

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.01.007

黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定

孙景彬^{1,2} 刘 琪^{1,2} 杨福增^{1,2} 刘志杰^{1,2} 王 峥³

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业农村部北方农业装备科学观测实验站, 陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对黄土高原坡地土壤-旋耕部件互作机理研究以及坡地专用旋耕机具设计缺乏准确可靠离散元仿真参数的问题,以典型坡地粘壤土(含水率 13.4% ± 1%)为研究对象,选取 EDEM 中 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 接触模型,对相关仿真参数进行标定。首先,对土壤颗粒间接触参数进行了标定,以土壤颗粒的仿真堆积角为响应值,基于 Design-Expert 软件中 Box - Behnken 的方法,确定了土壤堆积角的回归模型;通过模型寻优得到了恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数及表面能参数分别为 0.15、0.33、0.05 和 9.04 J/m²,此时土壤堆积角仿真值为 41.59°,与实测值相对误差为 3.8%。其次,对土壤与旋耕刀材料 65Mn 钢的接触参数进行了标定:通过静摩擦、斜板及碰撞等试验得到了土壤与 65Mn 钢之间静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数的范围,进一步以土壤在 65Mn 钢板上的静滑动摩擦角为响应值,基于 Box - Behnken 的方法得到了土壤静滑动摩擦角的回归模型;对该模型寻优得到了土壤颗粒与 65Mn 钢间的静摩擦因数、滚动摩擦因数及恢复系数分别为 0.50、0.06 和 0.18,此时静滑动摩擦角仿真值为 24.0°,与实测值相对误差为 1.7%。最后,通过坡地旋耕试验验证模型参数的有效性:土壤颗粒水平、侧向位移实测值和仿真值最大相对误差分别为 4.3% 和 5.1%。结果表明标定的参数准确可靠。

关键词: 黄土高原; 坡地土壤; 旋耕; 离散元法; 参数标定

中图分类号: S152.9; S220.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0063-11 OSID: 

Calibration of Discrete Element Simulation Parameters of Sloping Soil on Loess Plateau and Its Interaction with Rotary Tillage Components

SUN Jingbin^{1,2} LIU Qi^{1,2} YANG Fuzeng^{1,2} LIU Zhijie^{1,2} WANG Zheng³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Scientific Observing and Experimental Station of Agricultural Equipment for the Northern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming at the problem of lack of accurate and reliable discrete element simulation parameters for the research on the interaction mechanism of soil-rotary tillage components with sloping soil on the Loess Plateau and the optimized design of special rotary tillage equipment, taking the typical slope clay loam soil with common moisture content of 13.4% ± 1% on the Loess Plateau as the research object, the relevant parameters were calibrated based on Hertz - Mindlin with JKR Cohesion contact model in EDEM. Firstly, the contact parameters between soil particles were calibrated. The simulated accumulation angle of soil particles was used as the response value, the regression model of soil accumulation angle was obtained based on the Box - Behnken optimization method in the Design-Expert software. The regression model was optimized by using the measured accumulation angle as the target, and the optimization results of restitution coefficient, static friction coefficient, rolling friction coefficient and surface energy parameters between soil particles were 0.15, 0.33, 0.05 and 9.04 J/m², respectively. Under the optimal parameter combination, the simulation value of soil accumulation angle was 41.59°, and the relative error with the measured value was 3.8%. Then, the contact parameters

收稿日期: 2021 - 09 - 15 修回日期: 2021 - 10 - 20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700503)和陕西省科技重大专项(2020zdxc03 - 04 - 01)

作者简介: 孙景彬(1992—),男,博士生,主要从事丘陵山地农机系统-坡地土壤互作机理研究, E-mail: sunjingbin0208@163.com

通信作者: 杨福增(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事丘陵山地智能农机装备研究, E-mail: yangfzk@nwfu.edu.cn

between soil and rotary tillage knife material 65Mn steel were calibrated. The numerical range of the above three parameters between soil and 65Mn steel was obtained by static friction test, oblique plate test and impact test. Based on this, the static sliding friction angle of soil on 65Mn steel was obtained based on Box – Behnken optimization method. The regression model was optimized by using the measured static sliding friction angle as the target, and the optimization results of static friction coefficient, rolling friction coefficient and restitution coefficient between soil particles and 65Mn steel were 0.50, 0.06 and 0.18, respectively. Under the optimal parameter combination, the simulation value of static sliding friction angle was 24.0° , and the relative error with the measured value was 1.7%. Finally, through the comparative analysis of field test and simulation test of slope rotary tillage, it was concluded that the maximum relative errors of horizontal and lateral displacement of soil particles were 4.3% and 5.1% respectively, within the acceptable range. It showed that the calibration results and research methods of discrete element simulation parameters were accurate and reliable.

Key words: Loess Plateau; sloping soil; rotary tillage; discrete element method; parameters calibration

0 引言

我国黄土高原丘陵区是黄土高原重要农业区,该地区光照充足,适合种植小麦、玉米、马铃薯、谷子和荞麦等农产品^[1]。农作物播种前的旋耕作业是黄土高原坡耕地种植粮食作物时重要耕作工序之一^[1-2],因此,研发适用于坡地作业的专用高性能旋耕装备来减少坡地土壤的耕作侵蚀、有效保持水土,对促进黄土高原地区农业的发展至关重要。设计高效作业机具的首要前提是明确坡地土壤与触土部件间的相互作用机制,土槽、田间试验只能分析土壤宏观扰动状况,不能从微观的角度去剖析运动规律^[3],大量研究表明,离散元法可以模拟分析土壤颗粒与农具部件之间的相互作用关系,可为机具设计提供新的方法^[4],然而,农具部件与土壤之间的相互作用受到土壤性质及土壤动态作用的直接影响,对于不同类型的土壤,其影响效应差异显著,因此,在基于离散元法开展农具部件与土壤互作关系研究之前,对土壤颗粒间、土壤与触土部件间的仿真参数进行标定是首要工作。

目前,国内外专家学者基于离散元法在土壤参数标定、土壤-机器互作关系研究等方面做了一定研究。UCGUL等^[5]综合 Hertz – Mindlin 及 Hysteretic Spring 典型模型研究了土壤颗粒间的粘结力对其塑性形变的影响规律;AIKINS等^[6]整合 Hysteretic Spring 模型和 Linear Cohesion 模型对高粘度土壤的静摩擦因数和滚动摩擦因数进行了标定,并经开沟试验验证了参数标定的准确性;ZENG等^[7]建立了土壤-农具-秸秆残茬相互作用的离散元仿真模型,并以4种不同的铲进行仿真试验和土槽试验,最终验证模型的有效性;MILKEVYCH等^[8]基于离散法建立了除草过程中土壤与触土部件相互作用引起土壤位移的研究模型,模拟试验和实测试验表明土壤位移具有一致性;UCGUL等^[9]采用离散元法模拟了

