

基于离散元的风沙沙粒物理特性参数标定

杨 摄¹, 郑明军¹, 吴文江², 赵晨磊¹

(1 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043; 2 石家庄铁道大学 教务处, 河北 石家庄 050043)

摘要:在研究风沙地区的农用机械与除沙机械同沙粒相互作用时,沙粒间及沙粒与钢板之间相互作用的参数的准确性将直接影响机械优化及仿真结果。现提出一种仿真与试验相结合,并采用数值分析与实验数据相结合的办法,对沙粒的物理特性参数进行标定,并通过试验验证确定沙粒间物理特性参数。研究结果表明,沙粒间静摩擦系数为0.23、滚动摩擦系数为0.1、恢复系数为0.25。通过相应的试验方法测量得到,堆积密度为1 613 kg/m³、沙粒直径在0.1~0.5 mm之间占总质量的97.58%、含水率为0.04%、沙粒与钢(Q235)的静摩擦系数、滚动摩擦系数、恢复系数依次为0.59、0.28、0.478,沙粒与橡胶的静摩擦系数、滚动摩擦系数、恢复系数依次为0.613、0.45、0.175。仿真堆积角度为27.55°,试验堆积角度为27.94°,仿真与试验堆积角相对误差为1.39%。仿真与试验结果基本吻合,为沙漠地区农用机械及除沙机械仿真和优化设计提供理论依据。

关键词:沙粒物理特性参数;参数标定;数值分析;离散元

中图分类号:O347.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2021)01-0049-09

0 引言

在研究风沙地区农业机械以及除沙机械等相关设备前,沙土的力学特性及沙土与机械之间相互作用参数的准确性将直接影响机械优化及仿真结果,不同的土壤类型有不同的力学特性。由于风沙地区沙粒物理特性参数的缺失,因而无法建立针对风沙地区沙粒的土壤模型。沙粒同机械及沙粒同橡胶传送带仿真的过程中,参数尚无法确定,常出现与试验结果较大的出入。应用试验及离散元方法研究风沙地区沙粒的物理特性,可以为风沙地区农业机械及除沙机械设计研究奠定基础。目前国内外针对风沙地区沙粒物理参数特性的研究较少。张锐等^[1]认为沙土颗粒的形状将会对物理特性参数有很大影响,王宪良等^[2]利用砂壤土建立了相关土壤模型。

目前颗粒的物理特性参数,主要是通过试验直接获取以及虚拟参数标定,单一的试验没有考虑到几种参数相互作用时对试验结果的影响^[3-9]。沙粒直径较小,不易直接获得颗粒间静摩擦系数、滚动摩擦系数以及恢复系数,目前国内学者主要采用的方法为测量实际堆积角值,采用离散元仿真以及试验数据处理,建立拟合曲线,反推得到^[10-18]。

在现有的相关研究基础上,提出一个系统标定沙粒参数的方法。通过大量试验对风沙地区沙粒物理特性参数进行标定,如堆积密度、沙粒直径、质量分数、含水率、空隙率以及堆积角。其次是通过试验确定沙粒与钢板和橡胶的静摩擦系数、滚动摩擦系数以及恢复系数进行了标定。最后是在保证参数正确的情况下,进行相应的微调。运用 EDEM 软件进行仿真和试验的对比,进行验证,建立针对风沙地区沙粒的土壤模型,为机械除沙以及相关后续研究提供合理可靠的试验及仿真参数。

收稿日期:2019-11-27 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.20190187

基金项目:国家自然科学基金(11472180);河北省自然科学基金(E2017210166);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2017068);石家庄铁道大学在读研究生创新能力培养资助项目(YC2019033)

作者简介:杨摄(1993-),男,硕士研究生,研究方向为机械设计与理论。E-mail:haoyunyangshe@163.com

杨摄,郑明军,吴文江,等.基于离散元的风沙沙粒物理特性参数标定[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(1):49-57.

