

离散元模拟中沙土参数标定方法研究

张锐 韩佃雷 吉巧丽 何远 李建桥

(吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 农业机械与土壤相互作用仿真时, 选用颗粒相互作用参数的准确度将直接影响仿真结果。本文提出一种通过试验与模拟相结合系统地标定沙土颗粒相互作用参数的方法。通过堆积角测试装置、三轴剪切试验机、图像颗粒分析系统等设备测量计算沙土的堆积角、剪切模量、粒径分布和外观形貌等参数, 为颗粒或工厂建模提供参考。使用标准球和非标准球对沙土颗粒的碰撞恢复因数、静摩擦因数、滚动摩擦因数进行标定。研究不同质量和不同标定方法(抽板法和漏斗法)是否对堆积角产生影响。模拟结果表明, 选用标准球标定时, 碰撞恢复因数是0.15, 静摩擦因数是0.8, 滚动摩擦因数是0.2, 抽板法得到的堆积角是 33.99° , 相对误差是4.74%; 漏斗法得到的堆积角是 33.59° , 相对误差是3.51%。同时, 选用非标准球进行标定时, 碰撞恢复因数是0.15, 静摩擦因数是0.2, 滚动摩擦因数是0.3, 抽板法得到的堆积角是 32.06° , 相对误差是1.20%。由此看出, 颗粒外观形貌对颗粒间静摩擦因数影响相对较大。

关键词: 沙土; 参数标定; 离散元; 数值模拟

中图分类号: O347.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)03-0049-08

Calibration Methods of Sandy Soil Parameters in Simulation of Discrete Element Method

ZHANG Rui HAN Dianlei JI Qiaoli HE Yuan LI Jianqiao

(Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: When the interaction between agricultural machinery and soil is simulated, the accuracy of the chosen particle parameters will directly have an effect on the simulation results. A systematic method for calibrating the interaction parameters of sand particles was proposed based on the combination of experiment and simulation. By the repose angle test apparatus, the triaxial shearing test instrument and the particle image analysis system equipment, the repose angle of the sandy soil, the shear modulus, the particle size distributions and morphology were obtained, which provided reference for particles or factory modeling. The standard ball and non-standard ball were used to calibrate the coefficient of restitution, coefficient of static friction and coefficient of dynamic friction between particles. The effect of different qualities and different calibration methods (drawing plate method and funnel method) on the repose angle were studied. The effect of different qualities of the soil on repose angle was small, and it can be ignored. Meanwhile, there was no significant difference between the two calibration methods. When the standard ball was used for calibration, the repose angle obtained from the simulation was closest to that of the test (coefficient of restitution was 0.15, coefficient of static friction was 0.8, and coefficient of dynamic friction was 0.2). The repose angle of drawing plate method was 33.99° , and the relative error was 4.74%. The repose angle of the funnel method was 33.59° , and the relative error was 3.51%. When the non-standard ball was used for calibration, the repose angle of the drawing plate method was 32.06° , and the relative error was 1.20% (coefficient of restitution was 0.15, coefficient of static friction was 0.2, and coefficient of dynamic friction was 0.3). It can be seen that the effect of particle appearance on the coefficient of static friction was relatively large. The result provides a new idea and method for the calibration of particle parameters.

Key words: sandy soil; parameter calibration; discrete element method; numerical simulation

收稿日期: 2016-07-11 修回日期: 2016-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675221, 51275199)和吉林省科技发展计划项目(20140101074JC)

作者简介: 张锐(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事松软地面仿生行走理论与技术研究, E-mail: zhangrui@jlu.edu.cn

引言

研究耕整地机械、播种机械等与土壤的相互作用时,单纯采用大田或土槽试验,不能从微观角度观察土壤颗粒的动态细观行为、速度场、力场等;单纯采用仿真分析,结果可信度有待验证^[1-2]。试验与仿真各有优缺点,试验与仿真相结合的方法应用越来越多^[3-4]。土壤作为与触土部件直接接触的介质,其力学特性是影响农机具作业效果的重要因素^[5]。农机具作业仿真模拟前,土壤的力学参数是最先需要研究的问题。

土壤力学参数标定或仿真模拟面临的问题有:如何根据宏观参数确定细观参数,如何选取适当的参数成为数值模拟的一个关键性问题^[6];缺乏比较系统的标定方法,一些模拟^[7]只着眼于所需要的某个参数,并没有考虑参数与参数之间的相互作用效应,缺乏验证过程;对于颗粒建模,一些模拟^[8]只采用了标准的球型,而现实生活中触土部件面向的作业环境往往是非规则多面体。

