

# 基于 Plackett-Burman 试验设计与响应面法优化 玉米秸秆离散元模型

朱惠斌<sup>1</sup> 钱诚<sup>1</sup> 白丽珍<sup>1\*</sup> 李慧<sup>2</sup> 牟丹磊<sup>1</sup> 李骏杰<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 农业与食品学院, 昆明 650500;

2. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250010)

**摘要** 为了减小免耕播种机防堵装置数值模拟的误差, 结合物理试验与仿真试验进行玉米秸秆离散元参数的标定。基于 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型建立了玉米秸秆离散元模型, 以物理试验与仿真试验中临界载荷的相对误差为试验指标进行仿真单轴压缩试验; 采用 Plackett-Burman 试验筛选出具有显著性影响的试验因素; 采用 Box-Behnken 响应面法对玉米秸秆离散元模型进行优化。试验结果表明: 接触半径和单位面积切向刚度对试验指标影响极显著 ( $P < 0.01$ ), 单位面积法向刚度对试验指标影响显著 ( $0.01 < P < 0.05$ ); 玉米秸秆的最优离散元参数为, 接触半径 1.2 mm、单位面积法向刚度  $9.361 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、单位面积切向刚度  $9.845 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ , 在此条件下, 仿真压缩试验的临界载荷为 950.2 N, 与物理试验值 935.4 N 的相对误差为 1.58%, 验证了参数的可靠性。标定的玉米秸秆离散元模型可用于免耕播种机防堵装置的数值模拟, 为防堵装置结构优化改进提供了依据。

**关键词** 玉米秸秆; 离散元; 临界载荷; Plackett-Burman 试验设计; 响应面

**中图分类号** S223.2+2

**文章编号** 1007-4333(2021)12-0221-11

**文献标志码** A

## Optimization of discrete element model of corn stalk based on Plackett-Burman design and response surface methodology

ZHU Huibin<sup>1</sup>, QIAN Cheng<sup>1</sup>, BAI Lizhen<sup>1\*</sup>, LI Hui<sup>2</sup>, MU Danlei<sup>1</sup>, LI Junjie<sup>1</sup>

(1. Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Shandong Academy of Agricultural Machinery Science, Jinan 250010, China)

**Abstract** In order to improve the accuracy of the numerical simulation of the anti-blocking device, the discrete element parameters of corn stalk were calibrated by combining with physical and simulation experiments. The model of the simulated compression test was established based on Hertz-Mindlin with bonding contact model. Simulation experiments were designed by using the relative error of critical load between physical and simulation experiments as the experimental index. Factors that have positive effects to the experimental index were screened by Plackett-Burman design. The experiments were designed by Box-Behnken experimental design to optimize the discrete element model of corn stalk. The experiment result shows that contact radius and shear stiffness per unit area had an extremely significant influence on the index ( $P < 0.01$ ), and the normal stiffness per unit area had a significant influence on the index ( $0.01 < P < 0.05$ ). Statistical analysis was carried out to obtain optimum parameters of discrete element model of corn stalk, which were contact radius of 1.2 mm, normal stiffness per unit area of  $9.361 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ , and shear stiffness per unit area of  $9.845 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ . Under this condition, the critical load of corn stalk was 950.2 N in the simulated experiment. The critical load of corn stalk was 935.4 N in physical uniaxial compression experiments. The relative error between simulated and physical experiments was 1.58%. In conclusion, this study shows that the

收稿日期: 2021-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51865022); 云南省科技厅面上项目(2015FB125)

第一作者: 朱惠斌, 副教授, 主要从事丘陵山区保护性耕作技术研究, E-mail: hbzhu113@163.com

通讯作者: 白丽珍, 高级实验师, 主要从事智能农业装备测控技术研究, E-mail: lzhbai@qq.com

discrete element model of corn stalk is reliable and can be used to simulate the operation of the anti-blocking device of the no-tillage seeder.

**Keywords** corn stalk; discrete element; critical load; Plackett-Burman design; response surface methodology

我国的玉米种植长期采用传统耕作模式,存在土壤有机碳含量降低、耕层厚度减小、土壤潜在生产力降低等问题<sup>[1-3]</sup>。保护性耕作具有改善土壤理化性质、增强土壤蓄水保墒能力和提高土壤微生物群落数量等显著效益<sup>[4-6]</sup>。免耕播种机是在玉米种植区进行保护性耕作的重要农机具。防堵装置是免耕播种机的核心部件,其主要作用是切断或拨离秸秆从而保证免耕播种施肥作业的顺利进行。为提高免耕播种机防堵装置的作业性能,应对其进行数值模拟,从而对防堵装置的结构进行优化改进。防堵装置数值模拟的关键点是建立可破碎的玉米秸秆模型,从而对切割或拨离秸秆的过程进行数值模拟。

目前,机械部件的数值模拟方法主要为有限元法<sup>[7-8]</sup>和离散元法<sup>[9-10]</sup>,尤其在农业机械设计与理论分析方面,如对冰草种子<sup>[11]</sup>和花生<sup>[12]</sup>进行建模,对深松铲<sup>[13]</sup>、开沟器<sup>[14]</sup>、旋耕刀<sup>[15]</sup>和排种器<sup>[16]</sup>等进行优化改进。离散元法可用于模拟免耕播种机防堵装置的作业过程,为防堵装置优化提供理论依据,如已有研究建立玉米秸秆层离散元模型<sup>[17]</sup>和小麦秸秆离散元模型<sup>[18-19]</sup>对防堵装置进行数值模拟。但上述基于 Hertz-Mindlin (no slip) 模型建立的秸秆离散元模型存在局限性,这些秸秆模型不会因外力而发生断裂或破坏,无法对防堵装置切割秸秆的过程进行数值模拟。为对防堵装置切割或拨离秸秆过程进行数值模拟,以 Hertz-Mindlin with bonding 模型为接触模型建立可破碎的玉米秸秆离散元模型。