1 沙粒间参数标定方法与原理

土壤及种粒建模通常采用的方法为离散元法。离散元法是分析和求解复杂离散系统动力学问题的一种新型数值方法,主要通过建立固体颗粒系统的参数化模型,进行颗粒行为模拟和分析^[19]。基本思想是将不连续介质离散为刚性颗粒单元,颗粒由于接触,重力位置和速度发生改变,该过程遵循牛顿第二定律^[20-22]。目前离散元方法已经广泛应用于矿山、能源化工、散粒体运输和农业等许多领域,郑明军等^[23]运用离散元方法分析了沙粒在铁路除沙车内集沙、排沙、抛沙的动态过程和数值规律并进行了相关优化,严战友等^[24]通过离散元方法研究了对隧道盾构机施加不同的激励条件下,刀盘推进力和扭矩的变化规律。

由于风沙地区沙粒的粘结力较小,且沙粒本身具有离散性,又由于在 EDEM 中 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型为默认计算模型,相比较于其他模型,具有计算精准、速度快等特点,故采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型。在此模型中不考虑表面粘结的情况下,法向力采用 Hertz 理论进行计算,切向力采用 Mindlin-Deresiewicz 理论进行计算,Hertz 理论是颗粒曲面弹性接触问题的理论基础,广泛应用于球体、柱体等曲面体的弹性接触。Hertz 与 Mindlin-Deresiewicz 理论均针对颗粒的弹性接触,但是由于变形量和接触力之间是非线性的,法向力与切向力相互耦合很难求解,所以通常采用微量叠加法分别计算法向和切向的位移与接触力^[19],其接触力学模型如图 1 所示。其中, k_n 、 k_t 、 C_n 、 C_t 、 F_n 、 F_t 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、颗粒间法向力以及颗粒间切向力。

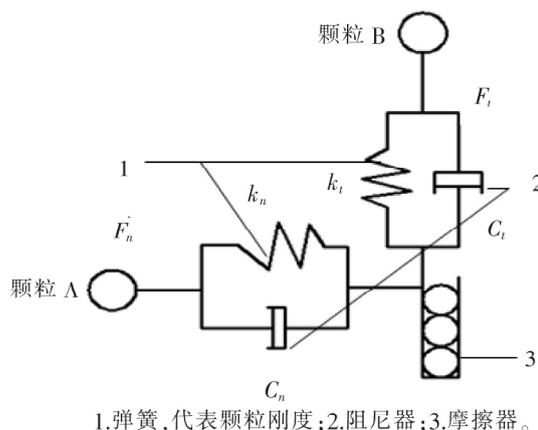


图 1 离散元接触力学模型

颗粒间的法向力为

$$F_n = k_n \delta_n^{3/2} + C_n \dot{\delta}_n \quad (1)$$

式中, k_n 为法向刚度; δ_n 为法向重叠量; $\dot{\delta}_n$ 为法向相对速度影响因子; C_n 为法向阻尼系数。

接触时的切向力为

$$F_t = \min \left[-S_t \delta_t - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{s_t m^* \dot{\delta}_t} \mu F_n \right] \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}} \quad (3)$$

式中, δ_t 为切向重叠量; m^* 为当量质量; $\dot{\delta}_t$ 为切向相对速度; μ 为滑动摩擦因数; S_t 为切向刚度。

2 沙粒本征参数测定

2.1 风沙地区沙粒的含水率

风沙明显区别于河沙及海沙,河沙成分较为复杂,表面具有一定的光滑性,含土量较高。海沙含盐量较高,对金属材料会产生电化学腐蚀。风沙则是由强风将沙漠中粒径较小的沙吹起形成的,其成分主要为二氧化硅,且纯度较高,杂质较少。取风沙试样 100 g,取沙地点位于内蒙古乌日根塔拉镇,东经 112.767°、北纬 42.23°。加热 6~8 h 至衡重,通过测量加热前后的质量变化,经过多次实验得到加热后沙土质量降低 (0.04 ± 0.002) g,其含水率约为 0.04%。而陈忠达等^[25],李振纲^[26]通过试验认为当沙粒含水率低于 1% 时,沙粒的干密度较大,此时沙粒的结构十分松散,几乎没有粘结力,仅有内摩擦力。

2.2 沙粒的堆积密度及空隙率

由于沙粒极难溶于水,所以测量沙粒的堆积密度采用排水法。经过 30 次试验测量,风沙地区的沙粒堆积密度为 1.613 kg/m^3 ,其空隙率为 38.12%。

2.3 沙粒直径分布与质量分数

由于风沙地区沙粒直径较小,为了给离散元软件颗粒工厂提供准确的颗粒直径,取沙土样本 500 g,用 GZS-1 型高频土壤筛机,将不同直径的沙粒通过标准筛进行颗粒分级,量取不同级别的沙粒质量,从而获得不同直径的沙粒所占的质量分数。试验重复 10 次,筛出 5 个级别沙粒试样,如图 2 所示,试验结果的平均值如表 1 所示。