土壤与板型犁之间的相互作用,经仿真试验与实地试验比较耕作牵引力以及犁沟剖面,结果表明离散元法精度可靠。石林榕等^[10]基于延迟弹性模型和线性粘附模型的优点对6种含水率的农田土壤进行模型参数标定,经鸭嘴插穴试验验证了模型的有效性;张锐等^[11]基于 Hertz – Mindlin 模型,经过堆积角试验完成沙土颗粒的模型参数标定;李俊伟等^[12]基于 Hertz – Mindlin with JKR Cohesion 模型标定了东北黑土颗粒接触参数及其与触土部件间接接触参数,为高含水率黏土参数标定提供参考;向伟等^[13]经堆积试验完成了南方黏壤土的仿真参数标定,成穴试验验证了标定参数的有效性;田辛亮等^[14]选用 Hertz – Mindlin with JKR 接触模型对黑土区玉米秸秆-土壤混料的离散元仿真接触参数进行标定,试验验证了仿真模型参数的可靠性。

上述土壤参数标定的研究主要是针对沙土、东北黑黏土、海南砖红黏土等土壤类型,并以特定的作业工况为研究目标,对于黄土高原典型坡地粘壤土并不适用。因此,本文针对典型坡地土壤与旋耕部件互作机理探究缺乏准确可靠离散元仿真模型参数,以及坡地旋耕作业耕作侵蚀现象严重的现实问题,拟选取 Hertz – Mindlin with JKR Cohesion 为接触模型,采用仿真试验与物理试验结合的方法,对土壤颗粒之间以及土壤颗粒与旋耕刀材料 65Mn 钢间的离散元仿真参数进行标定,并基于自主研发的丘陵山地履带拖拉机进行坡地旋耕田间试验和仿真试验,以期获得准确可靠的坡地旋耕土壤离散元仿真参数。

1 土壤颗粒仿真模型参数标定

1.1 接触模型选取

黄土高原坡地以粘壤土居多,经调研和文献^[15]知该区域土壤含水率一般为 10% ~ 15%。鉴于本文的接触模型建立主要是为后续坡地土壤-

旋耕刀互作机理研究做铺垫,故接触模型的选取需充分考虑模型间的粘结力对颗粒运动的影响。

离散元法中的 Hertz - Mindlin 接触模型只考虑了颗粒的弹性形变,没有涉及颗粒间粘结力影响^[3],故不能准确模拟土壤在旋耕部件扰动下的运动行为;Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型适用于粘结颗粒且广泛使用^[16-18],但该模型是基于粘结键将颗粒吸附在一起,粘结键在外力作用下断裂后颗粒会单独存在,这与实际情况不相符,严重影响仿真结果,此模型较适合模拟材质较为坚硬的物料,如混凝土、岩石等^[11];Hertz - Mindlin with JKR 接触模型是粘结性颗粒接触模型,考虑了颗粒粘结力对其运动的影响,适用于模拟有一定水分或静电存在的物料(如具有一定湿度的土壤等)^[19-22],故选用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型,其具体架构参考文献^[3]。

1.2 模型参数类型及标定

离散元仿真模型中参数类型有材料本征参数、材料接触参数和接触模型参数。材料本征参数是指材料自身特征参数,可通过试验或查阅文献获得;材料接触参数可经试验测定或仿真试验标定得到;接触模型参数主要是 JKR 表面能,对于坡地旋耕土壤,研究其在旋耕刀扰动下的运动规律要考虑土壤颗粒间粘结力的影响,故需标定 JKR 表面能。

1.2.1 试验材料及其本征参数

采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪(图 1a)对土壤样本的粒径百分含量进行检测,结果显示:粘粒(粒径 $d < 0.002\text{ mm}$)占比 23.11%,粉粒($0.002\text{ mm} \leq d \leq 0.02\text{ mm}$)占比 30.78%,砂粒($0.02\text{ mm} \leq d \leq 2\text{ mm}$)占比 46.11%,按照文献^[23]中的“国际制土壤质地分类三角图”方法对土壤类型进行划分,可得土壤类型属于黄土高原典型的粘壤土。采用图 1b 所示的奥豪斯 MB23 型水分快速分析仪(美国)实测 0~200 mm 深度土层平均含水率为 $13.4\% \pm 1\%$;采用环刀(容积 $2 \times 10^{-4}\text{ m}^3$)取土和电子天平(量程 500 g,精度 0.001 g)测量土壤的湿密度,试验重复 10 次求均值,将 $1\,210\text{ kg/m}^3$ 作为最终仿真参数。

采用筛析法^[24]对土壤的颗粒度进行分析,首先用奥豪斯 MB23 型水分快速分析仪(图 1b)将土样干燥至恒质量并研碎土壤固结体,使用不同孔径的标准检验筛在土壤振筛机(图 1c)上进行筛分,得到粒径大于 4 mm、1~4 mm、0~1 mm 的土壤占比分别为 25.61%、19.84%、54.55%。离散元仿真中,土壤颗粒粒径、形状会较大程度地影响仿真结果和效率^[25]。因此,为保证离散元仿真的可靠性,仿真试验中设置土壤粒径及百分比:4 mm 土壤颗粒

25.61%、2.5 mm 土壤颗粒 19.84%、1 mm 土壤颗粒 54.55%。为了提高离散元仿真的效率,利用 EDEM 软件中的球形颗粒替代不同形状类型的颗粒。



图 1 土壤本征参数测量仪器
Fig. 1 Measuring instruments for soil intrinsic parameters

根据广义胡克定律可以推导出侧压力系数与泊松比的关系^[10]为

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0} \tag{1}$$

式中 ν ——泊松比 K_0 ——侧压力系数

侧压力系数与内摩擦角间关系^[10,26]为

$$K_0 = 1 - \sin\varphi \tag{2}$$

式中 φ ——内摩擦角,直剪试验测得为 19.9°

通过计算得到试验土壤样品的泊松比为 0.40;参照文献^[18]设定土壤剪切模量为 $1 \times 10^6\text{ Pa}$ 。

1.2.2 土壤堆积角物理试验

配置含水率为 $13.4\% \pm 1\%$ 的土壤,搭建如图 2a 所示堆积角测定试验台,选用的漏斗口径为 25 mm,漏斗顶部直径 230 mm,高为 210 mm,将其固定于专用铁架台一侧,漏斗出口与接料底板间距 100 mm。开始堆积角试验前,先将漏斗出口堵住,将试验土壤倒入,打开漏斗口让土壤自然流出,待土壤全部流出静置后,使用手持式量角器随机从堆形的 5 个方位测量堆积角取均值,作为 1 次试验的测量值,如图 2b 所示,共重复 5 次试验取均值得到含水率 $13.4\% \pm 1\%$ 的土壤堆积角为 43.25° 。

1.2.3 土壤堆积角仿真试验

参照文献^[12]的方法,基于 SolidWorks 软件建立试验台的三维模型,如图 3a 所示,其几何尺寸与物理试验中漏斗的尺寸保持一致,仿真试验如图 3b 所示。

