

油葵籽粒离散元参数标定与试验验证

郝建军¹, 魏文波¹, 黄鹏程², 秦家辉¹, 赵建国¹

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071000; 2. 河北省张家口市乡村振兴促进中心, 张家口 075000)

摘要: 针对采用离散元法对油葵播种、收获等关键工作过程仿真分析时, 油葵籽粒本征参数、油葵籽粒与油葵机械化种植及收获装备间接接触参数缺乏问题, 该研究以油葵籽粒为研究对象, 利用三维扫描逆向建模技术与 EDEM 软件建立油葵籽粒离散元模型, 通过物理试验与虚拟仿真试验对仿真参数进行标定。采用绝对原点数显卡尺、电子分析天平、万能材料拉压力试验机等测定了矮大头 567 油葵籽粒的三维几何尺寸、密度、含水率、泊松比、弹性模量、剪切模量和静摩擦系数; 采用圆筒提升法进行油葵籽粒物理堆积试验, 利用 MATLAB 对堆积图像进行处理获得物理堆积试验油葵籽粒的堆积角为 48.858°。以堆积角为评价指标, 利用 Plackett-Burman 试验、最陡爬坡试验筛选出对堆积角影响显著的因子及取值范围; 通过响应面寻优试验结果的方差分析和寻优计算, 确定了油葵籽粒间静摩擦系数与动摩擦系数的较优组合为 0.41、0.05。以较优参数组合进行仿真堆积试验, 测得堆积角为 48.976°, 与物理堆积试验得到的堆积角误差为 0.24%; 进行电磁料斗振动物理试验与仿真试验对标定结果进行验证, 得到不同工作电压下油葵籽粒物理试验与仿真试验的质量流率曲线, 2 条曲线相关系数为 0.998, 变化趋势基本一致。研究结果表明, 油葵籽粒模型和标定所得的离散元仿真参数具有可靠性, 可为油葵籽粒离散元仿真研究提供参考。

关键词: 农作物; 离散元法; 油葵籽粒; 三维扫描; 参数标定

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.005

中图分类号: S565.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0036-09

郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 36-44. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.005 <http://www.tcsae.org>
Hao Jianjun, Wei Wenbo, Huang Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 36-44. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.005 <http://www.tcsae.org>

0 引言

油葵是中国第三大油料作物, 年产量达到 250 多万 t, 在农业发展中占据重要地位^[1-4]。传统试验方法不能精准分析油葵籽粒在种植、收获机械中的运动过程, 使油葵机械化种植与收获装备的相关研究与其他油料作物相比相对滞后, 制约了油葵产业的机械化进程^[5-6]。近年来, 以离散元法为基础的 EDEM 软件被广泛应用于散体物料运动过程研究, 为研究农业物料动力学行为提供了新思路。

对农业物料模型进行仿真试验时, 需要对其本征参数与接触参数进行标定^[7-11]。马文鹏等^[12]、郝建军等^[13]、石林榕等^[14]、李永祥等^[15]分别对苜蓿种子、沙壤土、胡麻籽粒、小麦粉等离散元参数进行分析与标定, 为相关物料的仿真提供了可参考的离散元参数。

油葵籽粒体积较小, 且形状不规则, 仅靠物理试验很难获得其参数。为防止仿真效果失真, 合理确定油葵籽粒离散元模型和相关参数具有重要意义。本文通过测定油葵籽粒本征参数, 结合三维扫描技术与 Hertz-Mindlin 接触模型, 建立油葵籽粒离散元模型。对油葵籽粒进行物理堆积试验与仿真试验, 以堆积角为指标, 通过

Plackett-Burman 试验筛选出对指标影响显著的因素, 利用最陡爬坡试验快速寻找各因素最优值所在区间。通过响应面优化试验, 建立堆积角与油葵籽粒间静摩擦系数和油葵籽粒间滚动摩擦系数的二阶回归模型, 获取可用于离散元仿真的油葵籽粒参数, 通过堆积试验和电磁料斗振动试验验证油葵籽粒模型和仿真参数的可靠性, 以期油葵播种、收获等机械化作业及装备研发仿真模拟提供可靠的离散元模型参数。

1 油葵籽粒本征参数测定及离散元模型建立

1.1 三维几何尺寸及分布规律

为准确建立油葵籽粒三维模型, 以五点取样法对河北省邢台市金沙河红薯岭基地油葵种植区的矮大头 567 取样, 随机选取 500 粒, 利用 111N-101-40 型绝对原点数显卡尺(精度 0.01 mm)分别测其 3 轴尺寸(最大长度 a 、最大宽度 b 、最大厚度 c)^[16], 测量结果取平均值(见表 1)。

由表 1 可知, 油葵籽粒的最大长度 a 、最大宽度 b 、最大厚度 c 的平均值分别为 13.36、6.94、4.63 mm, 标准偏差分别为 0.435、0.420、0.405, 油葵籽粒呈扁长形。

1.2 含水率与密度

应用赛多利斯 BSA224S 型高精度电子分析天平(最小刻度 0.1 mg)对随机选取的 100 粒油葵籽进行称量, 重复 5 次取平均值, 得到油葵籽粒百粒质量为 9.547 g, 采用比重瓶测试法测量 100 粒油葵籽粒的体积, 重复 5

收稿日期: 2021-04-03 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系创新团队(HBCT2018090206)

作者简介: 郝建军, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业生产机械化自动化及装备。Email: hjjpaper@163.com

次取平均值为 11.24 cm^3 。通过计算获得矮大头 567 油葵 籽粒的密度为 849.4 kg/m^3 。

表 1 矮大头 567 油葵籽粒三轴尺寸

Table 1 Three-axis dimensions of dwarf big head 567 oil sunflower seeds

三维尺寸 Three-dimensional size	一般尺寸 General size/mm	百分比 Percent/%	最大值 Maximum/mm	最小值 Minimum/mm	均值 Average/mm	标准偏差 Standard deviation
长 Length	12.72~14.05	89.37	14.68	11.77	13.36	0.435
宽 Width	6.15~7.59	93.11	8.13	4.89	6.94	0.420
厚 Thickness	3.71~5.33	95.87	5.77	3.17	4.63	0.405

利用 BOD-75-II 型电热恒温干燥箱（济南鑫贝生物技术有限公司）对上述 100 粒油葵籽粒进行烘干，冷却至室温后采用干基表示法^[16]，按照公式（1）计算得出油葵籽粒平均含水率为 10.13%。

$$M_d = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中 M_d 为干基含水率，%； m_w 为物料中所含水分的重量，g； m_s 为物料中所含干物质的重量，g。

