

大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定

张涛 刘飞 赵满全* 刘月琴 李凤丽 麻乾 张勇 周鹏

(内蒙古农业大学 机电工程学院,呼和浩特 010018)

摘要 研究大豆排种过程的离散元仿真参数设置。对大豆种子的本征参数、大豆种子与排种器的接触参数进行标定;测定大豆种子长、宽、高三轴尺寸,自然休止角,千粒重和密度的本征物理参数,测定大豆种子与排种盘、搅种轮和有机玻璃接触的最大静摩擦因数、碰撞恢复系数。以平均误差值为评价指标,应用离散元软件正交试验仿真标定。结果表明,离散元仿真标定的参数设置为:大豆种子三轴尺寸的长、宽、高分别为 6.884、6.833、6.292 mm,密度为 1 272.15 kg/m³;大豆种子与排种盘、搅种轮和有机玻璃的最大静摩擦因数分别为 0.449、0.408、0.474,碰撞恢复系数分别为 0.561、0.518、0.472,离散元仿真的平均误差值为 2.044%。

关键词 排种器;离散元;参数标定;大豆种子;恢复系数;最大静摩擦因数

中图分类号 S223.2

文章编号 1007-4333(2017)09-0086-07

文献标志码 A

Measurement of physical parameters of contact between soybean seed and seed metering device and discrete element simulation calibration

ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan*, LIU Yueqin, LI Fengli,
MA Qian, ZHANG Yong, ZHOU Peng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract In order to study the parameter setting of discrete element simulation, the intrinsic parameters of soybean seed and the contact parameters of soybean seed and seed metering device were calibrated. The physical parameters of three axial dimensions, natural repose angle, 1 000 grain weight and density were determined. The maximum contact coefficient and contact coefficient of soybean seed and seed plate, seed wheel and organic glass were measured. The discrete element software is used to calibrate the orthogonal test, and the average error value is the evaluation index. The results show that the parameters of discrete element simulation calibration are: the length, width and height of three axis of soybean seeds were respectively 6.884, 6.833 and 6.292 mm, and the density of soybean seeds was 1 272.15 kg/m³; The maximum static friction coefficients of soybean seed and seed plate, seed wheel and plexiglass were 0.449, 0.408, and 0.474, respectively; The recovery coefficient of soybean seed and seed plate, seed wheel and plexiglass were 0.561, 0.518, and 0.472, respectively. The average error of discrete element simulation is 2.044%.

Keywords seed metering device; discrete element method; parameter calibration; soybean seed; coefficient of restitution; coefficient of static friction

随着计算机计算能力的提高,计算机数值模拟在农业机械领域得到了大力发展。离散元方法是继有限元法、计算流体力学之后,用于分析散粒体动力

学问题的一种强有力的数值计算方法。通过建立固体颗粒体系的参数化模型,进行颗粒行为模拟和分析,为解决众多涉及颗粒、结构等问题提供了方法,

收稿日期:2016-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51365034);内蒙古自治区博士研究生科研创新项目(B20161012902Z);中国博士后科学基金项目(2014M552532XB)

第一作者:张涛,博士研究生, E-mail:308685885@qq.com

通讯作者:赵满全,教授,博士生导师,主要从事高寒干旱地区农业机械化工程与技术研究, E-mail:nmgzhaomq@163.com

已成为过程分析、设计优化和产品研发的一种强有力的工具。离散元方法作为散粒物料计算机数值模拟的一种方法,广泛应用于播种机作业的计算机数值模拟。较为准确的仿真输入参数,能够提高模拟结果的精度^[1-3]。