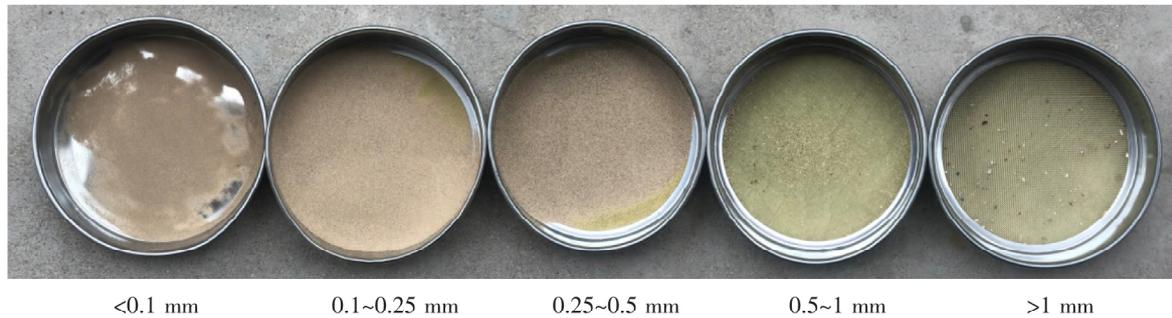


图 2 筛后沙粒试样

表 1 土壤粒径分级及质量分数

沙粒直径/mm	质量/g	质量分数/%	沙粒直径/mm	质量/g	质量分数/%
>1	0.76±0.04	0.152	0.1~0.25	347.79±3.22	69.56
0.5~1	2.72±0.09	0.544	<0.1	11.34±0.56	2.27
0.25~0.5	137.39±1.23	28.018			

查阅《公路土工试验规程》^[27]可知,沙粒范围在 2.0~0.5 mm 为粗沙;0.5~0.25 mm 为中沙;0.25~0.074 mm 为细沙;0.074~0.002 mm 为粉粒,从试验结果可知试验用风沙主要由中沙、细沙和粉粒组成。

3 沙粒与钢板及橡胶参数测定

3.1 沙粒与钢板及橡胶的恢复系数测定

恢复系数是反映物体碰撞时,物体变形恢复能力的参数,只与材料相关,广泛用于农业领域及化工领域。测定恢复系数主要使用的方法为,碰撞前后的两物体在接触点处的法向相对分离速度与法向相对接近速度之比^[28]。根据上述定义,恢复系数的表达式为

$$e = \frac{v_n'}{v_n} \tag{4}$$

式中, v_n' 为物料碰撞时法向相对分离速度; v_n 为物料碰撞时法向相对接近速度。

观察颗粒的恢复系数,目前大部分学者采用的方法是将碰撞前后的速度之比转化为高度之比,利用高速摄像机进行捕捉,但是由于沙粒直径过小,因而不易观察到前后高度变化。本文采用如下方法测定风沙地区沙粒与钢板的恢复系数。原理如图 3 所示。

图 3 中, H 为沙粒自由落体到钢板的高度, H_1 为沙粒与钢板碰撞后的下落速度,令 $H=H_1$, L 为沙粒与钢板碰撞点与沙粒在粘板落点之间的水平距离。钢板与水平面夹角为 45° 。

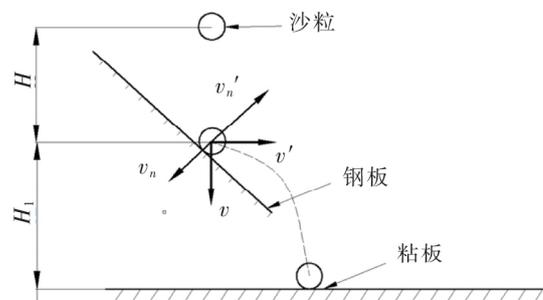


图 3 恢复系数试验原理图

设沙粒以初速度为 0 从距离水平面高度为 $2H$ 处自由下落,经过时间 t 与钢板接触,沙粒碰撞前速度为 v ,碰撞后速度的水平分量为 v' ,碰撞后沙粒下落至粘板的时间为 t_0 。根据运动学原理

$$v = \sqrt{2gH} \tag{5}$$

不计空气阻力及摩擦,沙粒碰撞后其垂直速度为 0,且 $H=H_1$,可得

$$t=t_0=\sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (6)$$

$$v'=\frac{L}{t_0}=\frac{L}{\sqrt{\frac{2H}{g}}} \quad (7)$$

$$v_n'=v'\sin 45^\circ \quad (8)$$

$$v_n=v\sin 45^\circ \quad (9)$$

$$e=(v_n')/v_n=(v'\sin 45^\circ)/(v\sin 45^\circ)=L/2H \quad (10)$$

为了便于观察,单个沙粒的粒径选取范围是 0.5~1 mm。通过制作试验平台,经过 30 次测量取平均值,得出沙粒与钢板的恢复系数为 0.478 ± 0.021 ,沙粒与橡胶的恢复系数为 0.175 ± 0.018 。

