

陈林涛,薛俊祥,牟向伟,等. 基于离散元的木薯种茎仿真参数标定方法研究[J]. 江苏农业科学,2023,51(4):198-205.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.04.029

# 基于离散元的木薯种茎仿真参数标定方法研究

陈林涛<sup>1,3</sup>, 薛俊祥<sup>1</sup>, 牟向伟<sup>1</sup>, 马 旭<sup>2,3</sup>, 刘文杰<sup>1</sup>, 刘雨飞<sup>1</sup>, 向金山<sup>1</sup>

(1. 广西师范大学职业技术师范学院, 广西桂林 541004; 2. 华南农业大学工程学院, 广东广州 510642;

3. 广东省水稻移栽机械装备工程技术研究中心, 广东广州 510642)

**摘要:**针对木薯机械化种植过程中切种与播种等环节离散元仿真研究缺乏准确模型等问题,以桂热 4 号木薯为研究对象,利用试验及离散元模拟结合的方法对木薯种茎离散元仿真参数进行标定。先测定种茎基本物理参数,应用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型开展颗粒堆积虚拟试验,并结合圆筒提升法进行种茎堆积物理试验。通过 2 水平因子试验、最陡爬坡试验以及响应面分析确定种茎基本接触参数。在此基础上,应用 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型开展种茎切断仿真试验,通过响应面分析颗粒切断离散元仿真参数。为验证标定参数准确性,通过侧壁坍塌试验进行参数验证,发现休止角的相对误差均小于 2%,相对误差平均值为 0.69%。研究结果表明,标定方法正确、仿真参数准确。

**关键词:**木薯种茎;离散元法;种茎切断;堆积角;仿真参数;标定

**中图分类号:**S223.2<sup>+</sup>6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)04-0198-08

研制木薯精密播种机需对切种、供种以及投种等多道工序进行结构设计优化<sup>[1-2]</sup>。现有木薯播种机采用预切种方式进行作业,利用切种机将种秆提前切成形状简单、长度约 150 mm 的种茎,由排种机构将种茎排至种沟<sup>[3-4]</sup>。众多研究表明,离散元法可应用于农业散体物料与机械装备相互作用的仿真分析<sup>[5-7]</sup>。应用离散元法研究木薯种茎离散元模型仿真参数,可加快木薯排种器研制周期,并改善其作业性能<sup>[8-10]</sup>。离散元模型仿真参数可分为材料本征参数和接触力学参数。材料本征参数大多可以通过标准化试验进行测定,但接触力学参数往往为微观参数,无法通过实测直接得到。因此,需对仿真参数进行重新标定<sup>[11-15]</sup>。

国内外学者在种子颗粒标定方面的研究主要集中在水稻、三七等植物上<sup>[14-15]</sup>,对木薯种茎离散元参数标定研究鲜有报道。但对于类似作物秸秆的离散元仿真开展过一系列研究。王宪良等对秸秆模型堆积角、恢复系数等参数进行了标定<sup>[16]</sup>。王

云霞等通过在两段秸秆之间添加连接点的方法,建立了一种弹性离散元秸秆模型,模型赋予连接点弹性阻尼,使其可承受扭矩和弯力<sup>[17]</sup>。鹿芳媛等分别对番茄藤、茄子藤等藤茎类秸秆进行离散元模拟,分析不同参数刀具切割受力情况<sup>[18]</sup>。木薯种茎为一定长度的圆柱状木质茎秆,且茎秆表面具有凸起,相比于水稻、三七以及番茄藤等作物在质量和形态方面均具有较大差异,目前研究较少且无类似作物作仿真参数的参考,难以开展木薯机械化装备的离散仿真研究。

针对木薯机械化种植过程中切种与播种等环节离散元仿真缺乏准确模型等问题,笔者以桂热 4 号木薯为研究对象,通过离散元软件,采用 Hertz - Mindlin 基本模型,结合堆积角测试物理试验,以及筛选显著性因素和响应曲面试验,确定碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数等基本接触参数;采用 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型,利用种茎弯曲破坏试验和响应曲面确定法向与切向接触刚度、法向与切向应力等黏结参数<sup>[19-23]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 木薯种茎基本物理参数测定

1.1.1 基本参数测定 选用桂热 4 号(广西壮族自治区亚热带作物研究所提供),随机选取 100 颗种茎(平均含水率为 68.46%,百颗质量 5 987.83 g)进

收稿日期:2022-03-24

基金项目:广西自然科学基金(编号:2018GXNSFAA050026)。

作者简介:陈林涛(1993—),男,云南玉溪人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事现代农业技术与智能装备的研究。E-mail: clt13424050147@163.com。

通信作者:牟向伟,博士,副教授,硕士生导师,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究。E-mail:1574287180@qq.com。

行直径测量统计。经统计,种茎直径在 29 ~ 31 mm 间占比为 59 颗(图 1)。仿真取种茎平均直径为 30 mm。通过体积和质量测出种茎的平均密度为  $720 \text{ kg/m}^3$ 。种茎泊松比为 0.42, 径向剪切模量 17.60 MPa, 径向弹性模量 50.01 MPa, 平均径向压缩强度 1.43 MPa、平均径向剪切强度为 2.53 MPa<sup>[24]</sup>。