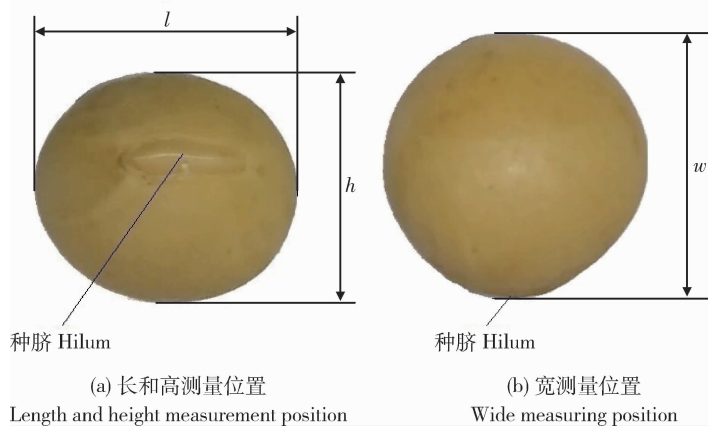
为得到较为准确的离散元仿真输入参数,需要对输入参数实际测定和离散元标定。已有研究基于响应面法的堆积试验标定了小麦离散元仿真参数,得到了离散元输入参数对颗粒堆休止角的影响^[4];建立了脱壳后粳稻的摩擦系数与堆积角的方程,得到滚动摩擦系数对颗粒堆积特性有显著影响^[5];应用高速摄像技术测试与分析了玉米种子与排种器离散元仿真的滚动摩擦系数^[6]。对于大豆种子与排种器的离散元仿真参数标定研究较少,本研究拟测定

大豆排种试验离散元仿真需要输入的主要参数,应用 EDEM 离散元软件仿真标定大豆种子三轴尺寸、密度、最大静摩擦因数和恢复系数,以期为大豆排种试验离散元数值模拟的参数设置提供依据。

1 大豆种子本征参数测定

1.1 三轴尺寸测量

测量大豆种子的品种为黑龙江省农科院佳木斯分院选育的合丰 55 大豆原种,种子净度为 99%,含水率 13.5%。应用精度为 0.01 mm 外径千分尺测量 200 粒大豆种子长、宽、高三轴尺寸,长、宽、高平均值分别为:6.884、6.833、6.292 mm,方差分别为 0.164 1、0.099 1、0.140 8。大豆种子长、宽、高三轴尺寸测量位置见图 1。



l 、 w 、 h 分别为大豆种子的长、宽、高。

l 、 w and h are respectively the length, width and height of soybean seed.

图 1 大豆种子三轴尺寸测量位置

Fig. 1 Measuring positions of the three axis of soybean seeds

1.2 自然休止角测定

应用 FT-104B 型休止角测定仪根据 GB/T 11986—1989《表面活性剂 粉体和颗粒休止角的测量》测量大豆种子自然休止角^[7-8]。FT-104B 型休止角测定仪技术参数为:口径长度 28 mm,漏斗下口内径 10 mm,透明圆盘直径 100 mm、高度 25 mm,标尺最大行程 150 mm(精度为 1 mm)。大豆种子自然休止角测量 10 次取平均值为 28.88°。

1.3 千粒重与密度测定

应用精度为 0.01 g 电子天平测量 100 0 粒大豆种子质量,重复 5 次试验取平均值为 185.37 g。应用精度为 1 mL 量筒测量 100 0 粒大豆种子体积,重复 3 次试验取平均值为 153 mL。计算得到 1 粒大

豆种子的质量为 0.185 37 g,体积为 0.153 mL;大豆种子的密度为 1 211.57 kg/m³。

2 大豆种子与排种器接触参数测定

2.1 气吸式排种器简介

气吸式排种器主要由排种器前壳体、排种器后体、搅种轮、排种盘、吸气管和刮种器等组成,依靠风机提供的负压吸力进行排种作业。排种盘一侧为种子室,另一侧上边为负压室,下边为大气压室。风机工作时产生的负压通过排种盘上均匀分布的吸种孔对种子产生吸力,当排种盘转动时,吸种孔上的种子随排种盘一起转动,当种子到达大气压区域时,负压吸力消失,种子在重力作用下落入导种管内,完成排

种作业。搅种轮与排种盘螺栓连接,随排种盘一起转动,增加种子的流动性且防止种子架空^[9]。

排种过程中大豆种子与排种器接触的零部件为排种盘、搅种轮和排种器前壳体。最大静摩擦因数和碰撞恢复系数对计算机数值模拟排种过程时种群运动精度影响较大,本研究测定大豆种子与排种盘、搅种轮和有机玻璃(有机玻璃为排种器前面壳体的制作材料)的最大静摩擦因数和碰撞恢复系数。