3.2 沙粒与钢板及橡胶的静摩擦系数测定

斜面滑动法是用来测量静摩擦系数常用的方法,在研究土壤及种粒与钢板之间静摩擦系数中应用较为广泛。设质量为 m 的单个沙粒放在斜面仪的斜面上, α 为斜面与水平面的夹角,静摩擦系数 μ 与夹角 α 的表达式如下

$$m=\frac{mg\sin\alpha}{ma\cos\alpha}=\tan\alpha \quad (11)$$

试验装置如图 4 所示,取钢板(Q235)放置于斜面仪上,将沙粒放在钢板之上,逐步增加夹角 α ,直至沙粒开始下落,当沙粒刚开始下滑时,记录夹角度数,取其正切值,为了便于观察,单个沙粒的粒径选取范围取 0.5~1 mm。经过 30 次测量取平均值,沙粒与钢板的静摩擦系数为 0.59 ± 0.01 ,沙粒同橡胶的静摩擦系数为 0.613 ± 0.008 。

3.3 沙粒与钢板及橡胶的滚动摩擦系数测定

沙粒与其他材料滚动摩擦系数不易测定,主要采用仿真方法确定。李贝等^[9]通过试验方法确定了铁球的滚动摩擦系数,并且通过试验验证,确定了方法的可行性。

将沙粒放置在长为 L 、倾角为 θ 、高度为 h_1 的斜面上,让其无初速度滚下至脱离斜面时的速度为 v_0 (水平速度为 v_1 ,竖直速度为 v_2);自由落体至粘板,落点与斜面终点的水平距离为 H ,竖直距离为 h_3 。设滚动摩擦系数为 k ,小球的质量为 m ,小球自由落体的时间为 t 。原理示意图如图 5 所示。

由能量守恒定律可知

$$mgh_1-kmgl\cos\theta=\frac{mv_0^2}{2} \quad (12)$$

$$V_1=V_0\cos\theta \quad (13)$$

$$V_2=V_0\sin\theta \quad (14)$$

$$v_1t=H \quad (15)$$

$$h_2=V_2t+\frac{gt^2}{2} \quad (16)$$

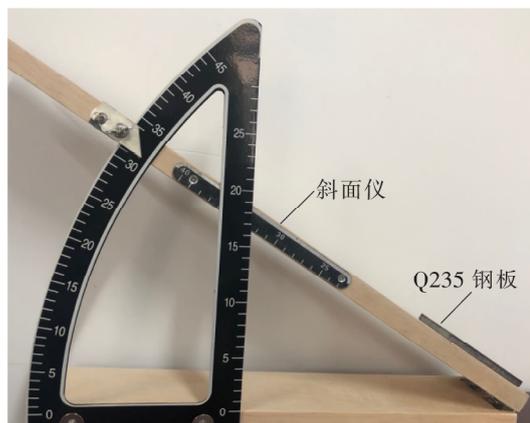


图 4 静摩擦系数测量装置

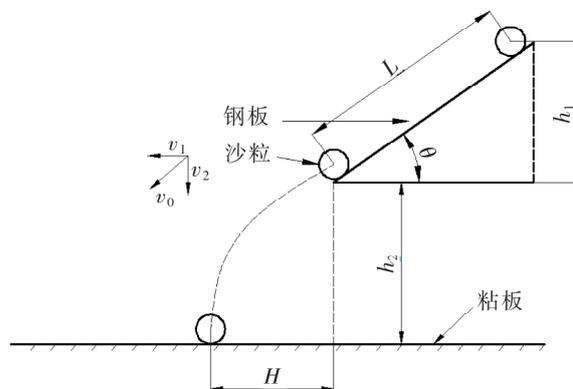


图 5 滚动摩擦系数测定原理图

$$k = \left[h_1 - \frac{H_2}{4\cos^2\theta h_2 - H\tan\theta} \right] \times [L\cos\theta]^{-1} \quad (17)$$

