

## 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定

刘凡一, 张 舰, 李 博, 陈 军\*

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100)

**摘 要:** 为确定小麦离散元仿真参数, 以真实试验及不同参数组合下仿真得到的小麦颗粒堆休止角为响应值, 基于响应面优化标定了小麦离散元仿真参数。研究应用 Plackett-Burman 试验对 8 个初始参数进行筛选, 发现小麦-小麦静摩擦系数、小麦-有机板静摩擦系数以及小麦-小麦滚动摩擦系数对颗粒堆休止角影响显著。在通过最陡爬坡试验确定显著性参数最优值区间的基础上, 根据 Box-Behnken 试验结果建立了休止角与显著性参数的二阶回归模型并对其进行优化, 得到显著性参数的最佳组合为: 小麦-小麦静摩擦系数 0.58、小麦-有机板静摩擦系数 0.61、小麦-小麦滚动摩擦系数 0.08。最后将最佳参数组合下仿真得到的休止角与真实试验值进行对比验证, 发现二者无显著性差异 ( $P>0.05$ ), 表明应用响应面优化标定小麦离散元仿真中所需的参数是可行的; 同时, 标定所得的最佳参数组合可为小麦离散元仿真参数的选取提供参考。

**关键词:** 离散元; 优化; 标定; 仿真参数; 休止角

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.035

中图分类号: O347.7; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0247-07

刘凡一, 张 舰, 李 博, 陈 军. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247—253. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.035 http://www.tcsae.org

Liu Fanyi, Zhang Jian, Li Bo, Chen Jun. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 247—253. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.035 http://www.tcsae.org

### 0 引 言

近年来, 随着计算机技术的发展, 离散元法 (discrete element method, DEM) 在农业装备研究上有着越来越多的运用<sup>[1-6]</sup>。小麦作为全球第二大粮食作物, 全面系统地研究小麦离散元仿真参数, 有助于离散元法在小麦生产农业装备研发中的应用。

离散元仿真中所需参数众多, 主要包括材料参数 (密度、泊松比、剪切模量) 和接触参数 (恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数)。目前, 这些参数主要通过直接测量和虚拟标定获取。对离散元仿真参数的直接测量, 国内外学者已经做了许多研究。王成军、黄小毛基于弹跳试验分别对不同含水率下小麦和油菜的恢复系数进行了测量<sup>[7-8]</sup>; Balevičius 等通过滑动试验测量了豌豆与有机玻璃间的静摩擦系数<sup>[9]</sup>; González-Montellano 等对离散元仿真中部分参数的直接测量方法进行研究, 结果表明, 对于玻璃球这类球形度高、质地均匀的颗粒, 采用直接测量能够较精确地获得所需微观参数, 但是对于玉米及橄榄核这类外形不规则的颗粒材料, 直接测量值变化很大<sup>[10]</sup>。

然而, 有些参数 (如滚动摩擦系数) 很难通过试验直接测量; 同时, 由于颗粒物质的各向异性, 直接测量

值变化通常较大。因此, 很多学者提出采用虚拟标定试验对离散元仿真中所需的微观参数进行确定。Coetzee 等采用剪切和侧限压缩试验对玉米颗粒的摩擦系数和刚度系数进行标定, 并进行了试验验证<sup>[11]</sup>; Grima 和 Wypych 利用崩塌试验中颗粒堆休止角分别对干、湿颗粒在离散元仿真中所需滚动摩擦系数进行了标定<sup>[12]</sup>; 韩燕龙等应用离散元法研究了水稻颗粒滚动摩擦系数对堆积角及堆积体的影响, 并对其滚动摩擦系数进行了标定<sup>[13]</sup>。

虽然在离散元仿真参数的虚拟标定上, 国内外学者已经做了大量的研究, 但这些标定通常采用“尝试法” (trial and error), 缺乏标准化的参数标定方法。为此, 有些学者提出了基于响应面法的离散元仿真参数标定的标准化方法。Santos 等基于响应面法, 利用旋转鼓试验获取樱桃果干动态休止角, 标定了其在离散元仿真中所需参数<sup>[14]</sup>; 李守巨等通过三轴压缩试验提出了基于响应面法的堆石料细观本构模型参数反演方法, 并标定了不同围压下堆石料的接触刚度和摩擦系数<sup>[15]</sup>。本研究在对国内外研究中所用小麦离散元仿真参数进行归纳的基础上, 采用圆筒提升获得小麦颗粒休止角, 通过 Plackett-Burman、最陡爬坡以及 Box-Behnken 试验对离散元仿真参数进行标定, 并通过仿真与真实试验值进行对比验证。以期小麦等颗粒物料离散元仿真参数标定提供参考。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验模型