2.2 最大静摩擦因数测定

由于大豆种子形状较为规则,较难测定单粒种子最大静摩擦因数,测定大豆种子群的最大静摩擦因数较为容易。将8粒大豆种子粘在一起做成一组大豆种子群,共制作6组大豆种群,其中1组大豆种子群见图2。



图2 大豆种子群

Fig.2 Soybean seeds population

最大静摩擦因数测定应用型号为CNY-1型斜面板。为了更精确测定排种盘、搅种轮和排种器前壳体的最大静摩擦因数,使用一段时间的排种盘、搅种轮和有机玻璃作为被测物体,固定在斜面板上,大豆种群分别放在排种盘、搅种轮和有机玻璃上,当斜面板角度缓慢增大到一定值时,大豆种群在被测物体上滑动,记录种群开始滑动时斜面角度,计算得到大豆与排种盘、搅种轮和有机玻璃接触时最大静摩擦因数^[10-11]。

每组种群试验5次,共试验30次,取平均值。通过测定得到大豆种群与排种盘、搅种轮和有机玻璃接触时最大静摩擦角分别为25.267°、23.217°、26.517°,方差分别为6.220、2.684、3.026。计算后得到大豆种子与排种盘、搅种轮和有机玻璃接触时最大静摩擦因数分别为0.472、0.429、0.499。

2.3 恢复系数测定

恢复系数是衡量2个物体碰撞后,恢复到原来

形状能力的参数,恢复系数越大,说明被碰撞的物体恢复初始状态的能力越强,弹性越好。恢复系数的定义为碰撞后法向相对分离速度与碰撞前相对接近速度的比值^[12-14]。被测物体静止,碰撞恢复系数为:

$$e = \frac{|v_2|}{|v_1|}$$

式中: v_1 、 v_2 分别为碰撞前、后大豆种子的速度。碰撞前大豆种子做自由落体运动,接触时其速度为:

$$v_1 = \sqrt{2gH_1}$$

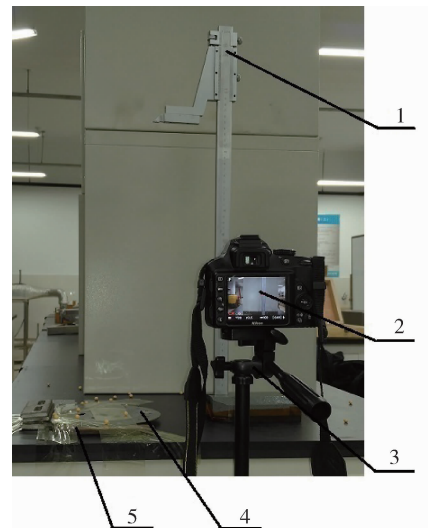
碰撞后大豆种子离开被测物件时速度为:

$$v_2 = \sqrt{2gH_2}$$

式中: H_1 为大豆种子下落高度, H_2 为大豆种子碰撞后弹起的最高点与碰撞平面的高度差。根据大豆种子下落高度与碰撞后弹起高度可计算得到碰撞恢复系数 e :

$$e = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$$

应用高度尺测量大豆种子与被测物体碰撞后弹起的高度;应用相机对试验过程录像,相机由三脚架水平仪调整水平,高度与大豆碰撞后弹起高度接近,使相机接近水平拍摄。为了使被测物体(排种盘、搅种轮和有机玻璃)更加接近工作状态,被测物件下面边缘处添加垫块,将垫块与被测物件固定在桌面上^[15-16]。恢复系数测定装置见图3。



1. 高度尺;2. 相机;3. 相机三脚架;4. 被测物体(分别为排种盘、搅种轮和有机玻璃);5. 垫块。

1, Height gauge; 2, Camera; 3, Tripod; 4, Object measured (seed plate, stirring wheel and plexiglass); 5, Heel block.