1.3 泊松比

泊松比是指材料在单向受拉或受压时，横向正应变与轴向正应变的绝对值之比，亦称横向变形系数，反映材料横向变形的弹性常数。

从上述样品中随机选取 10 粒油葵籽粒，分别用衡翼 HY-0580 型万能材料拉压力试验机沿油葵籽粒厚度方向施加压力（加载速度 0.1 mm/s ）至油葵籽粒发生破裂。由万能材料拉压力试验机读取油葵籽粒厚度方向（轴向）正应变的变形量，利用绝对原点数显卡尺测量宽度方向（横向）正应变的变形量^[17]。按公式（2）计算油葵籽粒泊松比。本研究 10 次试验结果平均值为 0.413。

$$\nu = \frac{|e'|}{e} = \frac{W_1 - W_2}{L_1 - L_2} \quad (2)$$

式中 ν 为泊松比； e' 为油葵籽粒宽度方向的变形量，mm； e 为油葵籽粒厚度方向的变形量，mm； W_1 为加载前油葵籽粒的宽度，mm； W_2 为加载后油葵籽粒的宽度，mm； L_1 为加载前油葵籽粒的厚度，mm； L_2 为加载后油葵籽粒的厚度，mm。

1.4 弹性模量与剪切模量

弹性模量是用来衡量材料抵抗弹性变形能力大小的标尺。试验时，首先利用绝对原点数显卡尺测量随机选取的 10 粒油葵籽粒受压前厚度（ L_1 ），将其自然放置于衡翼 HY-0580 型万能材料拉压力试验机的圆形平台上，使用直径 5 mm 的圆形压头，以 5 mm/min 的加载速度对油葵籽粒施加加载荷，并读取力（ F ）-变形（ ΔL ）数据，对 10 粒油葵籽粒分别重复上述试验，由公式（3）~公式（5）计算出弹性模量平均值为 304.69 MPa ，剪切模量平均值为 107.82 MPa 。

$$E = \left(\frac{F}{A} \right) / \varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon = \lim_{L_1 \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta L}{L_1} \right) \quad (4)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

式中 E 为弹性模量，MPa； F 为油葵籽粒受到的轴向载荷，N； A 为接触面积， mm^2 ，圆形压头直径 5 mm，与油葵籽粒接触面积为 0.193 mm^2 ； ε 为应变； ΔL 为油葵籽粒受压后的变形量，mm； G 为剪切模量，MPa； ν 为油葵籽粒泊松比。

1.5 基于三维扫描的油葵籽粒离散元模型建立

油葵籽粒的外形是不规则体，常规建模方法无法精确还原其真实特征。为准确建立油葵籽粒三维模型，提高仿真试验的真实性，本文选取长宽厚均接近平均值的油葵籽粒（如图 1a）为研究对象，应用三维扫描技术，通过 GD-3DScan 四目三维扫描仪（测量精度 $0.001 \sim 0.05 \text{ mm}$ ，单幅扫描点数为 2 620 000，平均点距为 $0.15 \sim 0.3 \text{ mm}$ ）扫描油葵籽粒外轮廓，精确获取油葵籽粒外表面三维坐标，生成点云数据（如图 1b），然后将点云数据导出到 Geomagic Studio 软件中进行合并拼接处理得到油葵籽粒模型，最后将油葵籽粒模型导入 GOM Inspect 软件，对尖锐、噪点进行锐化处理得到油葵籽粒三维模型（如图 1c）^[18-20]。将油葵籽粒三维模型导入 EDEM2020 软件中，设置颗粒属性并将平滑值设置为 5，最小颗粒半径设置为 0.3，运用 EDEM2020 软件的自动填充方法得到由 67 个不等径颗粒组成的油葵籽粒离散元模型（如图 1d）。

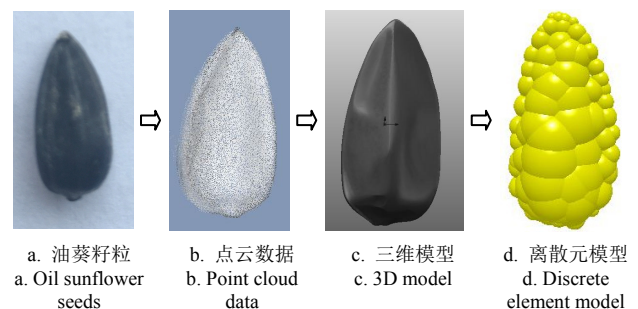


图 1 油葵籽粒离散元模型构建过程

Fig.1 Construction process of oil sunflower seed discrete element model

2 接触参数测定

2.1 静摩擦系数

2.1.1 油葵籽粒与其他材料之间的静摩擦系数

静摩擦系数是物料所受最大静摩擦力与法向正压力的比值，可以很好地表达物料与接触固体表面的摩擦性质^[21]。由于油葵种植与收获装备的主要材质为钢板、有机玻璃，故本研究采用斜面法测量油葵籽粒与钢板、有机玻璃之间的静摩擦系数，使用 H69020101 型数显倾角

测量仪(精度为 0.05°)测量试验过程中的倾斜角度,如图 2 所示。油葵籽粒属于散体物料,籽粒尺寸较小,易翻滚。为防止油葵籽粒翻滚,获取更加准确的静摩擦系数,试验时,将 4 粒油葵籽粘接在一起重复进行 10 次静摩擦系数测量试验。试验开始时钢板、有机玻璃分别置于水平位置,调节角度调节器,使钢板、有机玻璃绕其一侧缓慢转动,直至油葵籽块开始沿板向下滑动。利用高速摄影机捕捉油葵籽粒块开始滑动时钢板、有机玻璃倾斜角度,并求 10 次重复试验的倾斜角平均值 α 。按照公式(6)分别求出油葵籽块与钢板、有机玻璃的静摩擦系数,结果如表 2 所示。

$$\mu = \tan \alpha \quad (6)$$

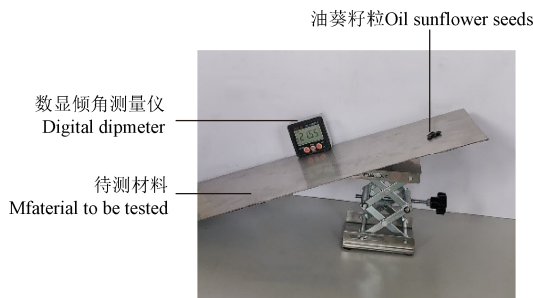


图 2 油葵籽粒与接触材料之间的静摩擦角测定过程

Fig.2 The measurement process of the static friction angle between oil sunflower seeds and the contact material

