

# 果荚初期饲料油菜茎秆离散元接触模型参数标定

廖宜涛<sup>1,2</sup> 王在腾<sup>1</sup> 廖庆喜<sup>1,2</sup> 万星宇<sup>1</sup> 周宇<sup>1</sup> 梁方<sup>1,2</sup>

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 针对饲料油菜与不同材料的接触参数实测难度大、机械化收获离散元仿真模拟缺乏接触模型参数的问题,以果荚初期饲料油菜为对象,基于 EDEM 开展了饲料油菜茎秆颗粒离散元接触模型参数标定。测定了果荚初期饲用油菜茎秆本征参数,茎秆平均直径为 20.4 mm,密度为 809 kg/m<sup>3</sup>,茎秆弹性模量、剪切模量和泊松比平均值分别为 115.73 MPa、47.04 MPa 和 0.23;以休止角为评价指标,应用 Hertz-Mindlin 基本模型和圆筒提升堆积法开展了饲料油菜茎秆颗粒堆积的虚拟二水平因子试验,结果表明饲料油菜茎秆与钢之间的碰撞恢复系数和滚动摩擦因数以及茎秆之间的碰撞恢复系数对休止角的影响较小,其值分别为 0.60、0.10 和 0.60;通过最陡爬坡试验和响应面分析,确定了饲料油菜茎秆颗粒间静摩擦因数、滚动摩擦因数和饲料油菜茎秆-钢静摩擦因数的取值范围,建立了颗粒休止角的回归模型,以实测休止角与仿真试验休止角之间相对误差最小进行响应面分析和优化求解,确定其参数值分别为 0.36、0.03 和 0.23。在接触参数最优组合条件下,根据回归模型计算得出的休止角理论值与实测值误差为 2.15%,仿真试验得出休止角模拟值与实测值误差为 1.83%,表明标定方法正确,标定参数准确。研究可为饲料油菜机械化收获过程的离散元仿真分析提供基本参数。

**关键词:** 饲料油菜; 离散元; 参数标定; 休止角; 果荚初期

**中图分类号:** S817.11      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0236-08

## Calibration of Discrete Element Model Parameters of Forage Rape Stalk at Early Pod Stage

LIAO Yitao<sup>1,2</sup> WANG Zaiteng<sup>1</sup> LIAO Qingxi<sup>1,2</sup> WAN Xingyu<sup>1</sup> ZHOU Yu<sup>1</sup> LIANG Fang<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Existing development using virtual simulation technology for the fodder rape crop harvest technology and machine lacks accurate model parameters, highlighting a need for the calibration. Taking the rape crop stalk at the early pod stage as the object, the parameters calibration was carried out by using EDEM software. The basic attribute of the stem, including the repose angle, were measured. The results indicated that the average stalk diameter was 20.4 mm, the density was 809 kg/m<sup>3</sup>, and the average elastic modulus, shear modulus and Poisson's ratio were 115.73 MPa, 47.04 MPa and 0.23, respectively. Furthermore, the Hertz-Mindlin contact mode was employed to conduct a cylindrical lifting simulation test, in which the contact mode used different parameter sets according to the test design rule of two-level factor test, steepest climbing test, and response surface analysis. The results showed that the recovery coefficient of the collision of particles of crop stem, the recovery coefficient of the collision between steel and particles of crop stem and the rolling friction coefficient between steel and particles of crop stem had slight effect on the angle of repose, whose values were determined as 0.60, 0.60 and 0.10, respectively. The static friction coefficient of particles of crop stem, the coefficient of rolling friction of particles of crop stem, and the static friction coefficient between steel and particles of crop stem were identified as 0.36, 0.03, and 0.23, respectively. The error rate of the value of repose angle between the simulated by using EDEM with the calibrated parameters and the real measured value was

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52075210)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662018JC005)、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)、农业农村部科研杰出人才与创新团队项目和湖北省自然科学基金项目(2018CFB343)

**作者简介:** 廖宜涛(1982—),男,副教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: liaoyitao@mail.hzau.edu.cn

1.83%。The research provided the basic parameters for the simulation of the fodder rape crop mechanized harvest.

**Key words:** fodder rape crop; discrete element; calibration of parameters; angle of repose; early pod stage

## 0 引言

随着我国畜牧业综合生产能力持续提升,畜产品结构不断优化,畜牧业已从传统零散的家庭副业经营模式向集约化和规模化饲养方向转变,成为了农业经济的重要支柱产业之一,但优质饲草短缺、饲料作物与粮食作物争地已成为限制我国畜牧业发展的重要原因<sup>[1-3]</sup>。油菜是我国长江中下游冬春季广泛种植的农作物之一,用作草食家畜饲料具有成本低、产量高、不与粮争地、解决青绿饲料短缺等优点<sup>[4]</sup>。研究表明利用青贮油菜饲喂牲畜,日增重率增加;对比青贮玉米,青贮油菜的饲料转化效率和净收益有显著优势,可有效降低饲养成本<sup>[5-6]</sup>。在果荚初期的油菜植株木质化程度不高,青贮发酵后作为草食家畜的粗饲料,其粗蛋白、粗脂肪等含量较高,适口性好,极具发展潜力<sup>[7-9]</sup>。

