1。网格划分使用 ICEM CFD 软件。使用分块的非均匀六面体结构化网格,结果如图 2。这样既能够加快运算速度,又能够提高网格质量,避免网格因过度扭曲而引起数值扩散问题,提高计算精度<sup>[12]</sup>。网格模型包含

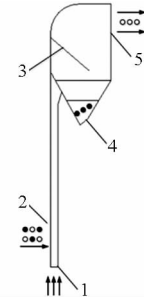


图 1 分离室工作原理图

Fig. 1 Function diagram of separation chamber

1. 入风口 2. 入料口 3. 挡板 4. 出料口 5. 风门

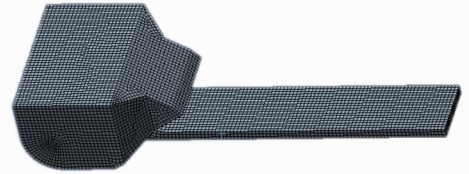


图 2 分离室网格结构

Fig. 2 Grid structure of separation chamber

371 269 个单元和 391 778 个节点,能够满足仿真的要求。

### 1.3 计算模型

分离室内气体流动属于不可压缩湍流运动,根据 MA 等<sup>[13]</sup>对标准  $k-\varepsilon$  模型、RNG  $k-\varepsilon$  模型和 RSM 模型在旋风分离器内流场的研究,可知 RNG  $k-\varepsilon$  模型比标准  $k-\varepsilon$  模型有更高的计算精度,而 RSM 模型在强旋湍流中效果并不理想,且计算量很大。综合考虑计算精度和运算量,气流场模拟采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型<sup>[14-15]</sup>。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \frac{\mu_{eff}}{\rho} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{G_k}{\rho} - \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \frac{\mu_{eff}}{\rho} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k\rho} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中  $k$ ——湍流动能

$\varepsilon$ ——湍流动能的耗散率

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ —— $k$  和  $\varepsilon$  的普朗特数

$C_{1\varepsilon}^*, C_{2\varepsilon}$ ——湍流模型系数和经验常数

$\eta$ ——无量纲参数

$\mu_{eff}$ ——湍流黏度

$G_k$ ——由层流速度梯度产生的湍流动能

因为分离室内颗粒相体积分小于 10%,可以忽略颗粒相对气流相的影响。所以颗粒相模拟选用 DPM 离散相模型。该模型把流体作为连续介质处理,而把颗粒相作为离散介质,利用已知的流场参数求解颗粒的运动方程。

颗粒相在湍流中所受的作用力很复杂,涉及到颗粒与气体、颗粒与颗粒及颗粒与壁面之间的相互作

用,在本研究中忽略颗粒间的相互作用。在颗粒运动过程中,颗粒相连续方程和动量守恒方程分别为<sup>[16]</sup>

$$\nabla \cdot (\alpha_p \mathbf{v}_p) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_p \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \mathbf{v}_p) + \rho_p \nabla \cdot (\alpha_p \mathbf{v}_p \mathbf{v}_p) = \alpha_p (-\nabla P_p + \rho_p \mathbf{g}) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_p) + r_{pg} \quad (4)$$

式中  $\alpha_p$ ——颗粒的体积分数

$\mathbf{v}_p$ ——颗粒的速度矢量

$P_p$ ——颗粒的压力

$\mathbf{g}$ ——重力加速度

$\rho_p$ ——颗粒的密度

$\boldsymbol{\tau}_p$ ——颗粒相应力张量

#### 1.4 边界条件及模拟参数设置

对于气流相,入料口和入风口被设为速度入口;风门设为压力出口;出料口在工作时通常为关闭状态,为简化计算,将其设为壁面。各边界处在不同风机频率和风门开度下的具体参数值,经实际测量确定。为研究分离室内流场分布特点,选取风机频率 35 Hz、风门开度 100% 的工况进行仿真研究,边界条件数值如表 1。