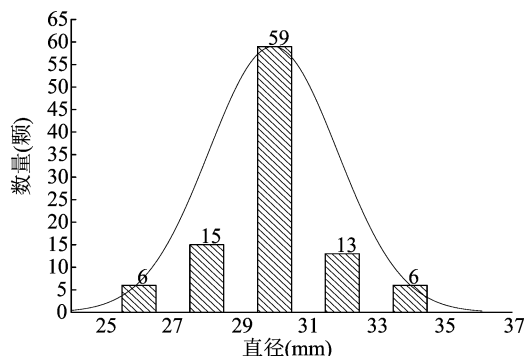


图1 木薯种茎直径尺寸分布

**1.1.2 堆积角测定** 木薯种茎堆积角通过圆筒提升法试验进行测定<sup>[25]</sup>。将木薯种茎预先切制成长度为 150 mm 的试件。将钢质无底圆筒(内径 400 mm × 高 600 mm)固定在万能试验机上,将圆筒以 50 mm/s 速度向上提升,使木薯种茎形成颗粒堆。测定试验设为 10 次,记录试验结果并取其均值,试验现场见图 2。



图2 木薯种茎堆积试验

为减小测量的人为误差,通过图像处理技术提取并测量试验结果。将 10 组照片导入 MATLAB 进行数据处理(图 3),计算木薯种茎堆积角,堆积角( $\theta_0$ )平均值为  $27.7^\circ$ 。

**1.1.3 切断破坏试验** 通过万能试验机进行种茎切断破坏试验,观察切断过程测定切刀所受阻力(图 4)。将木薯种茎试样分别固定在夹具上,对切刀进行加载,使其垂直向下运动切断种茎。计算剪切强度,试验重复 10 次。切刀材料为 Q235 钢(泊

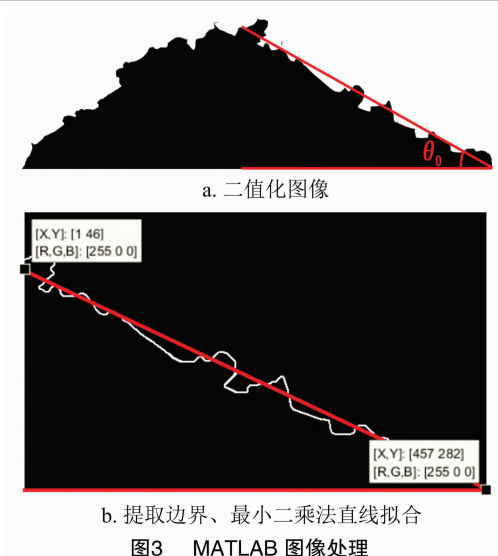


图3 MATLAB 图像处理

松比 0.28, 剪切模量  $8.20 \times 10^4 \text{ MPa}$ ), 切刀运行速度为 1 mm/s。剪切强度如下<sup>[26]</sup>:

$$\tau = \frac{F_{\max}}{2A} \quad (1)$$

式中: $\tau$  为剪切强度, MPa;  $F_{\max}$  为最大切断力, N;  $A$  为横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

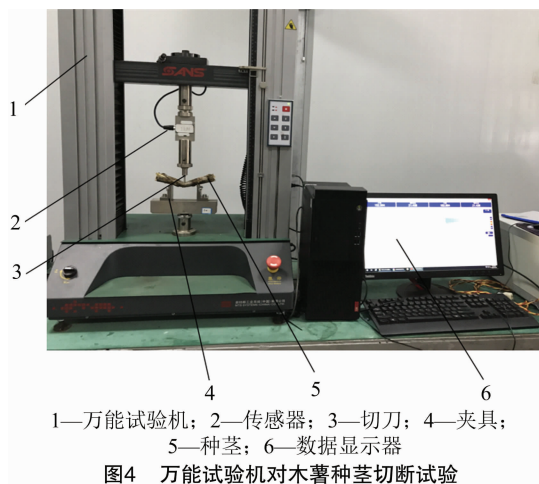


图4 万能试验机对木薯种茎切断试验

通过种茎切断试验发现,切断过程中切刀受力-位移变化见图 5, 可知当刀具接触到种茎为位移零点时,随着切刀不断下压,切力受力逐渐增大;直到木薯种茎切断的临界点,切刀受力达到最大值,种茎此时被切断,切刀受力急速下降。

经过试验得出 10 组最大切断力,代入公式(1),得出 10 组不同直径下木薯种茎相对应的剪切强度值(表 1)。得出剪切强度平均值为 0.19 MPa, 反求出当木薯种茎的直径为 30 mm 时最大切断力为 268.47 N。

