doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.015

基于 RSM 和 NSGA－Ⅱ的苜蓿种子离散元模型参数标定

马文鹏　尤　泳　王德成　尹世杰　郇晓龙
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：为寻求最优苜蓿种子离散元模型接触参数组合，设计了一种可同时测定物料休止角与堆积角的装置，并提出测定方法，将实际试验与仿真试验相结合，以苜蓿种子休止角和堆积角的实测值与仿真值误差为指标，对苜蓿种子模型参数进行标定。通过 Plackett－Burman 试验筛选出对指标影响显著的接触参数，采用响应曲面法（RSM）建立显著性参数与指标之间的二阶数学模型，采用非支配排序遗传算法Ⅱ（NSGA－Ⅱ）进行多目标寻优计算，获取最优苜蓿种子离散元模型接触参数组合，即种间碰撞恢复系数为 0.47，种间静摩擦因数为 0.24，种间滚动摩擦因数为 0.08。采用槽轮式排种器进行了试验验证，结果表明，在不同排种轮转速条件下，苜蓿种子质量流率实测值和仿真值的平均相对误差为 2.89%，该苜蓿种子离散元模型和接触参数能够满足离散元仿真试验要求，基于 RSM 和 NSGA－Ⅱ的多目标优化方法具有科学性和可行性。

关键词：苜蓿种子；离散元；NSGA－Ⅱ；参数标定
中图分类号：S223.2⁺6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)08-0136-09　　**OSID**：

Parameter Calibration of Alfalfa Seed Discrete Element Model Based on RSM and NSGA－Ⅱ

MA Wenpeng　YOU Yong　WANG Decheng　YIN Shijie　HUAN Xiaolong
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to find the optimal contact parameters combination of alfalfa seed discrete element model, a device and method which can simultaneously measure the repose angle and accumulation angle of materials were provided. The difference between measured value and simulated value of repose angle and accumulation angle were used as indicators to calibrate the parameters of the alfalfa seed model. The Plackett－Burman test was used to screen out the contact parameters that had significant impacts on the index. The second order mathematical models between the significant parameters and the index were established by using response surface methodology (RSM). The non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ (NSGA－Ⅱ) was used to obtain the optimal contact parameter combination of alfalfa seed discrete element model, that was, the inter-species collision recovery coefficient was 0.47, the inter-species static friction coefficient was 0.24, and the inter-species rolling friction coefficient was 0.08. Finally, the trough wheel seeder was used for experimental verification. The results showed that the average relative error of the measured and simulated values of alfalfa seed mass flow rate under different seeding wheel speeds was 2.89%, therefore the discrete element model and contact parameters of the alfalfa seed can be used in discrete element simulation experiments, and the multi-objective optimization method based on RSM and NSGA－Ⅱ had certain scientificness and feasibility.

Key words: alfalfa seed; discrete element; NSGA－Ⅱ; parameter calibration

0　引言

离散元法（Discrete element method, DEM）在农业装备研发中应用越来越广泛，采用离散元法研究散粒体动力学已成为一种发展趋势[1-2]。在排种器工作过程中，种间相互作用关系复杂，应用离散元法

收稿日期：2020－04－20　修回日期：2020－06－12
基金项目：现代农业产业技术体系建设专项资金项目（CARS－34）和国家自然科学基金项目（51405493）
作者简介：马文鹏（1988—），男，博士生，主要从事草业机械研究，E-mail：904209407@qq.com
通信作者：王德成（1965—），男，教授，博士生导师，主要从事草业机械研究，E-mail：wdc@cau.edu.cn

对排种过程进行数值模拟，有助于揭示排种机理，进而优化排种参数和性能[3-6]。紫花苜蓿是一种优质牧草，可以为畜禽提供优质饲料，被誉为“牧草之王”[7-9]。优化苜蓿种子离散元模型和仿真参数，可提高离散元法在苜蓿排种器研究中的准确性。物料物性参数主要包括本征参数和接触参数，本征参数是物体自身的特性参数（如泊松比、弹性模量和密度等），颗粒间及颗粒与几何体间的接触参数包括碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数，是两个物体发生接触时的物性参数。大多数离散元模型的本征参数与真实参数数值一致，但由于颗粒模型的误差以及颗粒间复杂的接触特性，应对部分参数进行重新标定及优化[10-12]。

目前，国内外学者已完成土壤、稻谷、饲料和玉米等离散元模型的建立和仿真参数的标定。于庆旭等[13]基于粘结颗粒模型，以堆积角实测值与仿真值相对误差为指标，对三七种子离散元模型进行了接触参数标定。鹿芳媛等[14]利用内部坍塌法、侧壁坍塌法和重力平衡法获取了水稻芽种两种休止角及滑动摩擦角，通过仿真试验与实际试验相结合的方法，对不同含水率水稻芽种离散元的主要接触参数进行了标定。王云霞等[15]利用两种接触材料（有机玻璃板与铝质圆筒）进行玉米种子堆积角仿真试验，建立种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数两个自变量的二元回归方程，以实际测量种群堆积角作为已知目标量进行数值求解，求得 EDEM 中玉米种间摩擦因数。张涛等[16]以堆积角、最大静摩擦因数以及碰撞恢复系数为指标，标定大豆种子离散元模型与排种盘、搅种轮和有机玻璃间接触参数。张锐等[17]以实际堆积角为指标，对标准球型和非标准球型沙土颗粒接触参数进行了标定。彭飞等[18]提出一种基于注入截面法的休止角测定装置与方法，可通过颗粒堆积体截面的轮廓线直接获取休止角，并以此进行颗粒饲料离散元模型接触参数组合的优化。罗帅等[19]提出了通过测定基质含水率预测休止角的方法，并以休止角作为参照对蚯蚓粪基质离散元模型进行参数标定。GHODKI 等[20]建立了大豆离散元模型，通过对大豆形状、静止角等特征进行比较，获得了该模型的接触参数。WANG 等[21]将离散元法与物理试验相结合，以堆积角为指标对不规则形状玉米颗粒的滚动摩擦因数进行了标定。MOUSAVIRAAD 等[22]通过休止角对比试验，优化了玉米离散元模型的形状和接触参数，并利用螺旋输送机的流量进行了验证。