表 1 气流相边界条件

Tab.1 Boundary conditions of air phase

参数	入风口速度 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	入料口速度 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	风门压力 /Pa
数值	12.5	2.4	-1450

对于颗粒相,以上海青种子为原型,设置了空心颗粒和实心颗粒两种类型,分别代表饱满种子和轻杂质,其颗粒相参数及边界条件数值如表 2 所示。种子由入料口截面中心处均匀地水平进入分离室内,当颗粒运动至入风口和风门时,停止对其追踪,故 DPM 边界类型设为“escape”;当颗粒运动至壁面会发生反弹,故 DPM 边界类型设为“reflect”。

表 2 颗粒相参数及边界条件

Tab.2 Parameters of particle phase and boundary conditions

颗粒属性	直径/ mm	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	形状系数	质量流/ ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )
空心	2	50	0.7	0.01
实心	3	500	0.8	0.04
环境属性	颗粒初速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	法向恢 复系数	切向恢 复系数	粗糙度/ mm
数值	0.15	0.6	0.9	0.046

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 气流场分布规律分析

分离室为对称结构,故选择具有代表性的中心

平面进行分析,该平面贯穿整个分离室内部,所以包含最为全面的流场信息。图 3 是分离室中心平面的流速等值线图。

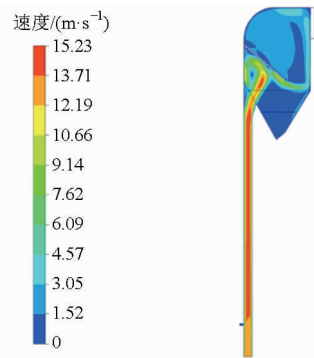


图 3 分离室中心平面的流速等值线图

Fig.3 Flow velocity contour on central plane in separation chamber

由于气流速度、方向以及分离室各部分功能结构不同,气流分布状况可分为以下 4 部分来分析:

(1) 长直的提升管道部分:入料口以上区域流速高于入料口以下区域流速,说明在入料口也有部分气体被吸入,使得流量增大,而在横截面积不变的情况下,流速加快。提升管道内的流场分布均匀,流速高,有利于把物料运输至主腔体。近壁面处由于摩擦作用,流速较低。

(2) 挡板以下部分:由于挡板阻拦的作用,导致高速的气流在冲击挡板后沿四周发散开来,一部分沿挡板下方和左右两侧运动,直至挡板边缘,又被吸向风门方向;另一部分沿挡板向上,在挡板与壁面的夹角间形成一个强旋流,同时发现该部分气流并未回流至提升管道,说明这部分气流最后是沿着垂直于等值线图的两个法向方向运动。这两部分气流的运动方向都有利于携带轻杂质从分离室离开,同时强旋流的存在,对于高速进入的物料起到缓冲减速的作用,防止种子碰撞挡板而产生破损。

(3) 出料口部分:这一区域流场分布非常均匀稳定,流速也非常低,这非常有利于那些被旋流减速或碰撞挡板而落下的饱满物料的收集,而不会因为气流较大而把沉积的饱满物料也吸出分离室。

(4) 挡板以上部分:该区域流场分布较为均匀,流速也适中,这既能使进入该区域的轻杂质被顺利吸出分离室,又能够不把那些进入该区域却又不希望被吸出的饱满物料吸走,从而使它们能够落入下方的出料口区域。

### 2.2 颗粒相运动规律分析

DPM 离散相模型是在单相流仿真基础上,通过添加离散相进行迭代计算,进而得到颗粒在流场中的运动规律。两种颗粒群运动轨迹如图 4 所示。

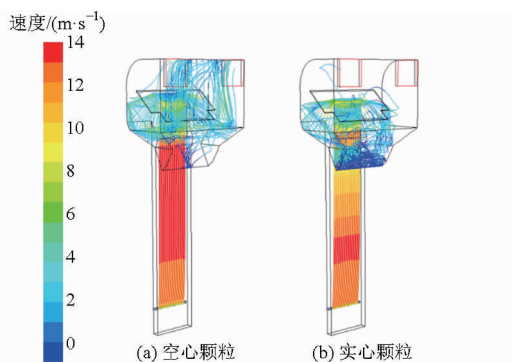


图 4 颗粒运动轨迹对比图

Fig. 4 Motion track comparison of particles

空心颗粒从入料口进入分离室,在气流作用下被吸至主腔体内,碰到挡板后,大部分沿挡板向四周散开,到达挡板边缘后,从风门处被吸出分离室;但仍有小部分空心颗粒在挡板和壁面间碰撞后,最终沉积在出料口区域。