表 2 静摩擦系数计算结果

Table 2 Calculation results of static friction coefficient

材质 Material	倾斜角度 Slope angle/($^\circ$)	静摩擦系数 Coefficient of static friction
油葵-钢板 Oil sunflower-Steel plate	22.95	0.423
油葵-有机玻璃 Oil sunflower- Perspex	27.70	0.525

2.1.2 油葵籽粒间的静摩擦系数

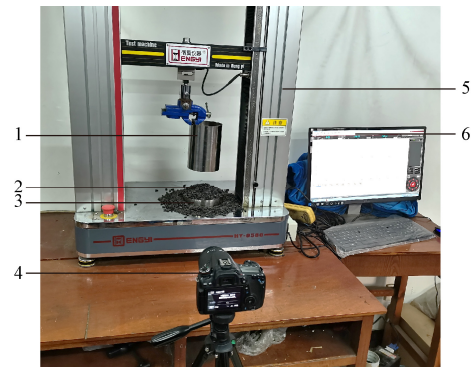
油葵籽粒表面为不规则曲面,利用油葵籽粒本体很难完成油葵籽粒间静摩擦系数的测量。为便于测量,参照文献[10, 14]方法,试验时利用双面胶将油葵籽粒粘在透明有机玻璃试验板上,粘贴时尽可能使油葵籽粒外壳排布紧密。试验时,将油葵籽粒置于水平放置的试验板上,调节角度调节器,使试验板绕其一侧缓慢转动,记录油葵籽粒开始沿试验板向下滑动时试验板的倾斜角度。求得 10 次重复试验油葵籽粒间静摩擦系数平均值为 0.569。

2.2 堆积试验

散体物料在形成堆积角的过程中存在多种复杂的运动状态,可较好地表征散体物料散落、流动和摩擦等特性^[16]。堆积角是物料运输、储藏、收获、播种等环节的重要基础数据^[16,22-25],针对不同物料特性发展出了注入法、倾斜法、圆筒提升法等堆积角测量方法。经预试验对比,表明利用圆筒提升法进行试验时,油葵籽粒的散落性能较好且操作便捷,故本文采用圆筒提升法进行油葵籽粒物理堆积试验,试验装置如图 3 所示。

试验前,利用直径 4~6 mm 的标准筛将大小接近油葵

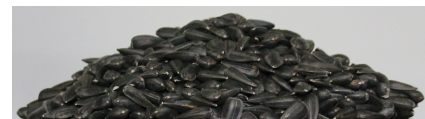
籽粒离散元模型的油葵籽粒筛分出来用于堆积试验^[26-27]。试验时,将不锈钢圆筒内填充满油葵籽粒,利用万能材料拉压力试验机的卡具夹持圆筒。通过改变不同的提升速度进行预试验,结果表明提升速度为 1m/s 时,油葵籽粒更容易达到坡面稳定状态,故本研究以 1 m/s 的速度匀速提升圆筒,0.25 s 后停止提升,待所有油葵籽粒静止且油葵籽粒坡面稳定时,利用摄像机对粒堆正侧两面进行垂直拍照。为减少人工测量误差,利用 MATLAB 对试验得到的堆积角图像进行处理^[28]。具体处理方法为:先对原始图像进行灰度处理,选定合适的阈值进行二值化处理,利用 bwperim 函数对二值图像进行轮廓提取。由于 bwperim 函数提取外轮廓时,会将图形区域内部的孔洞所围成的内部边缘也提取出来,故使用 imfill 函数将内部边缘做填洞和膨胀处理,得到完整的边缘轮廓。将边缘轮廓导入 Origin 中,利用图像数字化工具将边缘轮廓转化为坐标数据并进行线性拟合,将线性拟合得到的斜率转化为角度,即为油葵籽粒物理堆积试验的堆积角。轮廓提取过程如图 4 所示,将上述试验重复 10 次(结果见表 3),求其平均值得到油葵籽粒物理堆积试验的堆积角 θ 为 48.858° 。



1. 不锈钢圆筒 2. 油葵籽粒 3. 不锈钢圆台 4. 摄像机 5. HY-0580 型万能材料拉压力试验机 6. 计算机
1. Stainless steel cylinder 2. Oil sunflower seed 3. Stainless steel round table 4. Camera 5. HY-0580 universal material tensile and compression testing machine 6. Computer

图 3 油葵籽粒物理堆积试验

Fig.3 Physical stacking test of oil sunflower seeds



a. 原始图像
a. Original image



b. 二值化图像轮廓提取
b. Binarized image contour extraction



c. 边缘轮廓
c. Edge contour

图 4 堆积角边缘轮廓提取过程

Fig.4 Edge contour extraction process of stacking angle

表 3 油葵籽粒堆积角测量结果

Table 3 Measurement result of oil sunflower seed stacking angle

试验序号 Test No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
堆积角 测量值 Measurement value of stacking angle $\theta/(^{\circ})$	51.548	41.773	47.453	53.146	52.855	51.604	43.763	51.489	46.09	48.859

2.3 基于 Plackett-Burman 试验的最陡爬坡试验

Plackett-Burman 试验通过比较各因子 2 水平的差异与整体的差异来确定各因子的显著性，以快速筛选出对响应值影响显著的因子。本文采用 Design-Expert V8.0.6 的 Plackett-Burman 模块，以油葵籽粒堆积角为响应值，筛选出对油葵籽粒堆积角影响显著的因子，分别用 $X_1 \sim X_9$ 表示，设置 2 个虚拟参数，分别用 X_{10} 和 X_{11} 表示。每个参数设置高 (+1)、低 (-1) 水平，结合文献[6, 12, 14, 15, 19, 29-31]并根据本文试验与仿真预试验确定各参数的取值范围，结果如表 4 所示。设置 3 个中心点，共 15 组试验，每组试验重复 3 次求平均值。Plackett-Burman 试验方案和结果如表 5，试验结果方差分析如表 6。