将 Q235 钢板放在斜面仪上,沙粒放在钢板上,逐步增加夹角 θ ,直至沙粒全部滑落,记录夹角度数,取其正切值,为了便于观察,取单个沙粒的粒径选取范围是 0.5~1 mm。经过 30 次测量取平均值,沙粒与钢板之间滚动摩擦系数为 0.28 ± 0.009 ,沙粒同橡胶之间滚动摩擦系数为 0.45 ± 0.011 。

4 沙粒间物理参数虚拟标定

由于沙粒直径较小,沙粒间静摩擦系数、滚动摩擦系数以及恢复系数无法通过试验方法直接测量出来,故采用仿真与试验相结合的方法,通过数值分析及优化,对以上 3 个参数进行测定。参数优化流程如图 6 所示。

通过以上试验及相关参考文献确定离散元模型参数,如表 2 所示。

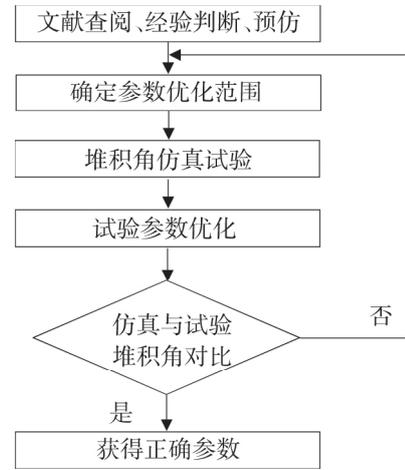


图 6 参数优化流程图

表 2 离散元仿真模型参数

仿真参数	钢(Q235)泊松比	钢(Q235)剪切模量/Pa	钢(Q235)密度/(kg·m ⁻³)	沙粒与钢(Q235)恢复系数	沙粒与钢(Q235)滚动摩擦系数	沙粒与钢(Q235)静摩擦系数	沙粒泊松比	沙粒剪切模量/Pa	沙粒密度/(kg·m ⁻³)
数值	0.3 ^[29]	7×10^{10} ^[29]	7 850 ^[30]	0.478	0.28	0.59	0.3 ^[31]	1.15×10^7 ^[1]	1 613

由表 1 知,颗粒直径在 0.1~0.5 mm 的比例占总数的 97.58%,颗粒建模时以直径为 0.1~0.5 mm 为基础。如果按照实际尺寸及比例生成颗粒,仿真时间将会延长,效率降低。为了加快仿真速度,提高效率,将沙粒的直径放大 0.8~2 倍,并利用颗粒工厂对其进行随机生成。沙粒的形状主要为球形、长条形、菱形^[1,32]。为了能够更加真实准确模拟堆积角,选取标准球型,对以上 3 种形状进行填充。

在多次预试验过程中发现,在下落高度一致的情况下,堆积角能否形成取决于颗粒数量的大小,颗粒数量过多将会使仿真时间延长,仿真效率降低。颗粒数量较少,不能形成堆积角,经过大量预试验,确定颗粒工厂共生成颗粒 30 000 颗,生成速率为 15 000 颗/s,颗粒生成后,从漏斗中下落。为了确保颗粒能够达到稳定状态,将仿真时间设置为 4 s,然后对其堆积角进行测量。

颗粒间相应参数,通常采用的方法为先测量堆积角,通过试验数据及分析反推得到相应的参数。经过大量预试验及查阅文献^[30]和文献^[33],确定沙粒间静摩擦系数所在区间为 0.2~0.28,沙粒间滚动摩擦系数所在区间为 0.05~0.2,沙粒间恢复系数所在区间为 0.15~0.35。

因待确定因素较多,故本次试验采用回归正交试验,建立拟合方程,对自变量参数进行求解。仿真试验因素取值范围、设计及结果如表 3、表 4 所示。

表 3 仿真试验因素取值范围

编码	因素		
	沙粒间静摩擦系数	沙粒间滚动摩擦系数	沙粒间恢复系数
1.68	0.28	0.2	0.35
1	0.264	0.17	0.31
0	0.24	0.125	0.25
-1	0.216	0.081	0.19