试验中所用小麦由西北农林科技大学小麦育种中心

收稿日期: 2015-12-29 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20130204110020)。

作者简介: 刘凡一, 男, 四川内江人, 博士生, 研究方向: 数值模拟及智能化农业装备。杨凌 西北农林科技大学, 712100。Email: liufanyi@nwsuaf.edu.cn

\*通信作者: 陈 军, 男, 宁夏固原人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能化农业装备研究。杨凌 西北农林科技大学, 712100。

Email: chenjun\_jdxy@nwsuaf.edu.cn

提供, 品种号为西农 223, 含水率为 10.05%, 真实密度为  $1\,350\text{ kg/m}^3$ 。

本研究选用有机玻璃圆筒, 根据小麦颗粒尺寸, 确定其内径和高度分别为 39 和 120 mm<sup>[16]</sup>。测量时, 圆筒放置在水平固定的有机玻璃底板上, 小麦颗粒通过孔径为 12 mm 的方孔筛填充整个圆筒(落雨法<sup>[17]</sup>)。通过数控铣床以 0.05 m/s 速度提升圆筒, 从而在底板上形成一个近似锥形的颗粒堆, 如图 1 所示。本研究中, 对小麦颗粒堆休止角的试验重复 5 次。

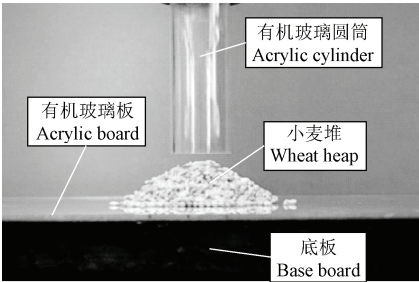


图 1 小麦颗粒堆积试验  
Fig.1 Accumulation test of wheat particles

为更准确地对休止角进行量化表征, 有学者提出利用计算机图像处理技术对颗粒堆休止角进行测量<sup>[18-19]</sup>。本研究基于贾富国等关于颗粒堆休止角的图像测量方法, 利用 Matlab 软件读取颗粒堆单侧图像, 经灰度化、阈值分割、边界搜索获得边界像素点, 通过线性拟合得到颗粒堆休止角<sup>[19]</sup>。

1.2 仿真模型

1.2.1 小麦颗粒离散元模型

小麦颗粒近似椭球形, 随机选取 50 颗利用游标卡尺对其长、短轴进行测量, 得到其平均长轴  $a=6.21\text{ mm}$ , 平均短轴  $b=3.04\text{ mm}$ 。因此, 根据图 2a 给出的各球形单元的半径和相对位置, 利用 EDEM 2.7.0 软件采用 5 球组合的方式构建如图 2b 所示的小麦颗粒离散元模型。

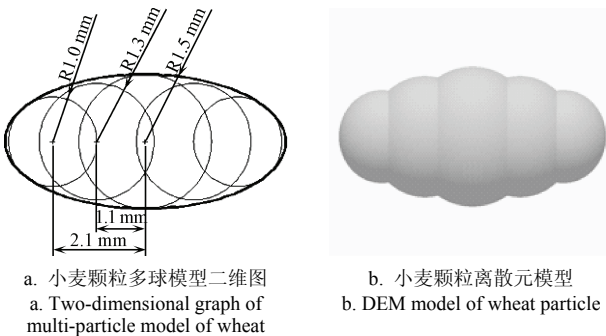


图 2 小麦颗粒模型  
Fig.2 Particle model of wheat

1.2.2 仿真参数

根据真实小麦颗粒长轴尺寸分布, 确定仿真中小麦颗粒尺寸按照标准正态分布生成(平均值: 1; 标准差: 0.06); 为避免生成过小的颗粒, 根据实际测量得到的最小、最大颗粒尺寸, 将单元球半径限制在 0.65~1.21 倍

的初始半径之间。结合国内外离散元仿真中小麦颗粒以及有机玻璃的参数<sup>[20-24]</sup>, 确定了本研究中各仿真参数的变化范围如表 1 所示。此外, 由于应力波在颗粒中传播受仿真参数的影响, 各仿真中瑞利时步可能不同, 因此在所有仿真中时步统一取 20%瑞利时步。仿真中网格尺寸取 3 倍最小球形单元尺寸。