本文提出一种系统、全面的参数标定方法。首先,通过三轴剪切试验和堆积密度测试,获得土壤颗粒的本征参数和堆积角。其次,进行颗粒分级,使用图像颗粒分析系统,研究颗粒外观形貌,为颗粒建模和工厂设置提供参考。最后,在保证参数量级正确的前提下,微调参数具体数值来拟定待标定参数,运用 EDEM 软件进行仿真参数虚拟标定。

1 标定方法与仿真原理

1.1 标定方法

土壤建模,常用的仿真分析是有限元法(FEM)和离散元法(DEM)。FEM把介质看作是连续的,只能把静止的土壤颗粒群体作为一个整体来考虑,无法分析土壤颗粒群体中每个颗粒的运动过程和土层破裂以及颗粒的分离、混合和流动等过程^[9]。DEM把介质看作由一系列离散的独立运动的单元所组成,单元运动受经典运动方程控制,整个介质的变形和演化由各单元的运动和相互位置来描述^[10]。考虑到土壤颗粒本身具有离散性,而且耕作时土壤颗粒是动态变化的,选择离散元法标定土壤颗粒力学参数更符合实际。

对于标定的参数是否正确或具有可信度,校核主要有以下方法:①采用三维颗粒流(PFC)软件,进行三轴试验的数值模拟,将模拟得到的应力应变曲线与真实试验得到的应力应变曲线进行比对,如果二者在线性、斜率和峰值强度上都能够很好的定量吻合,则说明数值模拟中采用的颗粒参数是相对真

实可靠的^[11]。堆积角是表征颗粒物料流动、摩擦等特性的宏观参数,该值测定可确定物料的流动性级别及计算物料的内摩擦因数^[12]。②在 EDEM 中,经常采用试验堆积角和模拟堆积角对比的方法来验证虚拟标定的参数是否正确^[13]。本文使用 EDEM 进行参数标定,选择堆积角进行校核。

1.2 离散元仿真原理

使用 Hertz - Mindlin - Deresiewicz (no slip) 接触模型,主要原因是:它提供了物理情境的准确表征,是经常使用的默认模型;该模型在力的计算方面精确且高效;沙土颗粒间几乎没有粘结作用,可节约仿真时间,提高效率^[14]。该模型如图 1 所示^[14],在这个模型中,法向力模型基于 Hertzian 接触理论^[15],切向力模型基于 Mindlin - Deresiewicz 理论^[16-17]。

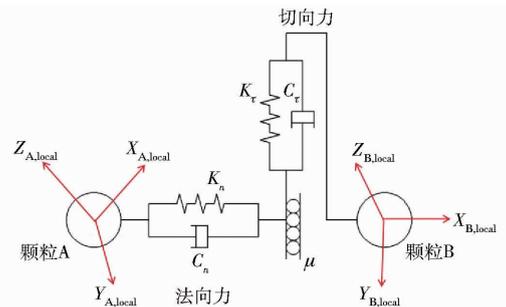


图1 Hertz - Mindlin - Deresiewicz (no slip) 接触模型基本原理

Fig.1 Basic principle of Hertz - Mindlin - Deresiewicz (no slip) contact model

颗粒 A 与颗粒 B 之间存在弹性力 F_s 、阻尼力 F_d 、滚动摩擦力 τ_i 。其中,弹性力 F_s 和阻尼力 F_d 又可进一步分为法向弹性力 F_s^n 、切向弹性力 F_s^t 、法向阻尼力 F_d^n 、切向阻尼力 F_d^t 。 K_n 、 K_t 、 C_n 、 C_t 、 μ 分别为弹簧法向刚度系数、弹簧切向刚度系数、法向阻尼系数、切向阻尼系数、静摩擦因数。

$$F_s^n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

其中

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (3)$$

式中 E^* ——当量弹性模量

R^* ——当量半径

δ_n ——法向重叠量

E_i 、 E_j ——弹性模量

ν_i 、 ν_j ——泊松比

R_i 、 R_j ——接触球体的半径

$$F_d^n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \nu_n^{rel} \quad (4)$$

其中
$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (5)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (6)$$

式中 S_n ——法向刚度

m^* ——当量质量

e ——恢复因数

v_n^{rel} ——相对速度的法向分量

β ——阻尼比

$$F_s^r = -S_r \delta_r \quad (7)$$

其中
$$S_r = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (8)$$

式中 S_r ——切向刚度

δ_r ——切向重叠量

G^* ——当量剪切模量

$$F_d^r = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta \sqrt{S_r m^* v_r^{rel}} \quad (9)$$