采用离散元法对免耕播种机防堵装置进行数值模拟时,需对秸秆离散元模型进行参数标定从而减小数值模拟的误差。已有研究主要采用堆积角试验对各类离散元模型进行标定,如苜蓿秸秆<sup>[20]</sup>、油菜茎秆<sup>[21]</sup>、水稻种子<sup>[22]</sup>、胡麻籽粒<sup>[23]</sup>和三七种子<sup>[24]</sup>。堆积角试验标定法不能准确反映出离散元模型的力学特性,因此采用单轴压缩试验法对玉米秸秆离散元模型进行标定,以减小免耕播种机防堵装置数值模拟的误差。

本研究拟对玉米秸秆进行物理单轴压缩试验,基于 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型建立玉米秸秆离散元模型;以物理试验与仿真试验的临界载荷相对误差为试验指标,采用单因素试验法、

Plackett-Burman 试验设计和 Box-Behnken 响应面法确定离散元模型的最优仿真参数组合;以期为免耕播种机防堵装置的数值模拟提供仿真参数依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 玉米秸秆物理单轴压缩试验

试验材料选用昆明理工大学保护性耕作试验田种植的“红单6号”玉米,在玉米收获2周之后采集秸秆。选取粗壮笔直的节间玉米秸秆为试样,标距为60 mm,直径为25.67 mm,含水率约为53.6%。试验设备为CSS-44100 万能材料试验机,最大载荷100 kN。以10 mm/min 加载速度和10 kN 加载力进行单轴压缩试验,试验重复9次。根据试验结果,玉米秸秆单轴压缩试验的临界载荷为935.4 N。

### 1.2 玉米秸秆仿真单轴压缩模型

#### 1.2.1 The Hertz-Mindlin with bonding 接触模型

The Hertz-Mindlin with bonding 接触模型是基于 Potyondya 提出的颗粒粘结模型 (Bonded particle model, BPM),主要用于物料破碎、磨损的模拟(图1)<sup>[25]</sup>。该接触模型采用有限尺寸的粘结键将颗粒粘结,粘结键可以抵抗切向和法向位移,直至达到最大法向和切向剪应力使粘结键断裂。此后,粒子以硬球的形式相互作用。在粘结键产生前,通过 Hertz-Mindlin 接触模型计算颗粒间的相互作用。

在某一时刻粘结键产生后,将粘结力和力矩设置为零,求出在每个时间步所受粘结力和力矩的叠加增量。表达式如下:

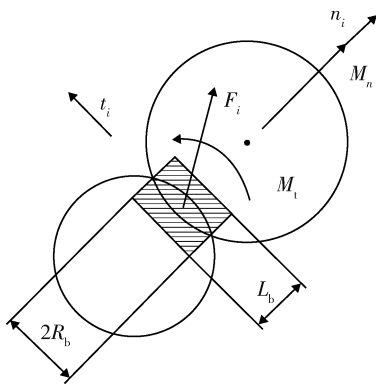
$$F_n = -v_n S_n A \delta_t \quad (1)$$

$$F_t = -v_t S_t A \delta_t \quad (2)$$

$$M_n = -\omega_n S_t J \delta_t \quad (3)$$

$$M_t = -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta_t \quad (4)$$

式中: $F_n$  为法向粘结力, N;  $F_t$  为切向粘结力, N;  $\delta_t$  为时间步长, s;  $M_n$  为法向力矩, N·m;  $M_t$  为切向力矩, N·m;  $S_n$  为法向刚度, N/m<sup>3</sup>;  $S_t$  为切向刚度, N/m<sup>3</sup>;  $v_n$  为法向速度, m/s;  $v_t$  为切向速度, m/s;  $\omega_n$  为法向角速度, rad/s;  $\omega_t$  为切向角速度, rad/s;  $A$  为颗粒接触区域面积, m<sup>2</sup>,  $A = \pi R_b^2$ ;  $J$  为惯性矩, m<sup>4</sup>;  $J = 0.5\pi R_b^4$ ;  $R_b$  为粘结键半径, m。



$t_i$  表示切线方向;  $n_i$  表示法线方向。

$M_t$ , 切向力矩;  $M_n$ , 法向力矩;  $F_t$ , 粘结力;  $R_b$ , 粘结键半径;  $L_b$ , 粘结键长度。

$t_i$ , tangent direction;  $n_i$ , normal direction.

$M_t$ , tangential moment;  $M_n$ , normal moment;  $F_t$ , bonding force;  $R_b$ , radius of bond;  $L_b$ , length of bond.