表 1 离散元仿真所需参数		
Table 1 Parameters required in DEM simulation		
仿真参数 Simulation parameters	数值 Value	
小麦泊松比 Poisson's ratio of wheat	0.16~0.42 <sup>a</sup>	
有机板泊松比 Poisson's ratio of acrylic	0.40	
小麦剪切模量 Shear modulus of wheat/MPa	4.20~997.90 <sup>a</sup>	
有机板剪切模量 Shear modulus of acrylic/MPa	160.00	
小麦密度 Density of wheat/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 350.00	
有机板密度 Density of acrylic/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 385.00	
小麦与小麦恢复系数 Wheat-wheat restitution coefficient	0.10~0.90 <sup>a</sup>	
小麦与有机板恢复系数 Wheat- acrylic restitution coefficient	0.30~0.80 <sup>a</sup>	
小麦与小麦静摩擦系数 Wheat-wheat static friction coefficient	0.10~0.60 <sup>a</sup>	
小麦与有机板静摩擦系数 Wheat- acrylic static friction coefficient	0.20~0.60 <sup>a</sup>	
小麦与小麦滚动摩擦系数 Wheat-wheat rolling friction coefficient	0~0.10 <sup>a</sup>	
小麦与有机板滚动摩擦系数 Wheat- acrylic rolling friction coefficient	0~0.10 <sup>a</sup>	

注: a 表示该项为试验变量。  
Note: a shows the term is variable.

1.2.3 圆筒提升模型

仿真中圆筒内径和高度与试验中所用一致, 颗粒在圆柱形颗粒工厂(直径: 39 mm; 高度: 20 mm)内生成后自由下落, 经过方孔筛填充整个圆筒。颗粒生成方式为 Dynamic, 生成速率为 5 000 个/s, 生成时间为 2 s。去除圆筒外部以及上端多余颗粒后, 运行仿真模型 1 s 以使系统达到平衡。以 0.05 m/s 的速度垂直提升圆筒, 颗粒将从圆筒底端缓慢流出, 最终在底板上形成稳定的颗粒堆。结合小麦力学特性和模型计算精度, 本研究采用 EDEM 软件内置的 Hertz-Mindlin (no slip)接触模型。

1.3 仿真模型的响应面设计

1.3.1 Plackett-Burman 试验

应用 Design Expert 软件进行 Plackett-Burman 试验设计, 选取了 8 个真实参数和 3 个虚拟参数; 每个参数取高低 2 个水平, 以编码+1 和-1 形式表示, 如表 2 所示。研究中采用 1 个中心点, 共进行 13 次试验。

1.3.2 最陡爬坡试验

根据 Plackett-Burman 试验筛选出的显著性参数, 进行最陡爬坡试验, 以快速地进入到最优值的附近区域。仿真时, 非显著性参数取 Plackett-Burman 试验中的中间水平, 显著性参数按照选定的步长逐步增加。观察试验与仿真得到的休止角的相对误差变化, 直到该相对误差达到最小值后又逐步增大。

表 2 Plackett-Burman 试验参数列表  
Table 2 Parameters of Plackett-Burman test

符号 Symbol	参数 Parameters	低水平(-1) Low level	高水平(+1) High level
$X_1$	小麦泊松比 Poisson's ratio of wheat	0.16	0.42
$X_2$	小麦剪切模量 Shear modulus of wheat/MPa	4.20	1 000
$X_3$	小麦-小麦恢复系数 Wheat-wheat restitution coefficient	0.10	0.90
$X_4$	小麦-有机板恢复系数 Wheat- acrylic restitution coefficient	0.30	0.80
$X_5$	小麦-小麦静摩擦系数 Wheat-wheat static friction coefficient	0.10	0.60
$X_6$	小麦-有机板静摩擦系数 Wheat- acrylic static friction coefficient	0.20	0.60
$X_7$	小麦-小麦滚动摩擦系数 Wheat-wheat rolling friction coefficient	0	0.10
$X_8$	小麦-有机板滚动摩擦系数 Wheat-acrylic rolling friction coefficient	0	0.10
$X_9、X_{10}、X_{11}$	虚拟参数 Virtual parameters	-	-