式中 v_r^{rel} ——相对速度的切向分量

$$\tau_i = -\mu_r F_s^r R_i \omega_i \quad (10)$$

式中 μ_r ——滚动摩擦因数

R_i ——接触到质心的距离

ω_i ——物体在接触点处单位角速度矢量

2 沙土本征参数试验测定

2.1 沙土本征参数测定

2.1.1 堆积角和堆积密度

沙土堆积角测试装置如图2所示,由铁架台、漏斗、泡沫板组成。形成的堆积角使用红外线遥控器进行测量,重复5次试验,得到沙土的堆积角是 $32.45^\circ \pm 0.44^\circ$ 。



(a) 沙土堆积角测试装置 (b) 沙土堆积角测量

图2 沙土堆积角测试

Fig. 2 Test of sandy soil repose angle

通过堆积密度仪测量沙土的堆积密度。堆积密度测试原理:将待测沙土装入漏斗,打开排放阀,沙土顺着漏斗的下端口自然下落并流入到测量筒中,将落入到测量筒中的沙土刮平,在天平上称取刮平后测量筒中的沙土质量,再除以测量筒的体积,重复

5次试验,测出待测沙土的堆积密度是 $(1.638 \pm 0.07) \text{ g/cm}^3$ 。

2.1.2 泊松比和剪切模量

通过SLB-1型应力应变测试三轴剪切试验仪,测定弹性模量,确定泊松比,如图3所示。



图3 土壤三轴试验装置

Fig. 3 Schematic diagrams of three axis test device for soil

主应力差-轴向应变关系曲线如图4所示,以线性变化阶段为研究对象,主应力差与轴向应变的比值,即线性变化段的斜率为土壤的弹性模量 E 。弹性模量 E 和泊松比 ν 计算公式分别为

$$E = \frac{\Delta\sigma_\alpha}{\Delta\varepsilon_\alpha} \quad (11)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\varepsilon_\alpha} \right) \quad (12)$$

式中 $\Delta\sigma_\alpha$ ——主应力差 $\Delta\varepsilon_\alpha$ ——轴向应变
 $\Delta\varepsilon_v$ ——体积应变

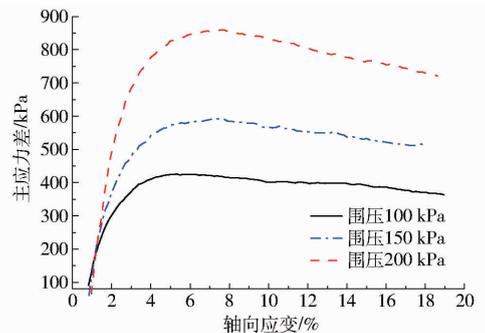


图4 主应力差-轴向应变关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between principal stress difference and axial strain

以剪切强度为纵坐标,主应力差为横坐标,以破坏时大主应力与小主应力和的一半为圆心的横坐标,以大主应力与小主应力差的一半为半径,在剪切强度-主应力差平面上绘制莫尔应力圆,并绘制不同围压下莫尔应力圆的包络线,即可得出试样的内凝聚力 c 和内摩擦角 ϕ ,如图5所示。

根据本次试验沙土的特性和相关的文献,选定沙土的泊松比为 $0.3^{[18]}$ 。根据材料力学可知弹性模量、泊松比和剪切模量 G 有

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (13)$$

通过试验及文献资料,可知沙土和钢本征参数如表1所示。

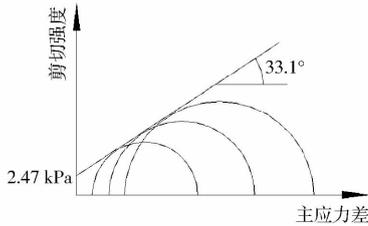


图5 莫尔应力圆

Fig. 5 Mohr's stress circle

表1 沙土和钢材的本征参数

Tab. 1 Intrinsic parameters of sandy soil and steel

材料 参数	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量 G/Pa	内凝聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
沙土	1 638	0.3 ^[18]	1.15×10^7	2.47	33.1
钢材	7 850 ^[19]	0.3 ^[20]	7.0×10^{10} ^[20]		

2.2 沙土颗粒形貌及分布测定

2.2.1 沙土粒径分布与质量分数

首先称取 400 g 土样,使用 GZS-1 高频振荡筛机

和标准筛进行颗粒分级,然后用电子秤称取不同粒径范围对应的质量,从而获得沙土粒径分布及对应的质量分数,重复 5 次试验,表 2 所示结果可为仿真时颗粒工厂生成颗粒的质量提供参考。