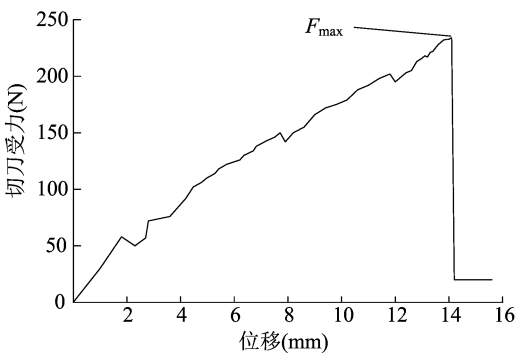


图5 木薯种茎切断试验切刀受力过程

表 1 木薯种茎试样的剪切强度值

序号	直径 (mm)	最大切断力 (N)	截面 (mm <sup>2</sup> )	剪切强度 (MPa)
1	27.9	249.3	611.05	0.20
2	35.4	298.1	983.73	0.15
3	27.2	244.6	580.77	0.21
4	25.1	235.3	494.56	0.24
5	32.2	280.5	813.92	0.17
6	29.1	259.9	664.75	0.20
7	37.3	320.7	1 092.16	0.15
8	28.6	254.7	642.10	0.20
9	26.7	239.5	559.62	0.21
10	29.9	263.4	701.80	0.19
均值	29.9			0.19

1.2 仿真模型的建立

1.2.1 接触模型选取 由于种茎颗粒表面没有黏附力,故颗粒与部件之间接触模型选择无滑动接触模型。

1.2.2 堆积角仿真模型 为真实模拟出种茎特性,采用多球聚合模型法建立木薯种茎的颗粒离散元模型<sup>[27-29]</sup>,用 60 个大小相异球体组合成种茎颗粒,木薯种茎主秆模型由 25 个大小相同的球体组成,木薯种茎主秆上的突起由 35 个大小不同的球体颗粒组成,Particles 模块创建,建立的颗粒模型见图 6。

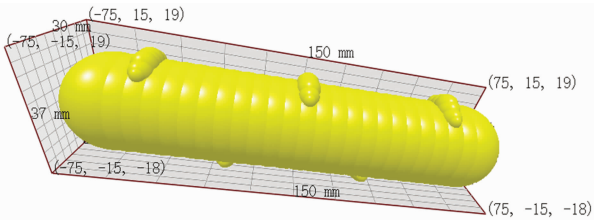


图6 木薯种茎颗粒模型

参考相关藤类农业颗粒物料的离散元仿真参数<sup>[30-33]</sup>,得出与本研究相关参数见表 2。在 EDEM

中建立颗粒工厂,采用动态生成种茎颗粒总量 250 颗。设定颗粒以 1 000 mm/s 初始速度下落,向上提升圆筒的速度设为 50 mm/s,最终形成姿态稳定的颗粒堆(图 7)。

表 2 木薯种茎颗粒堆积角仿真模型参数

仿真模型参数	数值
木薯种茎泊松比( $u_1$ )	0.42 <sup>a</sup>
木薯种茎剪切模量( $G_1$ , Pa)	$1.76 \times 10^7$ <sup>a</sup>
木薯种茎间碰撞恢复系数( $x_1$ )	0.1~0.7 <sup>c</sup>
木薯种茎间静摩擦系数( $x_2$ )	0.2~0.8 <sup>c</sup>
木薯种茎间滚动摩擦系数( $x_3$ )	0.02~0.08 <sup>c</sup>
木薯种茎-钢碰撞恢复系数( $x_4$ )	0.1~0.7 <sup>c</sup>
木薯种茎-钢静摩擦系数( $x_5$ )	0.1~0.7 <sup>c</sup>
木薯种茎-钢滚动摩擦系数( $x_6$ )	0.02~0.08 <sup>c</sup>

注:上标 a 表示该数据由试验测定,c 表示该试验变量,取值为该变量的上下极限数值。

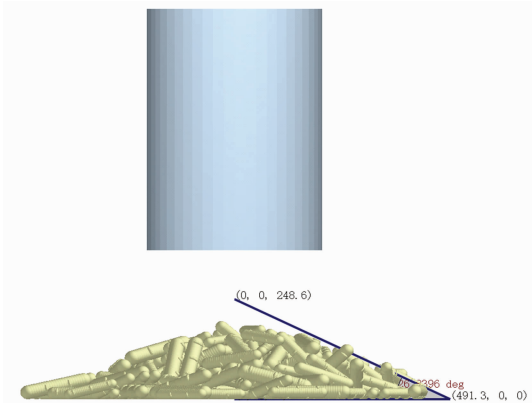


图7 木薯种茎颗粒堆积角仿真模型

1.2.3 切断破坏仿真模型 由于 Hertz - Mindlin 整体颗粒模型难以适用于木薯切断模拟仿真。因此,本研究在 Hertz - Mindlin 模型基础上,选用 Hertz - Mindlin with bonding 模型,利用 EDEM 快速填充 API 进行颗粒排列填充(图 8),导出网格文件.msh。