表 4 Plackett-Burman 试验参数列表
Table 4 Parameters of Plackett-Burman test

符号 Symbol	参数 Parameters	水平 Levels	
		-1	+1
X_1	油葵泊松比	0.3	0.5
X_2	油葵籽粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	650	1 050
X_3	油葵剪切模量/Pa	1E+07	3.1E+08
X_4	油葵-油葵恢复系数	0.25	0.75
X_5	油葵-油葵静摩擦系数	0.369	0.769
X_6	油葵-油葵滚动摩擦系数	0.03	0.2
X_7	油葵-钢板恢复系数	0.1	0.6
X_8	油葵-钢板静摩擦系数	0.223	0.623
X_9	油葵-钢板滚动摩擦系数	0.05	0.2
X_{10}, X_{11}	虚拟参数	—	—

由表 6 可知，该模型 $P < 0.05$ 、决定系数 $R^2 = 0.96$ ，表明该回归模型显著，且能较好地预测各参数变化趋势。 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_7 、 X_8 、 X_9 对堆积角影响较小，贡献率均小于 5%； X_5 对堆积角的贡献率达到 19.88%、 X_6 对堆积角的贡献率高达 65.66%，表明 X_5 和 X_6 对堆积角的形成影响极大。通过比较各参数的 F 值大小，得到各参数对堆积角影响的主次顺序为 X_6 、 X_5 、 X_1 、 X_3 、 X_2 、 X_8 、 X_7 、 X_4 。故选取对堆积角贡献率较大和影响较显著的 X_5 和 X_6 ，在后续的爬坡试验与响应面寻优试验中进行寻优， X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_8 选用以物理试验得出的值，其余参数采用表 4 中数值的中间水平。 X_5 和 X_6 的标准化效应值均大于 0，故其对堆积角的影响为正效应，在后续的爬坡试验中，呈正效应的因素以固定步长逐步增大。以上述选定的参数为试验因子，进行最陡爬坡试验并由式 (7) 计算出最陡爬坡试验堆积角 β 与 2.2 节物理试验堆积角 θ 的相对误差 Y ，最陡爬坡试验设计及结果如表 7 所示。

$$Y = \frac{|\beta - \theta|}{\theta} \times 100\% \quad (7)$$

表 5 Plackett-Burman 试验方案与结果

Table 5 Design and results of Plackett-Burman test scheme

编号 No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	Plackett-Burman 试验堆积角 Plackett-Burman test stacking angle $\eta/(^{\circ})$
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	53.148
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	54.831
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	51.695
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	50.971
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	54.988
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	51.608
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	49.595
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	51.346
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	48.914
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	49.290
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	49.181
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	47.869
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50.010
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50.306
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50.411

注： $x_1 \sim x_{11}$ 为 $X_1 \sim X_{11}$ 的水平值，下同。
Note: $x_1 \sim x_{11}$ are the levels of $X_1 \sim X_{11}$, the same below.

表 6 Plackett-Burman 试验参数显著性分析
Table 6 Analysis of significance of parameters in
Plackett-Burman test

参数 Parameters	标准化效应 Standardization effects	平方和 Sum of squares	贡献率 Contribution rate/%	F 值 F values	P 值 P values
模型 Model	—	57.88	—	13.34	0.005 4**
x_1	-0.95	2.69	4.36	5.57	0.064 7
x_2	0.59	1.06	1.76	2.19	0.198 6
x_3	0.73	1.59	2.63	3.29	0.129 5
x_4	-0.27	0.23	0.38	0.47	0.523 3
x_5	2.00	11.98	19.88	24.85	0.004 2**
x_6	3.63	39.59	65.66	82.09	0.000 3**
x_7	0.30	0.27	0.44	0.55	0.489 8
x_8	0.39	0.45	0.75	0.94	0.376 5
x_9	0.097	0.028	0.046	0.058	0.819 1

注：**表示影响极显著 ($P < 0.01$)，*表示影响显著 ($0.01 < P < 0.05$)， $R^2 = 0.96$ ， $\eta = 50.94 - 0.47x_1 + 0.30x_2 + 0.36x_3 - 0.14x_4 + 1.00x_5 + 1.82x_6 + 0.15x_7 + 0.19x_8 + 0.048x_9$ 。
Note: ** indicates extremely significant impact ($P < 0.01$), * indicates significant impact ($0.01 < P < 0.05$), $R^2 = 0.960$, $\eta = 50.94 - 0.47x_1 + 0.30x_2 + 0.36x_3 - 0.14x_4 + 1.00x_5 + 1.82x_6 + 0.15x_7 + 0.19x_8 + 0.048x_9$.

由表 7 可知，随着 X_5 、 X_6 的增大，最陡爬坡试验堆积角 β 与物理试验堆积角 θ 的相对误差呈先减小后增大趋势，且在试验 2 参数下相对误差最小。故选取试验 2 参数为中间水平，以试验 1 参数、试验 3 参数分别为低水平、高水平进行后续的响应面寻优试验。油葵籽粒间静摩擦系数与动摩擦系数取值区间分别为 0.369~0.569、0.03~0.115。

表 7 最陡爬坡试验方案与结果
Table 7 Test design scheme and results of path of steepest
ascent method

试验序号 Test No.	X_5	X_6	最陡爬坡试验堆积角 Path of steepest ascent method stacking angle $\beta/(^{\circ})$	相对误差 Relative errors $Y/\%$
1	0.369	0.0300	46.685	4.448
2	0.469	0.0725	47.605	2.566
3	0.569	0.1150	50.568	3.500
4	0.669	0.1575	51.392	5.186
5	0.769	0.2000	53.266	9.022

2.4 响应面寻优试验及回归模型建立

根据上文最陡爬坡试验得到的油葵籽粒间静摩擦系数与动摩擦系数取值区间,应用 Design-Expert V8.0.6 进行中心复合试验设计。对 11 组参数组合进行堆积角试验,其中 3 组为中心水平重复试验,探究油葵籽粒间静摩擦系数(X_5)与动摩擦系数(X_6)对响应面寻优试验的堆积角(φ)的影响效果。因素编码值与中心复合试验结果如表 8 所示。

表 8 中心复合试验方案及结果
Table 8 Center compound test design and results

试验序号 Test No.	x_5	x_6	堆积角 Stacking angle $\varphi/(^\circ)$	相对误差 Relative error $Y/\%$
1	-1	-1	47.725	2.319 0
2	1	-1	50.419	3.195 0
3	-1	1	49.913	2.159 3
4	1	1	50.996	4.375 9
5	-0.5	0	49.206	0.712 3
6	0.5	1	50.495	3.350 5
7	0	-0.5	50.608	3.581 8
8	0	0.5	50.981	4.345 2
9	0	0	51.032	4.449 6
10	0	0	50.635	3.637 1
11	0	0	49.954	2.243 2