表2 沙土粒径分级及对应的质量分数

Tab. 2 Size classification and mass fraction of sandy soil

粒径/mm	>1.6	1.25 ~ 1.6	1 ~ 1.25	0.63 ~ 1	0.3 ~ 0.63	0 ~ 0.3
质量/g	17.6 ± 5.6	59.8 ± 11.8	46.4 ± 2.4	160.4 ± 12.6	92.0 ± 13.0	22.8 ± 10.2
质量分数/%	4.41	14.99	11.63	40.20	23.06	5.71

筛选出 6 个粒径级别的沙土试样,如图 6 所示,为下一步研究颗粒的外观形貌做准备。

2.2.2 沙土外观形貌

分别将不同粒径级别的沙土试样置于 BT-1600 图像颗粒分析系统下观测,图 7 所示外观形貌可为颗粒的建模提供参考。

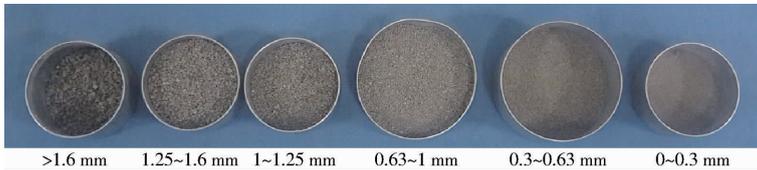


图6 筛选后沙土试样

Fig. 6 Sandy soil samples after screening

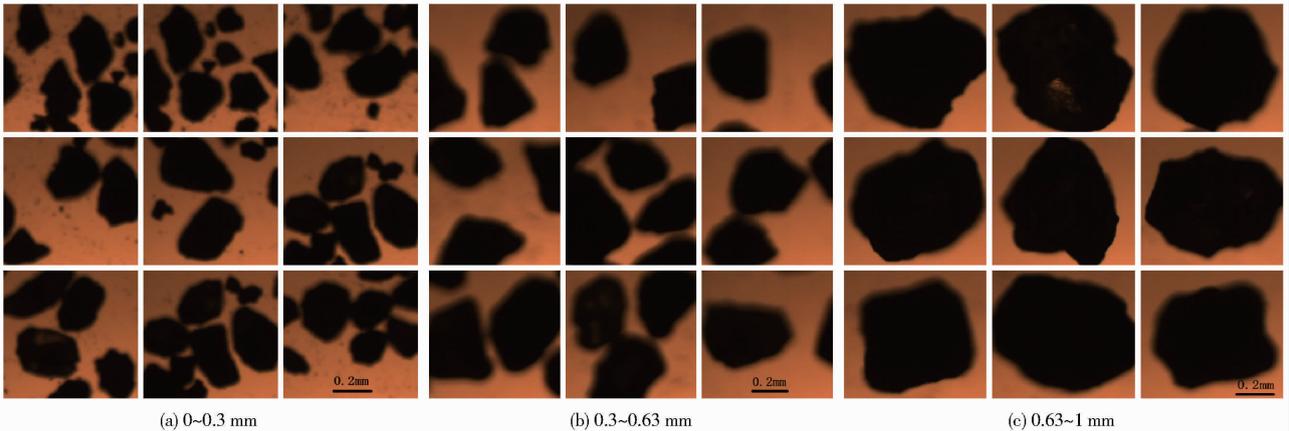


图7 沙土颗粒的外观形貌

Fig. 7 Appearance of sandy soil particles

3 沙土颗粒相互作用参数虚拟标定

3.1 采用标准球参数标定

3.1.1 不同质量对堆积角的影响

EDEM 模拟中,在粒径确定的情况下,沙土的总质量越大,制造的颗粒数量就会越多,所需要的仿真时间就越长,并且颗粒数量增减对仿真时间影响巨大^[14]。因此,需要探究质量不同是否会对堆积角产生影响。选取 100、150、200 g 3 种沙土质量测堆积角时,100 g 沙土形成不了堆积角。故研究 150 g 和

200 g 沙土在仿真模拟时形成的堆积角是否有差异。选用标准球型,粒径是 2 mm^[21]。颗粒和钢材的本征参数如表 3 所示。颗粒与颗粒、颗粒与钢材相互作用参数:恢复因数、静摩擦因数、滚动摩擦因数选取 EDEM 默认值,依次是 0.5、0.5、0.01。