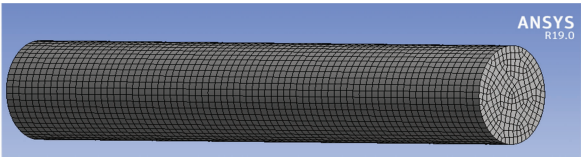
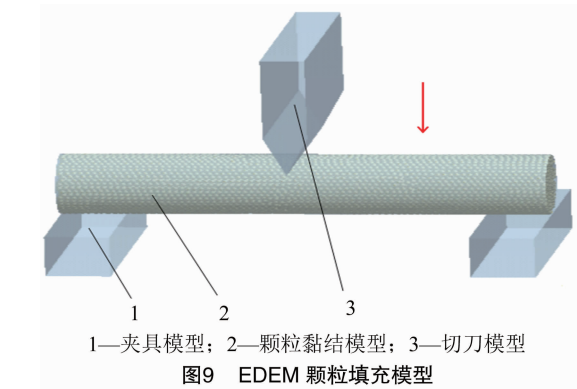


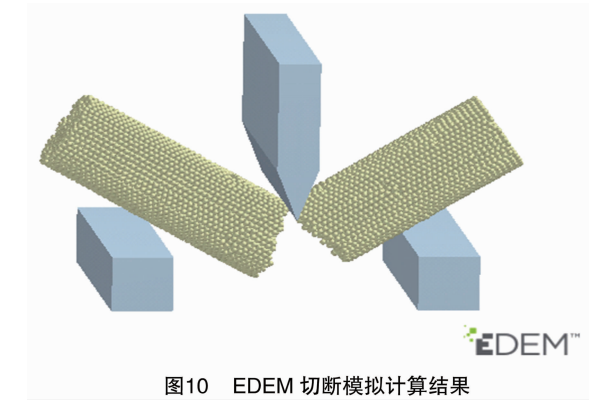
图8 木薯种茎有限元网格划分示意

接着导入颗粒工厂模板,将准备好的颗粒工厂模板 API 放到 EDEM 颗粒工厂导入路径,将前面导出的 point.txt 里的网格坐标数据复制并替换到颗粒工厂模板文件下的 Block\_Factory\_Data.txt 中。将颗粒材料参数、几何体材料参数、接触参数以及颗粒

模型设置完成,导入使用 UG 建立好并导出的剪切模型,在 Geometries 下拉菜单的 Plugin Factories 下添加自定义颗粒工厂,选择准备好的 API 文件,设置完毕进入计算页面,设置好参数,颗粒会在 0.01 s 填充完成(图 9)。



最后如图 10 所示为种茎离散元颗粒模型,模型由 15 000 个半径 1 mm 颗粒等间距黏结而成。随后删除圆柱体实体模型,将黏结颗粒漏出,设置刀具运动参数,运动速度设置 1 mm/s。



黏结参数参考藤茎类仿真参数,取值范围见表 3。

表 3 仿真参数

参数	数值
法向接触刚度 $x_7$ ( $\times 10^{10}$ N/m )	1 ~ 2.5
切向接触刚度 $x_8$ ( $\times 10^{10}$ N/m )	1 ~ 2
临界法向应力 $x_9$ ( $\times 10^7$ Pa )	2 ~ 6
临界切向应力 $x_{10}$ ( $\times 10^7$ Pa )	2 ~ 6

1.3 种茎参数标定试验

1.3.1 针对堆积角仿真参数标定试验设计 (1) 设计二因子试验,筛选对茎秆颗粒堆积角影响显著的参数;(2)设计最陡爬坡试验;(3)设计基本接触参数响应曲面试验,并基于以上试验结果,根据

BBD 设计原理,进行堆积角仿真试验。

1.3.2 针对种茎剪切仿真参数标定试验设计 根据 CCD 设计原理,利用表 3 参数设计响应曲面试验,开展种茎切断破坏仿真分析,黏结参数设定见表 4。

表 4 黏结模型参数编码

编码	黏结模型参数			
	$x_7$ ( $\times 10^{10}$ N/m )	$x_8$ ( $\times 10^{10}$ N/m )	$x_9$ ( $\times 10^7$ Pa )	$x_{10}$ ( $\times 10^7$ Pa )
-1.546	0.59	0.727	0.907	0.907
-1	1.00	1.000	2.000	2.000
0	1.75	1.500	4.000	4.000
1	2.50	2.000	6.000	6.000
1.546	2.91	2.273	7.093	7.093

2 结果与分析

2.1 因子试验

以  $x_1 \sim x_6$  作为因素,开展因子试验,试验设计及结果见表 5。

表 5 试验设计与结果

序号	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	堆积角 ( $^{\circ}$ )
1	0.1	0.2	0.08	0.1	0.7	0.08	27.59
2	0.7	0.2	0.08	0.7	0.1	0.02	15.73
3	0.7	0.2	0.02	0.7	0.7	0.08	23.34
4	0.7	0.8	0.02	0.1	0.1	0.08	23.95
5	0.1	0.2	0.08	0.7	0.7	0.02	28.59
6	0.7	0.8	0.08	0.7	0.7	0.08	37.85
7	0.1	0.8	0.02	0.1	0.7	0.08	32.35
8	0.7	0.2	0.02	0.1	0.7	0.02	21.74
9	0.1	0.2	0.02	0.1	0.1	0.02	25.41
10	0.7	0.2	0.08	0.1	0.1	0.08	20.93
11	0.1	0.8	0.08	0.7	0.1	0.08	29.68
12	0.7	0.8	0.08	0.1	0.7	0.02	40.97
13	0.7	0.8	0.02	0.7	0.1	0.02	15.69
14	0.1	0.2	0.02	0.7	0.1	0.08	19.73
15	0.1	0.8	0.08	0.1	0.1	0.02	29.65
16	0.1	0.8	0.02	0.7	0.7	0.02	32.47