图 1 The Hertz-Mindlin with bonding 接触模型

Fig. 1 The Hertz-Mindlin with bonding contact model

当模型中粘结键的法向应力  $\sigma_{max}$  和切向应力  $\tau_{max}$  到达临界值时, 粘结键产生破坏, 表达式如下:

$$\sigma_{max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J}R_b \quad (5)$$

$$\tau_{max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J}R_b \quad (6)$$

### 1.2.2 玉米秸秆离散元模型

玉米秸秆可分为内瓤和外表皮, 属于各向异性材料。本研究的玉米秸秆离散元模型主要用于免耕播种机防堵装置的数值模拟, 只需保证玉米秸秆离散元模型能体现秸秆的力学特性。在实际建模时, 对玉米秸秆进行简化, 将秸秆等效为各向同性材料。基于离散元法建立玉米秸秆离散元模型, 以颗粒之间产生粘结键来体现玉米秸秆的力学性能。采用颗粒快速填充法建立玉米秸秆离散元模型, 建模流程见图 2。

基于 Gambit 软件对玉米秸秆进行几何建模, 设置其半径为 13 mm, 高为 60 mm。对几何模型进行网格划分, 设置 spacing 为 3、网格类型为四面体网格, 完成网格划分。将已划分网格的几何建模导入到 Fluent 软件中, 以用户自定义函数下 Compiled UDFs 命令导入编写好的 C 文件, 对 C 文件进行编译, 得到包含颗粒坐标的文件。C 文件可根据用户定义的最大填充系数和基础半径, 求出几何体所有网格的中心坐标, 最后生成有关颗粒坐标、速度和粒径倍数等信息的文档。设置最大填充系数为 0.61, 基础半径为 1 mm。

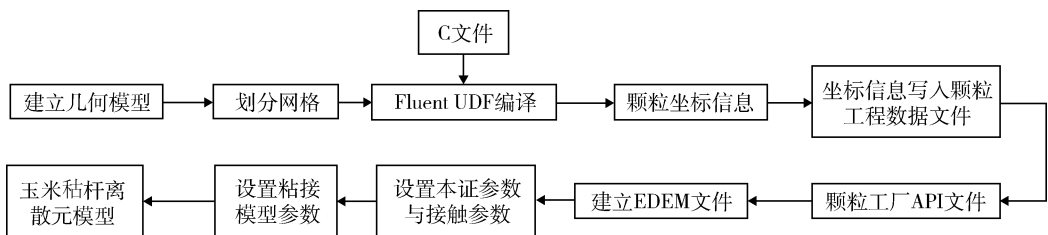


图 2 离散元模型建立流程

Fig. 2 Process of building discrete element model

建立 EDEM 文件, 对颗粒与几何模型的本征参数和接触参数进行设置, 如表 1 所示<sup>[26]</sup>。设置颗粒的半径为 1 mm, 接触半径根据试验方案进行设置。把颗粒坐标数据复制到颗粒工厂数据文件“Block\_Factory\_Data.txt”中, 将颗粒工厂 API 文件“myFactory.dll”导入 EDEM。设置颗粒之间的接触模型为“The Hertz-Mindlin with bonding”, 相关参数根据试验方案进行设置。将划分好网格的

玉米秸秆模型导入, 设置时间步长为 Rayleigh 的时间步长 2%, 完成玉米秸秆离散元模型的建立(图 3)。

基于后处理功能将粘结完成的秸秆离散元模型输出为“.edm”文件, 将压板与支撑底座的几何模型导入输出文件, 为压板添加 Force Controller, 设置压缩力为 10 kN, 速度为 10 mm/min, 玉米秸秆仿真单轴压缩试验模型见图 4。

表1 颗粒与几何模型的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of particle and geometric model

参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value	参数 Parameters	数值 Value
玉米秸秆泊松比 Poisson's ratio of corn stalk	0.4	45 钢密度/(kg/m <sup>3</sup> ) Density of steel	7 800	玉米秸秆间滚摩擦因数 Coefficient of rolling friction between corn stalks	0.078
玉米秸秆密度/(kg/m <sup>3</sup> ) Density of corn stalk	470	45 钢剪切模量/Pa Shear modulus of steel	$8.0 \times 10^{10}$	玉米秸秆-45 钢恢复系数 Coefficient of restitution between corn stalk and steel	0.663
玉米秸秆剪切模量/Pa Shear modulus of corn stalk	$1.7 \times 10^6$	玉米秸秆间恢复系数 Coefficient of restitution between corn stalks	0.485	玉米秸秆-45 钢静摩擦因数 Coefficient of static friction between particle and 45 steel	0.226
45 钢泊松比 Poisson's ratio of steel	0.3	玉米秸秆间静摩擦因数 Coefficient of static friction between corn stalks	0.142	玉米秸秆-45 钢动摩擦因数 Coefficient of restitution between corn stalk and 45 steel	0.119

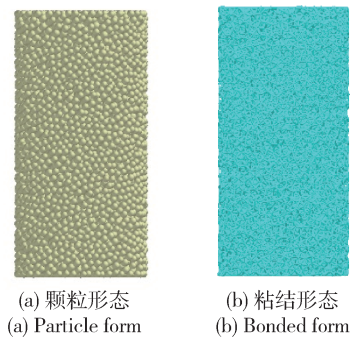
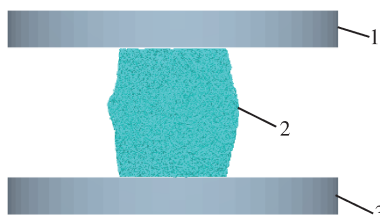


图3 玉米秸秆离散元模型

Fig. 3 Discrete element model of corn stalk



1. 压板; 2. 玉米秸秆; 3. 支撑底座

1. Compression; 2. Corn stalk; 3. Support base

图4 仿真压缩试验模型

Fig. 4 Model of simulated compression test

接触模型的相关参数为试验因素,根据前期试验结果,选取因素的试验水平见表2。在仿真单轴压缩试验完成之后,导出压板在每个时间步所受到力的数据文件,根据牛顿第三定律,该力等效为玉米秸秆在压缩过程中所受到的力,以其峰值为玉米秸秆所受到的临界载荷。试验以仿真试验与物理试验中玉米秸秆所受到的临界载荷的相对误差为试验指标,根据式(7)进行计算:

$$E_R = \left| \frac{F_{smax} - F_{pmax}}{F_{pmax}} \times 100\% \right| \quad (7)$$