实心颗粒进入分离室后,同样被吸至主腔体内,但是实心颗粒由于密度、惯性较大,所以上升的速度较空心颗粒慢,因此在管道的上方会和壁面发生碰撞、摩擦,导致实心颗粒进入主腔体的速度较低,这有利于实心颗粒落入主腔体下方的出料口区域。绝大部分实心颗粒都最终落在出料口区域。在实际工作中,当沉积物料的重力大于内外压强差面对出料口产生的压力时,出料口自动打开,收集的物料离开分离室,进入后续筛选环节。

清选性能包含清洁率和损失率两个指标。清洁率和损失率的定义均采用颗粒跟踪法<sup>[9]</sup>。当颗粒进入分离室时开始跟踪,跟踪步长 5 000 步,使可被分离的颗粒有足够的时间长度离开分离室。若在设定步长内颗粒仍在分离室中,便认为其无法被分离。将保留的颗粒定义为被收集的;离开的颗粒定义为被分离的。空心颗粒数目用  $H$  表示,实心颗粒数目用  $S$  表示,即可得到清洁率  $Z_1$  和损失率  $Z_2$  公式为

$$Z_1 = \frac{H_1}{S_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$Z_2 = \frac{S_1}{S_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中  $H_1$ ——被分离空心颗粒数  
 $S_1$ ——被分离实心颗粒数  
 $S_0$ ——实心颗粒总数

试验表明清洁率和损失率主要受风门开度和风机频率两个因素的影响,因此研究两者与清选性能的关系,是计算最佳工作参数的关键。

### 2.3 分离室工作参数对清选性能的影响

为了具体分析风机频率和风门开度与清选性能的关系,设计了不同工况下仿真试验。对于上海青

种子,由于风机频率在 25 Hz 以下时提升物料能力不足,风机频率在 45 Hz 以上时,大部分物料会直接被吸出分离室;而风门开度小于 50% 时,不利于轻杂质的排除。因此仿真试验中,风机频率和风门开度的范围分别为 25 ~ 45 Hz 和 50% ~ 100%。

仿真试验设计及模拟结果如表 3 所示。风门开度为自变量  $X$ ,风机频率为自变量  $Y$ ,清洁率为因变量  $Z_1$ ,损失率为因变量  $Z_2$ ,进行 2 组拟合试验,拟合方法使用三次多项式拟合。清洁率结果如图 5,损失率结果如图 6。

表 3 上海青种子仿真试验结果

Tab. 3 Simulation results of Chinese cabbage seed

编号	仿真试验因素		仿真试验指标	
	风机频率 $X/\text{Hz}$	风门开度 $Y/\%$	清洁率 $Z_1/\%$	损失率 $Z_2/\%$
1	25	50	80.78	5.39
2	25	75	82.31	9.73
3	25	100	77.69	11.85
4	30	50	88.26	1.89
5	30	75	85.63	0.58
6	30	100	83.54	2.81
7	35	50	91.95	3.02
8	35	75	89.74	2.24
9	35	100	86.04	1.21
10	40	50	93.98	10.66
11	40	75	94.53	3.12
12	40	100	90.68	2.55
13	45	50	96.97	13.49
14	45	75	98.83	8.21
15	45	100	92.21	5.32