方差分析见表 6,种茎间静摩擦系数  $x_2$ 、种茎间滚动摩擦系数  $x_3$  和种茎与钢之间静摩擦系数  $x_5$  对堆积角的影响较为显著。

2.2 最陡爬坡试验

由于  $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_5$  这 3 个显著性参数对堆积角效应均是正值,因此设计参数值逐增。将堆积角数值

表 6 参数显著性分析

参数	效应	均方和	影响率 (%)	显著性排序
$x_1$	-3.16	39.91	5.09	4
$x_2$	7.44	221.64	28.29	2
$x_3$	4.54	82.40	10.52	3
$x_4$	-2.44	23.79	3.04	5
$x_5$	8.02	257.04	32.81	1
$x_6$	0.65	1.67	0.21	6

及相对误差进行记录,结果见表 7。随着 3 个选定的试验因素数值增大,堆积角数值也逐渐增大,其中相对误差呈先减后增的趋势,3 号试验中相对误差最小,所以后期试验的中心点将采用 3 号试验中的各参数值,2 号、4 号试验则作为低、高水平进行响应面试验。

表 7 试验设计与结果

序号	$x_2$	$x_3$	$x_5$	堆积角 (°)	相对误差 (%)
1	0.14	0.04	0.64	23.90	13.70
2	0.18	0.06	0.68	25.60	7.58
3	0.22	0.08	0.72	27.44	0.94
4	0.26	0.10	0.76	30.87	11.44
5	0.30	0.12	0.80	33.73	21.77

2.3 响应曲面试验

取种茎间静摩擦系数  $x_2$ 、种茎间滚动摩擦系数  $x_3$  和种茎与钢之间静摩擦系数  $x_5$  3 个基本接触参数,开展 3 因素 3 水平响应曲面试验,试验设计与结果见表 8。

进行拟合分析,模型显著( $P=0.000\ 7$ )且失拟项不显著,方程为

$$\theta = 251.88 - 113.27x_2 + 93.39x_3 - 616.08x_5 + 415.63x_2x_3 + 43.75x_2x_5 + 334.38x_3x_5 + 143.44x_2^2 - 2\ 157.50x_3^2 + 405.94x_5^2. \quad (2)$$

该方差分析结果见表 9,其中  $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_3^2$ 、 $x_5^2$  对堆积角影响都显著。

在已知  $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_5$  的情况下,利用响应曲面分析已生成的堆积角模型,得出颗粒堆积角,但在堆积角已知条件下, $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_5$  的具体参数是堆积角的等值面曲线(图 11),故采用软件将实际值与仿真值间相对误差作为响应值分析,方程为

表 8 试验设计与结果

序号	$x_2$	$x_3$	$x_5$	堆积角 (°)	相对误差 (%)
1	0.18	0.08	0.76	28.02	1.16
2	0.26	0.08	0.68	29.45	6.32
3	0.22	0.08	0.72	28.13	1.55
4	0.22	0.06	0.68	26.34	4.91
5	0.22	0.08	0.72	28.23	1.91
6	0.18	0.10	0.72	28.47	2.78
7	0.18	0.06	0.72	25.31	8.63
8	0.26	0.06	0.72	25.45	8.12
9	0.26	0.10	0.72	29.94	8.09
10	0.18	0.08	0.68	28.06	1.30
11	0.22	0.08	0.72	27.73	0.11
12	0.26	0.08	0.76	29.69	7.18
13	0.22	0.10	0.76	29.62	6.93
14	0.22	0.08	0.72	27.65	0.18
15	0.22	0.06	0.76	26.48	4.40
16	0.22	0.10	0.68	28.41	2.56
17	0.22	0.08	0.72	27.89	0.69

表 9 堆积角响应曲面二次全模型方差分析

方差来源	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
模型	9	3.26	16.04	0.000 7
$x_2$	1	2.73	13.42	0.008 0
$x_3$	1	20.67	101.75	<0.000 1
$x_5$	1	0.30	1.48	0.263 5
$x_2x_3$	1	0.44	2.18	0.183 6
$x_2x_5$	1	0.020	0.096	0.765 2
$x_3x_5$	1	0.29	1.41	0.274 0
$x_2^2$	1	0.22	1.09	0.330 9
$x_3^2$	1	3.14	15.43	0.005 7
$x_5^2$	1	1.78	8.74	0.021 2
残差	7	0.20		
失拟项	3	0.39	6.25	0.054 4
纯误差	4	0.062		
总和	16	3.26	16.04	0.000 7

$$\delta_{\theta} = 406.54 - 938.21x_2 - 2\ 879.15x_3 - 545.71x_5 + 1\ 818.75x_2x_3 + 156.25x_2x_5 + 1\ 525x_3x_5 + 1\ 658.44x_2^2 + 8\ 408.75x_3^2 + 280.31x_5^2. \quad (3)$$