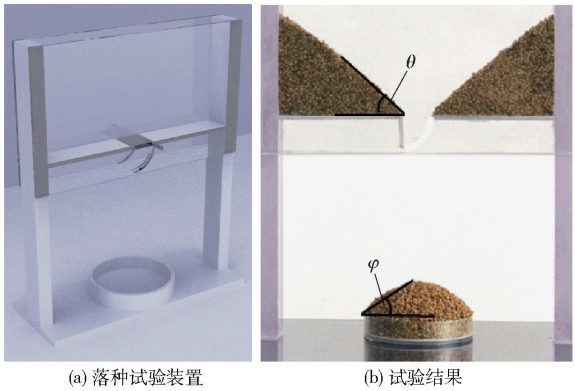
目前，在针对离散元模型参数标定的研究中，多以单一的休止角或堆积角为试验指标，且标定结果仅为一组解。因此，提高标定试验效率、建立多指标参数优化数学模型，并使用更有效的优化方法对其进行求解，对于获取更精确的模型参数具有重要的现实意义。本文设计一种可同时测定物料休止角和堆积角的装置，并提出测试方法。以苜蓿种子为研究对象，进行实际落种与仿真落种试验，以休止角相对误差和堆积角相对误差为试验指标，通过 Plackett－Burman 试验筛选出对指标影响显著的接触参数，采用响应面分析法（RSM）建立显著性参数与各指标之间的二阶数学模型，利用非支配排序遗传算法Ⅱ（NSGA－Ⅱ）进行多目标寻优计算，获取更具有收敛性和多样性的 Pareto 最优解集，并进行排种验证试验，以期为苜蓿、黑麦草等小粒牧草种子离散元模型参数标定提供参考。

1　苜蓿种子离散元模型参数标定

休止角和堆积角是表征颗粒物料流动、摩擦等特性的宏观参数，与接触材料和物料本身物理特性有关[23]，因此可将其应用于离散元模型的接触参数标定试验中。

1.1　实际落种试验

落种试验装置如图 1a 所示。该装置主要由种箱、挡板和圆盘组成，试验材料为中苜一号紫花苜蓿种子。试验时，先关闭挡板，在种箱中均匀加入适量种子，约占种箱总容积的 2/3，并尽可能保证种子层上表面的水平，将挡板快速打开，苜蓿种子在重力作用下落入圆盘，种箱内两侧对称形成梯形种堆。休止角 θ 为种箱上部水平面与种堆斜面所夹锐角；堆积角 φ 为种箱下部圆盘中水平面与种堆斜面所夹锐角，如图 1b 所示。



(a) 落种试验装置　　(b) 试验结果

图 1　实际落种试验

Fig. 1　Practical seed-dropping test

为减少人为测量导致的误差，利用 Matlab 软件对采集到的休止角和堆积角图像依次进行去噪处理、灰度处理以及二值化处理，获取种堆边界点，其连线即种堆边界曲线，最后采用最小二乘法

对曲线进行拟合,得到一条直线,直线的斜率即苜蓿种子的实际休止角和堆积角的正切值,如图 2 所示,其中左图为休止角,右图为堆积角。每组试验重复 5 次取平均值(表 1),得到实际试验中紫花苜蓿种堆休止角和堆积角平均值分别为 40.64°和 31.28°。

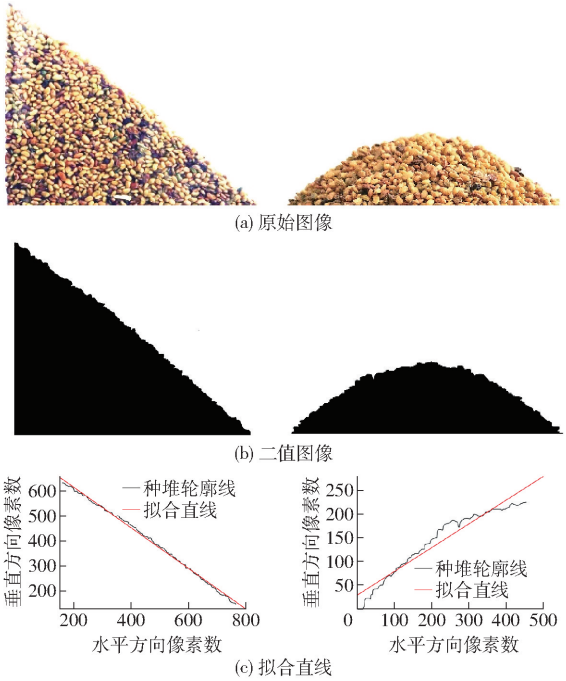


图 2 种堆图像处理

Fig. 2 Images processing of repose angle and accumulation angle

表 1 紫花苜蓿实际条件下休止角和堆积角测量结果

Tab. 1 Measurement results of repose angle and accumulation angle of alfalfa under actual conditions