通过对表 8 的数据进行二元回归拟合,建立堆积角(φ)与油葵籽粒间静摩擦系数(X_5)和动摩擦系数(X_6)的回归模型,如式(8)所示。

$$\varphi=50.47+0.98 x_5+0.66 x_6-0.40 x_5 x_6-2.25 x_5^2+1.53 x_6^2$$
 (8)

由方差分析结果表 9 可知,该回归模型 $P=0.007 6$,失拟项 $P=0.926 5$,决定系数 $R^2=0.925 5$,回归模型极显著,失拟项不显著,决定系数接近 1,表明该回归方程拟合得较好。变异系数(CV)越大时试验数据的可靠性越差,该模型的变异系数(CV)仅为 0.76%,表明该试验结果可靠性较高。利用 Design-Expert 软件进行中心复合试验时,精确度大于 4 模型才具有较好的预测性^[32],该模型的精确度为 12.363,表明该模型可以较好地预测油葵籽粒的堆积角。由表 9 可知, X_5 对油葵籽粒堆积角影响极显著, X_6 和 X_5^2 对油葵籽粒堆积角影响为显著,影响显著性由大至小的排序为: X_5 、 X_6 、 X_5^2 。试验因子 X_5 、 X_6 与指标之间存在二次非线性关系,且交互作用对指标的影响不显著,堆积角响应曲面如图 5 所示。

表 9 响应面寻优试验回归模型方差分析

Table 9 Analysis of variance in regression model of response surface optimization test

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F values	P 值 P values
模型 Model	8.96	5	1.79	12.42	0.007 6**
x_5	4.34	1	4.34	30.13	0.002 7**
x_6	1.94	1	1.94	13.43	0.014 5*
$x_5 x_6$	0.65	1	0.65	4.50	0.087 4
x_5^2	1.23	1	1.23	8.50	0.033 2*
x_6^2	0.57	1	0.57	3.95	0.103 6
残差 Residual	0.72	5	0.14	—	—
失拟项 Lack of fit	0.13	3	0.042	0.14	0.926 5
纯误差 Pure error	0.59	2	0.30	—	0.376 5

注: 变异系数 CV=0.76%, $R^2=0.9255$, 精确度为 12.363。
Note: Variable coefficient CV=0.76%, $R^2=0.925$, precision is 12.363.

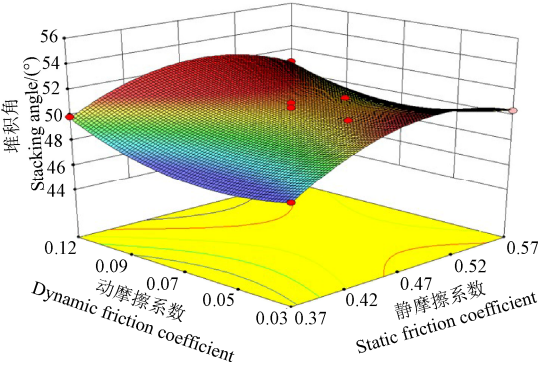


图 5 油葵籽粒堆积角响应曲面

Fig.5 Response surface of oil sunflower seed stacking angle

3 验证试验

3.1 堆积角验证试验

运用 Design-Expert V8.0.6 的 Optimization-Numerical 优化功能,以油葵籽粒物理堆积试验所得的堆积角为目标进行寻优,得到 25 组优化解。对优化解进行仿真试验,将仿真试验结果与物理堆积试验结果进行对比,找出与物理堆积试验堆积角大小、形状最为相似的一组优化解,即油葵籽粒间静摩擦系数为 0.41 和动摩擦系数 0.05。将该组优化解做 5 组重复仿真试验,求其平均值得到该参数组合下堆积角为 48.976°,与物理堆积试验得到的堆积角误差为 0.24%。仿真试验与物理试验的对比如图 6 所示,结果表明,在优化后的仿真参数下,堆积角仿真试验结果与堆积角物理试验结果无显著差异,两者的堆积角的形状与角度相似度高,表明本组仿真参数设置准确。

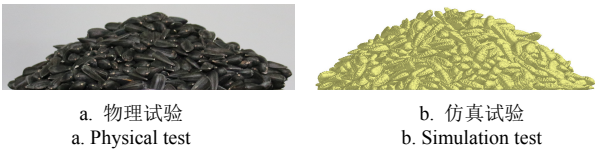


图 6 物理试验与仿真试验对比

Fig.6 Comparison of physical test and simulation test

3.2 电磁料斗振动验证试验

电磁振动料斗垂直方向上下微幅和水平方向扭转复合的振动方式可使油葵颗粒处于动态过程,颗粒间及颗粒与料斗间产生复杂的接触力,类似于实际生产过程(例如振动筛选机械、播种机械等)产生的使颗粒运动的条件。因此,在 EDEM 中为油葵籽粒模型和料斗模型添加本研究标定的油葵籽粒本征参数与接触参数,基于电磁振动给料器设计不同工作电压(正弦交流电,190~250 V)下油葵籽粒振动验证试验,验证离散元模型和仿真参数的准确性与合理性。试验装置如图 7 所示,试验时,首先在料斗内添加油葵籽粒,打开已调节好工作电压的控制器开关,并开启高速摄影机对料斗内油葵籽粒的运动进行录像。料斗在电磁力的作用下产生振动频率为 50 Hz 的垂直方向正弦微幅振动和水平方向正弦圆周振动,给油葵籽粒持续的螺旋激振力,对油葵籽粒做功。油葵籽粒在持续激振力作用下向料斗内壁方向运动,进入螺旋轨道并沿螺旋轨道向出料口运动。待油葵籽粒从