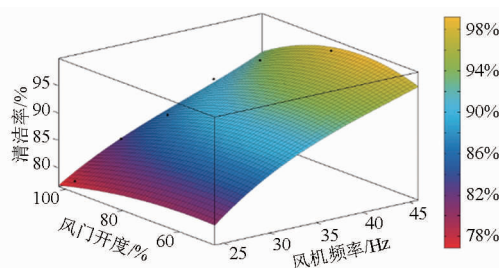


图 5 清洁率三维图

Fig. 5 3D diagram of cleaning rate

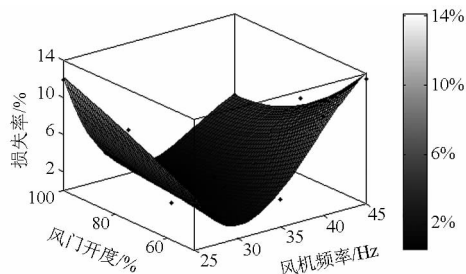


图 6 损失率三维图

Fig. 6 3D diagram of losing rate



对于清洁率,在风门开度固定的情况下,清洁率随风门开度增大而升高;而在风机频率固定的情况下,清洁率随风门开度的增大,先升高后降低。清洁率的峰值出现在风机频率 45 Hz、风门开度 70% 左右。

对于损失率,在风机频率 25 Hz 时,损失率随着风门开度增大而升高,而在 45 Hz 时,损失率随着风门开度增大而降低,损失率峰值出现在风机频率 45 Hz、风门开度 50% 和风机频率 25 Hz、风门开度 100% 时,而在另外两个极限工况下,损失率处于中等值,故损失率曲面形成一个类似中心对称、中心低两边高的凹面,最小值出现在风机频率 35 Hz、风门开度 80% 左右处。

## 2.4 清选效率

从上述分析可知,最佳的清洁率和损失率并不在同一工况下。而在实际中必须综合考虑两者。为了科学地衡量清选效果,通过对清洁率  $Z_1$  和损失率  $Z_2$  的计算,得到一个新的综合评价指标:清选效率,即

$$E = Z_1 + \gamma Z_2 \quad (7)$$

$\gamma$  为清选系数,取值为负,大小视损失率在清选中的重要性而定。因为在实际筛选过程中,分离室只是第 1 道工序,后续还有重力选和二次风选,所以低损失率比高清洁率更为重要。因此在本研究中,将  $\gamma$  取值为  $-2$ 。通过三次多项式拟合,得到清洁率函数  $Z_1(X, Y)$ 、损失率函数  $Z_2(X, Y)$ ,则清选效率函数  $E(X, Y)$  为

$$E(X, Y) = Z_1(X, Y) - 2Z_2(X, Y) \quad (8)$$

图 7 为上海青种子的清选效率率图。其中图 7a 为三维图,便于分析变化趋势,图 7b 为等值线图,便于观察三维图的峰值,选取最优工作参数。从图中可知,清选效率在风机频率 35 Hz、风门开度 75% 时达到最高值,因此该工况为上海青种子的最优工作参数。

## 2.5 颗粒相物理特性对清选效率的影响

因为在实际工作中,种子风力筛选机并不只针对一种类型的物料,还会对菠菜种子、小白菜种子等进行清选。所以以菠菜种子和小白菜种子为颗粒相原型,在相同的风机模型和清选系数  $\gamma$  下,又进行了两组仿真及拟合试验,颗粒相属性设置如表 4。实际情况下,菠菜种子含水率约为 1.9%,饱满种子飘浮速度 9.7 ~ 13.6 m/s,轻杂质飘浮速度 6.1 ~ 7.8 m/s;小白菜种子含水率约为 2.4%,饱满种子飘浮速度 8.9 ~ 11.8 m/s,轻杂质飘浮速度 5.9 ~ 7.6 m/s。