机械化收获是解决人工收获劳动强度大、效率低、成本高等产业发展现实问题的关键,但现有青贮收获机用于饲料油菜收获存在过度破碎物料导致营养流失、输送通道堵塞等问题,需要研制适用饲料油菜收获的机械。利用数值模拟对农业机械的作业过程开展可视化、参数化的仿真研究,可以提升新产品开发的效率,降低研究成本<sup>[10-14]</sup>。近年来,基于离散元法的虚拟仿真技术及专业软件 EDEM 在农业机械研究中得到广泛应用,在土壤工作部件、精量播种、收获机械等方面取得了一系列重要进展<sup>[15-19]</sup>。果荚初期油菜茎秆收获后用于青贮,切碎的茎秆物料是散粒体,可以用散粒体颗粒构建切碎物料的近似的几何模型,其中 EDEM 软件中的 Hertz - Mindlin 接触模型及 Hertz - Mindlin with Bonding 粘结接触模型应用相对广泛,可通过建立与实际接触表现等效的颗粒模型并添加粘结参数,模拟物料破坏过程<sup>[20-23]</sup>。

离散元仿真模型的参数准确性直接影响研究结果的可靠性<sup>[24]</sup>。模型参数主要包括材料本征参数和基本接触参数,本征参数包括物料密度、颗粒体几何尺寸、物料剪切模量和泊松比等,基本接触参数包括颗粒与不同材料之间的静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数等。饲料油菜是一种新型青饲料作物,相似物料较少,相关参数缺乏参考。本文以果荚初期饲料油菜茎秆为对象,进行基本特征参数测

试,基于 EDEM 软件及 Hertz - Mindlin 模型进行因素显著性试验、Steepest Ascent 试验和响应曲面试验等仿真试验,并结合饲料油菜茎秆休止角物理试验对果荚初期饲料油菜茎秆离散元基本接触参数进行等效标定,以期为进一步确定饲料油菜果荚初期的茎秆粘结参数、开展收获过程仿真研究提供基础参数。

## 1 本征参数测试

### 1.1 茎秆材料特征参数

茎秆材料特征参数主要包括三轴尺寸、密度、弹性模量、剪切模量和泊松比。试验对象为华中农业大学现代农业试验基地种植并可用于饲料的“华油杂 62”优质双低油菜<sup>[25]</sup>,种植方式为机械直播,播种量 5.25 kg/hm<sup>2</sup>,同步施复合肥 675 kg/hm<sup>2</sup>,平均生长密度约 465 000 株/hm<sup>2</sup>。油菜植株茎秆底部粗壮、顶部细弱,从离地 50 mm 开始每隔 100 mm 对果荚初期油菜主茎秆直径进行测量,统计分析得果荚初期饲料油菜茎秆平均直径为 20.4 mm,通过称量茎秆质量并计算其体积可换算得茎秆密度为 809 kg/m<sup>3</sup>。

制作长度为 20 mm、直径 20 mm 左右的果荚初期饲料油菜茎秆圆柱颗粒,利用质构仪(TMS - Pro 型,美国 FTC 公司)进行单轴平板压缩试验<sup>[23]</sup>,设置压缩速度为 5 mm/min、加载位移为 4 mm,通过高速摄像技术对比分析样品单轴压缩前后的高度和直径变化率,果荚初期饲料油菜茎秆弹性模量、剪切模量和泊松比计算式为

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1} = \frac{F_0 l_0}{S \Delta l} \quad (1)$$

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

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right| = \frac{\Delta d l_0}{\Delta l d_0} \quad (3)$$

式中  $E$ ——油菜茎秆弹性模量,MPa  
 $G$ ——油菜茎秆剪切模量,MPa  
 $\mu$ ——泊松比  
 $\sigma$ ——油菜茎秆所受应力,MPa  
 $F_0$ ——试验中承受的最大挤压力,N  
 $S$ ——油菜茎秆试验前横截面积,mm<sup>2</sup>  
 $l_0$ ——油菜茎秆试验前长度,mm  
 $d_0$ ——油菜茎秆试验前直径,mm  
 $\Delta l$ ——油菜茎秆试验后长度变化量,mm

$\Delta d$ ——油菜茎秆试验后直径变化量,mm

$\varepsilon_1$ ——纵向应变  $\varepsilon_2$ ——横向应变

试验重复 10 次,统计分析弹性模量、剪切模量和泊松比分别为 115.73 MPa、47.04 MPa 和 0.23,变异系数分别为 6.80%、6.02% 和 6.91%。

## 1.2 茎秆颗粒实际自然休止角

采用圆筒提升法获得饲料油菜茎秆堆,测量实际休止角<sup>[23,26]</sup>。测试样品为等质量比例下 4 种长度的预制颗粒样品混合物,预制颗粒样品长度为 30、40、50、60 mm,均在饲料油菜切碎长度需求范围内<sup>[23]</sup>;所用钢质圆筒内径与高度分别为 300、150 mm,试验前将圆筒放置于万能材料试验机平台并用测试样品填满,随后将圆筒匀速提升(提升速度设置为 0.05 m/s),使测试样品形成集堆(图 1)并测量颗粒堆休止角。试验重复 5 次,统计得休止角平均值为 27.93°,变异系数 2.49%。