表 4 仿真试验方案设计与结果

序号	静摩擦系数	滚动摩擦系数	恢复系数	堆积角/(°)
1	0.216	0.081	0.19	12.80
2	0.264	0.081	0.19	35.54
3	0.216	0.170	0.19	17.80
4	0.264	0.170	0.19	38.16
5	0.216	0.081	0.31	14.28
6	0.264	0.081	0.19	37.57
7	0.216	0.170	0.31	16.22
8	0.264	0.170	0.31	40.60
9	0.200	0.125	0.25	13.79
10	0.280	0.125	0.25	32.66
11	0.240	0.050	0.25	14.10
12	0.264	0.200	0.25	36.61
13	0.240	0.125	0.15	32.01
14	0.240	0.125	0.35	32.74
15	0.240	0.125	0.25	36.73
16	0.240	0.125	0.25	36.52
17	0.240	0.125	0.25	36.33
18	0.240	0.125	0.25	36.76
19	0.240	0.125	0.25	36.68
20	0.240	0.125	0.25	36.83
21	0.240	0.125	0.25	36.22
22	0.240	0.125	0.25	35.95
23	0.240	0.125	0.25	36.43

对试验数据进行分析,得到沙粒堆积角与试验变量的二阶回归模型,其回归方程为

$$\theta = -579.78 + 4.260.17A + 262.05B + 340.04C + 1.032.43AB - 1.037.93AC + 673.83BC - 7.866.39A^2 - 2.385.69B^2 - 380.40C^2 \quad (18)$$

对仿真结果进行方差分析,拟合模型中的 P 值小于 0.000 1,表明利用此模型表示自变量与因变量的关系极为显著,其中沙粒-沙粒静摩擦系数二次项 P 值均小于 0.000 1,相比较于其他因素,沙粒静摩擦系数对于堆积角的影响最为显著。试验模型整体极为显著,表明对指标有显著影响的因素已经考虑到,说明试验合理有效。决定系数 $R^2 = 0.937 3$,校正决定系数 $R_{adj}^2 = 0.893 9$,两者均接近于 1,表明方程可靠度较高。

5 试验验证

研究采用沙粒堆积角测试试验装置如图 7 所示,将 500 g 沙粒倒入漏斗中,沙粒在漏斗下方形成颗粒堆。为了减少人为测量误差,更加准确地对堆积角进行测量,从 4 个方向对堆积角进行拍照,使用 Matlab 对图像进行灰度化、二值化处理、孔洞填充、提取边界,利用最小二乘法对边界曲线进行直线拟合,拟合直线的斜率即为堆积角的正切值。仿真及试验结果如图 8 及表 5 所示。