1. 3. 3 Box-Behnken 试验

基于 Plackett-Burman 和最陡爬坡试验结果，根据 Box-Behnken 设计原理，取显著性参数的高(+1)、中(0)、低(-1) 3 个水平进行试验设计，非显著性参数取值同最陡爬坡试验。此外，设计中采用 3 个中心点进行误差估计。

2 结果与分析

2. 1 休止角的试验测定

小麦颗粒无底圆筒堆积试验结果表明，在 0.05 m/s 提升速度下，小麦颗粒能够在水平有机底板上形成较好的颗粒堆。经测量得到，小麦颗粒休止角均值为 30.02°，标准差为 0.42°。

2. 2 最佳参数组合的响应面优化

2. 2. 1 Plackett-Burman 试验

Plackett-Burman 试验设计及结果如表 3 所示，利用 Design Expert 软件对该结果进行方差分析，可得各参数的影响效果如表 4 所示。由表 4 可知，小麦-小麦静摩擦系数( $X_5$ )、小麦-有机板静摩擦系数( $X_6$ )及小麦-小麦滚动摩擦系数( $X_7$ )对颗粒堆休止角影响显著，而其余参数影响极小。因此在最陡爬坡试验以及 Box-Behnken 试验中只考虑这 3 个影响显著的参数。

表 3 Plackett-Burman 试验设计及结果  
Table 3 Design and results of Plackett-Burman test

序号 No.	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	休止角 Repose angle $\theta/(^{\circ})$
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	21.10
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	32.80
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	11.98
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	19.81
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	21.80
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	15.36
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	19.72
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	7.29
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	2.72
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1.60
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	6.15
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.02
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24.29

注：变量  $X_1$ - $X_{11}$  含义同表 2。  
Note: The variables  $X_1$ - $X_{11}$  are equal to those in table 2.

表 4 Plackett-Burman 试验参数显著性分析  
Table 4 Analysis of significance of parameters in Plackett-Burman test

参数 Parameters	效应 Effect	均方和 Sum of squares	影响率 Contribution/%	显著性排序 Significance
$X_1$	-3.9050	45.7471	3.8184	4
$X_2$	1.5483	7.1920	0.6003	6
$X_3$	-1.2083	4.3802	0.3656	7
$X_4$	-1.5583	7.2852	0.6081	5
$X_5$	13.5683	552.2990	46.0985	1
$X_6$	9.8850	293.1397	24.4674	2
$X_7$	7.2383	157.1804	13.1193	3
$X_8$	0.5083	0.7752	0.0647	8

2. 2. 2 最陡爬坡试验

表 5 给出了最陡爬坡试验设计及其结果。该结果表明随着小麦-小麦静摩擦系数( $A$ )、小麦-有机板静摩擦系数( $B$ )及小麦-小麦滚动摩擦系数( $C$ )增加，休止角逐渐增大，真实试验与仿真得到的小麦颗粒堆休止角的相对误差先减小后增加。在 4 号水平时，该相对误差最小，由此可知，最优值区间在 4 号水平附近，因此选取 4 号水平为中心点，3 号、5 号水平为低、高水平进行后续响应面设计。

2. 2. 3 Box-Behnken 试验及回归模型

根据 Box-Behnken 试验设计及其结果(表 6)，应用 Design-Expert 软件建立小麦颗粒堆休止角与 3 个显著性参数的二阶回归模型，得到其二次多项式方程为

$$\theta=19.71+25.28A-22.46B+40.53C-26.44AB+64.44AC+31.11BC-7A^2+36.78B^2-41.67C^2。$$
 (1)

表 5 最陡爬坡试验设计及结果  
Table 5 Design and results of steepest ascent test

序号 No.	小麦-小麦静摩擦系数 Wheat-wheat static friction coefficient <i>A</i>	小麦-有机板静摩擦系数 Wheat- acrylic static friction coefficient <i>B</i>	小麦-小麦滚动摩擦系数 Wheat-wheat rolling friction coefficient <i>C</i>	休止角 Repose angle $\theta(^{\circ})$	相对误差 Relative error/%
1	0.10	0.10	0	0	100.00
2	0.25	0.25	0.03	10.52	64.96
3	0.40	0.40	0.06	27.89	7.09
4	0.55	0.55	0.09	31.41	4.63
5	0.70	0.70	0.12	35.10	16.92