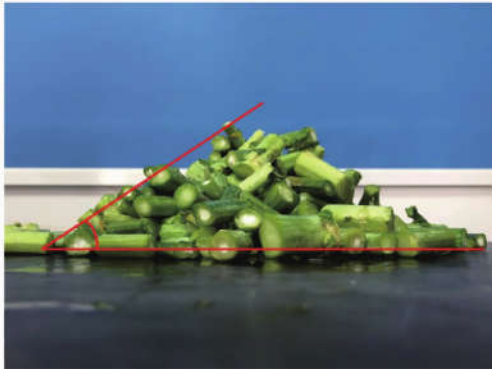


图 1 饲料油菜茎秆颗粒堆积试验

Fig.1 Test of angle of repose for fodder rape stalk particles

## 2 接触参数等效标定

### 2.1 标定方法

应用 Design-Expert 10.0.4 软件设计试验,在 EDEM 软件中开展饲料油菜茎秆颗粒的圆筒提升离散元仿真分析,通过参数筛选、优化求解,确定茎秆颗粒模型接触参数;应用标定参数开展圆筒提升仿真试验,对比分析休止角仿真试验模拟值和真实值之间的差异,验证标定饲料油菜茎秆颗粒离散元接触参数的准确性。

接触参数优化求解步骤为:①设计二因子试验,筛选对饲料油菜茎秆颗粒休止角影响显著的参数。②设计最陡爬坡试验,确定各显著性参数的取值范围。③设计响应曲面法试验,建立饲料油菜茎秆颗粒休止角与显著性参数回归模型,以仿真试验休止角与实测休止角相对误差最小进行优化求解,得到显著性参数最优值。

### 2.2 仿真模型及参数设置

饲料油菜茎秆颗粒堆积仿真试验使用 EDEM

软件中 Hertz-Mindlin 模型,可为后续添加粘结参数并模拟切碎过程奠定基础。为模拟还原果菜初期饲料油菜茎秆颗粒的实际堆积状态,采用圆形颗粒组合的方式<sup>[27]</sup>形成不同长度的颗粒模型(图 2),为简化模型并提高仿真效率,组成茎秆的球形单元直径设定为 20 mm。结合颗粒本征参数测定、离散元仿真农业物料和藤茎类物料与不同材料的接触参数<sup>[23-24,28]</sup>,确定了本研究各仿真参数的变化范围如表 1 所示。

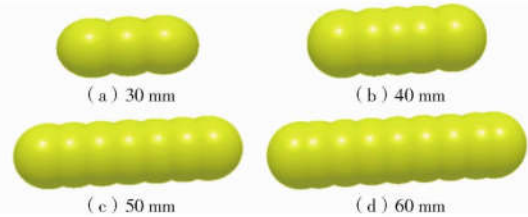


图 2 饲料油菜茎秆颗粒几何模型

Fig.2 Particle model of fodder rape stalk

表 1 茎秆颗粒休止角仿真模型参数

Tab.1 Parameters of angle of repose simulation model for fodder rape stalk particles

参数	数值
油菜茎秆泊松比 $\mu_1$	0.23 <sup>a</sup>
钢板泊松比 $\mu_2$	0.30 <sup>b</sup>
油菜茎秆剪切模量 $G_1$ /MPa	47.04 <sup>a</sup>
钢板剪切模量 $G_2$ /MPa	$7.94 \times 10^{4b}$
油菜茎秆密度 $\rho_1$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	809 <sup>a</sup>
钢板密度 $\rho_2$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$7.85 \times 10^{3b}$
油菜茎秆间碰撞恢复系数 $x_1$	0.3 ~ 0.9 <sup>c</sup>
油菜茎秆间静摩擦因数 $x_2$	0.5 ~ 0.9 <sup>c</sup>
油菜茎秆间滚动摩擦因数 $x_3$	0.05 ~ 0.15 <sup>c</sup>
油菜茎秆-钢碰撞恢复系数 $x_4$	0.3 ~ 0.9 <sup>c</sup>
油菜茎秆-钢静摩擦因数 $x_5$	0.5 ~ 0.9 <sup>c</sup>
油菜茎秆-钢滚动摩擦因数 $x_6$	0.05 ~ 0.15 <sup>c</sup>

注:a 表示该项为实测值,b 表示该项为文献参考值,c 表示该项为试验变量范围。

除茎秆颗粒模型外,模拟圆筒提升还需构建虚拟圆筒并模拟其提升过程。仿真前处理过程中,构建与实际圆筒尺寸相同的虚拟圆柱体并设置为颗粒工厂,茎秆颗粒采用动态生成,初始速度取 1 m/s,方向沿圆柱体中心轴向下,颗粒生成速度设置为 0.4 kg/s,生成时间设置为 4 s,总计生成茎秆颗粒 1.6 kg,颗粒稳定后圆柱体以 0.05 m/s 的速度沿中心轴向上匀速运动<sup>[23]</sup>,待圆筒完全移开后茎秆颗粒自然形成集堆(图 3)。