(°)

试验序号	休止角	堆积角
1	40.38	30.89
2	38.24	32.55
3	41.06	31.84
4	39.78	29.39
5	43.76	31.74
平均值	40.64	31.28

1.2 落种仿真试验

根据苜蓿种子的物理特性(表 2),在 EDEM 软件中利用球形颗粒组合的方法建立苜蓿种子仿真模型,如图 3 所示。颗粒接触模型选取 Hertz - Mindlin 无滑移模型[24-25]。将测量装置的几何模型和苜蓿种子模型导入 EDEM 中,设置苜蓿种子数量、试验过程与真实试验相同,试验结束后对堆积角进行图像采集,同样利用 Matlab 处理图像,获取仿真休止角 β 与堆积角 γ,如图 4 所示。休止角误差 Y_1 和堆积角误差 Y_2 的计算公式为

$$Y_1 = \frac{\beta - \theta}{\theta} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{\gamma - \varphi}{\varphi} \times 100\% \quad (2)$$

表 2 中苜一号紫花苜蓿种子物理特性参数

Tab. 2 Alfalfa seed physics features

参数	数值
长/mm	2.38
宽/mm	1.40
厚/mm	0.96
含水率/%	14.79
种子真实密度/(kg·m^{-3})	1 231
种子容积密度/(kg·m^{-3})	976



图 3 苜蓿种子离散元模型

Fig. 3 Discrete element model of alfalfa seeds

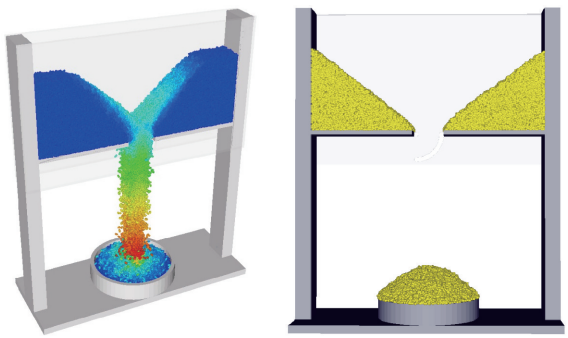


图 4 落种仿真试验

Fig. 4 Simulated seed dropping test

1.3 Plackett - Burman 试验

应用 Design-Expert 软件设计 Plackett - Burman 试验,以苜蓿种群休止角误差和堆积角误差为响应值,筛选出对响应值影响显著的仿真参数。仿真试验中共 7 个真实参数 $A \sim G$,设置 4 个虚拟参数 $H \sim K$,每个参数按照推荐范围值均取低、高 2 个水平,分别以编码 -1 和 1 表示。根据文献[13-14]以及前期大量预试验对各参数范围进行选取,结果如表 3 所示。仿真试验中设定 1 个中心点,共进行 12 组试验,每组仿真试验重复 4 次,取平均值,并计算休止角误差和堆积角误差。

表 4 为 Plackett - Burman 试验的设计方案及仿真结果,采用 Design-Expert 软件对该模拟试验结果进行方差分析,得出各参数的影响效果如表 5 所示。

表 3　Plackett－Burman 试验参数

Tab. 3　Test parameters of Plackett－Burman

参数	含义	低水平值（－1）	高水平值（1）
A	种子与有机玻璃碰撞恢复系数	0.1	0.9
B	种子与有机玻璃静摩擦因数	0.1	0.9
C	种子与有机玻璃滚动摩擦因数	0.05	0.45
D	种子泊松比	0.2	0.8
E	种间碰撞恢复系数	0.27	0.63
F	种间静摩擦因数	0.07	0.43
G	种间滚动摩擦因数	0.025	0.125
H、*I*、*J*、*K*	虚拟参数		

由表 5 可知，种间碰撞恢复系数 *E*、种间静摩擦因数 *F* 和种间滚动摩擦因数 *G* 对休止角误差、堆积角误差影响显著，其余参数影响较小。因此在最陡爬坡试验以及正交试验中对 *E*、*F*、*G* 3 个影响显著的接触参数进行优化。

1.4　最陡爬坡试验

表 6 所示为最陡爬坡试验设计方案及结果，结果表明：随着种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数的增大，休止角误差和堆积角误差呈现先减小后增大的趋势，取试验 3 为中心点，设为中水平，选取试验 2、4 水平分别为低、高水平进行

表 4　Plackett－Burman 试验方案设计及结果

Tab. 4　Design and results of Plackett－Burman test scheme

序号	水平值											休止角误差/%	堆积角误差/%
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	*I*	*J*	*K*		
1	1	1	－1	1	－1	1	1	－1	－1	1	－1	21.16	28.22
2	－1	1	1	－1	1	1	1	－1	－1	－1	1	29.56	36.67
3	1	－1	1	1	1	－1	1	1	－1	－1	－1	19.74	29.09
4	－1	1	－1	1	1	1	－1	1	1	－1	－1	22.35	27.87
5	－1	－1	1	－1	－1	1	1	1	1	1	－1	20.35	28.98
6	－1	－1	－1	1	1	－1	1	－1	1	1	1	18.45	28.17
7	1	－1	－1	－1	1	1	－1	1	－1	1	1	25.78	31.54
8	1	1	－1	－1	－1	－1	1	1	1	－1	1	16.86	23.23
9	1	1	1	－1	1	－1	－1	－1	1	1	－1	11.02	18.87
10	－1	1	1	1	－1	－1	－1	1	－1	1	1	9.67	17.98
11	1	－1	1	1	－1	1	－1	－1	1	－1	1	15.26	20.07
12	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	－1	10.67	19.76