表 6 Box-Behnken 试验设计及结果  
Table 6 Design and results of Box-Behnken test

序号 No.	小麦-小麦静摩擦系数 Wheat-wheat static friction coefficient <i>A</i>	小麦-有机板静摩擦系数 Wheat- acrylic static friction coefficient <i>B</i>	小麦-小麦滚动摩擦系数 Wheat-wheat rolling friction coefficient <i>C</i>	休止角 Repose angle $\theta(^{\circ})$
1	-1(0.40)	-1(0.40)	0(0.09)	27.99
2	1(0.70)	-1	0	31.71
3	-1	1(0.70)	0	31.44
4	1	1	0	32.78
5	-1	0(0.55)	-1(0.06)	26.17
6	1	0	-1	28.36
7	-1	0	1(0.12)	31.29
8	1	0	1	34.64
9	0(0.55)	-1	-1	28.21
10	0	1	-1	29.42
11	0	-1	1	32.50
12	0	1	1	34.27
13	0	0	0	30.31
14	0	0	0	30.02
15	0	0	0	30.60

由该模型方差分析结果(表 7)可知,小麦-小麦静摩擦系数(*A*)、小麦-有机板静摩擦系数(*B*)及小麦-小麦滚动摩擦系数(*C*)对颗粒堆休止角影响极其显著;小麦-有机板静摩擦系数的二次项(*B*<sup>2</sup>)对休止角影响显著。该拟合模型的 *P* 值为 0.0004 (*P*<0.01),说明该模型描述各参数与响应值之间的关系时,其因变量与全体自变量之间的关系极显著;失拟项 *P*=0.2144>0.05,表明方程拟合良好。一般情况下,变异系数(CV)越高,试验的可靠性越低,本试验中较低的变异系数(1.5500%)说明了试验具有较好的可靠性;决定系数 *R*<sup>2</sup>=0.9858,校正决定系数 *R*<sup>2</sup><sub>adj</sub>=0.9601,二者都接近 1,表明拟合方程可靠度高;精密度(Adeq precision)为 21.1910,表明该模型具有良好的精确度。

在保证模型显著、失拟项不显著的情况下,剔除影响不显著的项,对二阶回归模型进行优化,得到新的回归方程为

$$\theta=17.51+23.38A-20.34B+85.58C-26.44AB+37.40B^2。$$
 (2)

优化后的回归模型方差分析如表 8 所示,从中可得优

化后的模型各项均达到理想水平。优化后的模型其变异系数降低到 1.3900%,试验的可靠性进一步增加;决定系数 *R*<sup>2</sup>=0.9794,校正决定系数 *R*<sup>2</sup><sub>adj</sub>=0.9679,二者都接近 1,表明拟合方程可靠度高;精密度(Adeq precision)增大到 30.5100,模型精确度较优化前提高,可以用来预测颗粒堆的休止角。

表 7 Box-Behnken 试验设计二次多项式模型方差分析  
Table 7 ANOVA of quadratic polynomial model of Box-Behnken test

方差来源 Source of variation	均方 Mean square	自由度 Freedom	平方和 Quadratic sum	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
模型 Model	78.3808	9	8.7090	0.0004*
<i>A</i>	14.0450	1	14.0450	0.0005*
<i>B</i>	7.0313	1	7.0313	0.0026*
<i>C</i>	52.7365	1	52.7365	<0.0001*
<i>AB</i>	1.4161	1	1.4161	0.0544
<i>AC</i>	0.3364	1	0.3364	0.2772
<i>BC</i>	0.0784	1	0.0784	0.5818
<i>A</i> <sup>2</sup>	0.0916	1	0.0916	0.5527
<i>B</i> <sup>2</sup>	2.5283	1	2.5283	0.0205*
<i>C</i> <sup>2</sup>	0.0052	1	0.0052	0.8855
残差 Residual	1.1319	5	0.2264	
失拟项 Lack of fit	0.9637	3	0.3212	0.2144
纯误差 Pure error	0.1682	2	0.0841	
总和 Sum	79.5127	14		

*R*<sup>2</sup>=0.9858; *R*<sup>2</sup><sub>adj</sub>=0.9601; CV=1.5500%; 精密度 Adeq precision=21.1910

注: \*表示该项显著(*P*<0.05)。  
Note: \* shows the term is significant(*P*<0.05).