通过仿真试验得到两种物料的清选效率(图 8)。分析可知,菠菜种子和小白菜种子在风机

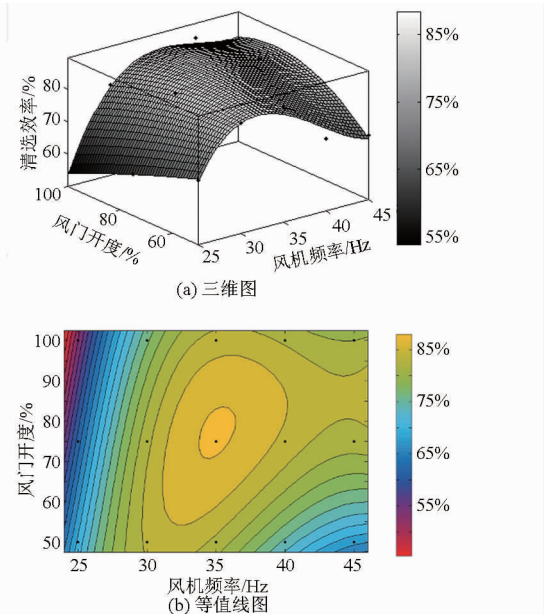


图 7 上海青种子清选效率三维图与等值线图

Fig. 7 Cleaning efficiency and contour map of Chinese cabbage seed

表 4 菠菜种子和小白菜种子的颗粒相参数

Tab. 4 Parameters of particle phase of spinach seed and pakchoi seed

颗粒属性	直径/ mm	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	形状 系数	质量流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )	
菠菜	空心	3	80	0.6	0.01
	实心	4	800	0.7	0.04
小白菜	空心	2.50	50	0.7	0.01
	实心	3.25	500	0.8	0.04

频率 42 Hz、风门开度 80% 时和风机频率 36 Hz、风门开度 80% 时,分别达到最优工作参数。通过研究发现,风机频率主要影响气流对物料的运载能力,风门开度主要影响不同大小杂质的分离,同时对流场有一定调整作用。对比可知,菠菜种子密度稍大于小白菜和上海青种子,但是体积明显大于小白菜和上海青种子,所以需要适当提高风机频率和风门开度,一方面提升运载能力,另一方面更加利于杂质分离,以达到其最优工作参数。而小白菜和上海青种子相比,密度相当,但是小白菜体积略大于上海青种子,所以并不需要提升运载能力,而只需适当增加风门开度以利于杂质分离。因此小白菜种子的最优工作参数与上海青种子的相比,风机频率基本不变,风门开度稍微增大。所以从基本物理常识和经验上判断,可以定性地认为此仿真拟合法是可行的。