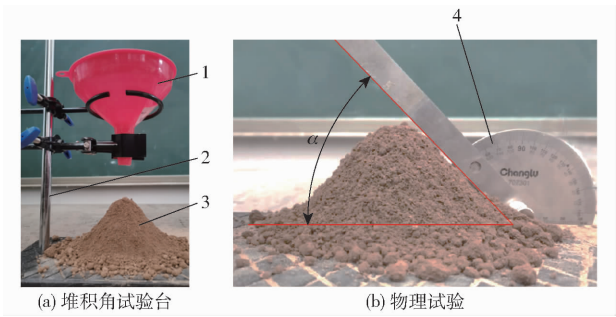


图 2 土壤堆积角测定试验

Fig. 2 Determination test for soil repose angle

1. 漏斗 2. 支架 3. 土壤 4. 量角器

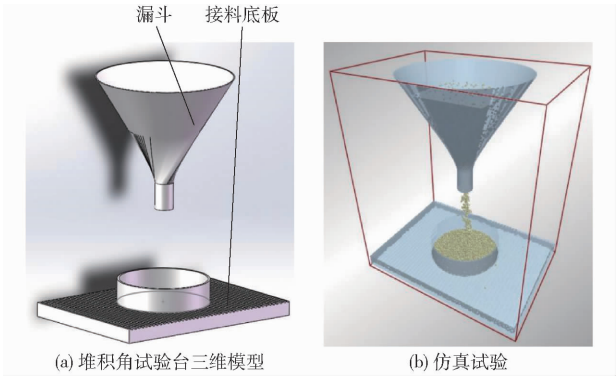


图 3 土壤堆积角仿真试验

Fig. 3 Simulation test for soil repose angle

将仿真规模(小规模)、堆积角(43.25°)和材料堆积密度(1 210 kg/m³)等输入 EDEM 颗粒材料数据库(Generic EDEM material model database, GEMM)中,确定了需要标定的接触模型参数为 JKR 表面能 4~12 J/m²、恢复系数 0.15~0.75、静摩擦因数 0.32~0.68、滚动摩擦因数 0.01~0.05。

1.3 标定试验设计

基于上述土壤模型的参考值范围,以堆积角为试验评价指标,依据 Design-Expert 软件的 Box- Behnken 优化方法开展标定试验。试验因素编码如表 1 所示。

表 1 土壤堆积角仿真试验因素编码

Tab.1 Factors and codes of simulation test for soil repose angle

编码	因素			
	JKR 表面能	土壤间恢复	土壤间静	土壤间滚动
	$x_1/(J \cdot m^{-2})$	系数 x_2	摩擦因数 x_3	摩擦因数 x_4
-1	4	0.15	0.32	0.01
0	8	0.45	0.50	0.05
1	12	0.75	0.68	0.10

对同一接触参数下的堆积仿真试验重复 3 次,分别从生成土堆的 2 个不同方向截取图像,在 CAD 软件构建参考线并测量堆积角,结果如表 2 所示。

表 2 土壤堆积角仿真试验方案设计与结果

Tab.2 Results and simulation test design for soil repose angle

序号	因素				堆积角/ (°)
	JKR 表面能	恢复系数	静摩擦	滚动摩擦	
	$x_1/(J \cdot m^{-2})$	x_2	因数 x_3	因数 x_4	
1	8	0.15	0.68	0.05	42.99
2	8	0.45	0.50	0.05	39.52
3	8	0.45	0.68	0.10	42.98
4	8	0.15	0.50	0.01	39.14
5	8	0.75	0.68	0.05	16.45
6	8	0.15	0.50	0.10	44.59
7	8	0.45	0.50	0.05	44.55
8	12	0.45	0.68	0.05	53.47
9	8	0.45	0.50	0.05	39.50
10	8	0.75	0.50	0.01	11.81
11	4	0.45	0.50	0.10	32.38
12	4	0.45	0.68	0.05	27.06
13	4	0.75	0.50	0.05	13.20
14	12	0.45	0.50	0.01	47.60
15	12	0.75	0.50	0.05	24.11
16	8	0.45	0.32	0.10	49.55
17	8	0.75	0.50	0.10	22.48
18	8	0.45	0.68	0.01	32.84
19	12	0.15	0.50	0.05	40.34
20	8	0.15	0.32	0.05	45.35
21	8	0.45	0.50	0.05	43.83
22	12	0.45	0.32	0.05	50.89
23	4	0.45	0.32	0.05	28.39
24	8	0.75	0.32	0.05	18.47
25	12	0.45	0.50	0.10	56.59
26	4	0.15	0.50	0.05	43.42
27	8	0.45	0.32	0.01	33.05
28	4	0.45	0.50	0.01	19.39
29	8	0.45	0.50	0.05	39.18

对上述试验结果开展方差分析,结果如表 3 所示,对试验结果开展多元回归分析得到堆积角回归模型为

$$y = 41.32 + 13.11x_1 - 12.36x_2 - 10.44x_3 + 5.41x_4 + 3.50x_1x_2 + 0.98x_1x_3 - x_1x_4 - 0.92x_2x_3 + 1.31x_2x_4 - 2.84x_3x_4 + 4.06x_1^2 - 5.43x_2^2 - 4.08x_3^2 - 6.39x_4^2 + 0.75x_1^2x_2 + 10.76x_1^2x_3 + 0.085x_1^2x_4 - 11.15x_1x_2^2 - 0.88x_1x_3^2 + 8.35x_2^2x_3 - 1.38x_2^2x_4 + 0.005x_2x_3^2 - 9.68x_1^2x_2^2 - 1.35x_1^2x_3^2 \quad (3)$$

回归方程的决定系数 $R^2 = 0.9940$,校正决定系数 $R^2_{Adj} = 0.9578$ 。由表 3 可知,该回归模型的 $P = 0.0027 < 0.01$,表明模型非常显著,可基于该模型对土壤的堆积角进行预估。在上述 4 个因素中, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 对土壤堆积角的影响均显著,显著性由大到小为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ,其中 x_1 、 x_2 、 x_3 对堆积角的影响非

常显著;所有因素的交互作用对土壤堆积角影响均不显著; x_4^2 的影响非常显著, x_2^2 、 x_3^2 的影响显著, x_1^2 的影响不显著; $x_1^2x_3$ 、 $x_1x_2^2$ 对堆积角的影响非常显著, $x_2^2x_3$ 的影响显著, 其余因素的二次方与一次方项交互作用的影响不显著; $x_1^2x_2^2$ 影响显著, 其余二次方项的交互作用影响均不显著。