表 5　Plackett－Burman 试验参数显著性分析

Tab. 5　Significance analysis of Plackett－Burman test parameters

参数	休止角误差				堆积角误差			
	效应值	均方和	影响率/%	显著性排序	效应值	均方和	影响率/%	显著性排序
A	－0.2	0.13	0.031	6	－1.4	5.89	1.58	6
B	0.062	0.011	0.0028	7	－0.79	1.9	0.51	7
C	－1.61	7.79	1.90	4	－1.19	4.24	1.14	5
D	－1.27	4.83	1.18	5	－1.27	4.88	1.31	4
E	5.49	90.37	22.01	2	5.66	96.16	25.79	3
F	8.01	192.4	46.87	1	6.04	109.51	29.37	2
G	5.23	82.01	19.98	3	6.38	122.05	32.74	1

表 6　最陡爬坡试验设计方案及结果

Tab. 6　Test design scheme and results of steepest climb

试验序号	种间碰撞恢复系数 *E*	种间静摩擦因数 *F*	种间滚动摩擦因数 *G*	休止角误差/%	堆积角误差/%
1	0.27	0.07	0.025	26.43	29.16
2	0.36	0.16	0.050	9.76	11.82
3	0.45	0.25	0.075	2.85	4.64
4	0.54	0.34	0.100	10.79	14.72
5	0.63	0.43	0.125	31.57	27.81

三因素二次旋转正交组合试验和回归模型分析；种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数以及种间滚动摩擦因数的优化范围分别为 0.36～0.54、0.16～0.34、0.050～0.100。

1.5　三因素二次旋转正交组合仿真试验

为进一步获取最优接触参数组合，以种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数为试验因素，以休止角误差和堆积角误差为试验指标，进行三因素二次旋转正交组合仿真试验。试验因素编码见表 7，试验方案与试验结果见表 8（*e*、*f*、*g* 为因素编码值），每组试验重复 5 次取平均值。

表 7 仿真试验因素编码

Tab. 7 Simulation test factors and codes

编码	种间碰撞恢复系数 E	种间静摩擦因数 F	种间滚动摩擦因数 G
-1.682	0.36	0.16	0.050
-1	0.40	0.20	0.060
0	0.45	0.25	0.075
1	0.50	0.30	0.090
1.682	0.54	0.34	0.100

表 8 试验设计方案及响应值结果

Tab. 8 Test design scheme and response value results

试验序号	e	f	g	响应值/%	
				Y_1	Y_2
1	-1	-1	-1	6.74	6.93
2	1	-1	-1	3.69	7.21
3	-1	1	-1	7.21	4.36
4	1	1	-1	6.57	6.11
5	-1	-1	1	5.97	6.19
6	1	-1	1	2.57	3.52
7	-1	1	1	7.52	1.14
8	1	1	1	5.74	5.17
9	-1.682	0	0	8.14	2.85
10	1.682	0	0	3.67	4.21
11	0	-1.682	0	3.68	7.65
12	0	1.682	0	6.32	7.34
13	0	0	-1.682	6.89	6.74
14	0	0	1.682	4.21	4.62
15	0	0	0	1.97	1.53
16	0	0	0	2.47	1.34
17	0	0	0	1.56	1.15
18	0	0	0	1.74	0.72
19	0	0	0	2.14	1.26
20	0	0	0	2.64	0.97
21	0	0	0	1.54	2.85
22	0	0	0	2.78	2.44
23	0	0	0	2.67	1.51

1.6 多目标优化方法

本文选取种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数进行优化，设有两个响应值，因此属于多目标优化研究。对于多目标优化问题，通常存在一个最优解集，被称为 Pareto 最优解。首先应用 RSM 法进行正交试验，建立参数与目标之间的关系，之后利用 NSGA－Ⅱ算法进行全局搜索，得到 Pareto 最优前沿。NSGA－Ⅱ算法是由 DEB 提出的一种在多目标遗传算法界非常有效，并基于非支配排序、精英保留策略与多样性维持机制的优化算法，该算法所特有的精英保留策略和多样性维持机制可以确保其计算结果的收敛性与多样性[26-27]。NSGA－Ⅱ算法流程如图 5 所示，优化步骤如下：①确定待优化的接触参数以及试验指标。②利用 RSM 进行试验设计。③从落种仿真试验中获取数据。④对试验结果进行二次方差分析，建立有目标因素的回归模型。⑤利用 NSGA－Ⅱ算法计算 Pareto 最优前沿，得到最优过程。⑥通过排种试验验证最佳工艺参数。