二次多项式回归模型  $P$  值为 0.006,除了种茎间静摩擦系数  $x_2$ 、种茎与钢的静摩擦系数  $x_5$  的交互项以及种茎与钢之间的静摩擦系数  $x_5$  的平方项  $P$  值大于 0.05 之外,其他因素的显著性较好。

通过 DesignExpert 12.0 对式(3)求误差最小极



值点,得  $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_5$  为 0.20、0.09 和 0.68。将求解出的参数带入公式(2),拟合值  $\theta_c = 28.56^\circ$ ,与  $\theta_0 = 27.7^\circ$ 误差为 3.1%。建立堆积角模型开展仿真,种茎平均堆积角  $\theta_s = 27.29^\circ$ ,模拟结果与实际结果接近。

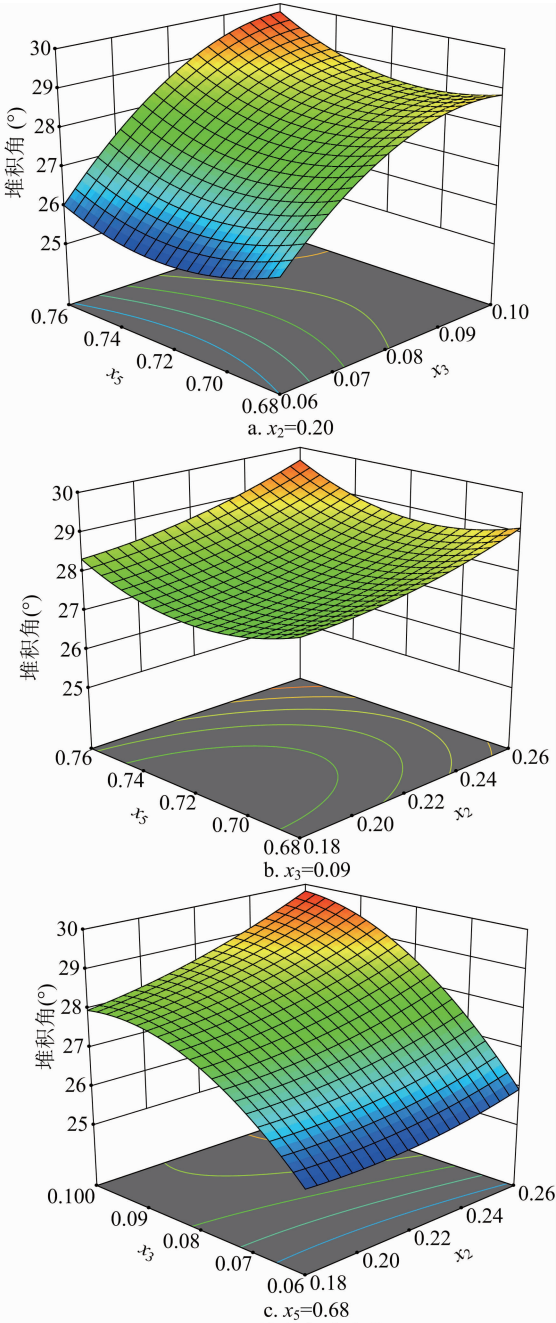


图11 堆积角响应曲面

2.4 黏结参数标定试验

利用法向接触刚度  $x_7$ 、切向接触刚度  $x_8$ 、临界法向应力  $x_9$ 、临界切向应力  $x_{10}$  等参数值,开展木薯种茎切断破坏仿真。试验设计及仿真结果见表 10。

对结果进行拟合分析。由方差分析(表11)可

表 10 试验设计与结果

序号	$x_7$ ( $1 \times 10^{10}$ N/m)	$x_8$ ( $1 \times 10^{10}$ N/m)	$x_9$ ( $1 \times 10^7$ Pa)	$x_{10}$ ( $1 \times 10^7$ Pa)	破坏力 $F$ (N)
1	2.50	1.00	6.00	6.00	202.2
2	1.75	1.50	4.00	7.09	213.6
3	1.75	1.50	7.09	4.00	213.8
4	2.91	1.50	4.00	4.00	231.2
5	1.00	1.00	2.00	2.00	158.7
6	1.75	1.50	0.96	4.00	212.4
7	1.00	1.00	2.00	6.00	159.4
8	1.75	1.50	4.00	4.00	212.7
9	1.00	1.00	6.00	6.00	159.5
10	1.00	2.00	6.00	2.00	202.2
11	1.00	1.00	6.00	2.00	159.1
12	1.00	2.00	2.00	2.00	201.8
13	1.00	2.00	2.00	6.00	202.4
14	1.75	1.50	4.00	0.91	212.1
15	2.50	1.00	2.00	2.00	201.3
16	2.50	1.00	6.00	2.00	201.6
17	1.75	1.50	4.00	4.00	213.5
18	2.50	2.00	6.00	2.00	268.7
19	1.75	1.50	4.00	4.00	214.2
20	2.50	2.00	6.00	6.00	269.3
21	1.75	0.73	4.00	4.00	173.6
22	1.75	2.27	4.00	4.00	260.3
23	1.00	2.00	6.00	6.00	202.5
24	2.50	1.00	2.00	6.00	201.9
25	0.59	1.50	4.00	4.00	139.8
26	2.50	2.00	2.00	2.00	268.3
27	2.50	2.00	2.00	6.00	268.9