表 3 回归模型的方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression model

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	4 598. 36	24	191. 60	27. 50	0. 002 7
x_1	686. 96	1	686. 96	98. 61	0. 000 6
x_2	611. 08	1	611. 08	87. 72	0. 000 7
x_3	436. 39	1	436. 39	87. 72	0. 001 4
x_4	117. 07	1	117. 07	16. 81	0. 014 9
x_1x_2	48. 93	1	48. 93	7. 02	0. 057 0
x_1x_3	3. 82	1	3. 82	0. 55	0. 500 0
x_1x_4	4. 00	1	4. 00	0. 57	0. 490 8
x_2x_3	3. 35	1	3. 35	0. 48	0. 526 2
x_2x_4	6. 81	1	6. 81	0. 98	0. 378 7
x_3x_4	32. 26	1	32. 26	4. 63	0. 097 8
x_1^2	33. 80	1	33. 80	4. 85	0. 092 4
x_2^2	123. 94	1	123. 94	17. 79	0. 013 5
x_3^2	69. 94	1	69. 94	10. 04	0. 033 9
x_4^2	171. 68	1	171. 68	24. 64	0. 007 7
$x_1^2x_2$	1. 12	1	1. 12	0. 16	0. 709 2
$x_1^2x_3$	231. 45	1	231. 45	33. 32	0. 004 5
$x_1^2x_4$	0. 014	1	0. 014	$2. 07 \times 10^{-3}$	0. 965 9
$x_1x_2^2$	248. 53	1	248. 53	35. 68	0. 003 9
$x_1x_3^2$	1. 54	1	1. 54	0. 22	0. 662 7
$x_2^2x_3$	139. 44	1	139. 44	20. 02	0. 011 0
$x_2^2x_4$	3. 81	1	3. 81	0. 55	0. 500 7
$x_2x_3^2$	5×10^{-5}	1	5×10^{-5}	$7. 177 \times 10^{-6}$	0. 998 0
$x_1^2x_2^2$	93. 75	1	93. 75	13. 46	0. 021 4
$x_1^2x_3^2$	1. 82	1	1. 82	0. 26	0. 636 6
纯误差	27. 86	4	6. 97		
总和	4 626. 23	28			

根据 Design-Expert 软件中参数优化模块,以含水率 $13.4\% \pm 1\%$ 的土壤堆积角 43.25° 为目标对堆积角回归模型进行寻优,找到与堆积角实测值最接近的 1 组解,即土壤颗粒之间的 JKR 表面能 9.04 J/m^2 ,恢复系数 0.15、静摩擦因数 0.33、滚动摩擦因数 0.05,该最优解下堆积角仿真值为 41.59° ,与实测值 (43.25°) 相对误差为 3.8%。其中,仿真试验与物理试验如图 4 所示。

2 土壤与旋耕刀材料接触模型参数标定

旋耕机触土部件旋耕刀常用材料为 65Mn 钢,本征参数^[27]如表 4 所示。土壤与旋耕刀之间的接触模型选取Hertz – Mindlin (no slip),首先采用静摩

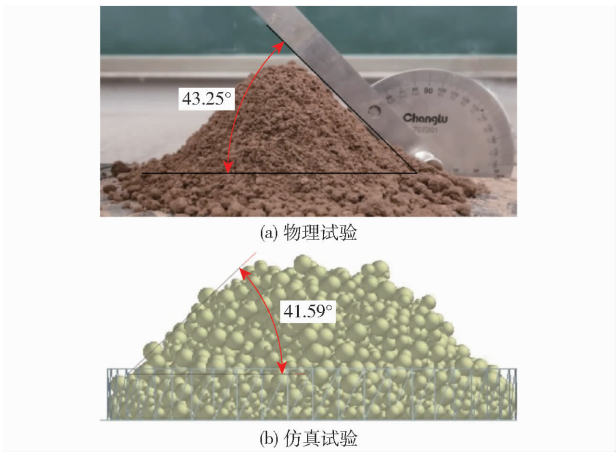


图 4 土壤堆积角物理试验与仿真试验的堆形对比
Fig.4 Stacked shape comparison between physical and simulation test of soil repose angle

表 4 65Mn 钢的本征参数

Tab.4 Intrinsic parameters of 65Mn steel

参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 865
泊松比	0.3
剪切模量/MPa	7.9×10^4

擦试验、斜面试验和斜板碰撞试验分别获得土壤与 65Mn 钢之间静摩擦因数、滚动摩擦因数、碰撞恢复系数范围,最后采用土壤滑落试验标定上述 3 个参数。

2.1 静摩擦因数测定

搭建如图 5 所示的斜板试验台来进行静摩擦试验,其中,土块受力平衡方程为

$$\begin{cases} f_1 = G_1 \sin \theta_1 \\ N_1 = G_1 \cos \theta_1 \\ f_1 = \mu N_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 G_1 ——土块重力,N
 f_1 ——土块所受摩擦力,N
 N_1 ——土块所受支持力,N
 μ ——静摩擦因数
 θ_1 ——斜面与水平面的夹角, ($^\circ$)

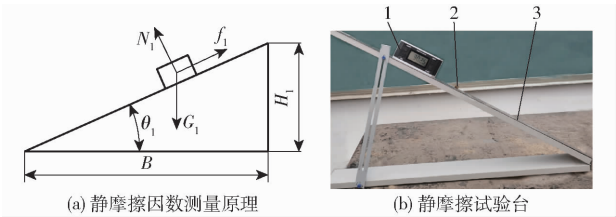


图 5 静摩擦因数测量原理及试验台
Fig.5 Static friction measuring principle and test bench
1. 倾角仪 2. 试验土样 3. 65Mn 钢板

将含水率为 $13.4\% \pm 1\%$ 、边长为 1 cm 土块水平放置于试验台的斜板上,缓慢抬升斜板改变其倾

斜角,待测土壤样品开始滑落时记录此时的倾角,然后按式(4)计算静摩擦因数。共 3 个相同尺寸和含水率的立方体土块,每个土块做 5 次重复试验,最终得到土壤与 65Mn 钢的静摩擦因数为 0.4~0.6。

2.2 滚动摩擦因数测定

通过斜板滚动试验来测定土壤与触土部件材料 65Mn 钢之间的滚动摩擦因数,搭建如图 6 所示的滚动摩擦试验台,斜板与水平板材料均为 65Mn 钢,宽度为 100 mm,水平板水平放置,斜板倾斜一定的角度,与水平板连接处尽量光滑。将含水率 13.4%±1%、半径 5 mm 的土球静置于高度为 H_2 的斜板中间处,使土球自由滚动至停止,测量土球的水平滚动距离 S ,重复 10 次。

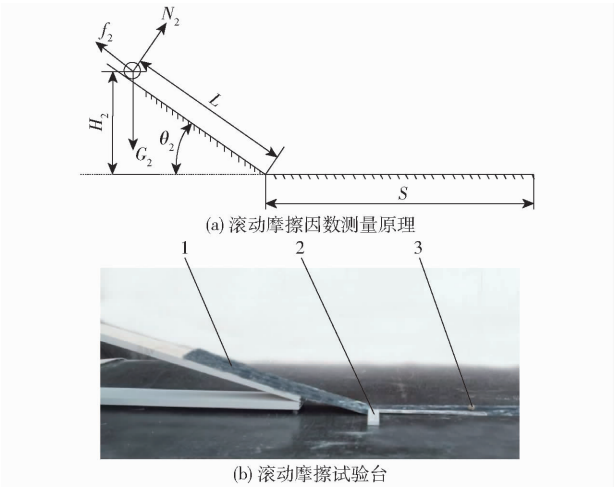


图 6 滚动摩擦因数测量原理及试验台
Fig. 6 Measuring principle of dynamic friction coefficient and test bench
1. 65Mn 钢板 2. 刻度尺 3. 土球