## 3 试验

### 3.1 试验方案

为验证仿真的可靠性,在 FLX-150A 型种子风

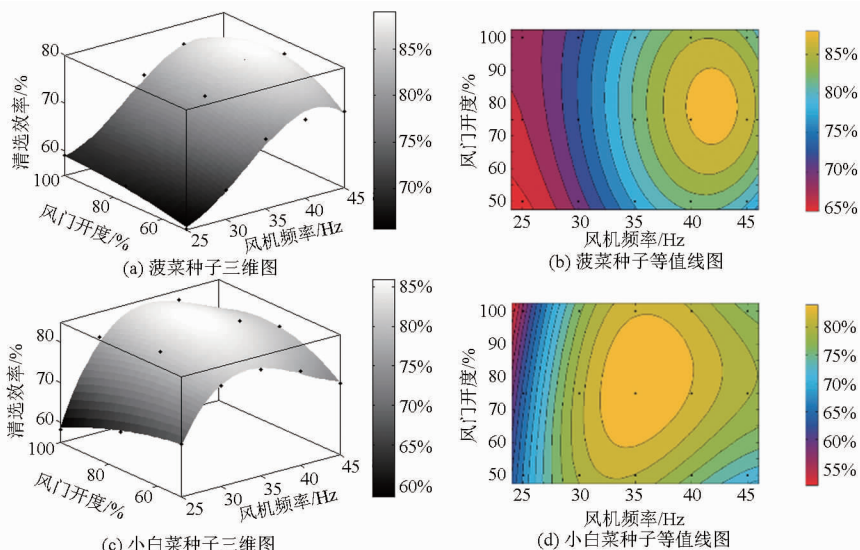


图 8 菠菜种子和小白菜种子清选效率三维及等值线图

Fig. 8 Cleaning efficiency and contour map of spinach seed and pakchoi seed

力筛选机上,进行了与仿真试验相同的 15 种工况下的实机试验。该种子风力筛选机由上海交通大学智能机电研究所设计,是智能化的蔬菜种子精选分级设备,如图 9 所示。

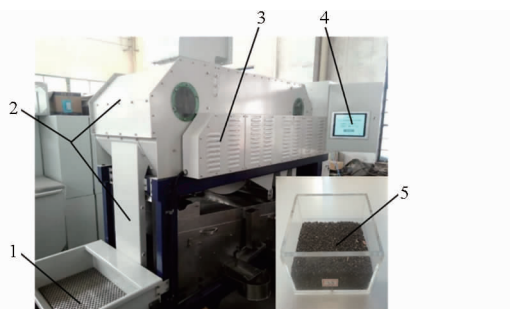


图 9 试验现场图

Fig. 9 Photo of validation test

1. 进料装置 2. 分离室 3. 离心风机 4. 智能控制面板 5. 上海青种子

试验对象见图 9 右下角,其与 2.2 节的仿真颗粒相对应,包含了优良的饱满种子和不合格的轻质种子 2 种颗粒。物料喂入量 0.05 kg/s,含水率 2.8%,饱满种子飘浮速度 8.8~11.5 m/s,轻杂质飘浮速度 5.6~7.3 m/s,饱满种子和轻杂质的比例为 4:1。在计算试验的性能指标时,因为种子数目较大,如果采用仿真时的统计颗粒数目的方法,将大大增加工作量,故采用计算各组分颗粒质量的方法。2 种方法虽然在结果上会产生一定的差异性,但是同样能够准确地反映清选效率及其变化趋势。

### 3.2 分离试验与模拟结果对比

图 10 为风门开度分别在 50%、75%、100%,风机频率分别取 25~45 Hz(5 Hz 为间隔)时,分离室性能指标的试验值和仿真值的对照图。

如图所示,虽然存在一些误差,但试验结果与模

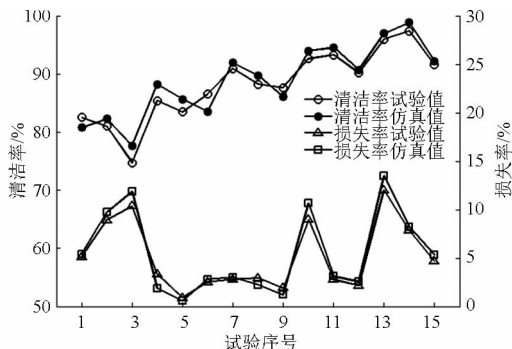


图 10 仿真与试验清选性能对比图

Fig. 10 Separation efficiency comparison of simulation and test

拟结果基本吻合。出现误差可能原因:仿真所设置边界条件与实际边界条件存在一定误差;试验过程中分离室并不是理想状态的完全密闭,存在气流入入;仿真与试验的清选效率和损失率计算方法存在差异。

可以减小误差的方法:改良边界条件测量工具和方法,提高边界条件测量精度;改进试验机器,改善试验环境,减少干扰气流来源。

## 4 结论

(1) 利用 Fluent 软件中  $k-\varepsilon$  湍流模型和 DPM 离散相模型模拟了分离室内流场情况及颗粒相分离过程。分别以上海青、菠菜、小白菜种子为颗粒相原型,研究了它们在不同风机频率和风门开度下的清选性能。

(2) 提出了综合评价指标——清选效率,该指标由清洁率和损失率运算而得。通过清选效率能够便捷地分析分离室针对不同种子的最优工作参数。并得到了上海青种子、菠菜种子和小白菜种子的清