表 8 Box-Behnken 试验优化模型方差分析  
Table 8 ANOVA of modified model of Box-Behnken test

方差来源 Source of variation	均方 Mean square	自由度 Freedom	平方和 Quadratic sum	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
模型 Model	77.8720	5	15.5744	<0.0001*
<i>A</i>	14.0450	1	14.0450	<0.0001*
<i>B</i>	7.0313	1	7.0313	0.0002*
<i>C</i>	52.7365	1	52.7365	<0.0001*
<i>AB</i>	1.4161	1	1.4161	0.0212*
<i>B</i> <sup>2</sup>	2.6432	1	2.6432	0.0042*
残差 Residual	1.6407	9	0.1823	
失拟项 Lack of Fit	1.4725	7	0.2104	0.3152
纯误差 Pure Error	0.1682	2	0.0841	
总和 Sum	79.5127	14		

*R*<sup>2</sup>=0.9794; *R*<sup>2</sup><sub>adj</sub>=0.9679; CV=1.3900%; 精密度 Adeq precision=30.5100

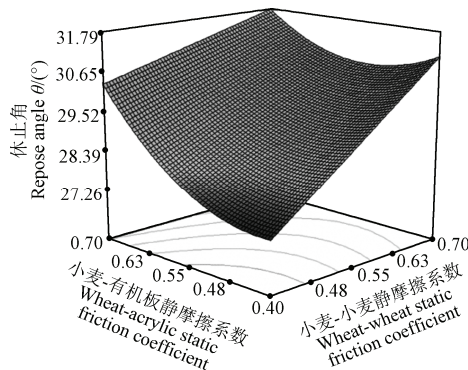
注: \*表示该项显著(*P*<0.05)。  
Note: \* shows the term is significant (*P*<0.05).

2.2.4 回归模型交互效应分析

根据优化后的模型的方差分析(表 8)可知,小麦-小麦静摩擦系数与小麦-有机板静摩擦系数的交互项(*AB*)对颗粒堆休止角影响显著(*P*<0.05)。当小麦-小麦滚动摩擦系数为 0.08 时,应用 Design-Expert 软件绘制小麦-小麦静摩擦系数与小麦-有机板静摩擦系数交互作用的响



应曲面，可以直观地看到这两个参数之间的交互效应，如图 3 所示。随着两参数取值的增加，颗粒堆休止角均呈现上升的趋势；但是，当这两个参数中的任意一个取较小值时，颗粒堆休止角随另一参数增大而增加的趋势大于当该参数取较大值时的增长趋势。



注：小麦-小麦滚动摩擦系数为 0.08。  
Note: the wheat-wheat rolling friction coefficient is 0.08.

图 3 小麦-小麦静摩擦系数与小麦-有机板静摩擦系数交互作用  
Fig.3 Interaction of static friction for wheat-wheat and wheat-acrylic board contact

### 3 最优参数组合的确定及仿真验证

应用 Design Expert 软件对优化后的回归模型以最初设计点为起始点求解可得，欲使仿真结果最接近试验得到的小麦颗粒堆休止角，小麦-小麦静摩擦系数应为 0.58、小麦-有机板静摩擦系数应取 0.61、小麦-小麦滚动摩擦系数应为 0.08，其余非显著性参数取中间水平（小麦泊松比为 0.29；小麦剪切模量为 501MPa；小麦-小麦恢复系数为 0.50；小麦-有机板恢复系数为 0.50；小麦-有机板滚动摩擦系数为 0.05）。为验证最优参数组合的准确性，采用上述参数值仿真得到颗粒堆积形态如图 4 所示。3 次重复模拟所得颗粒堆休止角分别为 29.97°、30.14°、30.25°。应用 T 检验对仿真结果和试验值进行分析，得到  $P=0.3440>0.05$ ，表明仿真结果与真实试验值无显著性差异。

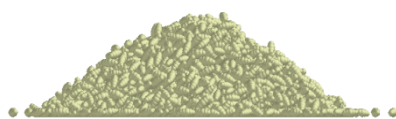


图 4 休止角离散元仿真验证

Fig.4 Calibration of the repose angle by DEM simulation

### 4 结 论

1) 由 Plackett-Burman 试验结果可知，小麦-小麦静摩擦系数、小麦-有机板静摩擦系数及小麦-小麦滚动摩擦系数对小麦颗粒堆休止角影响显著；而泊松比、剪切模量、恢复系数以及小麦-有机板滚动摩擦系数对休止角无显著性的影响。

2) 根据 Box-Behnken 试验结果，建立了显著性参数与休止角之间的二次回归模型并对其进行了优化，根据其方差分析可得 3 个显著性参数的一次项（小麦-小麦静摩擦系数、小麦-有机板静摩擦系数及小麦-小麦滚动摩擦