在 EDEM 仿真中,150 g 和 200 g 沙土对应的堆积角分别是 34.26°和 34.14°。这两个堆积角差异很小,仅为 0.35%。因此,质量对堆积角影响较小,可以忽略,后续仿真选取 150 g 沙土,能够节约大量仿真时间。

表 3 颗粒和钢材的本征参数

Tab. 3 Intrinsic parameters of particles and steel

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
颗粒	0.3	1.15×10^7	1 638
钢材 ^[22]	0.25	1.00×10^{10}	7 850

3.1.2 不同标定方法对堆积角的影响

3.1.1 节已经确定质量对堆积角产生的影响较小。因此选择 150 g 土样,利用粒径 2 mm^[21] 的标准球型颗粒,进行恢复因数、静摩擦因数、滚动摩擦因数的标定。沙土与钢材的本征参数选取表 1 的数据,颗粒与颗粒相互作用参数待标定,颗粒与钢材的恢复因数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别是 0.3、0.3、0.2^[19]。

颗粒与颗粒间的相互作用参数,根据沙土密度,选取文献提供的经验值。碰撞恢复因数^[23]:0.15、0.35、0.75;静摩擦因数^[24-25]:0.2、0.8、1.16;滚动摩擦因数:0.2^[11]、0.3^[19]。试验测得沙土的堆积角是 $32.45^\circ \pm 0.44^\circ$,偏差是 $\pm 0.44^\circ$ 。在 EDEM 中进行参数标定时,由于标定方案、测量方法等都会对堆积结果产生影响,堆积角误差根据试验偏差选用 $\pm 0.44^\circ$ 。

抽板法和漏斗法是当前测试堆积角的典型方法^[8,13,26]。在同一组参数下,对比了抽板法和漏斗法,如图 8 所示,各自对应的堆积角如表 4 所示。模拟结果表明,两种堆积方法颗粒堆积角并没有显著差异,如图 9 所示。采用标准球进行标定时,碰撞恢复因数是 0.15,静摩擦因数是 0.8,滚动摩擦因数是 0.2,仿真得到的堆积角与试验得到的堆积角最接近。在本次仿真模拟的条件下,抽板法得到的堆积角是 33.99° ,相对误差是 4.74%;漏斗法得到的堆积角是 33.59° ,相对误差是 3.51%。

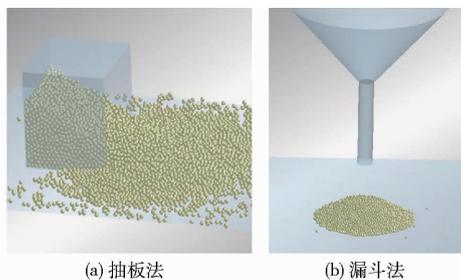


图 8 不同堆积方法

Fig. 8 Different stacking methods

3.2 采用非标准球参数标定

3.2.1 颗粒工厂建模

鉴于实际沙土颗粒中粒径分布并不均匀,为了与实际沙土更为接近,采用非标准球型颗粒来模拟实际沙土。由表 2 可知,选取的沙土样本中,颗粒粒径 0.3 ~ 1.6 mm 的质量占总质量的 89.68%。其中

表 4 标定方案及不同方法对应的堆积角

Tab. 4 Calibration schemes and repose angle of different methods

仿真 次序	碰撞恢复 因数	静摩擦 因数	滚动 摩擦因数	堆积角/($^\circ$)	
				抽板法	漏斗法
0	0.50	0.50	0.01	27.29	28.48
1	0.15	0.20	0.2	27.89	27.51
2	0.15	0.20	0.3	26.68	27.44
3	0.15	0.80	0.2	33.99	33.59
4	0.15	0.80	0.3	38.77	38.28
5	0.15	1.16	0.2	39.92	39.05
6	0.15	1.16	0.3	37.08	38.14
7	0.35	0.20	0.2	27.20	27.48
8	0.35	0.20	0.3	28.31	28.05
9	0.35	0.80	0.2	39.23	36.47
10	0.35	0.80	0.3	37.89	37.16
11	0.35	1.16	0.2	37.04	37.98
12	0.35	1.16	0.3	42.40	41.75
13	0.75	0.20	0.2	28.06	29.36
14	0.75	0.20	0.3	27.64	26.92
15	0.75	0.80	0.2	37.46	37.27
16	0.75	0.80	0.3	45.10	45.26
17	0.75	1.16	0.2	39.37	40.48
18	0.75	1.16	0.3	41.11	41.29