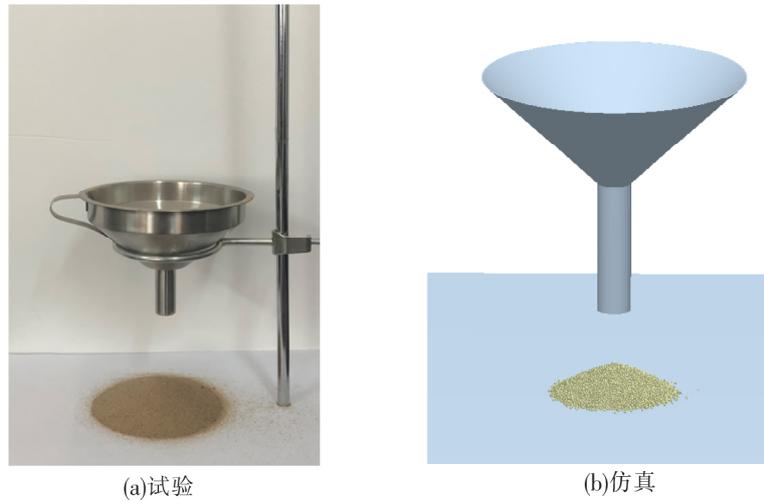


图 7 漏斗法试验装置

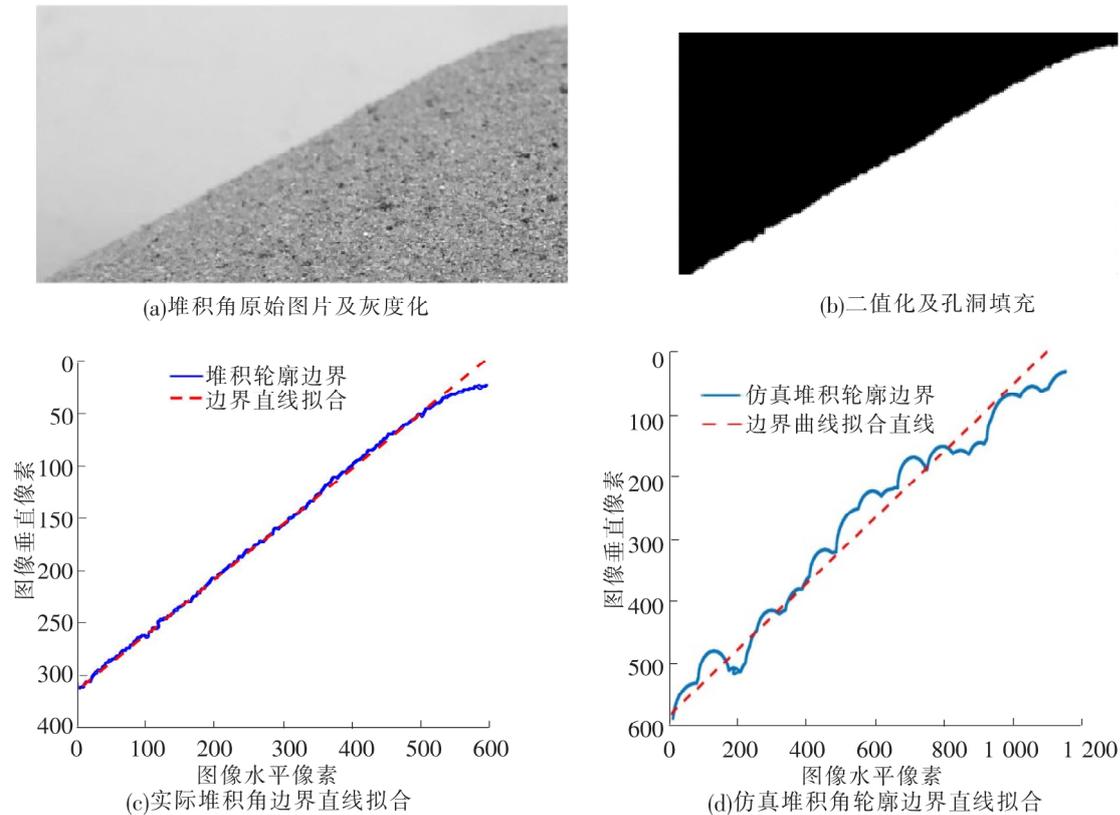


图 8 堆积角图像处理

表 5 堆积角试验与仿真数据对比

试验类型	堆积角/($^{\circ}$)	拟合直线斜率	拟合直线截距
试验	27.94	-0.530 5	313.94
仿真	27.55	-0.521 7	601.59

以实际堆积角 27.94° 为目标值,对回归方程进行有约束目标的优化求解。将优化结果通过离散元软件进行仿真确认并进行进一步优化确认,得到沙粒间静摩擦系数为 0.23、滚动摩擦系数为 0.1、沙粒间恢复系数为 0.23。由图 8 及表 5 中可以看出,仿真的堆积曲线与试验堆积曲线拟合较好,沙粒间静摩擦系

数、滚动摩擦系数与恢复系数接近于真实值,分别为 0.23、0.1、0.25。

6 结论

(1)以风沙地区沙粒作为研究对象,通过高频土壤筛机、堆积角测量装置及相关试验设备,确定了风沙地区沙粒的颗粒直径、堆积角、堆积密度、含水率,提出一种系统标定沙粒与其他材料相互作用参数的方法,并首次测量得到沙粒与钢板(Q235)及橡胶的静摩擦系数、滚动摩擦系数以及恢复系数。

(2)利用仿真与试验相结合的方法,通过回归正交试验方法,对离散元仿真数据进行分析,建立回归方程,采用漏斗法进行堆积角试验,利用 Matlab 图像技术测量堆积角,以实际堆积角为目标值,对方程进行求解,依次求得沙粒间静摩擦系数为 0.23,沙粒间滚动摩擦系数为 0.1,沙粒间恢复系数为 0.25。通过试验对优化参数进行验证,对比 2 条曲线,拟合度较高,堆积角差异值为 0.39° ,相对误差值为 1.39%,误差值较小。说明针对风沙地区沙粒物理特性参数的标定方法是可行的,测量数据真实有效,从而为风沙地区农用机械及除沙机械仿真、设计与优化提供可靠的试验数据。