系数）、小麦-小麦静摩擦系数与小麦-有机板静摩擦系数交互项以及小麦-有机板静摩擦系数的二次项对颗粒堆休止角影响显著。

3) 通过对优化后的回归模型求解得到，当小麦-小麦静摩擦系数为 0.58、小麦-有机板静摩擦系数为 0.61、小麦-小麦滚动摩擦系数为 0.08，其余非显著性参数取中间水平时（小麦泊松比为 0.29；小麦剪切模量为 501MPa；小麦-小麦恢复系数为 0.50；小麦-有机板恢复系数为 0.50；小麦-有机板滚动摩擦系数为 0.05），仿真与真实试验得到的小麦颗粒堆休止角无显著性差异 ( $P>0.05$ )，表明应用响应面分析标定离散元仿真参数是可行的。

### 【参 考 文 献】

- [1] Lenaerts B, Aertsen T, Tijskens E, et al. Simulation of grain-straw separation by Discrete Element Modeling with bendable straw particles[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2014, 101(2): 24—33.
- [2] 苟文, 马荣朝, 杨文钰, 等. 小麦免耕播种机开沟器的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 21—25.  
Gou Wen, Ma Rongchao, Yang Wenyu, et al. Design of opener on no-till wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.1): 21—25. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李政权, 于建群, 张尉林, 等. 内充式排种器工作过程和性能的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 32—36.  
Li Zhengquan, Yu Jianqun, Zhang Weilin, et al. Simulation analysis of working process and performance of inside-filling seed metering device by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邱白晶, 姜国微, 杨宁, 等. 水稻籽粒流对承载板冲击过程离散元分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 44—49.  
Qiu Baijing, Jiang Guowei, Yang Ning, et al. Discrete element method analysis of impact action between rice particles and impact-board[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 44—49. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117—121.  
Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 117—121. (in Chinese with English abstract)

- [6] 贾富国, 姚丽娜, 韩燕龙, 等. 基于离散元法的糙米匀料盘仿真优化设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 235—241.  
Jia Fuguo, Yao Li'na, Han Yanlong, et al. Simulation and optimal design of uniform plate of brown rice based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(4): 235—241. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王成军, 李耀明, 马履中, 等. 小麦籽粒碰撞模型中恢复系数的测定[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 274—278.  
Wang Chengjun, Li Yaoming, Ma Lüzhong, et al. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds in collision models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 274—278. (in Chinese with English abstract)
- [8] 黄小毛, 查显涛, 潘海兵, 等. 油菜籽粒点面接触碰撞中恢复系数的测定及分析[J]. 农业工程学报, 2014(24): 22—29.  
Huang Xiaomao, Zha Xiantao, Pan Haibing, et al. Measurement and analysis of rapeseeds' restitution coefficient in point-to-plate collision model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(24): 22—29. (in Chinese with English abstract)
- [9] Balevičius R, Sielamowicz I, Mróz Z, et al. Investigation of wall stress and outflow rate in a flat-bottomed bin: A comparison of the DEM model results with the experimental measurements[J]. Powder Technology, 2011, 214(3): 322—336.
- [10] González-Montellano C, Fuentes J M, Ayuga-Téllez E, et al. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(4): 553—562.
- [11] Coetzee C J, Els D N J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 198—212.
- [12] Grima A P, Wypych P W. Development and validation of calibration methods for discrete element modelling[J]. Granular Matter, 2011, 13(2): 127—132.
- [13] 韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014(17): 174501—174507.  
Han Yanlong, JiaFuguo, Tang Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Phys. Sin, 2014, 63(17): 174501—174507. (in Chinese with English abstract)
- [14] Campos A V P, Oliveira O S, Ferreira L V, et al. Dem simulations of dynamic angle of repose of acerola residue: a parametric study using a response surface technique[J]. Blucher Chemical Engineering Proceedings, 2015, 1(2): 11326—11333.
- [15] 李守巨, 李德, 于申. 基于宏观实验数据的堆石料细观本构模型参数反演[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2015, 34(5): 20—26.  
Li Shouju, Li De, Yu Shen. Meso-parameter inversion of constitutive model for rockfill materials based on macro experimental data[J]. Journal of Shangdong University of Science and Technology: Natural Science, 2015, 34(5): 20—26. (in Chinese with English abstract)
- [16] 吴爱详, 孙业志, 刘湘平. 散体动力学理论及其应用[M]. 北京: 冶金出版社, 2002.
- [17] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] Frączek J, Złobicki A, Zemanek J. Assessment of angle of repose of granular plant material using computer image analysis[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 17—22.
- [19] 贾富国, 韩燕龙, 刘扬, 等. 稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 254—260.  
Jia Fuguo, Han Yanlong, Liu Yang, et al. Simulation prediction method of repose angle for rice particle materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 254—260. (in Chinese with English abstract)
- [20] Boac J M, Casada M E, Maghirang R G, et al. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles[J]. Transactions of the Asabe, 2010, 53(4): 1201—1216.
- [21] Weigler F, Mellmann J. Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer[J]. Particuology, 2014, 12(2): 33—39.
- [22] Keppler I, Kocsis L, Oldal I, et al. Grain velocity distribution in a mixed flow dryer[J]. Advanced Powder Technology, 2012, 23(6): 824—832.
- [23] Ramírez A, Nielsen J, Ayuga F. On the use of plate-type normal pressure cells in silos: Part 2: Validation for pressure measurements[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2010, 71(1): 64—70.
- [24] 李政权. 基于离散元法的小麦排种器的数字化设计方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2009.  
Li Zhenquan. Study on Digital Design Method of Wheat Metering Device based on DEM[D]. Jilin: Jilin University, 2009. (in Chinese with English abstract)

## Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap

Liu Fanyi, Zhang Jian, Li Bo, Chen Jun<sup>\*</sup>

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In this study, we determined the parameters of wheat required in discrete element method (DEM) simulation by the response surface method. The repose angle is a macroscopic parameter, which is used to describe the friction and flow properties of particle material and widely applied in DEM parameter calibration for it can be measured easily. In this research, the heap of wheat was formed through the bottomless cylinder method and the repose angle was measured using a computer graphic technology. The calibration tests were conducted in laboratory and by simulation using EDEM 2.7.0 software. According to previous research, an acrylic cylinder with an inner diameter of 39 mm and a height of 120 mm was used. The wheat particles were filled into the cylinder using the “rainy method” through a square-opening sieve with 12 mm aperture and lifted with a speed of 0.05 m/s. For DEM simulation, different parameter combination tests were designed. Specifically, the Plackett-Burman test was performed to screen the significant parameters from the 8 selected parameters. It was found that the static friction for wheat-wheat and wheat-acrylic contact and the rolling friction for wheat-wheat contact had a significant effect on the repose angle, while the other 5 parameters’ influence was negligible. Then the steepest ascent test was used to determine the optimal value range of the significant parameters. In the steepest ascent test, the 5 non-significant parameters were the mid-value of the corresponding initial region, while the 3 significant parameters increased progressively until the relative errors between the simulated and the test value reached the minimum. Based on the result of the Box-Behnken test, a quadratic polynomial model for the repose angle and the 3 significant parameters was created. The analysis of variance (ANOVA) of the quadratic polynomial model showed that the model was significant and the lack-of-fit was non-significant. This means the model can be used to determine the best parameter combination. However, some terms in the quadratic polynomial model were non-significant. So, a modified regression model was established by deleting these non-significant terms. The ANOVA of the modified model showed all of the terms were desirable, and the first-order term of the 3 significant parameters, the interactive term of the wheat-wheat static friction coefficient and wheat-acrylic static friction coefficient, and the quadratic term of wheat-acrylic static friction coefficient had a significant effect on the repose angle. The interaction of the static friction coefficient for the wheat-wheat and wheat-acrylic contact was also analyzed, and it was found that the repose angle increased with the increase of the 2 parameters. However, when one of the 2 parameters (the static friction coefficients for the wheat-wheat  $A$  and wheat-acrylic  $B$  contact) was low, the growth rate of repose angle with the other parameter was larger than that when one of the 2 parameters was high. This showed that the interaction between the parameters of  $A$  and  $B$  was more significant when they were low. By solving the modified regression equation, the best combination of the parameters was obtained: wheat-wheat static friction coefficient of 0.58, wheat-acrylic static friction coefficient of 0.61 and wheat-wheat rolling friction of 0.08. The best parameter combination was validated through comparing the DEM simulation results with the test values, and it was found that there was no significant difference between them. The research shows that the parameter calibration method based on the response surface method is feasible. Meanwhile, the best parameter combination can be used as reference values when choosing the simulation parameters of wheat required in DEM.

**Keywords:** discrete event simulation; optimization; calibration; simulation parameters; repose angle