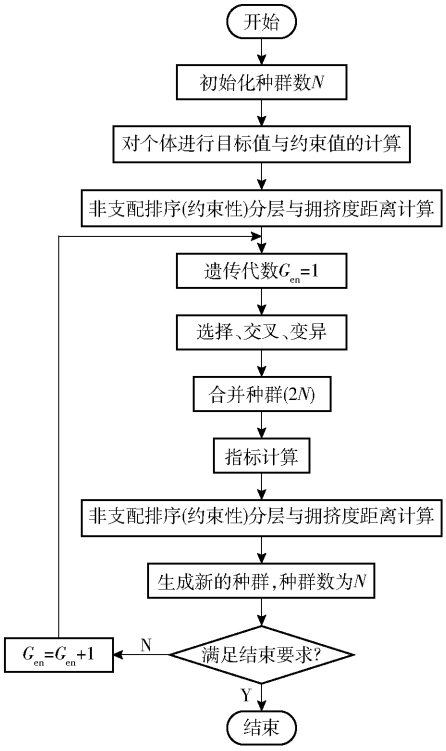


图 5 NSGA－Ⅱ算法流程图

Fig. 5 Flow chart of NSGA－Ⅱ algorithm

2 试验结果与讨论

2.1 数学模型的建立与显著性检验

2.1.1 休止角误差回归模型与显著性检验

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对休止角误差影响的回归模型

$$Y_1 = 173.771\,64 - 468.323\,57E - 255.367\,7F - 803.419\,22G + 175.903\,72EF - 234.130\,91EG + 215.274\,73FG + 466.093\,77E^2 + 354.365\,37F^2 + 5\,472.575\,2G^2 \quad (3)$$

回归方程的显著性检验如表 9 所示，根据表 9 可知，该模型的拟合度是极显著的（$P < 0.01$）。其中 E、F、G、EF、E^2、F^2 以及 G^2 的 P 值均小于 0.05，说明以上各项对休止角误差的影响显著，相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。对于失拟项 $P = 0.464\,3$，不显著，说明不存在其他影响指标的主要因素存在。

2.1.2 堆积角误差回归模型与显著性检验

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对堆积角误差影响的回归模型

表 9　回归方程方差分析

Tab. 9　Variance analysis of regression equation

方差来源	休止角误差				堆积角误差			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	104. 17	9	47. 62	<0. 000 1 **	118. 05	9	14. 62	<0. 000 1 **
E	19. 66	1	80. 91	<0. 000 1 **	2. 36	1	2. 63	0. 128 9
F	11. 46	1	47. 15	<0. 000 1 **	4. 22	1	4. 70	0. 049 3 *
G	3. 5	1	14. 41	0. 002 2 *	10. 82	1	12. 06	0. 004 1 **
EF	2. 03	1	8. 35	0. 012 6 *	8. 34	1	9. 30	0. 009 3 **
EG	0. 277 5	1	1. 14	0. 304 7	0. 056 1	1	0. 062 5	0. 806 5
FG	0. 234 6	1	0. 965 3	0. 343 8	0. 009 1	1	0. 010 2	0. 921 3
E^2	28. 31	1	116. 48	<0. 000 1 **	4. 89	1	5. 45	0. 036 3 *
F^2	16. 36	1	67. 33	<0. 000 1 **	60. 83	1	67. 78	<0. 000 1 **
G^2	23. 24	1	95. 6	<0. 000 1 **	27. 47	1	30. 61	<0. 000 1 **
残差	3. 16	13			11. 67	13		
失拟项	1. 23	5	1. 02	0. 464 3	7. 87	5	3. 32	0. 064 3
误差	1. 93	8			3. 79	8		
总和	107. 33	22			129. 72	22		

注：* 表示相关性显著，** 表示相关性极显著。

$$Y_2 = 157.903\,25 - 247.843\,26E - 515.660\,2F - 915.713\,49G + 356.608\,79EF - 105.280\,34EG + 42.426\,41FG + 193.728\,02E^2 + 683.234\,19F^2 + 5\,950.715\,16G^2 \quad (4)$$

回归方程的显著性检验如表 9 所示，根据表 9 可知，该模型的拟合度极显著（$P<0.01$）。其中 E、F、G、EF、E^2、F^2 以及 G^2 的 P 值均小于 0. 05，说明以上各项对休止角误差的影响显著，相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。对于失拟项 $P=0.064\,3$，不显著，说明不存在其他影响指标的主要因素存在。

2. 2　各因素对试验指标的影响

2. 2. 1　各因素交互作用对休止角误差的影响

对数据进行处理，可得到种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数对休止角误差的影响，其响应曲面如图 6 所示。由图可知，等高线呈现较大曲率的椭圆形，各因素交互影响显著。在种间碰撞恢复系数为 0. 42 ~ 0. 48、种间静摩擦因数为 0. 22 ~ 0. 28、种间滚动摩擦因数为 0. 068 ~ 0. 082 时，休止角误差较小。

2. 2. 2　各因素交互作用对堆积角误差的影响

各因素对堆积角误差交互作用的响应曲面如图 7 所示。由图可知，种间静摩擦因数与种间滚动摩擦因数对堆积角误差影响较显著，在种间静摩擦因数为 0. 22 ~ 0. 28、种间滚动摩擦因数为 0. 068 ~ 0. 082 时，休止角误差较小。