根据能量守恒定律,土球重力势能转换为摩擦能耗,计算式为

$$G_2H_2 = \mu G_2(L\cos\theta_2 + S) \tag{5}$$

式中 G_2 ——土球重力,N
 H_2 ——土球初始高度,mm

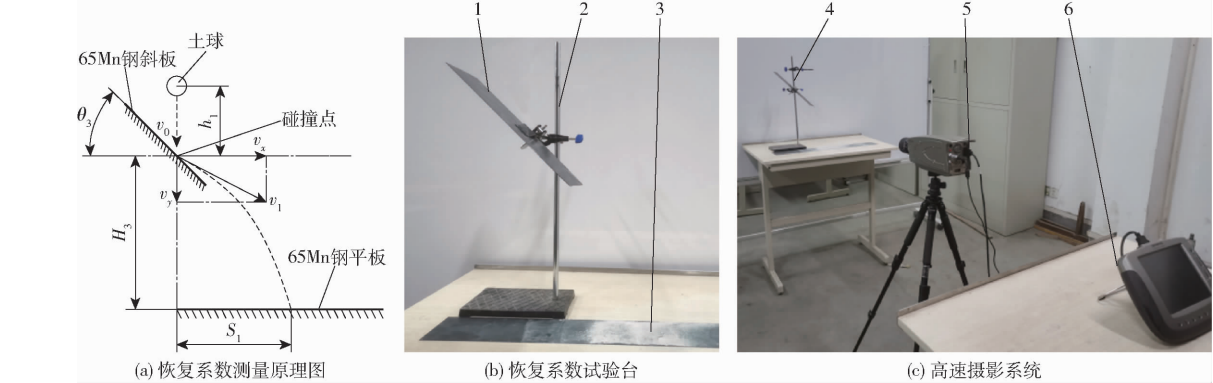


图 7 碰撞恢复系数测量原理及试验系统
Fig. 7 Measuring principle and test system of collision restitution coefficient
1. 65Mn 钢斜板 2. 支架 3. 65Mn 钢平板 4. 试验台 5. 高速摄像机 6. 显示器

L ——土球在斜面上滚动的距离,mm
 θ_2 ——斜板倾角,(°)

按照式(5)对滚动摩擦因数计算,得到土壤与 65Mn 钢间的滚动摩擦因数为 0.04~0.2。

2.3 碰撞恢复系数测定

碰撞恢复系数是指碰撞后法向反弹速度与碰撞前法向前进速度的比值^[3]。通过搭建碰撞试验台^[28]来测定土壤与触土部件材料 65Mn 钢之间的碰撞恢复系数,试验原理及试验台如图 7 所示。将土球置于一定高度处使其作自由落体运动,当土球接触到 65Mn 钢板发生碰撞后做斜抛运动,经过时间 t 后落于底板上,其中碰撞时间 t 通过高速摄影系统来采集获取。

碰撞恢复系数计算式为

$$C_r = \frac{v_{n1}}{v_{n0}} \tag{6}$$

其中
$$v_{n0} = v_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_3\right)$$
$$v_{n1} = v_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_3 + \arctan \frac{v_y}{v_x}\right)$$
$$v_0 = \sqrt{2gh_1} \quad v_1 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

由于土球与 65Mn 钢板发生碰撞后作斜抛运动,故可得

$$H_3 = v_y t + \frac{1}{2}gt^2 \quad S_1 = v_x t$$

式中 C_r ——土壤与 65Mn 钢间的碰撞恢复系数
 v_{n0} ——土球与 65Mn 钢碰撞前的法向速度,m/s
 v_{n1} ——土球与 65Mn 钢碰撞后的法向速度,m/s
 H_3 ——土球落点至碰撞点间的竖直距离,mm
 h_1 ——土球初始位置至碰撞点间的距离,mm
 S_1 ——土球落点至碰撞点间的水平距离,mm
 v_0 ——土球自由落体至碰撞点速度,m/s

θ_3 ——碰撞板倾斜角, (°)
 v_x —— v_1 沿水平方向分速度, m/s
 v_y —— v_1 沿垂直方向分速度, m/s

将含水率为 13.4% ± 1%、半径为 5 mm 的试验土球在斜置钢板质心竖直方向高度为 h_1 处做自由落体运动。当土球开始下落时, 打开高速摄影系统拍摄, 曝光量设置为 100 ms, 小球落至底板后, 关闭高速摄影系统, 记录土球从碰撞点落至接料板之间的时间 t , 并测量 S_1 。对 10 个半径为 5 mm 的土球, 每个土球做 3 次试验, 得到碰撞恢复系数为 0.04 ~ 0.6。

2.4 标定试验设计

以上述测定的 3 个参数作为试验因素, 以土壤静滑动摩擦角为试验评价指标, 进行仿真标定试验, 因素编码如表 5 所示, 试验结果如表 6 所示。

表 5 土壤滑动仿真试验因素编码

编码	因素		
	土壤与 65Mn 钢间静摩擦因数 D	土壤与 65Mn 钢间滚动摩擦因数 E	土壤与 65Mn 钢间碰撞恢复系数 F
-1	0.40	0.04	0.04
0	0.50	0.12	0.32
1	0.60	0.20	0.60

表 6 土壤滑动仿真试验方案与结果

序号	因素			土壤静滑动摩擦角/ (°)
	土壤与 65Mn 钢间静摩擦因数 D	土壤与 65Mn 钢间滚动摩擦因数 E	土壤与 65Mn 钢间碰撞恢复系数 F	
1	0.60	0.12	0.60	29.3
2	0.50	0.20	0.04	25.8
3	0.40	0.04	0.32	21.5
4	0.50	0.04	0.60	24.9
5	0.60	0.04	0.32	25.4
6	0.40	0.20	0.32	21.7
7	0.50	0.04	0.04	22.9
8	0.60	0.12	0.04	31.1
9	0.50	0.12	0.32	24.2
10	0.50	0.20	0.60	27.5
11	0.50	0.12	0.32	25.6
12	0.50	0.12	0.32	25.2
13	0.40	0.12	0.60	21.3
14	0.50	0.12	0.32	26.1
15	0.60	0.20	0.32	30.6
16	0.50	0.12	0.32	24.2
17	0.40	0.12	0.04	20.5

对仿真试验结果进行方差分析, 如表 7 所示。多元回归分析得到静滑动摩擦角的回归模型为

$$y = 25.06 + 4.65D + 1.38E + 0.93F + 1.25DE - 0.65DF - 0.075EF + 0.0075D^2 - 0.27E^2 + 0.48F^2 - 0.025D^2E - 1.18D^2F - 1.45DE^2 \quad (7)$$