出料口均匀排出后, 计算 1 min 内落入集料罐内的油葵籽粒质量, 并计算质量流率, 每个工作电压重复 5 次试验求其平均值。

电磁振动装置的作用是为料斗施加激振力, 使料斗产生微小的螺旋圆周振动, 该振动可分为频率为 50 Hz 的水平圆周振动和垂直振动, 可在 EDEM 的“Add motion”选项中为料斗模型添加 “Add sinusoidal rotation kinematic” 和 “Add sinusoidal translation kinematic” 运动函数, 设置与物理试验相同的频率和振幅来模拟电压变化, 故在仿真试验中只需建立料斗模型, 其余装置进行简化。在 SolidWorks 中建立料斗模型导入 EDEM 软件中, 为料斗添加振动频率均为 50 Hz 的水平圆周方向和垂直方向的正弦运动, 振幅分别为 θ_0 和 Z_0 , θ_0 和 Z_0 的关系如公式 (9) [33-35]。通过电磁涡流传感器检测料斗与探头端面相对位移变化, 将得到的信号转化为垂直振幅大小, 根据公式 (9) 计算出不同工作电压下垂直振幅 (Z_0) 对应的角振幅 (θ_0), 如表 10 所示。工作电压越大, 料斗的振幅就越大, 故通过改变振幅大小可模拟工作电压的变化, 依据表 10, 通过改变料斗模型的垂直振幅和角振幅来模拟电压的调节。试验时, 待料斗模型内生成的油葵颗粒与物理试验质量相同时, 开始振动模拟, 在后处理模块输出 1min 内落入集料罐内的油葵籽粒质量并计算质量流率。仿真试验油葵籽粒分散前、分散后和在螺旋轨道上输送的 3 种运动状态如图 8 所示。

$$Z_0 = r_A \theta_0 \tan \varphi_A \tag{9}$$

式中 Z_0 为料斗的垂直方向振幅, mm; r_A 为弹簧安装点到原点的距离, mm; θ_0 为料斗的水平圆周方向的角振幅, ($^\circ$); φ_A 为弹簧安装角, ($^\circ$)。

表 10 工作电压对应的垂直振幅和角振幅
Table 10 Vertical amplitude and angular amplitude corresponding to working voltage

电压 Voltage U/V	垂直振幅 Vertical amplitude/mm	角振幅 Angular amplitude/ $(^\circ)$
190	0.766	1.327
200	0.774	1.341
210	0.779	1.349
220	0.784	1.358
230	0.800	1.386
240	0.821	1.422
250	0.849	1.471

物理试验与仿真试验振动过程中不同工作电压下产生的工作电压-质量流率曲线如图 9 所示。不同工作电压下油葵籽粒物理试验与仿真试验的质量流率曲线的相关系数为 0.998, 2 条曲线变化趋势基本一致, 且相关性较强。在工作电压小于 230 V 时, 随着工作电压的增大, 质量流率均呈明显的增长趋势, 但当工作电压大于 230 V 之后, 增大工作电压对质量流率的影响均不明显。对物理振动试验过程进行录像帧回放, 观察分析发现油葵籽粒在料斗的螺旋轨道上做定向有序连续滑移运动, 且靠近出料口的油葵颗粒比料斗底部的油葵颗粒上下跳动

程度小。当工作电压大于 230 V 时, 油葵籽粒在螺旋轨道上产生强烈碰撞, 跳动程度明显增强, 一些油葵籽粒从轨道掉落回料斗底部, 重新进入螺旋轨道排序输送, 故当工作电压大于 230 V 时质量流率增长趋势变缓, 此过程与仿真动画中油葵颗粒的状态相符。综上可知, 该油葵籽粒模型和接触参数合理可用于后续的仿真试验。

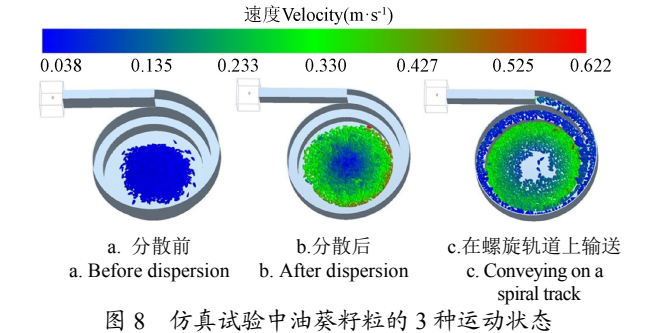
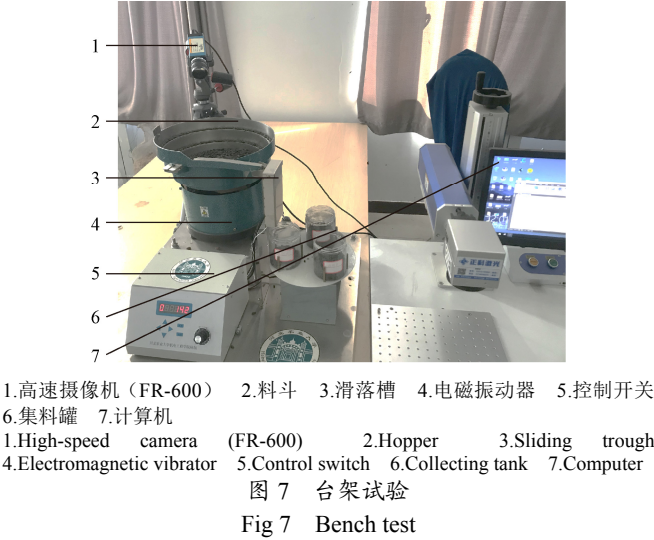


图 8 仿真试验中油葵籽粒的 3 种运动状态
Fig.8 Three movement states of oil sunflower seeds in the simulation experiment

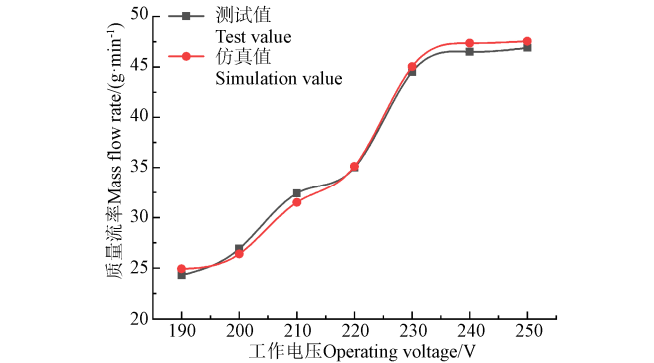


图 9 不同工作电压下质量流率的实测和仿真结果
Fig.9 Measured and simulated results of mass flow rate under different operating voltages

4 结 论

1) 通过试验对油葵籽粒物理特性参数进行测定。矮大头 567 油葵籽粒长、宽、厚的平均值分别为 13.36、6.94、4.63 mm, 且三轴尺寸均符合正态分布, 密度、含水率分