图3 恢复系数测定装置

Fig.3 Recovery coefficient measuring device

试验时，种子由固定高度 H_1 处自由下落 ($H_1=500$ mm)，与盘种盘、搅种轮和有机玻璃平面碰撞后弹起，由相机对弹起种子录像。试验后，应用电脑对录像视频 0.1 倍慢放，对正碰撞的种子进行分析，与高度尺对比测得种子弹起后最高点与测定部件上平面的距离 H_2 。根据碰撞恢复因数公式可计算出大豆种子与 3 个物体的碰撞恢复系数。

分别测量 50 次大豆种子与排种盘、搅种轮和有机玻璃正碰撞时弹起高度，求平均值后代入碰撞恢复因数公式计算得到：大豆种子与排种盘、搅种轮、有

机玻璃碰撞恢复系数分别为 0.561、0.518、0.472。

3 离散元仿真参数标定

3.1 离散元参数设置

离散元仿真软件为 EDEM 2.7，仿真计算时颗粒与颗粒、颗粒与几何体接触模型都选用 Hertz-Mindlin (no slip) built-in 接触模型。仿真设置排种盘材料为钢，搅种轮材料为塑料，排种器前壳体材料为有机玻璃。本研究未测定的仿真参数参照已有研究测得的结果^[17-19] (表 1)。

表 1 大豆种子与排种器的离散元仿真参数

Table 1 Discrete element simulation parameters of soybean seed and seed metering device

材料 Material	参数 Parameter	数值 Value	材料 Material	参数 Parameter	数值 Value
大豆种子 Soybean seed	泊松比	0.23	大豆种子-大豆种子 Soybean seed- soybean seed	碰撞恢复系数	0.30
	剪切模量/MPa	63		最大静摩擦因数	0.39
钢 Steel	泊松比	0.30		动摩擦系数	0.17
	剪切模量/MPa	70 000	大豆种子-钢 Soybean seed-steel	动摩擦系数	0.09
	密度/(kg/m ³)	7 800		大豆种子-塑料 Soybean seed-plastic	动摩擦系数
有机玻璃 Plexiglass	泊松比	0.50	大豆种子-有机玻璃 Soybean seed-plexiglass	动摩擦系数	0.10
	剪切模量/MPa	35			
	密度/(kg/m ³)	1 180			

测定的离散元仿真参数包括大豆种子三轴尺寸、密度、最大静摩擦因数(大豆种子与排种盘 μ_1 、大豆种子与搅种轮 μ_2 、大豆种子与有机玻璃 μ_3)、碰撞恢复系数(大豆种子与排种盘 e_1 、大豆种子与搅种轮 e_2 、大豆种子与有机玻璃 e_3)。为

减少试验次数，应用 $L_9(3^4)$ 正交表做离散元正交试验仿真标定，对 4 组参数的 3 种水平分别设置为每个参数测定值减小 5%、参数测定值和每个参数测定值增加 5%，正交仿真试验因素和水平见表 2。

表 2 离散元仿真参数的因素与水平

Table 2 Factors and levels of parameters of discrete element simulation

水平 Level	密度/ (kg/m ³) Density	三轴尺寸/mm Three axis dimension			最大静摩擦因数 The maximum static friction coefficient			碰撞恢复系数 The collision recovery coefficient		
		l	w	h	μ_1	μ_2	μ_3	e_1	e_2	e_3
1	1 150.990	6.54	6.491	5.977	0.449	0.408	0.474	0.533	0.492	0.449
2	1 211.570	6.884	6.833	6.292	0.472	0.429	0.499	0.561	0.518	0.472
3	1 272.150	7.228	7.175	6.607	0.496	0.450	0.524	0.589	0.544	0.496

注： l 、 w 、 h 分别为大豆种子的长、宽、高； μ_1 、 μ_2 、 μ_3 分别为大豆种子与排种盘、搅种轮、有机玻璃静的最大静摩擦因数； e_1 、 e_2 、 e_3 分别为大豆种子与排种盘、搅种轮、有机玻璃静的碰撞恢复系数。下表同。

Note: l , w and h respectively for the length, width and height of three axis of soybean seeds; μ_1 , μ_2 and μ_3 respectively for the maximum static friction coefficients of soybean seed and seed plate, seed wheel and plexiglass; e_1 , e_2 and e_3 respectively for the recovery coefficient of soybean seed and seed plate, seed wheel and plexiglass. The same as in the following table.