参 考 文 献

- [1]张锐,韩佃雷,吉巧利,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):49-55.
- [2]王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报,2017,48(12):78-85.
- [3]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.
- [4]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.
- [5]李洪昌,高芳,李耀明,等. 水稻籽粒物理特性测定[J]. 农机化研究,2014(3):23-27.
- [6]陆永光,吴努,王冰,等. 花生荚果碰撞模型中恢复系数的测定及分析[J]. 中国农业大学学报,2016,21(8):111-118.
- [7]刘文政,何进,李洪文,等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2018,49(5):125-142.
- [8]李铁军,王学文,李博,等. 基于离散元法的煤颗粒模型参数优化[J]. 中国粉体技术,2018,24(5):6-12.
- [9]李贝,陈羽,孙平,等. 滚动摩擦系数工程测量方法与验证[J]. 工程机械,2017,48(4):29-35.
- [10]梅占舰,李骅,齐新丹,等. 砂壤土力学特性的测试与分析[J]. 沈阳农业大学学报,2018,49(5):605-612.
- [11]催涛,刘佳,杨丽,等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报,2013,29(15):34-41.
- [12]刘彩玲,魏丹,宋建农,等. 颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J]. 农业机械学报,2018,49(9):82-89.
- [13]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.
- [14]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.
- [15]郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报,2016,47(9):62-72.
- [16]韩燕龙,贾富国,唐玉荣,等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报,2014,63(17):173-179.
- [17]Zhou Y C, Xu B H, Yu A B, et al. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres [J]. Powder Technology, 2002, 125(1):45-54.
- [18]Yang J, Xuan K, Bin L I, et al. Study on release mechanism of inhibitory components from cinnamon and clove powders [J]. Journal of Food Safety, 2012, 32(2):189-197.
- [19]胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- [20]Zhu H P, Yu A B. A theoretical analysis of the force models in discrete element method[J]. Powder Technology, 2006, 161(2):122-129.
- [21]Ji S, Shen H, Asce M. Effect of contact models on granular flow dynamics[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2006, 132(11):1252-1259.
- [22]陈凯凯,叶方平,梅磊,等. 基于离散元法修正散料垂直螺旋输送运动模型[J]. 机械设计,2018,35(3):27-32.
- [23]郑明军,胡庆江,吴文江. 铁路轨道除沙车除沙装置的离散元仿真分析与试验[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2019,32(4):35-39.
- [24]严战友,盖惠恩,王震. 基于离散元法的隧道开挖过程动力学分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33(2):102-109.
- [25]陈忠达,张登良. 塔克拉玛干风积沙工程特性[J]. 西安公路交通大学学报,2001,21(3):1-4.

- [26]李振纲. 含水率对沙漠风积沙溯源冲刷速度的影响[J]. 吉林水利, 2019(10):39-41.
- [27]交通部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [28]王俊, 许乃章, 胥芳. 桃子冲击力学特性及其与桃子硬度的数学模型[J]. 农业机械学报, 1994, 25(4): 58-62.
- [29]Budynas R G, Nisbett J K. Shigley's mechanical engineering design[M]. Columbus, OH: McGraw-Hill, 2012.
- [30]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.
- [31]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.
- [32]Lu M, McDowell G R. The importance of modeling ballast particle shape in the discrete element method[J]. Granular Matter, 2007, 9(1/2):69-80.
- [33]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.

Calibration of Physical Characteristics of Wind Sand Particles Based on Discrete Element Method

Yang She¹, Zheng Mingjun¹, Wu Wenjiang², Zhao Chenlei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Office of Academic Affairs, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In the design and simulation of agricultural machinery and clean sand machinery designed in windy and sandy areas, the traditional calculation method cannot analyze the movement law of particles and the related forces of machinery because of the complex stress state. In this paper, a method of combination of simulation and experiment was proposed, and the method of combination of numerical analysis and experimental data was used to calibrate the physical characteristic parameters of sand particles, and the physical characteristic parameters between sand particles were determined through test verification. The results show that the static friction coefficient is 0.23, the rolling friction coefficient is 0.1 and the recovery coefficient is 0.25. According to the corresponding test methods, the stacking density is 1 613 kg/m³, the sand diameter is 0.1~0.5 mm, accounting for 97.58% of the total weight, the moisture content is 0.04%, the static friction coefficient, rolling friction coefficient and recovery coefficient of sand and steel (Q235) are 0.59, 0.28 and 0.478 respectively, and the static friction coefficient, rolling friction coefficient and recovery coefficient of sand and rubber are 0.613, 0.45 and 0.175 respectively. The simulation stacking angle is 27.55°, the experiment stacking angle is 27.94°, and the relative error between simulation and experiment stacking angle is 1.39%. The simulation results are in good agreement with the test results. It provides theoretical basis for simulation and optimization design of agricultural machinery and sand removal machinery in desert area.

Key words: physical properties of sand; particles parameter calibration; numerical analysis; discrete element method