表2 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型参数

Table 2 Parameters contact model of Hertz-Mindlin with bonding

参数 Parameter	取值 Value
接触半径 $X_1$ /mm Contact radius	1.0~1.3
单位面积法向刚度 $X_2$ /(N/m <sup>3</sup> ) Normal stiffness per unit area	$1 \sim 15 \times 10^7$
单位面积切向刚度 $X_3$ /(N/m <sup>3</sup> ) Shear stiffness per unit area	$1 \sim 15 \times 10^7$
临界法向应力 $X_4$ /Pa Critical normal stress	$10^6 \sim 10^9$
临界切向应力 $X_5$ /Pa Critical shear stress	$10^6 \sim 10^9$
粘结键半径 $X_6$ /mm Bonded disk radius	1.8~2.1

### 1.3 试验因素与试验指标

选取接触半径和 Hertz-Mindlin with bonding

式中： $E_R$  为物理试验与仿真试验的相对误差，%； $F_{smax}$  为在仿真单轴压缩试验中玉米秸秆所受到的临界载荷，N； $F_{pmax}$  为在物理单轴压缩试验中玉米秸秆所受到的临界载荷，N。

## 1.4 试验设计

### 1.4.1 单因素试验设计

以仿真试验与物理试验中玉米秸秆所受到的临界载荷的相对误差为试验指标，对 6 个试验因素进行单因素试验，分析各个因素对相对误差的变化规律。单因素试验采用的固定参数分别为：接触半径 1.2 mm、单位面积法向刚度  $1 \times 10^8$  N/m<sup>3</sup>、单位面积切向刚度  $1 \times 10^8$  N/m<sup>3</sup>、临界法向应力  $1 \times 10^8$  Pa、临界切向应力  $1 \times 10^8$  Pa 和粘结半径 2 mm。

### 1.4.2 Plackett-Burman 试验设计

Plackett-Burman 试验设计法在可在试验因素较多的条件下，选取试验因素的两个高低水平进行试验设计来筛选出对试验结果有显著影响的因素。

在单因素试验的基础上，对接触半径、单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力和粘结半径共 6 个试验因素进行筛选，得到对相对误差影响显著的因素，设计了试验次数  $N=12$  的 Plackett-Burman 试验。

### 1.4.3 最陡爬坡试验

根据 Plackett-Burman 试验结果，对具有显著性的因素（接触半径、单位面积法向刚度和单位面积切向刚度）进行最陡爬坡试验，使试验因素水平快速逼近最优范围，以进行 Box-Behnken 响应面法试验。

### 1.4.4 Box-Behnken 响应面法试验设计

根据最陡爬坡试验试验的结果，以接触半径、单位面积法向刚度和单位面积切向刚度为自变量，相对误差为响应值，进行 Box-Behnken 响应面试验。设计 3 因素 3 水平共 17 次的响应面试验，探究变量对响应值的影响，因素试验因素和水平见表 3。

表 3 Box-Behnken 试验因素与水平

Table 3 Experimental factors and levels of Box-Behnken

水平 Level	因素 Factor		
	$X_1$ , 接触半径/mm Contact radius	$X_2$ , 单位面积法向刚度/( $10^7$ N/m <sup>3</sup> ) Normal stiffness per unit area	$X_3$ , 单位面积切向刚度/( $10^7$ N/m <sup>3</sup> ) Shear stiffness per unit area
1	1.20	10.0	10.0
0	1.19	9.5	9.5
-1	1.18	9.0	9.0

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

1) 随着接触半径增大，相对误差先减小然后增大，这是由于接触半径增大使粘结键的数量增加，导致临界载荷增大(图 5(a))。接触半径为 1.2 mm 时，相对误差最小。

2) 随着单位面积法向刚度增加，相对误差先减小然后增大(图 5(b))。这是由于单位面积法向刚度增大使颗粒之间粘结力增加，导致临界载荷增大。单位面积法向刚度为  $1 \times 10^8$  N/m<sup>3</sup> 时，相对误差最小。