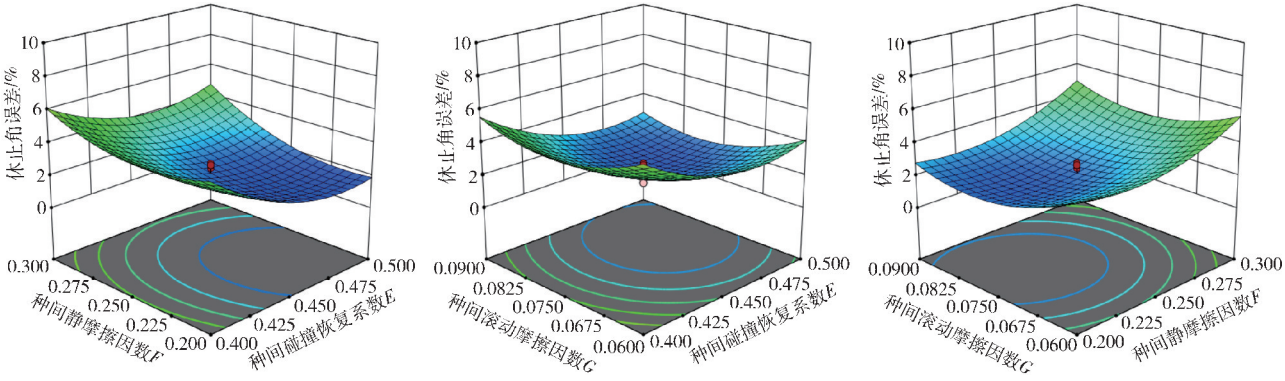


图 6　各因素交互作用对休止角误差的影响

Fig. 6　Influence of each factor on interaction of repose angle error

2. 3　NSGA－Ⅱ算法优化

本文以最小休止角误差和最小堆积角误差为优化目标，以种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数为优化对象进行研究。在最陡爬坡试验的基础上，确定种间碰撞恢复系数为 0. 36 ~ 0. 54，种间静摩擦因数为 0. 16 ~ 0. 34，种间滚动摩擦因数为 0. 05 ~ 0. 10。因此，优化问题的目标函数和约束函数为

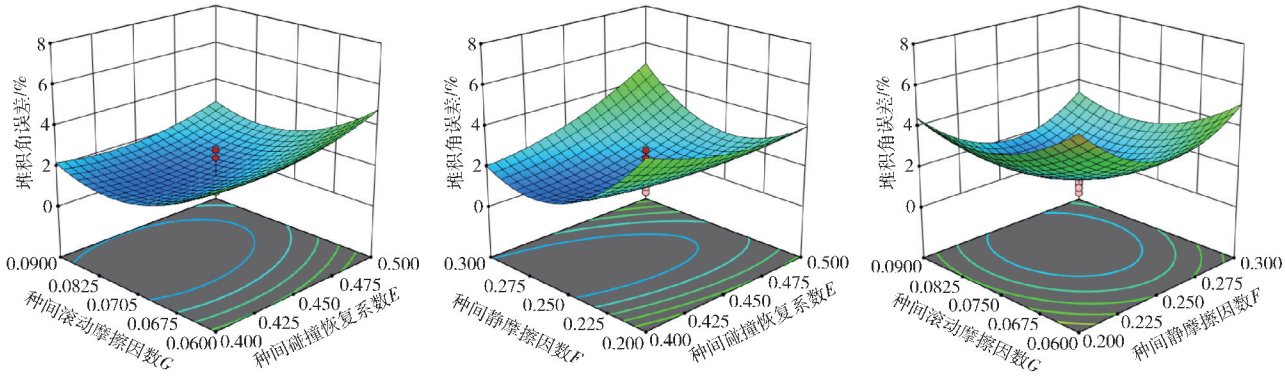


图 7 各因素交互作用对堆积角误差的影响

Fig. 7 Influence of various factors on interaction of accumulation angle error

$$\begin{cases}\min(Y_1(E,F,G),Y_2(E,F,G))\\ \text{s. t.}\begin{cases}0.36\leqslant E\leqslant 0.54\\0.16\leqslant F\leqslant 0.34\\0.05\leqslant G\leqslant 0.10\end{cases}\end{cases}\tag{5}$$

用 NSGA－Ⅱ算法求解优化模型得到的 Pareto 最优解曲线如图 8 所示。对于多目标优化问题，不可能使每个目标同时最优。但可以在目标之间进行协调和权衡，以尽可能地满足每个目标，这意味着最优边界上的所有解都可以用于方案优化。在兼顾休止角误差和堆积角误差的原则下，选取种间碰撞恢复系数为 0.47，种间静摩擦因数为 0.24，种间滚动摩擦因数为 0.08，此时休止角误差为 1.687%，堆积角误差为 1.683%。

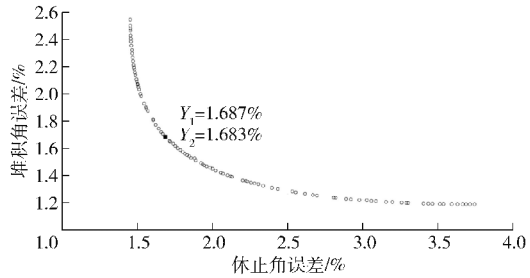
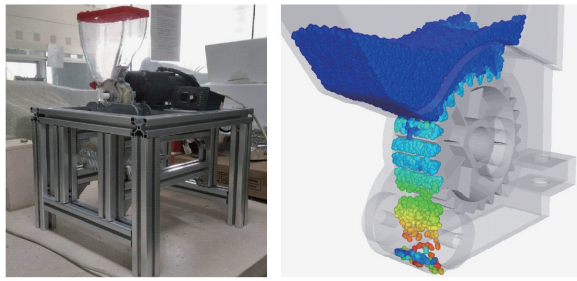