知,二次全模型  $P$  值小于 0.01,且失拟项不显著;其中  $x_7$ 、 $x_8$  及其二者平方项、交互项有显著影响。

剔除不显著项,得到如下回归方程

$$F = 81.315 + 75.473x_7 - 10.140x_8 + 16.000x_7x_8 - 17.830x_7^2 + 12.470x_8^2. \tag{4}$$

之后通过响应值取破坏力与实测力之间的误差  $\Delta F$ ,进行方差分析,结果见表 12。

剔除  $x_9$ 、 $x_{10}$  优化调整后建立破坏力误差  $\Delta F$  与各显著性因素之间的二次多项式:

$$\Delta F = 186.084 - 75.142x_7 + 11.259x_8 - 15.505x_7x_8 + 17.576x_7^2 - 13.040x_8^2. \tag{5}$$

求最小值,得  $x_7 = 2.5$ ,  $x_8 = 2.0$ 。

将其带入公式(5)中得  $\Delta F = 0.912$  N,相对误差为 0.3%;同理,将其带入公式(4)中得  $F = 268.195$  N,这时的相对误差为 0.1%;对计算所得参

表 11 破坏力响应曲面二次全模型方差分析

方差来源	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
模型	14	2 417.26	421.45	<0.000 1
$x_7$	1	16 071.90	2 802.16	<0.000 1
$x_8$	1	15 879.53	2 768.62	<0.000 1
$x_9$	1	1.00	0.17	0.683 2
$x_{10}$	1	2.17	0.38	0.549 7
$x_7x_8$	1	576.00	100.43	<0.000 1
$x_7x_9$	1	0.01	$1.74 \times 10^{-3}$	0.967 4
$x_7x_{10}$	1	0.01	$1.74 \times 10^{-3}$	0.967 4
$x_8x_9$	1	$2.50 \times 10^{-3}$	$4.36 \times 10^{-4}$	0.983 7
$x_8x_{10}$	1	$2.50 \times 10^{-3}$	$4.36 \times 10^{-4}$	0.983 7
$x_9x_{10}$	1	0.02	$3.92 \times 10^{-3}$	0.951 1
$x_7^2$	1	1151.02	200.68	<0.000 1
$x_8^2$	1	111.31	19.41	0.000 9
$x_9^2$	1	26.07	4.54	0.054 4
$x_{10}^2$	1	22.58	3.94	0.070 6
残差	12	5.74		
失拟项	10	6.77	12.02	0.079 2
纯误差	2	0.56		
总和	26			

表 12 破坏力误差响应曲面二次全模型方差分析

方差来源	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
模型	14	2 390.28	472.120	<0.000 1
$x_7$	1	15 906.05	3 141.690	<0.000 1
$x_8$	1	15 715.76	3 104.100	<0.000 1
$x_9$	1	0.52	0.100	0.755 0
$x_{10}$	1	1.06	0.210	0.655 7
$x_7x_8$	1	540.91	106.840	<0.000 1
$x_7x_9$	1	0.05	$9.778 \times 10^{-3}$	0.922 9
$x_7x_{10}$	1	0.17	0.033	0.859 3
$x_8x_9$	1	0.07	0.013	0.910 8
$x_8x_{10}$	1	0.33	0.065	0.803 5
$x_9x_{10}$	1	0.05	0.011	0.919 4
$x_7^2$	1	1 118.74	220.970	<0.000 1
$x_8^2$	1	121.65	24.030	0.000 4
$x_9^2$	1	31.19	6.160	0.028 9
$x_{10}^2$	1	27.37	5.410	0.038 4
残差	12	5.06		
失拟项	10	5.80	4.260	0.205 1
纯误差	2	1.36		
总和	26			

数进行仿真,得到最终平均破坏力为 267.4 N,与实际试验破坏力之间的相对误差为 0.40%,表明标定方法可靠、参数正确。

3 验证试验

为验证标定参数的准确性,模型参数按表 13 进行设置。采用侧壁坍塌法(图 12-a)来模拟木薯种茎在种箱里的运动,物理试验和模拟试验各 10 次,记录休止角,将 10 次休止角进行对比。将实体模型、木薯种茎离散元模型和标定接触参数导入 EDEM 中进行仿真,仿真过程见图 12-b。每组试验重复 10 次,取平均值。

表 13 木薯种茎离散元仿真参数

参数	数值
$x_1$	0.40
$x_2$	0.20
$x_3$	0.09
$x_4$	0.40
$x_5$	0.68
$x_6$	0.05
$x_7(\times 10^{10} \text{ N/m})$	2.50
$x_8(\times 10^{10} \text{ N/m})$	2.00
$x_9(\times 10^7 \text{ Pa})$	4.00
$x_{10}(\times 10^7 \text{ Pa})$	4.00