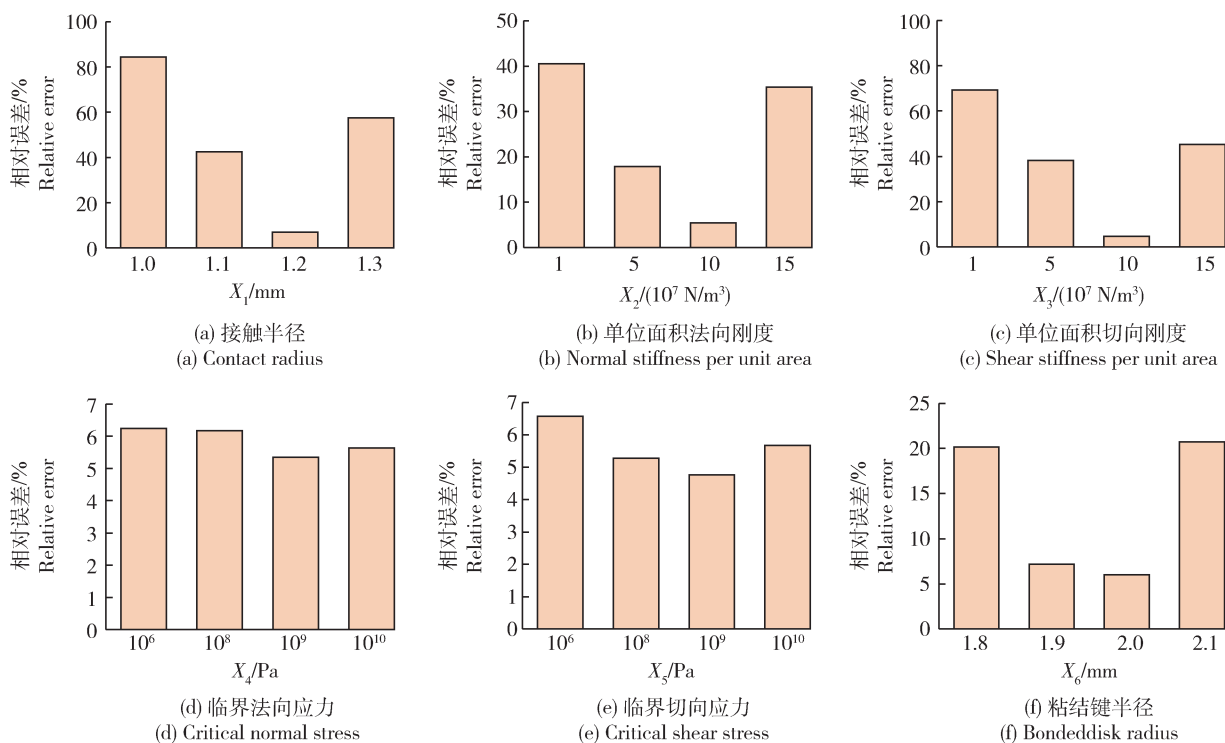
3) 随着单位面积切向刚度增加，相对误差先减小然后增大(图 5(c))。这是因为单位面积切向刚

度增大使颗粒之间粘结力增加，从而提高玉米秸秆离散元模型抵抗变形和破坏的能力，最终导致临界载荷增大。单位面积切向刚度为  $1 \times 10^8$  N/m<sup>3</sup> 时，相对误差最小。

4) 随着临界法向应力增加，相对误差的变化不大(图 5(d))。临界法向应力为  $1 \times 10^8$  Pa 时，相对误差最小。

5) 随着临界切向应力增加，相对误差先减小后增大，但变化幅度不大(图 5(e))。临界切向应力为  $1 \times 10^8$  Pa 时，相对误差最小。

6) 随着粘结键半径增加，相对误差先减小后增大(图 5(f))。这是因为粘结键半径增大使颗粒粘结力增大，导致临界载荷变大。粘结键半径为 2 mm 时，相对误差最小。



$X_1, X_2, \dots, X_6$  的含义见表 2, 下表、图同。

The meanings of  $X_1, X_2, \dots, X_6$  are shown in Table 2, and the following Tables and Figures are the same.

图 5 各因素对物理试验与仿真试验相对误差的影响

Fig. 5 Effect of factors on relative error of physical test and simulation test

## 2.2 Plackett-Burman 试验

Plackett-Burman 试验结果见表 4, 对试验结果

进行方差分析, 结果见表 5。可知: 决定系数  $R^2$  为 0.97, 说明模型适用于 97.44% 的试验数据;  $X_1$  和  $X_3$

表 4 Plackett-Burman 试验结果

Table 4 Test result of Plackett-Burman

序号 No.	$X_1/\text{mm}$	$X_2/(10^7 \text{ N/m}^3)$	$X_3/(10^7 \text{ N/m}^3)$	$X_4/\text{Pa}$	$X_5/\text{Pa}$	$X_6/\text{mm}$	相对误差/% Relative error
1	1.1	5	10	$10^8$	$10^8$	2.0	52.33
2	1.2	10	5	$10^9$	$10^8$	2.0	37.98
3	1.1	10	5	$10^9$	$10^8$	1.9	70.54
4	1.2	5	5	$10^8$	$10^8$	1.9	60.61
5	1.2	5	10	$10^9$	$10^7$	2.0	17.55
6	1.1	10	10	$10^8$	$10^8$	2.0	42.57
7	1.2	10	10	$10^8$	$10^7$	1.9	8.25
8	1.2	10	5	$10^8$	$10^7$	2.0	38.26
9	1.1	5	5	$10^8$	$10^7$	1.9	77.30
10	1.1	5	5	$10^9$	$10^7$	2.0	74.22
11	1.2	5	10	$10^9$	$10^8$	1.9	28.57
12	1.1	10	10	$10^9$	$10^7$	1.9	49.51

表 5 Plackett-Burman 试验方差分析

Table 5 ANOVA for the Plackett-Burman design

来源 Source	效应 Effect	系数 Coefficient	标准误差 Standard error	T 值 T-value	P 值 P-value
模型 Model		46.47	1.51	30.87	<0.001
$X_1$	-29.21	-14.60	1.51	-9.70	<0.001
$X_2$	-10.58	-5.29	1.51	-3.51	0.017
$X_3$	-26.69	-13.34	1.51	-8.86	<0.001
$X_4$	-0.16	-0.08	1.51	-0.05	0.960
$X_5$	4.59	2.29	1.51	1.52	0.188
$X_6$	-5.31	-2.66	1.51	-1.76	0.138