回归方程决定系数 $R^2 = 0.9818$, 校正决定系数 $R^2_{Adj} = 0.9273$ 。由表 7 可知, 模型 $P = 0.0065 < 0.01$, 说明该回归模型非常显著, 能够根据该模型对土壤静滑动摩擦角进行预估。在上述 3 因素中, 静摩擦因数 D 对静滑动摩擦角的影响非常显著, 滚动摩擦因数 E 对土静滑动摩擦角的影响显著, 而碰撞恢复系数 F 的影响不显著, 交互项 DE 的影响显著, 其余交互项影响不显著。

表 7 静滑动摩擦角回归模型方差分析
Tab. 7 Variance analysis of static sliding friction angle regression model

方差源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	155.17	12	12.93	18.01	0.006 5
D	86.49	1	86.49	120.46	0.000 4
E	7.56	1	7.56	10.53	0.031 5
F	3.42	1	3.42	4.77	0.094 4
DE	6.25	1	6.25	8.70	0.042 0
DF	1.69	1	1.69	2.35	0.199 8
EF	0.023	1	0.023	0.031	0.868 1
D^2	2.368×10^{-4}	1	2.368×10^{-4}	3.299×10^{-4}	0.986 4
E^2	0.30	1	0.30	0.42	0.552 4
F^2	0.98	1	0.98	1.37	0.307 5
D^2E	1.250×10^{-3}	1	1.250×10^{-3}	1.741×10^{-3}	0.968 7
D^2F	2.76	1	2.76	3.85	0.121 4
DE^2	4.20	1	4.20	5.86	0.072 8
纯误差	2.87	4	0.72		
总和	158.04	16			

通过 Design-Expert 软件中的参数优化模块, 以土壤静滑动摩擦角 23.6° 为目标对建立的模型进行寻优, 找到与实测试验最为接近的 1 组解, 即土壤与 65Mn 钢板间的静摩擦因数 0.50、滚动摩擦因数 0.06、碰撞恢复系数 0.18。其中, 物理试验如图 8 所示, 仿真试验如图 9 所示, 该最优解下静滑动摩擦角仿真值为 24.0°, 与实测值 (23.6°) 的相对误差为 1.7%, 表明标定的参数准确可靠。

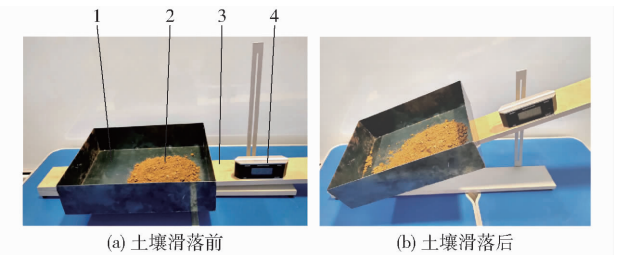


图 8 静滑动摩擦角物理试验

Fig. 8 Physical test of static sliding friction angle
1. 65Mn 钢土盒 2. 400 g 土壤 3. 斜板 4. 倾角仪

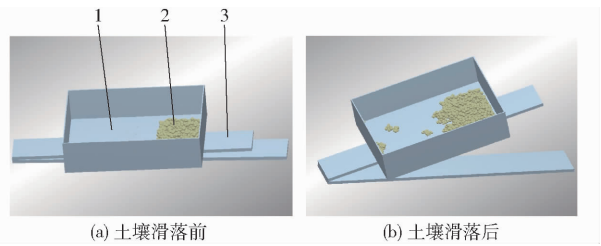


图 9 静滑动摩擦角仿真试验

Fig. 9 Simulation test of static sliding friction angle

1. 65Mn 钢土盒 2. 400 g 土壤 3. 斜板

3 坡地旋耕验证试验

3.1 试验目的

坡地旋耕作业时,土壤会在旋耕刀的扰动作用下发生位移,这种位移既可以反映土壤颗粒间的相互作用,还可以间接表征触土部件与土壤间的相互作用^[29],因此,为进一步验证上述标定的所有参数的准确可靠性,基于本团队自主研发的山地履带拖拉配套旋耕机进行坡地旋耕试验,以作业时土壤颗粒的位移^[29-32]为响应值,将坡地实测试验的结果与 EDEM 软件中仿真结果进行对比。

3.2 坡地旋耕实地试验

3.2.1 试验条件准备

试验在西北农林科技大学机械与电子工程学院专用试验坡地进行,首先在坡角 $15^{\circ} \pm 1^{\circ}$ 的坡地上经人工洒水、压实等工序塑造坡地土壤含水率、紧实度等参数,其中,用 TZS-2X-G 型土壤含水率速测仪(浙江托普云农公司生产)测定 0 ~ 200 mm 深度土壤含水率,范围为 12.4% ~ 14.4%,用 TJSD-750-II 型土壤紧实度仪(浙江托普云农公司生产)测定土壤紧实度,范围为 2 ~ 3 MPa。

3.2.2 实地试验

实地试验中,参照文献[7]以铝块作为示踪器来追踪土壤颗粒位移。首先,在每个土壤示踪器(铝块)的表面用记号笔编写序号,按照图 10a 所示的埋设方案,将其布设在 3 种不同深度的土层中(表层 0 ~ 50 mm、中层 50 ~ 100 mm 和深层 100 ~ 150 mm 各埋设 45 个示踪器,即图 10a 示意的 3 种颜色各有 45 个),并采用坐标测定架测量并记录此时每个示踪器的初始二维坐标;然后,基于山地履带拖拉机旋耕机组(设定旋耕刀轴转速 200 r/min、作业速度 1 km/h)完成旋耕作业,其中,山地履带拖拉机的车身姿态可以自动调整保证其始终保持水平,旋耕机姿态可以通过山地履带拖拉机上的坡地自适应悬挂系统实时调节,保证其与坡地面保持平行。最后,人工追踪所有带有编号的土壤示踪器,用坐标测定架测量并记录示踪器的最终二维坐标,对每个

示踪器的最终二维坐标与初始二维坐标取差值,即得到示踪器沿着水平和侧向两个方向的位移。所有示踪器的水平位移、侧向位移分别取均值得到最终结果。

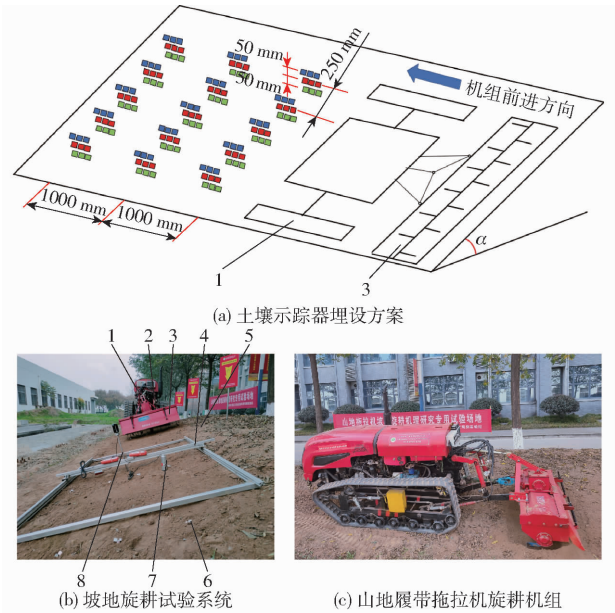


图 10 坡地旋耕实地试验

Fig. 10 Field test of rotary tillage on slope

1. 山地履带拖拉机 2. 坡地自适应悬挂系统 3. 旋耕机 4. 示踪器坐标测定架 5. 坡地 6. 土壤示踪器(铝块) 7. 土壤含水率速测仪 8. 土壤紧实度测定仪