## 3 仿真试验结果与分析

### 3.1 因素显著性筛选试验

以影响茎秆颗粒休止角的茎秆与茎秆、茎秆与

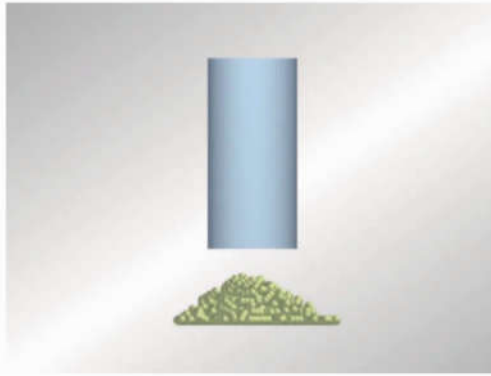


图 3 茎秆颗粒休止角仿真模型

Fig. 3 Angle of repose simulation model of stalk particles

钢之间的接触参数(表 1)为试验因素,以休止角模拟值为评价指标,开展二水平部分因子试验设计,试验设计及仿真结果如表 2 所示,显著性分析如表 3 所示。

表 2 二水平因子试验设计及结果

Tab. 2 Regular two-level factorial design and results

序号	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	休止角 $\theta/(^\circ)$
1	0.3	0.5	0.05	0.3	0.5	0.05	27.13
2	0.9	0.5	0.05	0.3	0.9	0.05	23.21
3	0.3	0.5	0.15	0.3	0.9	0.15	29.21
4	0.9	0.5	0.15	0.3	0.5	0.15	33.1
5	0.3	0.5	0.05	0.9	0.5	0.15	23.15
6	0.9	0.5	0.05	0.9	0.9	0.15	25.11
7	0.3	0.5	0.15	0.9	0.9	0.05	34.99
8	0.9	0.5	0.15	0.9	0.5	0.05	23.98
9	0.6	0.7	0.10	0.6	0.7	0.10	31.55
10	0.6	0.7	0.10	0.6	0.7	0.10	35.21
11	0.6	0.7	0.10	0.6	0.7	0.10	35.62
12	0.6	0.7	0.10	0.6	0.7	0.10	30.15
13	0.3	0.9	0.05	0.3	0.9	0.15	33.96
14	0.9	0.9	0.05	0.3	0.5	0.15	25.12
15	0.3	0.9	0.15	0.3	0.5	0.05	30.04
16	0.9	0.9	0.15	0.3	0.9	0.05	37.16

表 3 参数显著性分析

Tab. 3 Analysis of parameter significance

参数	效应	均方和	影响率	显著性排序
$x_1$	-0.94	1.32	0.275 6	4
$x_2$	1.63	3.92	0.073 3	3
$x_3$	2.28	7.70	0.018 1	2
$x_4$	-0.76	0.84	0.377 8	5
$x_5$	2.40	8.51	0.014 0	1
$x_6$	-0.074	$8.058 \times 10^{-3}$	0.930 1	6

由表 3 可知,饲料油菜茎秆间静摩擦因数  $x_2$ 、茎秆间滚动摩擦因数  $x_3$  和茎秆与钢之间的静摩擦因数  $x_5$  对休止角模拟值影响显著,在后续试验中可忽略非显著性因素休止角变化的影响,并取中间水平为标定值,即茎秆与钢之间的碰撞恢复系数和滚动

摩擦因数分别可取 0.60 和 0.10,茎秆间碰撞恢复系数可取 0.60。

### 3.2 最陡爬坡试验

由表 3 可知,茎秆间静摩擦因数  $x_2$ 、茎秆间滚动摩擦因数  $x_3$  和茎秆与钢之间的静摩擦因数  $x_5$  对休止角的效应均为正值,表明休止角模拟值将随以上参数的增加而增大,因此设定仿真试验参数值递增,观察并记录各仿真试验中休止角仿真试验值及其与实测值的相对误差,试验参数及结果如表 4 所示。由表 4 可知,休止角模拟值随着试验因素数值的增大而增大,休止角相对误差则呈先减后增的趋势,当  $x_2$ 、 $x_3$  和  $x_5$  分别取 0.38、0.025 和 0.25 时,休止角模拟值相对误差最小,故将以上因素水平取为响应面试验中心点,同时将 2 号和 4 号试验因素取值设定为响应面试验低水平和高水平。

表 4 最陡爬坡试验试验设计及结果

Tab. 4 Experimental results of the steepest ascent test

序号	$x_2$	$x_3$	$x_5$	休止角 $\theta/(^\circ)$	相对误差 $\delta/\%$
1	0.22	0.005	0.15	24.45	12.46
2	0.30	0.010	0.20	26.35	5.66
3	0.38	0.025	0.25	28.12	0.68
4	0.46	0.040	0.30	31.22	11.78
5	0.54	0.055	0.35	35.48	27.03

### 3.3 响应曲面试验

根据筛选试验结果,取饲料油菜茎秆间静摩擦因数  $x_2$ 、茎秆间滚动摩擦因数  $x_3$  和茎秆与钢之间的静摩擦因数  $x_5$  3 个基本接触参数,进行三因素三水平响应曲面试验设计,共进行 17 组参数组合的休止角仿真试验,其中中心水平设置了 5 组重复。试验设计及仿真结果如表 5 所示。