图 8 基于 NSGA－Ⅱ的 Pareto 最优解曲线

Fig. 8 Pareto optimal set based on NSGA－Ⅱ

3 验证试验

为进一步验证苜蓿离散元模型和仿真参数的可靠性，采用槽轮式排种器进行试验验证，以排种质量流率为试验指标，在不同排种轮转速条件下(10～60 r/min)对比质量流率的实测值和仿真值。选取中苜一号苜蓿种子进行台架试验，排种轮采用 3D 打印，台架如图 9a 所示。试验时，首先在种箱中加入适量紫花苜蓿种子，打开步进电机的电源，调节电机转速，种子下落至排种器下方的收集盘中，待种子均匀排出时，每隔 1 min 记录 1 次圆盘中种子的质量，计算排种器的质量流率，重复 5 次取平均值。将排种器的简化模型、苜蓿种子离散元模型和标定的接触参数导入离散元软件 EDEM 中，在与台架试验相同条件下进行仿真试验，输出排种器质量流率，仿真试验如图 9b 所示。



(a) 台架试验 (b) 仿真试验

图 9 验证试验

Fig. 9 Verification test

图 10 为不同转速条件下质量流率的实测值和仿真值。由图可知，质量流率的实测值和仿真值与排种轮转速的变化趋势一致，两者平均相对误差为 2.89%，表明该苜蓿离散元模型和接触参数可用于离散元仿真试验。

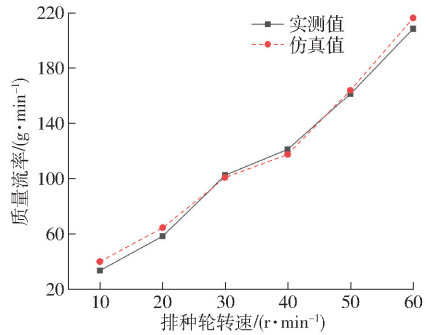


图 10 不同转速条件下质量流率的实测和仿真结果

Fig. 10 Measured and simulated values of mass flow rate at different rotational speeds

4 结论

(1)设计了一种可同时获取物料休止角与堆积角的装置，以苜蓿种子为研究对象，通过实际落种试验，并采用 Matlab 数字图像处理技术，测定苜蓿种子休止角为 40.64°、堆积角为 31.28°。

(2)采用 Hertz－Mindlin 无滑移模型以及球面堆积法,在 EDEM 软件中建立苜蓿种子离散元模型,并进行了落种仿真试验;以休止角相对误差和堆积角相对误差为试验指标,进行 Plackett－Burman 试验,筛选出对指标影响显著的 3 个因素分别为:种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数、种间滚动摩擦因数。以这 3 个因素为试验因素,以休止角误差和堆积角误差为试验指标,进行了三因素二次旋转正交组合试验。通过方差分析可知,3 个试验因素及其二次方项对休止角误差的影响显著($P<0.05$)。对各因素指标的交互作用进行分析,并获得了因素与指标之间的回归数学模型。

(3)以最小休止角误差和最小堆积角误差为优化目标,以种间碰撞恢复系数、种间静摩擦因数和种间滚动摩擦因数为优化对象,采用 NSGA－Ⅱ对回归数学模型进行求解,获取了 Pareto 最优解集。在兼顾休止角误差和堆积角误差的原则下,选取种间碰撞恢复系数为 0.47、种间静摩擦因数为 0.24、种间滚动摩擦因数为 0.08,此时休止角误差为 1.687%,堆积角误差为 1.683%。

(4)采用槽轮式排种器进行试验验证,搭建排种试验台架进行实际排种试验,并在 EDEM 软件中进行仿真试验。结果表明,在不同排种轮转速下,苜蓿种子质量流率的实测值和仿真值平均相对误差为 2.89%,该苜蓿种子离散元模型和接触参数可用于离散元仿真试验。

参　考　文　献

[1] 顿国强,范芯蕊,杨永振,等. 基于离散元的插装式大豆排种器改进设计及试验[J]. 华中农业大学学报,2020,39(3):135－144.
DUN Guoqiang, FAN Xinrui, YANG Yongzhen, et al. Improved design and experiment of a plug-in soybean seed metering device based on discrete element[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020,39(3):135－144. (in Chinese)

[2] 王龙,胡灿,贺小伟, 等. 基于离散元法立式饲料搅拌机混合过程的模拟[J]. 饲料工业,2020,41(3):6－10.
WANG Long, HU Can, HE Xiaowei, et al. Simulation of mixing process in vertical feed mixer based on discrete element method[J]. Feed Industry,2020,41(3):6－10. (in Chinese)

[3] 刘亚夫,吴志立,聂也之, 等. 基于 EDEM 的双排型孔轮式油菜排种器的排种性能分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(5):554－559.
LIU Yafu, WU Zhili, NIE Yezhi, et al. Seeding performance of double hole-wheel seedmeter for rapeseed based on EDEM[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences),2019,45(5):554－559. (in Chinese)

[4] 郭小军,张海东,吴进玲, 等. 基于 EDEM 的勺轮式葵花排种器离散元仿真研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(2):19－24.
GUO Xiaojun, ZHANG Haidong, WU Jinling, et al. Simulation research on spoon-type seed metering device of sunflower seed based on EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(2):19－24. (in Chinese)