别为 849.4 kg/m³、10.13%、泊松比、弹性模量和剪切模量分别为 0.413、304.69 和 107.82 MPa。

2) 利用三维扫描逆向建模技术扫描得到油葵籽粒的三维模型; 在 EDEM 中, 以 Hertz-Mindlin 接触模型为基础, 运用自动填充方法得到由 67 个不等径颗粒组成的油葵籽粒离散元模型, 通过试验证明了该模型的合理性。

3) 根据圆筒提升法进行油葵籽粒物理堆积试验, 利用 MATLAB 对堆积角图像进行处理, 得到边缘轮廓, 进行线性拟合得到堆积角为 48.858°。通过 Plackett-Burman 试验与最陡爬坡试验快速筛选出对油葵籽粒堆积角影响显著的因子为油葵籽粒间静摩擦系数和油葵籽粒间动摩擦系数。应用 Design-Expert V8.0.6 进行中心复合试验设计, 建立 2 个显著性因子与堆积角的回归模型。显著性因子与堆积角之间存在二次非线性关系, 且交互作用对堆积角影响不显著。

4) 以油葵籽粒物理堆积试验堆积角为目标进行寻优, 得到显著性因子较优组合为油葵籽粒间静摩擦系数为 0.41 和动摩擦系数为 0.05。堆积角仿真试验测得该参数组合下堆积角为 48.976°, 与物理堆积试验得到的堆积角误差为 0.24%, 两者堆积角的形状与角度相似度高; 基于电磁振动给料器设计了不同工作电压下油葵籽粒振动的物理试验与仿真试验, 结果表明不同工作电压下油葵籽粒物理试验与仿真试验的质量流率曲线的相关系数为 0.998, 2 条曲线变化趋势基本一致, 相关性较强。且物理试验与仿真试验中油葵籽粒动态运动过程相符。以上验证试验的结果表明, 标定结果真实可靠, 可为油葵播种、收获等阶段机械化作业的仿真提供参考。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第七十五卷[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] 张学军, 马少腾, 朱兴亮, 等. 正多杆变隙式油葵脱粒装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 26-33.
Zhang Xuejun, Ma Shaoteng, Zhu Xingliang, et al. Design and test of oil-sunflower threshing device with variable clearance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 26-33. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张学军, 张凌杰, 朱兴亮. 油葵收获割台工作性能仿真及试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 1-5.
Zhang Xuejun, Zhang Lingjie, Zhu Xingliang. Simulation and experimental study on working performance of oil sunflower harvesting head[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张学军, 李茜, 朱兴亮, 等. 基于自抗扰-动态矩阵的油葵联合收获机脱粒滚筒转速控制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 9-16.
Zhang Xuejun, Li Qian, Zhu Xingliang, et al. Rotational speed control of threshing cylinder of oil sunflower combine harvester based on active disturbance rejection controller-dynamic matrix predictive[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2019, 35(15): 9-16. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马少腾, 朱兴亮, 张学军, 等. 油葵籽粒物理特性的测定[J]. 农机化研究, 2020, 42(8): 192-196.
Ma Shaoteng, Zhu Xingliang, Zhang Xuejun, et al. Determination of physical properties of oil sunflower seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 192-196. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘羊, 宗望远, 马丽娜, 等. 采用高速摄影技术测定油葵籽粒三维碰撞恢复系数[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 44-53.
Liu Yang, Zong Wangyuan, Ma Lina, et al. Determination of three-dimensional collision restitution coefficient of oil sunflower grain by high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 44-53. (in Chinese with English abstract)
- [7] 侯占峰, 戴念祖, 陈智, 等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 46-54.
Hou Zhanfeng, Dai Nianzu, Chen Zhi, et al. Measurement and calibration of physical property parameters for agropyron seeds in a discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(24): 46-54. (in Chinese with English abstract)
- [8] 马彦华, 宋春东, 宣传忠, 等. 苜蓿秸秆压缩仿真离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 22-30.
Ma Yanhua, Song Chundong, Xuan Chuanzhong, et al. Parameters calibration of discrete element model for alfalfa straw compression simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(11): 22-30. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhou H L, Hu Z Q, Chen J G, et al. Calibration of DEM models for irregular particles based on experimental Check for design method and bulk experiments[J]. Powder Technology, 2018, 332: 210-223.
- [10] 吴孟宸, 丛锦玲, 闫琴, 等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 30-38.
Wu Mengchen, Cong Jinling, Yan Qin, et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 30-38. (in Chinese with English abstract)
- [11] Liang R Q, Chen X G, Jiang P, et al. Calibration of the simulation parameters of the particulate materials in film mixed materials[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 29-36.
- [12] 马文鹏, 尤泳, 王德成, 等. 基于 RSM 和 NSGA-II 的苜蓿种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 136-144.
Ma Wenpeng, You Yong, Wang Decheng, et al. Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA-II[J]. Transactions of the Chinese Society