表 5 接触参数响应曲面试验设计及结果

Tab. 5 Response surface test design and results of basic contact parameters

序号	$x_2$	$x_3$	$x_5$	休止角 $\theta/(^\circ)$	相对误差 $\delta/\%$
1	0.38	0.010	0.20	25.80	7.63
2	0.30	0.010	0.25	24.77	11.31
3	0.46	0.010	0.25	25.21	9.74
4	0.38	0.010	0.30	26.31	5.80
5	0.30	0.025	0.20	28.42	1.75
6	0.46	0.025	0.20	30.04	7.55
7	0.38	0.025	0.25	27.79	0.50
8	0.38	0.025	0.25	28.10	0.61
9	0.38	0.025	0.25	28.13	0.72
10	0.38	0.025	0.25	28.49	2.00
11	0.38	0.025	0.25	28.59	2.36
12	0.30	0.025	0.30	29.38	5.19
13	0.46	0.025	0.30	30.36	8.70
14	0.38	0.040	0.20	28.77	3.01
15	0.30	0.040	0.25	28.83	3.22
16	0.46	0.040	0.25	30.86	10.49
17	0.38	0.040	0.30	30.21	8.16

对响应曲面试验结果进行不同形式的回归模型拟合,拟合效果如表6所示。使用直线型方程拟合时,模型显著、失拟项不显著,但决定系数 $R^2$ 为0.6937,决定系数偏小;二次交互型方程拟合决定系数 $R^2$ 为0.6312,决定系数偏小且拟合方程不显著;四次型方程拟合虽决定系数 $R^2$ 最高,为0.9678,但模型不显著;使用二次全模型方程拟合时,决定系数 $R^2$ 为0.9345,模型显著、失拟项不显著,综合效果较好。休止角响应曲面二次型全模型方差分析结果如表7所示。

表6 休止角响应曲面试验多种模型方程拟合结果  
Tab.6 Fitting results of various model equation

模型	决定系数 $R^2$	失拟项 $P$	模型 $P$
直线型	0.6937	0.0120	0.0003
二次交互型	0.6312	0.0070	0.8487
二次全模型	0.9345	0.1335	0.0015
四次全模型	0.9678		0.1335

由表7可知,二次全模型回归模型极显著( $P < 0.01$ ),且失拟项不显著( $P > 0.05$ ),证明模型可靠,茎秆间静摩擦因数 $x_2$ 、茎秆间滚动摩擦因数 $x_3$ 及其

表7 休止角响应曲面分析二次型全模型方差分析  
Tab.7 Analysis of variance of angle of repose for response surface quadratic model

方差来源	自由度	均方	$F$	$P$
模型	9	50.28	26.36	0.0001
$x_2$	1	3.21	15.16	0.0059
$x_3$	1	34.36	162.13	<0.0001
$x_5$	1	1.30	6.15	0.0442
$x_2x_3$	1	0.63	2.98	0.1278
$x_2x_5$	1	0.10	0.48	0.5094
$x_3x_5$	1	0.22	1.02	0.3461
$x_2^2$	1	1.00	4.72	0.0663
$x_3^2$	1	7.01	33.06	0.0007
$x_5^2$	1	2.99	14.10	0.0071
残差	7	1.48		
失拟项	3	1.07	3.41	0.1335
纯误差	4	0.42		
总和	16			

平方项、茎秆与钢之间的静摩擦因数 $x_5$ 及其平方项均显著影响休止角,各因素之间交互项对休止角的响应曲面如图4所示。

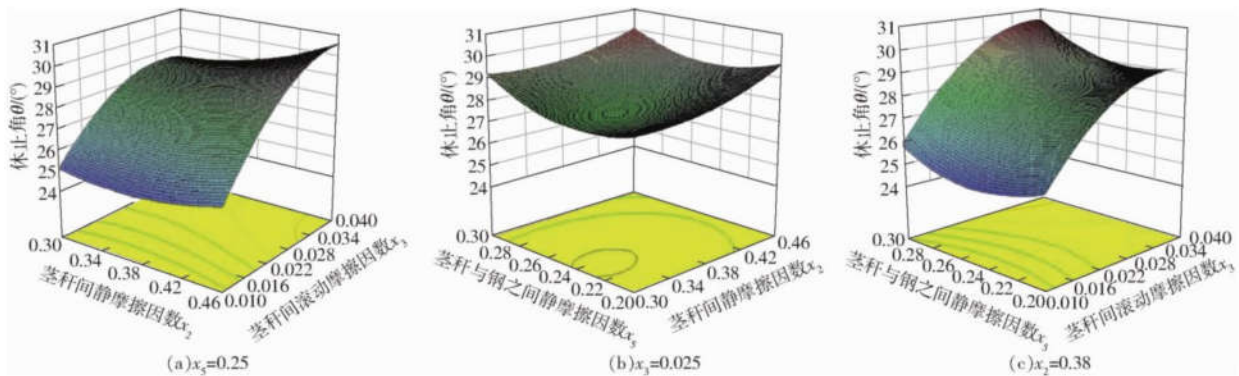


图4 休止角响应曲面

Fig.4 Response surfaces for angle of repose

为简化回归模型,充分考量显著性因素对休止角模拟值 $\theta$ 的影响,饲料油菜茎秆间静摩擦因数 $x_2$ 、茎秆间滚动摩擦因数 $x_3$ 和茎秆与钢之间静摩擦因数 $x_5$ 与休止角模拟值的二次多项式关系为

$$\theta = 49.50 - 48.25x_2 + 221.46x_3 - 152.98x_5 + 331.25x_2x_3 - 40x_2x_5 + 310x_3x_5 + 76.17x_2^2 - 5733.33x_3^2 + 337x_5^2 \quad (4)$$