的  $P < 0.01$ , 表明接触半径和单位面积切向刚度对相对误差的影响极显著;  $X_2$  的  $P < 0.05$ , 即单位面积法向刚度对相对误差的影响显著;  $X_4$ 、 $X_5$  和  $X_6$  的  $P > 0.05$ , 说明粘临界法向应力、临界切向应力和粘结键半径对相对误差的影响不显著。因此, 选取因素  $X_1$ 、 $X_2$  和  $X_3$  进行最陡爬坡试验和中心组合响应面试验。在进行最陡爬坡试验和中心组合响应面试验时, 根据单因素试验结果取不显著因素的水平为: 临界切向应力  $1 \times 10^8$  Pa、临界切向应力  $1 \times$

$10^8$  Pa 和粘结键半径 2 mm。

### 2.3 最陡爬坡试验

最陡爬坡试验的结果见表 6, 可知: 试验 5 与试验 6 的临界载荷分别为 775.73 和 986.85 N。玉米秸秆物理单轴压缩试验的临界载荷为 935.4 N, 在试验 5 与试验 6 的结果区间之内, 而且试验 5 与试验 6 的相对误差较小, 因此选取试验 5 和试验 6 的因素水平分别为 Box-Behnken 试验低水平和高水平。

表 6 最陡爬坡试验结果

Table 6 The path of steepest ascent design and results

试验编号 Test number	$X_1$ /mm	$X_2/(10^7 \text{ N/m}^3)$	$X_3/(10^7 \text{ N/m}^3)$	临界载荷/N Critical load	相对误差/% Relative error
1	1.10	5	5	240.93	74.24
2	1.12	6	6	339.12	63.75
3	1.14	7	7	459.09	50.92
4	1.16	8	8	606.78	35.13
5	1.18	9	9	775.73	17.07
6	1.20	10	10	986.85	5.50

### 2.4 Box-Behnken 试验

为得到离散元模型参数的最优组合, 进行 Box-Behnken 试验, 结果见表 7。对试验结果进行回归拟合后, 得到以相对误差为响应值,  $X_1$  (接触半径)、 $X_2$  (单位面积法向刚度) 和  $X_3$  (单位面积切向刚度) 为变量的回归方程:

$$Y = 5.82 - 3.64X_1 - 0.98X_2 - 2.92X_3 + 0.93X_1X_2 + 1.66X_1X_3 + 0.43X_2X_3 + 1.18X_1^2 + 0.46X_2^2 + X_3^2 \quad (8)$$

对回归模型进行方差分析, 结果见表 8。可知, 回归方程的决定系数为  $R^2 = 0.97$ , 表明方程拟合度较高; 模型的  $P < 0.01$ , 说明回归方程极显著, 能够描述因素与响应值之间的关系; 模型失拟项的  $P > 0.05$ , 失拟项不显著, 说明不存在其他主要因素影响响应值; 模型的一次项  $X_1$  和  $X_3$  极显著, 一次项  $X_2$  显著, 二次项  $X_1^2$  显著, 交互项  $X_1X_3$  显著。

根据回归方程得到各因素交互作用对物理试验与仿真试验相对误差影响的响应面图(图 6)。

表7 Box-Behnken 试验结果

Table 7 Experimental results of Box-Behnken

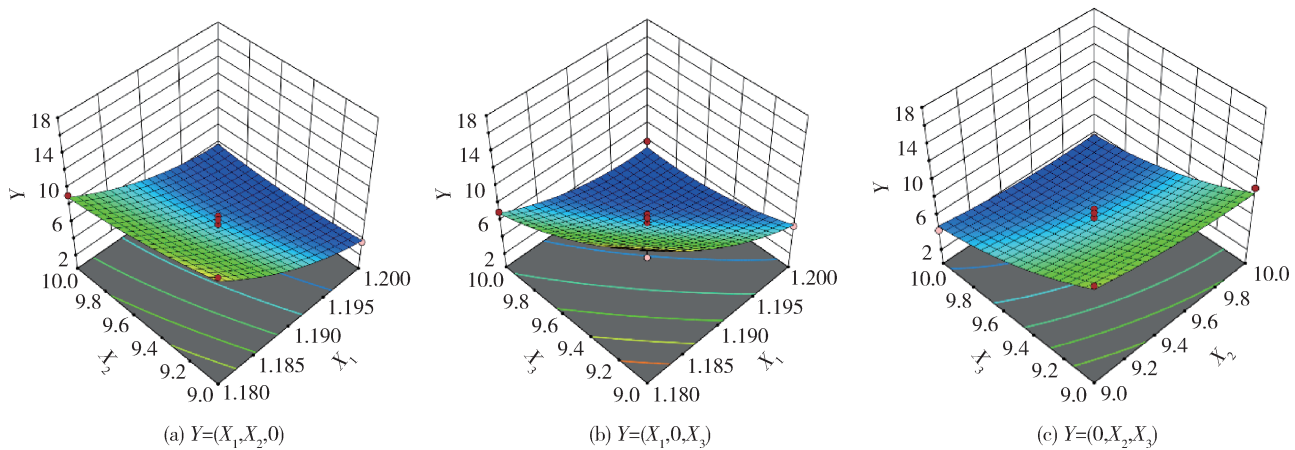
序号 No.	因素水平值 Factor level value			相对误差/% Relative error
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
1	0	0	0	5.88
2	0	1	-1	9.35
3	1	0	1	3.88
4	1	0	-1	5.48
5	-1	1	0	9.39
6	0	0	0	6.97
7	0	-1	1	4.34
8	0	0	0	4.13
9	-1	0	-1	15.45
10	0	1	1	3.46
11	-1	-1	0	13.43
12	0	0	0	5.65
13	0	0	0	6.48
14	-1	0	1	7.19
15	0	-1	-1	11.97
16	1	-1	0	3.66
17	1	1	0	3.36