- for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 136-144. (in Chinese with English abstract)
- [13] 郝建军, 龙思放, 李浩, 等. 机收麻山药离散元模型构建及其仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 34-42. Hao Jianjun, Long Sifang, Li Hao, et al. Development of discrete element model and calibration of simulation parameters for mechanically-harvested yam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(20): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [14] 石林榕, 马周泰, 赵武云, 等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 25-33. Shi Linrong, Ma Zhoutai, Zhao Wuyun, et al. Calibration of simulation parameters of flax seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(20): 25-33. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李永祥, 李飞翔, 徐雪萌, 等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320-327. Li Yongxiang, Li Feixiang, Xu Xuemeng, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(16): 320-327. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马云海. 农业物料学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [17] Khodabakhshian R. Poisson's ratio of pumpkin seeds and their kernels as a function of variety, size, moisture content and loading rate[J]. Agricultural Engineering International the CIGR Journal, 2012, 14(3): 203-209.
- [18] 李胜男, 林晓, 陈言, 等. 基于点云的球面三维逆向建模[J]. 图学学报, 2013, 34(3): 49-52. Li Shengnan, Lin Xiao, Chen Yan, et al. 3D converse modeling for sphere point cloud[J]. Journal of Graphics, 2013, 34(3): 49-52. (in Chinese with English abstract)
- [19] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123-132. Yu Qingxu, Liu Yan, Chen Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for panax notoginseng seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123-132. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294-300. Liu Cailing, Wang Yali, Song Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(15): 294-300. (in Chinese with English abstract)
- [21] 余参参, 段宏兵, 蔡兴奎, 等. 基于离散元仿真参数的微型薯物料测定[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 210-217.
- Yu Cancan, Duan Hongbing, Cai Xingkui, et al. Discrete element simulation parameters-based measurement of materials for potato minituber[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 210-217. (in Chinese with English abstract)
- [22] 彭才望, 许道军, 贺喜, 等. 黑水虻处理的猪粪有机肥离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 212-218. Peng Caiwang, Xu Daojun, He Xi, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for pig manure organic fertilizer treated with *Hermetia illucen*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(17): 212-218. (in Chinese with English abstract)
- [23] Xia R, Li B, Wang X W, et al. Measurement and calibration of the discrete element parameters of wet bulk coal[J]. Measurement, 2019, 142: 84-95.
- [24] Hamzah M, Beakawi A H, Omar S, et al. A review on the angle of repose of granular materials[J]. Powder Technology, 2018, 330: 397-417.
- [25] Tsa B, Rf B, Er B. Classification of granular materials via flowability-based clustering with application to bulk feeding[J]. Powder Technology, 2021, 378: 288-302.
- [26] 郝建军, 龙思放, 李建昌, 等. 麻山药种植田沙壤土流动性离散元模型颗粒放大尺效应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 56-64. Hao Jianjun, Long Sifang, Li Jianchang, et al. Effect of granular ruler in discrete element model of sandy loam fluidity in Ma yam planting field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 56-64. (in Chinese with English abstract)
- [27] 韩树杰, 戚江涛, 坎杂, 等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 101-108. Han Shujie, Qi Jiangtao, Kan Za, et al. Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 101-108. (in Chinese with English abstract)
- [28] Müller D, Fimbinger E, Brand C. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis[J]. Powder Technology, 2021, 383: 598-605.
- [29] 王志鹏, 李永祥, 徐雪萌. 基于堆积实验的小米离散元参数标定[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 115-120. Wang Zhipeng, Li Yongxiang, Xu Xuemeng. Parameter calibration of millet discrete element based on stacking experiment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(2): 115-120. (in Chinese with English abstract)
- [30] 侯俊铭, 李金澎, 姚恩超, 等. 典型蓖麻蒴果离散元参数标定与分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(5): 565-575. Hou Junming, Li Jinpeng, Yao Enchao, et al. Calibration and analysis of discrete element parameters of typical castor[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(5): 565-575.

- 565-575. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王美美, 王万章, 杨立权, 等. 基于响应面法的玉米籽粒离散元参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(3): 111-117.
Wang Meimei, Wang Wanzhang, Yang Liquan, et al. Calibration of discrete element model parameters for maize kernel based on response surface methodology[J]. Journal of South China Agricultural University 2018, 39(3): 111-117. (in Chinese with English abstract)
- [32] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- [33] 邢洁洁, 徐丽明, 刘旭东, 等. 电磁振动料斗内玉米种子分散与排序输送仿真及试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 32-39.
Xing Jiejie, Xu Liming, Liu Xudong, et al. Simulation and test of corn seeds' dispersion and arraying transport in electromagnetic vibration hopper[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- [34] 邢洁洁, 徐丽明, 史丽娜, 等. 圆周电磁振动下单粒玉米种子运动特性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 21-28.
Xing Jiejie, Xu Liming, Shi Lina, et al. Analysis of movement characteristics of single corn seed under circular electromagnetic vibration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(23): 21-28. (in Chinese with English abstract)
- [35] 顾平灿. 电磁振动给料器给料速度影响因素的探讨[J]. 机电工程, 2008, 25(6): 39-41.
Gu Pingcan. Study on influencing factors of feeding speed of electromagnetic vibration feeder[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(6): 39-41. (in Chinese with English abstract)

Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds

Hao Jianjun¹, Wei Wenbo¹, Huang Pengcheng², Qin Jiahui¹, Zhao Jianguo¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. Zhangjiakou Rural Revitalization Promotion Center, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: Discrete element method (DEM) is widely used to simulate the key work process of oil sunflower seeding and harvesting. However, feature parameters of oil sunflower seeds are still lacking, particularly on the contact parameters between seeds and mechanized planting/harvesting equipment. Taking the oil sunflower seeds as the research object, this research aims to establish a discrete element model using a 3D scanning reverse simulation in the EDEM software, and then to calibrate the specific parameters of oil sunflower seeds. The average length, width, and thickness of 567DW oil sunflower seeds were 13.36, 6.94, and 4.63 mm, respectively, in an absolute digital caliper. The weight of 100 567DW oil sunflower seeds was measured at 9.547 g using an electronic analytical balance. The density of 567DW oil sunflower seeds was 849.4 kg/m³, and the water content was 10.13% in a B0D-75-II electric thermostatic drier and pycnometer. Poisson's ratio, elastic modulus, and shear modulus of oil sunflower seeds were 0.413, 304.69, and 107.82 MPa, respectively. A universal tensile testing machine was also used. The static friction coefficients between oil sunflower seeds and steel plate/plexiglass were 0.423 and 0.525 on the inclined plane, respectively. A physical stacking test was performed on a cylinder lifting for the oil sunflower seeds. MATLAB platform was selected to carry out a gray-scale and binarization processing on the image of stacking angle. Bwperim and imfill functions were selected to extract the outline of binary image, and then perform the holes filling and expansion on the inner edge, finally to obtain the edge contour. The edge contour was imported into the Origin software, where the converted coordinate data was obtained for the linear fitting slope, thereby obtaining a stacking angle of 48.858°. Taking the stacking angle as the evaluation index, the Plackett-Burman test was used to screen out the factors with a significant impact on the stacking angle and the static and dynamic friction coefficients between the oil sunflower seeds. The steepest ascending path was used to determine the range of factors with a significant impact on the stacking angle. The variance analysis was also made to optimize the response surface. Optimal static/dynamic friction coefficients between oil sunflower seeds were determined to be 0.41 and 0.05, respectively. A stacking test was simulated with a better parameter combination, where the measured stacking angle was 48.976°, only 0.24% in error with the stacking angle, compared with the physical stacking test. The electromagnetic hopper vibration and simulation were carried out to obtain the mass flow rate curves of oil sunflower seeds under different working voltages. The correlation coefficient of the two curves was 0.998, indicating the changing trend was all the same. Consequently, the reliable model of oil sunflower seeds and the calibrated discrete element parameters can provide significant theoretical support to the discrete element simulation.

Keywords: crops; discrete element method; oil sunflower seeds; three-dimensional scanning; parameter calibration