在已知 $x_2$ 、 $x_3$ 和 $x_5$ 的情况下可代入计算得出饲料油菜茎秆颗粒休止角模拟值,但在已知休止角实测值条件下却难以求解 $x_2$ 、 $x_3$ 和 $x_5$ 的准确值,因此以休止角实测值与仿真值之间的相对误差 $\delta_\theta$ 为响应值开展分析,建立相对误差 $\delta_\theta$ 与试验因素 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_5$ 的关系模型,通过 $\delta_\theta$ 最小值优化求解,得到对应 $x_2$ 、 $x_3$

和 $x_5$ 的精确解。

对休止角相对误差 $\delta_\theta$ 响应曲面试验结果进行多种形式的回归拟合,拟合效果如表8所示。直线型方程决定系数 $R^2$ 仅为0.0337;二次交互型方程决定系数 $R^2$ 为-0.0168,决定系数为负且模型不显著;二次全模型方程决定系数 $R^2$ 为0.9159,模型显

表8 休止角相对误差响应曲面试验多种模型方程拟合结果

Tab.8 Fitting results of relative error of repose angle model equation

模型	决定系数 $R^2$	失拟项 $P$	模型 $P$
直线型	0.0337	0.0037	0.3533
二次交互型	-0.0168	0.0028	0.5292
二次全模型	0.9159	0.2304	0.0001
四次全模型	0.9445		0.2304

著且失拟项不显著,拟合较好;虽然四次型方程决定系数  $R^2$  为 0.944 5,但模型不显著。故采用二次全模型方程进行休止角相对误差响应曲面试验结果分析,二次全模型方差分析结果如表 9 所示,其回归模型  $P$  为 0.000 3,且失拟项  $P$  大于 0.05,证明模型可靠。

表 9 休止角相对误差响应曲面分析二次全模型方差  
Tab.9 Variance analysis of relative error of repose angle for response surface quadratic regression model

方差来源	自由度	均方	$F$	$P$
模型	9	212.77	20.36	0.000 3
$x_2$	1	28.13	24.23	0.001 7
$x_3$	1	11.51	9.91	0.016 2
$x_5$	1	7.83	6.74	0.035 6
$x_2x_3$	1	19.55	16.84	0.004 6
$x_2x_5$	1	1.31	1.13	0.322 9
$x_3x_5$	1	12.19	10.50	0.014 3
$x_2^2$	1	53.12	45.75	0.000 3
$x_3^2$	1	64.07	55.18	0.000 1
$x_5^2$	1	4.29	3.70	0.095 9
残差	7	8.13		
失拟项	3	5.06	2.20	0.230 4
纯误差	4	3.07		
总和	16			

模型中除了饲料油菜茎秆间静摩擦因数  $x_2$  和饲料油菜茎秆与钢之间静摩擦因数  $x_5$  的交互项  $P$  远大于 0.05 之外,其余因素都具有较好的显著性。为考察  $x_2$  和  $x_5$  交互项的影响,生成对休止角相对误差的响应曲面,如图 5 所示。

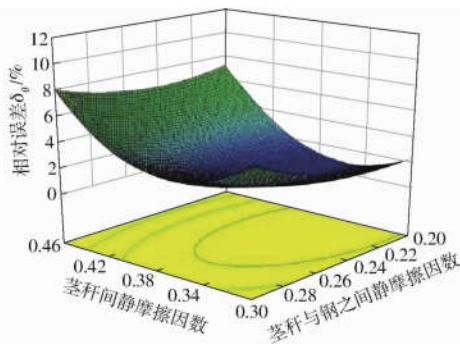


图 5 静摩擦因数与休止角相对误差响应曲面

Fig.5 Response surface for relative error of angle of repose

响应曲面图为凹型曲面,说明两因素之间存在一定的交互关系,为保证标定结果的准确性,保留  $x_2$  和  $x_5$  交互项,建立休止角相对误差响应曲面二次全模型方程为

$$\delta_\theta = 124.04 - 408.58x_2 - 2\,228.74x_3 - 185.91x_5 + 1\,842.40x_2x_3 - 143.22x_2x_5 + 2\,327.25x_3x_5 + 554.96x_2^2 + 17\,336.99x_3^2 + 403.87x_5^2 \quad (5)$$