[5] 秦伟,于英杰,赖庆辉, 等. 三七种子的大小对窝眼轮排种器充种性能的影响[J]. 华南农业大学学报,2019,40(4):126－132.
QIN Wei, YU Yingjie, LAI Qinghui, et al. Effect of *Panax notoginseng* seed size on seed-filling performance of the socket-roller seeding apparatus[J]. Journal of South China Agricultural University,2019,40(4):126－132. (in Chinese)

[6] 许健,蔡宗寿,甘义权, 等. 基于 EDEM 的倾斜圆盘勺式大豆排种器清种过程优化研究[J]. 东北农业大学学报,2018,49(10):79－88.
XU Jian, CAI Zongshou, GAN Yiquan, et al. Optimization study on seed clearing process for declined disc-scoop-type soybean seed metering device based on EDEM[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2018,49(10):79－88. (in Chinese)

[7] 才璐,王林林,罗珠珠, 等. 中国苜蓿产量及水分利用效率对种植年限响应的 Meta 分析[J]. 草业学报,2020,29(6):27－38.
CAI Lu, WANG Linlin, LUO Zhuzhu, et al. Meta-analysis of alfalfa yield and WUE response to growing ages in China[J]. Acta Prataculturae Sinica,2020,29(6):27－38. (in Chinese)

[8] 陈志宏,李新一,王加亭, 等. 中国苜蓿种质资源保护及创新利用[J]. 种子,2020,39(5):59－63.
CHEN Zhihong, LI Xinyi, WANG Jiating, et al. Conservation and innovative utilization of alfalfa germplasm resources in China[J]. Seed,2020,39(5):59－63. (in Chinese)

[9] 李旺,马召稳,李元晓, 等. 苜蓿青贮优势菌种筛选及应用效果[J]. 动物营养学报,2020,32(4):1883－1890.
LI Wang, MA Zhaowen, LI Yuanxiao, et al. Screening and application effects of dominant strains of alfalfa silage[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2020,32(4):1883－1890. (in Chinese)

[10] GRIMA A P, WYPYCH P W. Development and validation of calibration methods for discrete element modelling[J]. Granular Matter, 2011,13(2): 127－132.

[11] HORABIK J, MOLENDA M J B E. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review[J]. Biosystems Engineering, 2016,147:206－225.

[12] 温翔,杨望,郭无极, 等. 切段式甘蔗收割机排杂离散元仿真参数标定及验证[J]. 中国农机化学报,2020,41(1):12－18.
WEN Xiang, YANG Wang, GUO Wuji, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of segmented sugarcane harvester for impurity removal[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 12－18. (in Chinese)

[13] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):123－132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2002014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.

issn. 1000-1298. 2020. 02. 014. (in Chinese)
[14] 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/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):93 - 99.
LU Fangyuan, MA Xu, TAN Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2):93 - 99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180212&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.012. (in Chinese)
[15] 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.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22):36 - 42. (in Chinese)
[16] 张涛,刘飞,赵满全,等. 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[J]. 中国农业大学学报,2017,22(9):86 - 92.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Measurement of physical parameters of contact between soybean seed and seed metering device and discrete element simulation calibration[J]. Journal of China Agricultural University, 2017,22(9):86 - 92. (in Chinese)
[17] 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):49 - 56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):49 - 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170306&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006. (in Chinese)
[18] 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/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 fed 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. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)
[19] 罗帅,袁巧霞,SHABAN G,等. 基于 JKR 粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):343 - 350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, SHABAN G, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):343 - 350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180440&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.040. (in Chinese)
[20] GHODKI B M, PATEL M, NAMDEO R, et al. Calibration of discrete element model parameters: soybeans[J]. Computational Particle Mechanics,2018,6(1):3 - 10.
[21] WANG L, LI R, WU B, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. Particuology,2018,38:185 - 195.
[22] MOUSAVIRAAD M, TEKESTE M Z, ROSENTRATER K A. Calibration and validation of a discrete element model of corn using grain flow simulation in a commercial screw grain auger[J]. Transactions of the ASABE,2017,60(4):1403 - 1415.
[23] ILELEJI K, ZHOU B. The angle of repose of bulk corn stover particles[J]. Powder Technology,2008,187(2):110 - 118.
[24] VELICKY B, CAROLI C. Pressure dependence of the sound velocity in a two-dimensional lattice of Hertz - Mindlin balls: mean-field description[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics,2002,65(2):021307.
[25] 吴佳胜,曹成茂,谢承健, 等. 前胡种子物性参数测定及其离散元仿真模型参数标定[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(4):180 - 189.
WU Jiasheng, CAO Chengmao, XIE Chengjian, et al. Measurement of physical parameters of *Radix peucedani* seeds and parameter calibration of discrete element simulation model[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2019,54(4):180 - 189. (in Chinese)
[26] 周瑜哲. 基于 NSGA - Ⅱ算法的多层共挤吹塑装备张力控制系统研究[J]. 制造业自动化,2020,42(2):24 - 27,54.
ZHOU Yuzhe. Study of tension control methods for multi-layer co-extrusion blow equipment based on NSGA - Ⅱ algorithm[J]. Manufacturing Automation,2020,42(2):24 - 27,54. (in Chinese)
[27] FU Jun, YUAN Haikuo, ZHANG Depeng, et al. Multi-objective optimization of process parameters of longitudinal axial threshing cylinder for frozen corn using RSM and NSGA - Ⅱ[J]. Applied Sciences,2020,10(5):1646.