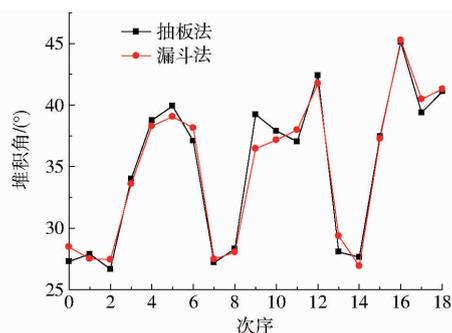


图 9 抽板法和漏斗法堆积角对比

Fig. 9 Comparison of repose angle between drawing plate method and funnel method

粒径 0.63 ~ 1 mm 的占 40%,这已经占据颗粒的大多数。对于过大或者过小的颗粒,在此忽略处理。进行参数标定时,如果完全按照颗粒真实的尺寸进行建模,仿真时间将大大延长,仿真效率降低。为提高仿真速度,选取粒径分布中质量分数最大的几种粒径进行非标准球型颗粒建模。根据模拟经验^[21],颗粒建模时,不一定要逼近真实的颗粒尺寸和形状,更关键的是颗粒与颗粒、颗粒与几何体之间相互作用参数。考虑到计算机计算能力和速度,对沙土样本做简化处理。颗粒建模时,以粒径 0.63 ~ 1 mm 的颗粒为基础,将其尺寸放大 3 倍,从图 7c 可以看出,沙土颗粒形貌主要是球型、长条形、棱状型 3 种。为了逼近颗粒的非规则形貌,选取标准球型对非规则形貌进行填充^[27]。对于长条形,用标准球线性阵

列来填充;对于棱状型,依据颗粒轮廓选取标准球三角形阵列来填充^[28],如图10所示。对图7c中3种颗粒各自数量进行统计,间接确定球型、长条型、棱

状型各自对应的质量。球型占1/2,长条型占1/3,棱状型占1/6。在EDEM中,每种颗粒的基本参数如表5所示。

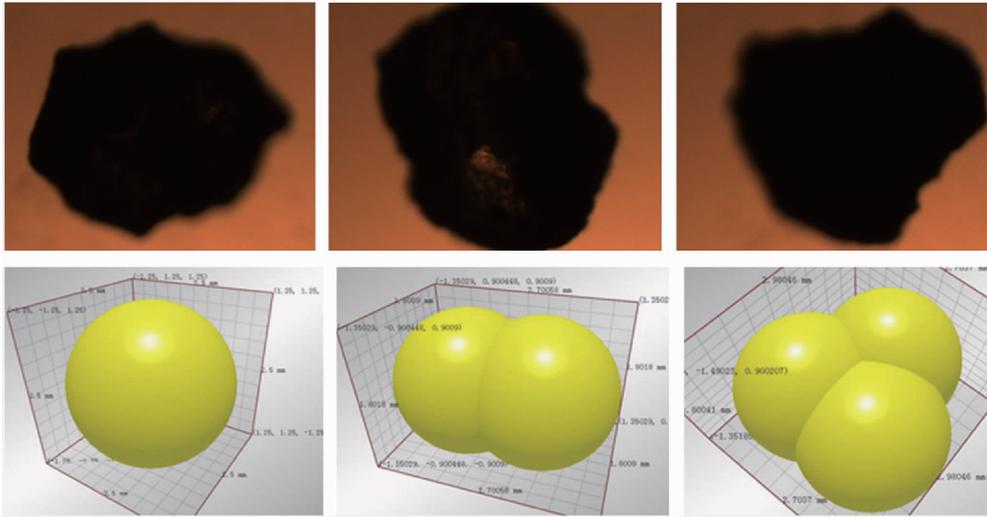


图10 3种非标准球模型

Fig.10 Three kinds of non-standard ball model

表5 非标准球基本参数

Tab.5 Basic parameters of non-standard ball

类型	球型	长条型	棱状型
单球半径/mm	1.25	0.9	0.9
质量/g	75	50	25

表6 非标准球不同标定方案的堆积角

Tab.6 Repose angle of different calibration schemes for non-standard ball

仿真 次序	碰撞恢复 因数	静摩擦 因数	滚动摩擦 因数	堆积角/ (°)
0	0.50	0.50	0.01	27.35
1	0.15	0.20	0.2	30.98
2	0.15	0.20	0.3	32.06
3	0.15	0.80	0.2	42.21
4	0.15	0.80	0.3	43.61
5	0.15	1.16	0.2	41.00
6	0.15	1.16	0.3	43.28
7	0.35	0.20	0.2	27.77
8	0.35	0.20	0.3	29.01
9	0.35	0.80	0.2	41.24
10	0.35	0.80	0.3	45.32
11	0.35	1.16	0.2	45.08
12	0.35	1.16	0.3	45.00
13	0.75	0.20	0.2	28.23
14	0.75	0.20	0.3	29.82
15	0.75	0.80	0.2	39.27
16	0.75	0.80	0.3	38.71
17	0.75	1.16	0.2	42.44
18	0.75	1.16	0.3	44.68