3.3 坡地旋耕仿真试验

基于图 11a 所示的 HandySCAN3D 型扫描仪,对 H245R、H245L 旋耕刀进行三维结构扫描,经 VXeElements 软件处理得到旋耕刀的 STL 点云模型,将 STL 文件导入逆向建模软件 Geomagic Design X 64 中得到旋耕刀三维模型(图 11b),此方法得到的旋耕刀模型与实物具有极高契合度,有效保证仿真的准确性。最后,将 SolidWorks 中建立的整个旋耕机三维模型导入仿真土槽模型,如图 11c 所示。

依据实地试验条件,设定旋耕刀辊转速 200 r/min,旋耕机作业前进速度 1 km/h,入土深度设置为 150 mm。在 EDEM 求解器模块对仿真时间步长、仿真时间及网格大小等进行设置。为保证仿真的连续性,设置其仿真时间步长为 1.50×10^{-4} s,仿真时间为 5 s,网格单元尺寸设置为颗粒平均半径的 3 倍。仿真作业过程如图 12 所示。

基于 Analyst 模块进行后处理分析。在旋耕机幅宽范围内,垂直于坡面方向设置 3 个不同深度的土壤层,分别是浅层(0 ~ 50 mm 范围的颗粒设置为蓝色)、中层(50 ~ 100 mm 范围的颗粒设置为红色)和深层(100 ~ 150 mm 范围的颗粒设置为绿色),如图 12a 所示。基于“Export Results Data”导出仿真

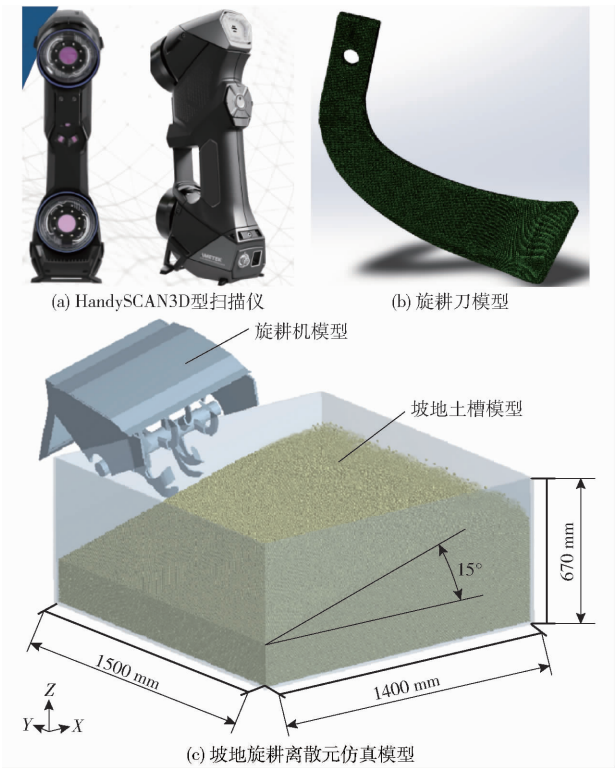


图 11 离散元仿真模型的构建

Fig. 11 Construction of discrete element simulation model

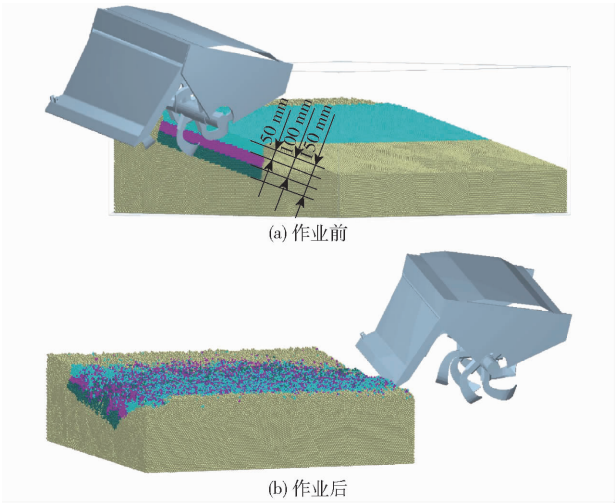


图 12 坡地旋耕仿真试验

Fig. 12 Simulation test of rotary tillage on slope

前、后每种颜色的土壤颗粒在侧向(X 轴方向)和水平方向(Y 轴方向)上坐标的均值,对均值作差得到 3 种不同深度范围中土壤沿侧向和水平方向的位移。

3.4 试验结果与分析

实地试验中,根据旋耕前后土壤示踪器的坐标位置,计算每个深度范围内示踪器位移均值,可得浅层土壤位移明显大于中层和深层,原因在于深层土壤会受到浅层土壤重力的作用,其运动在一定程度上受到浅层土壤的阻碍。仿真试验得到同样的结论。并且,大部分土壤颗粒侧向位移的方向是由坡

高侧指向坡低侧,说明坡角的引入增大了土壤颗粒侧向位移的程度,原因在于土壤抛撒过程中其自身重力沿着坡面向下的分力起到一定程度的作用。此外,无论土壤颗粒处于何种深度,在水平力的作用下,大部分土壤颗粒随着旋耕刀切土作用表现出向后运动的行为,并且土壤该运动所产生的水平位移大于侧向位移,表明旋耕刀的扰动对土壤沿着水平方向的重置程度大于侧向。土壤的这种水平位移在实际农业生产中是允许的,但是土壤的侧向位移会导致水土流失,因此,为了有效降低土壤颗粒的侧向位移(耕作侵蚀),需要在后续的工作中,更加深入地分析坡地旋耕侵蚀的机理,优化坡地专用旋耕机具。