离散元软件中大豆种子模型的三轴尺寸根据各试验号的尺寸参数设置,离散元仿真计算的大豆种子模型由4个球面组成,见图4。

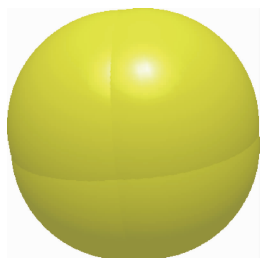


图4 大豆种子离散元模型

Fig. 4 Model of discrete element simulation of soybean seed

3.2 自然休止角离散元仿真标定

应用离散元软件模拟 FT-104B 型休止角测定仪测定过程。几何体为圆形塑料容器;颗粒工厂最下边与漏斗出口平行,模拟种子从漏斗落入容器内产生自然休止角的过程。休止角测定与试验测定的方法相同,通过离散元软件后处理部分得到顶端种子距离容器下平面的距离,应用 GB/T 11986—1989《表面活性剂 粉体和颗粒休止角的测量》标准中的公式计算得到休止角,自然休止角离散元仿真结果见图5。

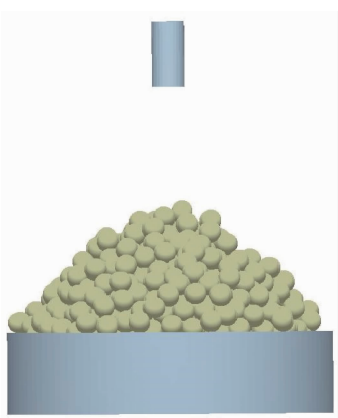


图5 自然休止角离散元仿真结果

Fig. 5 Simulation results of discrete element of natural repose angle

3.3 最大静摩擦因数离散元仿真标定

建立一个厚度为 2 mm 的平板,做 3 组离散元仿真,平板材料分别为钢、塑料和有机玻璃。种群颗粒由 9 个圆球组成,圆球的直径为每个试验号大豆种子的宽度。3 个颗粒工厂下平面与平板上平面重

合,仿真时间 0.2 s 内,每个颗粒工厂静态生成 1 粒种子群颗粒。从 0.5 s 开始,平板以 0.017 45 rad/s 的速度定轴转动,旋转到一定角度时,种子群颗粒产生滑动,通过后处理部分得到种子群滑动时平板的角度,每组试验计算 3 个种子群颗粒开始滑动角度的平均值。离散元仿真标定最大静摩擦因数时,种子群滑动过程见图6。

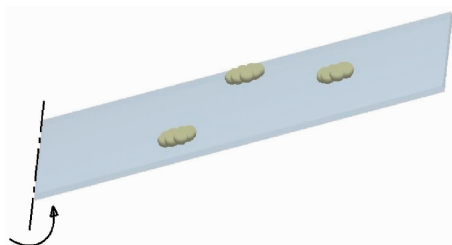


图6 种子群滑动过程的离散元仿真

Fig. 6 Discrete element simulation of population sliding process

3.4 碰撞恢复系数离散元仿真标定

离散元仿真的底板参数设置和仿真次数与 3.3 节相同。大豆种子颗粒参数设置根据各试验号的三轴尺寸参数设置,颗粒工厂的下平面与平板上平面距离为 500 mm,大豆种子颗粒由颗粒工厂生成后自由下落与底板碰撞,碰撞后颗粒弹起一定高度。应用离散元软件后处理部分,得到颗粒弹起最高点与底板上平面的距离,每组试验计算 10 个颗粒弹起高度的平均值,计算得到碰撞恢复系数。离散元仿真标定碰撞恢复系数时,大豆种子与底板碰撞过程见图7。



图7 种子与底板碰撞过程的离散元仿真

Fig. 7 Discrete element simulation of the seed and the bottom plate collision process