表8 Box-Behnken 回归模型的方差分析

Table 8 ANOVA for Box-Behnken quadratic model

来源 Source	平方和 Sum of Squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value
模型 Model	209.03	9	23.23	22.67	0.000 2
$X_1$	105.73	1	105.73	103.19	<0.000 1
$X_2$	7.66	1	7.66	7.48	0.029 2
$X_3$	68.28	1	68.28	66.64	<0.000 1
$X_1 X_2$	3.48	1	3.48	3.40	0.107 7
$X_1 X_3$	11.09	1	11.09	10.82	0.0133
$X_2 X_3$	0.754 5	1	0.75	0.734	0.419 3
$X_1^2$	5.84	1	5.84	5.70	0.048 3
$X_2^2$	0.89	1	0.89	0.87	0.380 9
$X_3^2$	4.20	1	4.20	4.10	0.082 4
残差 Residual	7.17	7	1.02		
失拟项 Lack of Fit	2.54	3	0.85	0.73	0.584 8
纯误差 Pure error	4.63	4	1.16		
总计 Total	216.21	16			





Y 为玉米秸秆临界载荷试验值与仿真值之间的相对误差。

Y was relative error between the critical load test value and simulation value of corn stalk.

图 6 交互作用对物理试验与仿真试验相对误差的影响

Fig. 6 Effect of interaction factors on relative error of physical test and simulation test

当单位面积法向刚度为定值时,相对误差随着接触半径的增大,呈减小趋势,变化幅度明显,接触半径对相对误差的影响高于单位面积法向刚度的影响(图 6(a))。

接触半径与单位面积切向刚度的交互作用对相对误差的影响明显(图 6(b))。当接触半径为定值时,随着单位面积切向刚度的增大,相对误差呈先减小后增大的趋势;当单位面积切向刚度的增大为定值时,随着接触半径的增大,相对误差呈减小趋势,且变化幅度明显。

由图 6(c)可知,当接触半径为固定水平值时,单位面积法向刚度与单位面积切向刚度的交互作用对相对误差的影响不显著。当单位面积法向刚度为定值时,相对误差随着单位面积切向刚度的增大,呈减小趋势,单位面积切向刚度对相对误差的影响高于单位面积法向刚度的影响。

## 2.5 最优参数与模型验证

为了使仿真单轴压缩试验中玉米秸秆所受到的临界载荷接近物理试验的 935.4 N,采用 Design-Expert 软件对回归模型进行优化分析,得到最优仿真参数为:接触半径 1.2 mm、单位面积法向刚度  $9.361 \times 10^7 \text{ N/m}^3$  和单位面积切向刚度  $9.845 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ ,预测理论相对误差为 2.94%。根据最优仿真参数进行验证试验,玉米秸秆离散元模型在验证试验中临界载荷为 950.2 N,与物理试验的相对误差为 1.58%,试验结果与预测值基本一致,进一步证明了模型的准确性与可靠性。

## 3 结论

本研究基于 Plackett-Burman 试验设计和 Box-Behnken 响应面法,以单轴压缩试验法对玉米秸秆离散元模型进行标定,探究了玉米秸秆离散元模型的最优参数组合,主要结论如下:

1) 进行物理试验测定得到玉米秸秆单轴压缩试验的临界载荷为 935.4 N。开展 Plackett-Burman 试验,筛选出对临界载荷试验值与仿真值之间的相对误差有显著影响的因素为:接触半径、单位面积法向刚度和单位面积切向刚度。

2) 进行最陡爬坡试验缩小显著性因素的水平范围,再进行 Box-Behnken 响应曲面试验,对试验结果进行方差分析,得到二次多项式回归方程。方差分析表明,回归方程极显著,且拟合度高。对回归方程进行优化求解,得到最优参数为:接触半径 1.2 mm、单位面积法向刚度  $9.361 \times 10^7 \text{ N/m}^3$  和单位面积切向刚度  $9.845 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 。进行验证试验,验证试验的临界载荷为 950.2 N,与物理试验 935.4 N 的相对误差为 1.58%,验证了玉米秸秆离散元模型的仿真参数的可靠性。

## 参考文献 References

- [1] Seitz S, Goebes P, Puerta V L, Pereira E I P, Wittwer R, Six J, Heijden M G A, Scholten T. Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018, 39(1): 1-10