通过 Design-Expert 自带的约束求解工具对方

程求最小值,求解得  $x_2 = 0.36, x_3 = 0.03, x_5 = 0.23$ 。将求解结果代入式(5)休止角误差方程式,得  $\delta_\theta = 0.32\%$ ;将结果代入式(4)休止角模拟值方程,得  $\theta = 28.53^\circ$ ,此时  $\delta_\theta = 2.15\%$ 。由上述结果可知,建立的饲料油菜茎秆颗粒休止角模拟值回归模型和误差回归模型较好,计算出的参数数值是可信的。

### 3.4 标定参数验证

为了验证求解参数的可行性与准确性,以标定的参数(表 10)建立果荚初期饲料油菜茎秆颗粒等效模型,开展休止角仿真试验,试验重复 5 次,仿真得出平均休止角模拟值  $\theta = 28.44^\circ$ ,与休止角实测值之间的相对误差  $\delta_\theta = 1.83\%$ ,模拟结果与实际试验结果无明显差异,表明建立的果荚初期饲料油菜茎秆颗粒等效模型可行,标定的参数准确。

表 10 果荚初期油菜茎秆离散元接触模型参数  
Tab.10 Parameters of fodder rape crop for discrete element simulation

参数	数值
油菜茎秆泊松比	0.23
钢板泊松比	0.30
油菜茎秆剪切模量/MPa	47.04
钢板剪切模量/MPa	$7.94 \times 10^4$
油菜茎秆密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	809
钢板密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$7.85 \times 10^3$
油菜茎秆间碰撞恢复系数	0.60
油菜茎秆间静摩擦因数	0.36
油菜茎秆间滚动摩擦因数	0.03
油菜茎秆-钢碰撞恢复系数	0.60
油菜茎秆-钢静摩擦因数	0.23
油菜茎秆-钢滚动摩擦因数	0.10

## 4 结论

(1) 试验测得果荚初期饲料油菜茎秆平均直径为 20.4 mm,油菜茎秆密度为  $809 \text{ kg/m}^3$ ,油菜茎秆弹性模量、剪切模量和泊松比平均值分别为 115.73 MPa,47.04 MPa 和 0.23,测得油菜茎秆颗粒休止角平均值为  $27.93^\circ$ 。

(2) 饲料油菜茎秆间碰撞恢复系数、饲料油菜茎秆与钢之间的碰撞恢复系数及饲料油菜茎秆与钢之间的滚动摩擦因数对休止角模拟值影响较小,其取值确定为 0.60,0.60 和 0.10;饲料油菜茎秆间静摩擦因数、饲料油菜茎秆滚动摩擦因数及其平方项、饲料油菜茎秆与钢之间的静摩擦因数及其平方项对休止角模拟值的影响都显著,建立休止角模拟值与该三参数的二次全模型方程,决定系数  $R^2$  为 0.934 5。

(3) 以休止角实测值与仿真值之间相对误差为

响应值开展分析,建立相对误差的二次回归模型,以相对误差值最小为目标优化求解可得饲料油菜茎秆间静摩擦因数为0.36,饲料油菜茎秆间滚动摩擦因数为0.03,饲料油菜茎秆-钢静摩擦因数为0.23;利