3.2.2 不同标定方案对应的沙土堆积角

沙土的堆积角试验选取漏斗下侧直径是13 mm的圆柱。依据漏斗实际尺寸,对漏斗进行建模。起初,选取抽板法和漏斗法两种标定方法来研究颗粒之间的相互作用参数。但是,采用漏斗法时,由于长条型、棱状型颗粒尺寸最大直线距离分别达到2.7、3 mm,此时非规则颗粒的堆积效应会使颗粒的下流速度降低,甚至会引起颗粒卡在漏斗下侧圆柱内,挡住后续颗粒往下运动,仿真时间将会被无限制的延长,不再适合工程应用,而采用抽板法则不会出现这个问题。另外,3.1.2节得出抽板法和漏斗法在模拟沙土堆积角时差异较小。因此,本节仅选取抽板法来标定非标准球之间的相互作用参数。通过EDEM软件中的角度测量工具,得到不同参数组合下仿真的堆积角结果,如表6所示。采用非标准球模拟,当碰撞恢复因数、静摩擦因数和滚动摩擦因数分别是0.15、0.2和0.3时,仿真得到的堆积角与试验得到的堆积角最接近。在本次模拟的条件下,抽板法得到的堆积角是32.06°,相对误差是1.20%。

4 结论

(1)通过堆积角测试装置、堆积密度测试仪、三轴剪切试验仪、图像颗粒分析系统等测出了一种沙

土的堆积角、堆积密度、剪切模量、沙土粒径分布和颗粒形貌等,并结合EDEM对颗粒与颗粒之间相互作用参数进行标定,提出一种系统地标定沙土颗粒相互作用参数的方法。

(2)研究确定了不同质量、不同标定方法(抽板法和漏斗法)是否对堆积角产生影响。模拟结果表明,质量不同或标定方法不同,对沙土堆积角产生的

影响较小,可以忽略。

(3)研究了标准球和非标准球是否对堆积角产生影响。在本次仿真模拟的条件下,选用标准球标定时,碰撞恢复因数是0.15,静摩擦因数是0.8,滚动摩擦因数是0.2,抽板法得到的堆积角是 33.99° ,相对误差是4.74%;漏斗法得到的堆积角是

33.59° ,相对误差是3.51%。同时,选用非标准球进行标定时,碰撞恢复因数是0.15,静摩擦因数是0.2,滚动摩擦因数是0.3,抽板法得到的堆积角是 32.06° ,相对误差是1.20%。可见达到相同的堆积角,非标准球静摩擦因数要远远小于标准球静摩擦因数。

参 考 文 献

- 1 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22-28. 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.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, 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. (in Chinese)
- 2 马云海,马圣胜,贾洪雷,等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 36-41.
MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 36-41. (in Chinese)
- 3 李建桥,黄晗,王颖,等. 松软地面机器系统研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 306-320. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150544&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.044.
LI Jianqiao, HUANG Han, WANG Ying, et al. Development on research of soft-terrain machine systems[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 306-320. (in Chinese)
- 4 张青松,廖庆喜,汲文峰,等. 油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 53-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150108&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.008.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 53-59. (in Chinese)
- 5 张锐,李建桥,李因武,等. 部件复杂表面影响土壤扰动行为的离散元宏观分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(5): 1218-1223.
ZHANG Rui, LI Jianqiao, LI Yinwu, et al. DEM macroscopic and mesoscopic analysis in disturbed behavior of soil acted by part with complex surface[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(5): 1218-1223. (in Chinese)
- 6 于建群,付宏,李红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 1-6.
YU Jianqun, FU Hong, LI Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 1-6. (in Chinese)
- 7 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. (in Chinese)
- 8 UCCUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modeling[J]. Information Processing in Agriculture, 2015, 74(2): 130-141.
- 9 SHMULEVICH I, ASAF Z, RUBINSTEIN D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(1): 37-50.
- 10 CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in block rock systems[C]//Symposium of International Society of Rock Mechanics, 1971: 11-18.
- 11 于建群,钱立彬,于文静,等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 53-57.
YU Jianqun, QIAN Libin, YU Wenjing, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53-57. (in Chinese)
- 12 GUO Z, CHEN X, LIU H, et al. Theoretical and experimental investigation on angle of repose of biomass-coal blends[J]. Fuel, 2014, 116(1): 131-139.
- 13 JIN F, XIN H, ZHANG C, et al. Probability-based contact algorithm for non-spherical particles in DEM [J]. Powder Technology, 2011, 212(1): 134-144.
- 14 胡国明. 颗粒系统的离散元法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2010.
- 15 HERTZ H. On the contact of elastic solids[J]. Journal Für die Reine und Angewandte Mathematik, 1882, 92: 156-171.
- 16 MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1949, 16: 259-268.
- 17 MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. ASME Journal of Applied