对比各试验次数实测值和仿真值,可得 10 次休止角相对误差均小于 2%,10 次休止角相对误差平均值为 0.69%,表明标定方法正确、标定的参数准确。

## 4 结论

木薯种茎间碰撞恢复系数、木薯种茎与钢之间的碰撞恢复系数及木薯种茎与钢间的滚动摩擦系数对堆积角影响较小,其取值确定为 0.40、0.40 和 0.05;木薯种茎间静摩擦系数、木薯种茎间滚动摩擦系数、木薯种茎与钢间的静摩擦系数对堆积角的影响显著。木薯种茎间静摩擦系数为 0.20,木薯种茎间滚动摩擦系数为 0.09,木薯种茎与钢静摩擦系数为 0.68。通过方差分析得出临界法向应力和临界切向应力对木薯种茎切断破坏力影响较小,取值分别确定为 4.00 和 4.00;法向、切向接触刚度及其平方项、交互项有显著影响;法向接触刚度、切向接触刚度值分别为 2.50 和 2.00;通过确定的黏结参数开展 5 次仿真试验,与实测值相对误差为 0.40%。采用侧壁坍塌法模拟木薯种茎在种箱里运动,分别对比各试验次数的实测值和仿真值,10 次休止角相对误差的平均值为 0.69%,表明标定方法正确。本研究通过堆积角和弯曲破坏切断试验,确定了种茎切断离散元模型参数,为建立木薯种茎作物切断过程离散元仿真模型提供一种新方法,以期为精密播种器的研制提供技术参考。

## 参考文献:

- [1] 崔振德,邓干然,李 玲,等. 木薯垄作模式下起垄技术与设备研究进展[J]. 热带农业工程,2018,42(4):12-16.
- [2] 梁海波,魏云霞,黄 洁,等. 世界木薯生产对中国的启示[J]. 中国农学通报,2016,32(9):94-99.
- [3] 蒋 瑞,黄 晖,崔振德. 国内外木薯机械化种植技术的研究现状和发展动态[J]. 中国热带农业,2012(3):58-60.
- [4] 何冯光,邓干然,崔振德,等. 外槽轮式单段木薯种茎排种器设计与仿真试验[J]. 中国农机化学报,2020,41(4):6-12.
- [5] Lungkapin J, Salokhe V, Kalsirisilp R, et al. Development of a stem cutting unit for a cassava planter[J]. Agricultural Engineering International, 2007, 9(4):1-16.
- [6] 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.
- [7] 于建群,付 宏,李 红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报,2005,21(5):1-6.
- [8] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 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.
- [9] 崔振德,邓干然,李国杰,等. 木薯种植机切秆试验台的设计[J]. 江苏农业科学,2017,45(19):243-245.
- [10] 薛 忠. 木薯茎秆切割力学特性与仿真分析[D]. 武汉:华中农业大学,2018.
- [11] 向 伟,吴明亮,吕江南,等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(12):116-123.

- [12] 彭 飞,王红英,方 芳,等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2018,49(4):140-147.
- [13] 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(7):36-42.
- [14] 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.
- [15] Lenaerts B, Aertens T, Tijskens E, et al. Simulation of grain-straw separation by Discrete Element Modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101:24-33.
- [16] 王宪良,胡 红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报,2017,48(12):78-85.
- [17] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22):36-42.
- [18] 鹿芳媛,马 旭,谭穗妍,等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(2):93-99.
- [19] 廖宜涛,廖庆喜,周 宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(6):73-82.
- [20] 赖庆辉,于庆旭,苏 微,等. 三七超窄行气吸式精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):102-112.
- [21] 张 涛,刘 飞,赵满全,等. 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报,2018,23(4):120-127.
- [22] Lungkapin J, Salokhe V M, Kalsirisilp R, et al. Design and development of a cassava planter[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(2):393-399.
- [23] Leblicq T, Smeets B, Ramon H, et al. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123:80-88.
- [24] 郭 茜,张西良,徐云峰,等. 基于 EDEM 的番茄秸秆切割性能仿真及试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10):1017-1022.
- [25] 陈 实. 基于 ANSYS 的木薯茎秆有限元建模及其静力学仿真分析[D]. 海口:海南大学,2015.
- [26] 刘凡一,张 舰,李 博,等. 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.
- [27] 陈争光,王德福,李利桥,等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J]. 农业工程学报,2012,28(21):59-65.
- [28] 文愿运,刘马林,刘荣正,等. 颗粒离散单元法数值模拟与典型实验对比研究[J]. 中国粉体技术,2015,21(3):1-5.
- [29] 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,2014,63(17):165-171.
- [30] 于亚军,周海玲,付 宏,等. 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法[J]. 农业工程学报,2012,28(8):167-174.
- [31] 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.
- [32] 胡国明. 颗粒系统的离散元法分析仿真离散元法的工业应用与 EDEM 软件简介[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- [33] 曾智伟,马 旭,曹秀龙,等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报,2021,52(4):1-20.