- [2] Zuber S M, Behnke G D, Nafziger E D, Villamil M B. Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 147-155
- [3] 张凯, 刘战东, 强小嫚, 米兆荣, 冯荣成, 马岩川, 余轩, 孙景生. 耕作方式和灌水处理对冬小麦-夏玉米水分利用及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 102-109  
Zhang K, Liu Z D, Qiang X M, Mi Z R, Feng R C, Ma Y C, Yu X, Sun J S. Effects of tillage and irrigation on water use and yield of winter wheat and summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(17): 102-109 (in Chinese)
- [4] 王兴, 祁剑英, 井震寰, 李超, 张海林. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 121-128  
Wang X, Qi J Y, Jing Z H, Li C, Zhang H L. Effects of long-term conservation tillage on soil aggregate stability and carbon and nitrogen in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24): 121-128 (in Chinese)
- [5] Reichert J M, da Rosa V T, Vogelmann E S, da Rosa D P, Horn R, Reinert D J, Sattler A, Denardin J E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 158: 123-136
- [6] Briones M J I, Schmidt O. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4396-4419
- [7] Balachandra Shetty P, Mishra R K, Prithvi S S, Lohith R, Karthik B M, Lohith D M. Finite element approach for failure analysis of a gas turbine blade[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2018, 18(5): 1210-1215
- [8] 曹成茂, 蒋兰, 吴崇友, 李正, 汪天宇, 丁冉. 山核桃破壳机加载锤头设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 307-315  
Cao C M, Jiang L, Wu C Y, Li Z, Wang T Y, Ding R. Design and test on hammerhead of pecan shell-breaking machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 307-315 (in Chinese)
- [9] 肖望强, 叶淑祯, 王兴民, 贾尚帅, 潘德阔, 卢大军. 动车组车体端墙粒子阻尼器减振的数值分析与实验研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 481-489  
Xiao W Q, Ye S Z, Wang X M, Jia S S, Pan D K, Lu D J. Numerical analysis and experimental study of particle dampers for vibration reduction of EMU end wall structures[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(4): 481-489 (in Chinese)
- [10] Tekeste M Z, Way T R, Syed Z, Schafer R L. Modeling soil-bulldozer blade interaction using the discrete element method (DEM)[J]. *Journal of Terramechanics*, 2020, 88: 41-52
- [11] 侯占峰, 戴念祖, 陈智, 仇义, 张曦文. 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 Z F, Dai N Z, Chen Z, Qiu Y, Zhang X W. Measurement and calibration of physical property parameters for Agropyron seeds in a discrete element simulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(24): 46-54 (in Chinese)
- [12] 吴孟宸, 丛锦玲, 闫琴, 朱彤, 彭心怡, 王怡苏. 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 M C, Cong J L, Yan Q, Zhu T, Peng X Y, Wang Y S. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(23): 30-38 (in Chinese)
- [13] 马跃进, 王安, 赵建国, 郝建军, 李建昌, 马璐萍, 赵伟博, 吴月. 基于离散元法的凸圆刃式深松铲减阻效果仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 16-23  
Ma Y J, Wang A, Zhao J G, Hao J J, Li J C, Ma L P, Zhao W B, Wu Y. Simulation analysis and experiment of drag reduction effect of convex blade subsoiler based on discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(3): 16-23 (in Chinese)
- [14] Barr J B, Ucgul M, Desbiolles J M A, Fielke J M. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 171: 1-15
- [15] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 张倩倩, 黄杨清, 张卓伟. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 113-121  
Xiong P Y, Yang Z, Sun Z Q, Zhang Q Q, Huang Y Q, Zhang Z W. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(18): 113-121 (in Chinese)
- [16] Gao X J, Zhou Z Y, Xu Y, Yu Y B, Su Y, Cui T. Numerical simulation of particle motion characteristics in quantitative seed feeding system[J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 643-658
- [17] 黄玉祥, 高鹏洋, 张庆凯, 沈浩, 朱瑞祥, 史江涛. 免耕播种机切茬草组合式草土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 67-78  
Huang Y X, Gao P Y, Zhang Q K, Shen H, Zhu R X, Shi J T. Design and experiment of grass-soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5): 67-78 (in Chinese)
- [18] 王伟伟, 朱存玺, 陈黎卿, 李兆东, 黄鑫, 李金才. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 10-17

- Wang W W, Zhu C X, Chen L Q, Li Z D, Huang X, Li J C. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize No-tillage planter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 10-17 (in Chinese) 自译
- [19] 牛萌萌, 方会敏, CHANDIO F A, 史嵩, 薛艳芳, 刘虎. 秸秆分拨引导式玉米免耕防堵机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 52-58
- Niu M M, Fang H M, Chandio F, Shi S, Xue Y F, Liu H. Design and experiment of separating-guiding anti-blocking mechanism for No-tillage maize planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 52-58 (in Chinese)
- [20] 马彦华, 宋春东, 宣传忠, 王昊毅, 杨帅, 武佩. 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 Y H, Song C D, Xuan C Z, Wang H Y, Yang S, Wu P. Parameters calibration of discrete element model for alfalfa straw compression simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 22-30 (in Chinese)
- [21] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 王在腾, 蒋亚军, 梁方. 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
- Liao Y T, Liao Q X, Zhou Y, Wang Z T, Jiang Y J, Liang F. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 73-82 (in Chinese)
- [22] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 祁兵, 刘虎, 夏倩倩. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 227-235
- Zhang R F, Jiao W, Zhou J L, Qi B, Liu H, Xia Q Q. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 227-235 (in Chinese)
- [23] 石林榕, 马周泰, 赵武云, 杨小平, 孙步功, 张建平. 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 L R, Ma Z T, Zhao W Y, Yang X P, Sun B G, Zhang J P. Calibration of simulation parameters of flaxed seeds using discrete element method and verification of seed-metering test [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(20): 25-33 (in Chinese)
- [24] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 孙凯, 赖庆辉. 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 Q X, Liu Y, Chen X B, Sun K, Lai Q H. 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)
- [25] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(8): 1329-1364
- [26] 张涛, 刘飞, 赵满全, 麻乾, 王伟, 樊琦, 闫鹏. 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
- Zhang T, Liu F, Zhao M Q, Ma Q, Wang W, Fan Q, Yan P. Determination of corn stalk contact parameters and calibration of Discrete Element Method simulation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(4): 120-127 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春