用确定的基本接触参数建立果荚初期饲料油菜茎秆颗粒的基本接触模型,得到休止角模拟值与实测值相对误差为1.83%,表明茎秆颗粒本征参数和标定的接触参数有效可行。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈伟生,关龙,黄瑞林,等.论我国畜牧业可持续发展[J].中国科学院院刊,2019,34(2):135-144.  
CHEN Weisheng, GUAN Long, HUANG Ruilin, et al. Sustainable development of animal husbandry in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(2): 135-144. (in Chinese)
- [2] 白文明,侯龙鱼,宋世环,等.饲草料优化配比是实现草-畜高效转化的关键[J].科学通报,2018,63(17):1686-1692  
BAI Wenming, HOU Longyu, SONG Shihuan, et al. Optimal formula feed is a key for efficient transformation of forage to animal products in grass-based livestock husbandry[J]. Chin. Sci. Bull., 2018, 63(17): 1686-1692. (in Chinese)
- [3] 辛良杰,王立新,刘爱民.我国饲料粮区域产销平衡特征及政策启示[J].自然资源学报,2018,33(6):965-977.  
XIN Liangjie, WANG Lixin, LIU Aimin. Regional production and consumption equilibrium of feed grain in China and its policy implication[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 965-977. (in Chinese)
- [4] 汪波,宋丽君,王宗凯,等.我国饲料油菜种植及应用技术研究进展[J].中国油料作物学报,2018,40(5):695-701.  
WANG Bo, SONG Lijun, WANG Zongkai, et al. Production and feeding technology of fodder rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 695-701. (in Chinese)
- [5] 杨华,熊明清,余陵峰,等.青贮饲料油菜对肉牛增重效果的研究[J].中国饲料,2017(2):16-18.  
YANG Hua, XIONG Mingqing, YU Lingfeng, et al. Study on feed effects of forage rape silage on the weight gain of beef cattle [J]. China Feed, 2017(2): 16-18. (in Chinese)
- [6] 文健,刘桂琼,姜勋平,等.饲料油菜生物量与营养成分测定及其发酵全混合日粮饲喂湖羊效果[J].华中农业大学学报,2018,37(2):71-75.  
WEN Jian, LIU Guiqiong, JIANG Xunping, et al. Biomass nutrition of forage rape and effect of its fermented total mixed ration on growth, carcass and meat quality in Hu sheep [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(2): 71-75. (in Chinese)
- [7] 刘彦培,黄必志,刘建勇,等.结实期全株油菜及油菜秸秆青贮技术研究[J].草食家畜,2017(6):22-26.  
LIU Yanpei, HUANG Bizhi, LIU Jianyong, et al. The research on nutrients value and silage technology of whole rape plant at fruiting stage[J]. Grass-feeding Livestock, 2017(6):22-26. (in Chinese)
- [8] 谭占坤,商振达,刘锁珠.青贮油菜在生长期藏猪饲料中的应用研究[J].中国饲料,2018(6):47-50.  
TAN Zhankun, SHANG Zhenda, LIU Suozhu. Applied research on forage rape in growing Tibetan pigs diet[J]. China Feed, 2018(6):47-50. (in Chinese)
- [9] 张玉雯,匡崇义,黄必志.油菜的饲用价值和利用展望[J].草学,2019(2):7-11.  
ZHANG Yuwen, KUANG Chongyi, HUANG Bizhi. The feeding value and prospect of whole rape[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2019(2): 7-11. (in Chinese)
- [10] 赵淑红,王加一,陈君执,等.保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(2):82-92.  
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):82-92. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190907&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190907&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.007. (in Chinese)
- [11] 王金武,李响,高鹏翔,等.胡萝卜联合收获机高效减阻松土铲设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(6):93-103.  
WANG Jinwu, LI Xiang, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of high efficiency drag reducing shovel for carrot combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):93-103. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200610&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200610&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.010. (in Chinese)
- [12] 侯加林,王后新,牛子儒,等.大蒜取种装置取种清种性能离散元模拟与试验[J].农业工程学报,2019,35(24):48-57.  
HOU Jialin, WANG Houxin, NIU Ziru, et al. Discrete element simulation and experiment of picking and clearing performance of garlic seed-picking device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 48-57. (in Chinese)
- [13] 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/OL].农业机械学报,2014,45(2):109-114.  
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140219&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140219&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019. (in Chinese)
- [14] 李尚平,张伟,黄宗晓,等.基于离散元法的自走式甘蔗转运车车厢稳定性研究[J/OL].农业机械学报,2020,51(2):374-382.

- LI Shangping, ZHANG Wei, HUANG Zongxiao, et al. Stability of carriages of self propelled sugarcane transporters based on discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 374 - 382. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200610&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200610&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.010. (in Chinese)
- [15] LIM J, KIM M H, KIM S M, et al. Transport performance simulation of separating system for self-propelled peanut harvester using edem software[J]. Journal of the Faculty of Agriculture, 2016, 61(2): 361 - 365.
- [16] SCHUSTER J N, DARR M J, MCNAULL R P, et al. Design and development of a particle flow yield monitor for combine harvesters[C]//ASABE Annual International Meeting, Detroit, 2018.
- [17] BARR J B, DESBIOLLES J M A, FIELKE J M, et al. Development and field evaluation of a high-speed no-till seeding system [J/OL]. Soil and Tillage Research, 2019, 194:104337. DOI:10.1016/j.still.2019.104337.
- [18] LENAERTS B, AERTSEN 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.
- [19] 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.
- [20] 丁启朔,任骏,BELAL Eisa Adam,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):38 - 48  
DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):38 - 48. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170305&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170305&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.005. (in Chinese)
- [21] 方会敏,姬长英,FARMAN Ali Chandio,等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):22 - 28.  
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):22 - 28. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160304&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160304&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004. (in Chinese)
- [22] 张江涛,易廷军,张梅,等. 橡胶粘结颗粒材料粘弹性性能的试验研究与离散元模拟[J]. 固体力学学报,2017,38(5):416 - 425.  
ZHANG Jiangtao, YI Tingjun, ZHANG Mei, et al. Experimental study and discrete element simulation on the viscoelastic properties of rubber-bonded particle material [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(5): 416 - 425. (in Chinese)
- [23] 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/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):73 - 82.  
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):73 - 82. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200608&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200608&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.008. (in Chinese)
- [24] HORABIK J, MOLEND A. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 206 - 225.
- [25] 毕影东,刘明,周广生,等. 黑龙江省饲料油菜品种筛选与种植技术研究[J]. 中国油料作物学报, 2019,41(6):835 - 841.  
BI Yingdong, LIU Ming, ZHOU Guangsheng, et al. Selection and cultivation of forage rapeseed in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(6): 835 - 841. (in Chinese)
- [26] 鹏飞,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/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):140 - 147.  
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 140 - 147. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180416&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180416&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)
- [27] 石林榕,吴建民,孙伟,等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. 农业工程学报,2014,30(8):40 - 48.  
SHI Linrong, WU Jianmin, SUN Wei, et al. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(8): 40 - 48. (in Chinese)
- [28] 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.  
GUO Qian, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. EDEM-based simulation and experiment on tomato cane straw cutting performance [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(10):1017 - 1022. (in Chinese)