- Mechanics, 1953, 20:327-344.
- 18 ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1-2): 227-242.
- 19 石林榕, 吴建民, 赵武云, 等. 基于离散单元法农田土壤单轴压缩模型的建立及参数校核[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 174-182.
SHI Linrong, WU Jianmin, ZHAO Wuyun, et al. Establishment and parameter verification of farmland soil model in uniaxial compression based on discrete element method[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(4): 174-182. (in Chinese)
- 20 BUDYNAS R G, NISBETT J K. Shigley's mechanical engineering design[M]. Columbus, OH: McGraw-Hill, 2012.
- 21 BHARADWAJ R, KETTERHAGEN W R, HANCOCK B C. Discrete element simulation study of a freeman powder rheometer [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(21): 5747-5756.
- 22 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- 23 DAS B M. Advanced soil mechanics[M]. 2nd ed. Washington D C: Taylor & Francis, 1997.
- 24 UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modeling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105-117.
- 25 BOAC J M, CASADA M E, MAGHIRANG R G, et al. Material and interaction properties of selected grains and oil seeds for modeling discrete particles[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1201-1216.
- 26 贾富国, 韩燕龙, 刘扬, 等. 稻谷颗粒物料堆积角模拟预测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 254-260.
JIA Fuguo, HAN Yanlong, LIU Yang, et al. Simulation prediction method of repose angle for rice particle materials [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 254-260. (in Chinese)
- 27 王金武, 王奇, 唐汉, 等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 112-117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016.
WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112-117. (in Chinese)
- 28 BARRIOS G K P, CARVALHO R M D, KWADE A, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling[J]. Powder Technology, 2013, 248(2): 84-93.

~~~~~

(上接第 83 页)

- 18 KHALID A, AL-GAADI K A. Performance evaluation of a cup-belt potato planter at different operation conditions and tuber shapes [J]. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 2011, 10(5):821-828.
- 19 政东红, 陈伟, 杜文亮, 等. 勺式排种技术及其排种均匀性的研究分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(7):106-109.  
ZHENG Donghong, CHEN Wei, DU Wenliang, et al. The study and analysis of cup seed sowing technology and uniformity [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 106-109. (in Chinese)
- 20 王泽明. 勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
- 21 王徐建, 宋建农, 刘彩玲, 等. 甘草倾斜移栽开沟器的设计与试验[J/OL]. 农业工程学报, 2016, 32(13):16-23. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161303&flag=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161303&flag=1). DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.003.  
WANG Xujian, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment on licorice tilt transplanting furrow opener [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13):16-23. (in Chinese)
- 22 岳群, 蒋金琳, 战长龄, 等. 小型多功能马铃薯种植机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(10):128-131.  
YUE Qun, JIANG Jinlin, ZHAN Changling, et al. Design and test of multifunctional small potato planting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10): 128-131. (in Chinese)
- 23 陈强, 韩文贺, 王国红, 等. 春马铃薯膜上覆土技术的应用研究[J]. 农学学报, 2015, 5(1):1-4.  
CHEN Qiang, HAN Wenhe, WANG Guohong, et al. Application research of covering soil over membrane technology of spring potato cultivation [J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(1): 1-4. (in Chinese)
- 24 徐余伟. 橡胶工业螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 橡塑技术与装备, 2008, 34(10):52-58.  
XU Yuwei. The choice and decision of design parameters for screw conveyor for rubber industry [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2008, 34(10): 52-58. (in Chinese)
- 25 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J/OL]. 农业工程学报, 2013, 29(10):153-159. [http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20131021&flag=1](http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131021&flag=1). DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.10.021.  
LI Qiang, LIU Guobin, XU Mingxiang, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10):153-159. (in Chinese)
- 26 GB/T 6242—2006 种植机械 马铃薯种植机 试验方法[S]. 2006.