3.5 仿真结果与分析

离散元正交试验仿真结果见表3。误差为 $\frac{|a-b|}{b}$, 式中, a 为仿真结果, b 为该仿真结果对应的测定值, 误差平均值为7项仿真结果误差的平均值。

根据离散元正交试验仿真标定结果, 6号试验

的仿真误差平均值最小为2.044%。根据 $L_9(3^4)$ 正交表的试验设计, 6号试验的参数设置分别为: 大豆种子长、宽、高三轴尺寸分别为6.884、6.833、6.292 mm, 密度为1272.15 kg/m³, 大豆种子与排种盘、搅种轮和有机玻璃最大静摩擦因数分别为0.449、0.408、0.474, 碰撞恢复系数分别为0.561、0.518、0.472。

表3 离散元仿真标定的结果

Table 3 Results of discrete element simulation calibration

试验编号 Test number	休止角/(°) Repose angle	最大静摩擦因数 The maximum static friction coefficient			碰撞恢复系数 The collision recovery coefficient			误差平均值/% Mean value of error
		μ_1	μ_2	μ_3	e_1	e_2	e_3	
		1	30.766	0.471	0.423	0.521	0.533	
2	29.905	0.501	0.455	0.530	0.563	0.519	0.480	3.444
3	31.341	0.530	0.473	0.566	0.591	0.538	0.506	8.728
4	30.144	0.500	0.447	0.535	0.596	0.550	0.506	5.906
5	32.376	0.525	0.473	0.562	0.534	0.493	0.452	8.603
6	31.631	0.471	0.423	0.504	0.566	0.521	0.476	2.044
7	29.131	0.530	0.471	0.576	0.560	0.518	0.475	5.603
8	31.832	0.472	0.423	0.503	0.590	0.544	0.499	4.106
9	33.070	0.501	0.448	0.529	0.536	0.495	0.452	6.282
测定值	28.880	0.472	0.429	0.499	0.561	0.518	0.472	—

4 结论

1) 本研究测定大豆种子本征物理参数、大豆种子与排种器接触物理参数的结果为: 大豆种子自然休止角28.88°, 千粒重185.37 g, 密度1211.57 kg/m³; 大豆种子与排种盘、搅种轮和排种器壳体最大静摩擦因数分别为0.472、0.429、0.499, 碰撞恢复系数分别为0.561、0.518、0.472。

2) 对大豆种子三轴尺寸、密度、最大静摩擦因数(大豆种子与排种盘、搅种轮、有机玻璃静)、碰撞恢复系数(大豆种子与排种盘、搅种轮、有机玻璃)进行了离散元正交试验仿真标定, 误差较小的参数设置为: 大豆种子长、宽、高三轴尺寸分别为6.884、6.833、6.292 mm, 密度为1272.15 kg/m³, 大豆种子与排种盘、搅种轮和有机玻璃的最大静摩擦因数分别为0.449、0.408、0.474, 碰撞恢复系数分别为0.561、0.518、0.472。

参考文献 References

- [1] 陈晨, 赵满全, 张涛, 吕冰, 刘飞. 基于离散元的排种器振动对大粒径作物种群的影响[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 214-218
Chen C, Zhao M Q, Zhang T, Lv B, Liu F. Based on the discrete element method of gas suction seed metering device vibration on the influence of the large size crop species: Soybeans[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(11): 214-218 (in Chinese)
- [2] 马征, 李耀明, 徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 22-29
Ma Z, Li Y M, Xu L Z. Summarize of particle movement research in agricultural engineering realm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 22-29 (in Chinese)
- [3] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 余佳佳, 曹秀英. 基于EDEM的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114
Liao Q X, Zhang P L, Liao Y T, Yu J J, Cao X Y. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. *Transactions of the*

- Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 109-114 (in Chinese)
- [4] 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
Liu F Y, Zhang J, Li B, Chen J. 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* 2016, 32(12): 247-253 (in Chinese)
- [5] 韩燕龙,贾富国,唐玉荣,刘扬,张强. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 173-179
Han Y L, Jia F G, Tang Y R, Liu Y, Zhang Q. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(17): 173-179 (in Chinese)
- [6] 崔涛,刘佳,杨丽,张东兴,张瑞,蓝薇. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34-41
Cui T, Liu J, Yang L, Zhang D X, Zhang R, Lan W. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15): 34-41 (in Chinese)
- [7] GB/T 11986—1989 表面活性剂粉体和颗粒休止角的测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990
GB/T 11986—1989 Surface active agents-powders and granules-measurement of the angle of repose[S]. Beijing: China Standard Press, 1990 (in Chinese)
- [8] 杨作梅,郭玉明,崔清亮,李红波. 谷子摩擦特性试验及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 258-264
Yang Z M, Guo Y M, Cui Q L, Li H B. Test and influence factors analysis of friction characteristics of millet[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(16): 258-264 (in Chinese)
- [9] 刘哲良,张旭东,张旭,邱立春. 垂直圆盘气吸式排种器攫取种子过程分析[J]. 农机化研究, 2012, 34(7): 70-72, 77
Liu Z L, Zhang X D, Zhang X, Qiu L C. Analysis process of grabbing corn seed of vertical disc air-suction metering device[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(7): 70-72, 77 (in Chinese)
- [10] 杨磊,宋欣,李艳聪,单慧勇. 苹果表面摩擦系数的试验研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(12): 220-221, 224
Yang L, Song X, Li Y C, Shan H Y. Test study on the apple friction coefficient[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(12): 220-221, 224 (in Chinese)
- [11] 牟光辉,郭锦山,朱旭,周志权. 林木种子静摩擦系数的实验研究[J]. 东北林业大学学报, 1994, 22(2): 37, 40
Mou G H, Guo J S, Zhu X, Zhou Z Q. Study on experiment of static friction coefficient of forest trees seeds[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1994, 22(2): 37, 40 (in Chinese)
- [12] 黄小毛,查显涛,潘海兵,宗望远,陈辉. 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, 30(24): 22-29
Huang X M, Zha X T, Pan H B, Zong W Y, Chen H. Measurement and analysis of rapeseeds' restitution coefficient in point-to-plate collision model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 22-29 (in Chinese)
- [13] 王成军,李耀明,马履中,马征. 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 C J, Li Y M, Ma L Z, Ma Z. Experimental study on measurement of restitution coefficient of wheat seeds in collision models[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 274-278 (in Chinese)
- [14] 陆永光,吴努,王冰,于昭洋,林德志,胡志超. 花生荚果碰撞模型中恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(8): 111-118
Lu Y G, Wu N, Wang B, Yu Z Y, Lin D Z, Hu Z C. Measurement and analysis of peanuts' restitution coefficient in point-to-plate collision mode[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(8): 111-118 (in Chinese)
- [15] Mangwandi C, Cheong Y S, Adams M J, Hounslow M J, Salman A D. The coefficient of restitution of different representative types of granules[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(1-2): 437-450
- [16] Imre B, Rábsamen S, Springman S M. A coefficient of restitution of rock materials[J]. *Computers and Geosciences*, 2008, 34(4): 339-350
- [17] 刘月琴,赵满全,刘飞,杨铁军,张涛,李凤丽. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 65-72
Liu Y Q, Zhao M Q, Liu F, Yang T J, Zhang T, Li F L. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 65-72 (in Chinese)
- [18] 张涛,刘飞,刘月琴,赵满全,张思,李娜,李凤丽,吕冰. 离散元模拟外槽轮排肥器排量分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(9): 198-201
Zhang T, Liu F, Liu Y Q, Zhao M Q, Zhang S, Li N, Li F L, Lv B. Discrete element simulation of outer groove wheel type fertilizer discharging device capacity analysis[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(9): 198-201 (in Chinese)
- [19] 王福林,尚家杰,刘宏新,郭丽峰. EDEM颗粒体仿真技术在排种机构研究上的应用[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(2): 110-114
Wang F L, Shang J J, Liu H X, Guo L F. Application of EDEM particles simulation technology on seed-metering device research[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(2): 110-114 (in Chinese)