选效率最高值及相对应的最优工作参数,分别为:清选效率 88% 时,风机频率 35 Hz、风门开度 75%;清选效率 84% 时,风机频率 42 Hz、风门开度 80%;清选效率 88% 时,风机频率 36 Hz、风门开度 80%。

(3)通过上海青种子的实机验证试验,可知清选性能的仿真值和试验值吻合度较好,证明了使用

气固两相流模型来研究风力筛选机分离室工作过程的可靠性。

(4)但由于颗粒运动复杂,影响分离效果的因素很多,本文只研究了其中主要的因素,未来还需建立更加精准的运动模型,考虑机械结构对清选性能的影响,开展更加全面综合的研究。

#### 参 考 文 献

- 1 韩占忠,王敏,兰小平. Fluent 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- 2 LI Y, NIELSEN P V. CFD and ventilation research [J]. Indoor Air, 2011, 21(6): 442 - 453.
- 3 ALVARADO A, SANCHEZ E, DURAZNO G, et al. CFD analysis of sludge accumulation and hydraulic performance of a waste stabilization pond [J]. Water Science and Technology, 2012, 66(11): 2370 - 2377.
- 4 MEKONNEN Gebreslasie Gebrehiwot, JOSSE DE Baerdemaeker, MARTINE Baelmans. Numerical and experimental study of a cross-flow fan for combine cleaning shoes [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 448 - 457.
- 5 李骅,张美娜,尹文庆,等. 基于 CFD 的风筛式清选装置气流场优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 12 - 16.  
LI Hua, ZHANG Meina, YIN Wenqing, et al. Optimization of airflow field on air-and-screen cleaning device based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 12 - 16. (in Chinese)
- 6 代建武,肖红伟,白峻文,等. 气体射流冲击干燥机气流分配室流场模拟与结构优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 69 - 76.  
DAI Jianwu, XIAO Hongwei, BAI Junwen, et al. Numerical simulation and optimum design on airflow distribution chamber of air-impingement jet dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 69 - 76. (in Chinese)
- 7 SHUKLA S K, SHUKLA P, GHOSH P. Evaluation of numerical schemes using different simulation methods for the continuous phase modeling of cyclone separators [J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(2): 209 - 219.
- 8 ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modeling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 128 - 136.
- 9 孙国祥,汪小岳,丁为民,等. 基于 CFD 离散相模型雾滴沉积特性的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 13 - 19.  
SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, DING Weimin, et al. Simulation analysis on characteristics of droplet deposition base on CFD discrete phase model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 13 - 19. (in Chinese)
- 10 CHU K W, WANG B, XU D L, et al. CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(5): 834 - 847.
- 11 敬志臣,韩正晟,高爱民,等. 小区小麦联合收获机清选系统的仿真分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(3): 140 - 144.  
JING Zhichen, HAN Zhengsheng, GAO Aimin, et al. Simulation analysis of the district wheat combine harvester cleaning system [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(3): 140 - 144. (in Chinese)
- 12 牟春宇. 基于 CFD 的旋风除尘器分离效率的数值模型研究[D]. 无锡:江南大学, 2008.  
MOU Chunyu. Numerical research on cyclone separator's separating efficiency model based on CFD [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008. (in Chinese)
- 13 GRIFFITH W D, BOYSAN F. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modeling of the performance of a number of cyclone samples [J]. Journal of Aerosol Science, 1996, 27(2): 281 - 304.
- 14 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- 15 张德胜,施卫东,李通通,等. 轴流泵叶轮出口尾迹区非定常压力和速度场特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 32 - 37.  
ZHANG Desheng, SHI Weidong, LI Tongtong, et al. Property of unsteady pressure and meridional velocity in wake region of axial-flow pump impeller[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 32 - 37. (in Chinese)
- 16 沈有柏. 颗粒物料在三自由度风筛式清选装置虚拟样机中的运动研究[D]. 镇江:江苏大学, 2009.  
SHEN Youbai. Research on the motion of grain in 3-DOF air-and-screen cleaning device virtual prototype [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)