为了验证所标定的离散元仿真模型参数的准确性,对坡地旋耕实地试验与仿真试验中 3 个不同深度中的土壤颗粒沿着水平方向和侧向平均位移进行比较(图 13)。

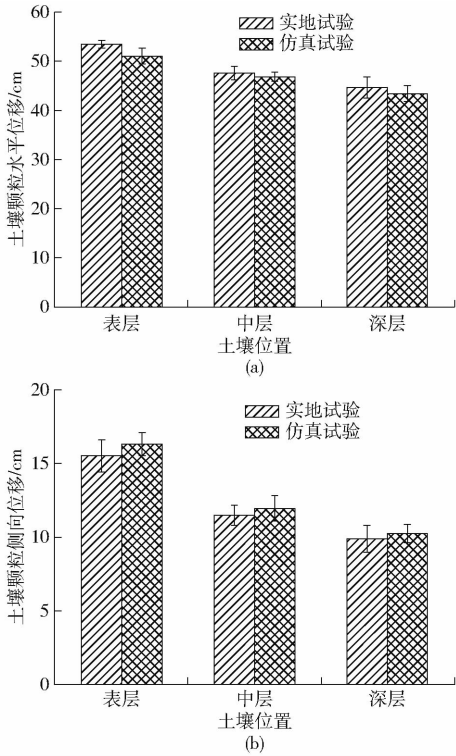


Fig. 13 Moving displacements of soil at different positions

依据图 13a,定义仿真试验与实地试验结果的绝对差值与实地试验值的百分比为仿真相对误差^[29],以此相对误差来表征离散元仿真参数标定的准确性。土壤颗粒水平位移相对误差为:表层土壤 4.3%、中层土壤 1.7%、深层土壤 2.9%;由图 13b 可得,土壤颗粒侧向位移相对误差分别是:表层土壤 5.1%、中层土壤 4.3%、深层土壤 4.0%。

综上,坡地旋耕实地试验与仿真试验相比,土壤颗粒的水平位移和侧向位移最大相对误差分别为

4.3%和5.1%,表明仿真模型中标定的土壤参数与实际参数基本一致,验证了离散元仿真参数标定结果的准确性。

4 结 论

(1)以土壤颗粒间的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数及表面能参数为试验因素,以仿真堆积角为试验评价指标,依据 Box – Behnken 优化方法得到了堆积角回归模型,并经寻优得到了土壤颗粒间的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数及表面能参数分别为 0.15、0.33、0.05 和 9.04 J/m²,该最优解下堆积角仿真结果为 41.59°,与物理试验相对误差为 3.8%。

(2)以含水率为 13.4% ± 1% 的土壤为研究对

象,经静摩擦试验、斜板试验、碰撞试验等获得了土壤与 65Mn 钢间的静摩擦因数、滚动摩擦因数、恢复系数的范围;以上述 3 个参数为试验因素,以土壤静滑动摩擦角为试验评价指标,依据 Box – Behnken 优化方法得到了静滑动摩擦角的回归模型,并经寻优得到了土壤颗粒与 65Mn 钢间的静摩擦因数、滚动摩擦因数及碰撞恢复系数分别为 0.50、0.06 和 0.18,该最优解下的静滑动摩擦角仿真结果为 24.0°,与物理试验的相对误差为 1.7%。

(3)通过坡地旋耕实地试验和仿真试验对比分析,得到了土壤颗粒的水平位移和侧向位移的最大相对误差分别为 4.3% 和 5.1%,处于可以接受的范围,表明标定的离散元仿真模型参数准确可靠。

参 考 文 献

[1] YOUNG C J, LIU S, SCHUMACHER, J A, et al. Evaluation of a model framework to estimate soil and soil organic carbon redistribution by water and tillage using 137 Cs in two US Midwest agricultural fields[J]. Geoderma, 2014, 232: 437 – 448.

[2] 贾洪雷. 现代农业机械设计理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2020.

[3] 邢洁洁,张锐,吴鹏,等. 海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(5):158 – 166. XING Jiejie, ZHANG Rui, WU Peng, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol particles in hot areas of Hainan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 158 – 166. (in Chinese)

[4] 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. ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4):1 – 20. (in Chinese)

[5] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121(3): 105 – 117.

[6] AIKINS K A, UCGUL M, BARR J B, et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213:105123.

[7] ZENG Z, MA X, CHEN Y, et al. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197:104505.

[8] MILKEVYCH V, MUNKHOLM L J, CHEN Y, et al. Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183:60 – 71.

[9] UCGUL M, SAUNDERS C. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190:58 – 70.

[10] 石林榕,赵武云,孙伟. 基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J]. 农业工程学报,2017,33(21): 181 – 187. SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei. Parameter calibration of oil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 181 – 187. (in Chinese)

[11] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 – 56. (in Chinese)

[12] 李俊伟,佟金,胡斌,等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(6):130 – 140. LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters interaction between clayey black soil with different oisture content and soil-engaging component in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130 – 140. (in Chinese)

[13] 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. XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116 – 123. (in Chinese)

[14] 田辛亮,丛旭,齐江涛,等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2021,52(10):100 – 108,242.

- TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100 – 108, 242. (in Chinese)
- [15] 王云强, 张兴昌, 从伟, 等. 黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 65 – 71.
- WANG Yunqiang, ZHANG Xingchang, CONG Wei, et al. Spatial variability of soil moisture on slope land under different land uses on the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 65 – 71. (in Chinese)
- [16] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 124 – 136.
- WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 124 – 136. (in Chinese)
- [17] 杜俊, 张文良, 祝英豪, 等. 基于离散元法的旋埋刀辊功率分配特性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(6): 1031 – 1037.
- DU Jun, ZHANG Wenliang, ZHU Yinghao, et al. Study on the characteristic of power distribution of rotary tillage by discrete element method[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(6): 1031 – 1037. (in Chinese)
- [18] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 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 Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 113 – 121. (in Chinese)
- [19] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. Proc. R. Soc. London: A, 1971, 324(158): 301 – 313.
- [20] EDEM 2.5 theory reference guide[R/OL]. 2014 – 12 – 05[2015 – 06 – 07]. <http://www.docin.com/p-980174717.html>.
- [21] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真——离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- [22] 王国强. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [23] 邓时琴. 土壤矿质颗粒及土壤质地[J]. 土壤, 1983(2): 77 – 80.
- [24] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [25] WANG X, ZHANG S, PAN H, et al. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 138 – 150.
- [26] CHENG Y P, NAKATA Y, BOLTON M D. Discrete element simulation of crushable soil[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 633 – 641.
- [27] 方会敏, 姬长英, AHMED A T, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60 – 67.
- FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw – soil – rotary blade system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60 – 67. (in Chinese)
- [28] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123 – 132. (in Chinese)
- [29] 方会敏, 姬长英, FARMAN A C, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22 – 28.
- FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22 – 28. (in Chinese)
- [30] 丁启朔, 任骏, ADAM B E, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38 – 48.
- DING Qishuo, REN Jun, ADAM B E, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38 – 48. (in Chinese)
- [31] CHEN Y, MUNKHOLM L J, NYORD T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126(1): 34 – 41.
- [32] 王志山, 夏俊芳, 许绮川, 等. 船式旋耕埋草机螺旋刀辊作业功耗试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 44 – 47.
- WANG Zhishan, XIA Junfang, XU Qichuan, et al. Power consumption experiment of rotary tillage and stubble-mulch knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 44 – 47. (in Chinese)