

基于离散元法土壤分析的挖掘机铲斗仿真和实验

李文华 马 龙*

(辽宁工程技术大学机械工程学院, 阜新 123000)

摘要:为了证实离散元法土壤分析用于仿真挖掘作业的可行性,利用离散元法,先将土壤粒子运动公式化,通过崩落实验来确定土壤粒子仿真参数,之后进行实机实验验证仿真实验。通过分析仿真和实机结果的误差表明,离散元法土壤分析在实际运用中能准确地模拟和仿真挖掘工作,为进行真实挖掘机挖掘性能的分析提供了理论和实验依据。

关键词:挖掘机;铲斗;离散元法;土壤分析;仿真;实机实验

中图分类号:TU621 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2015.06.003

Simulation and Experiment of Digging Bucket Based on Discrete Element Method for Soil Analysis

LI Wenhua MA Long*

(College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000)

Abstract:In order to verify the feasibility of the simulation of digging operation, the discrete element method is used for soil analysis. Firstly, the soil particle movement is formalized by discrete element method. Then, the parameters of the soil particles are determined by digging experiments. Finally, the real machine experiment is done to verify the simulation results. By analyzing the results of simulation and real machine error results, the discrete element method for soil analysis can accurately simulate the digging work, which provide the theoretical basis and experimental basis for the analysis of real excavator digging performance.

Key words:excavator; bucket; discrete element method; soil analysis; simulation; real machine experiment

1 引言

挖掘机在挖掘过程中性能的高低受铲斗形状、土质、挖掘速度等各种因素影响。在挖掘过程中,铲斗受到的地面不规则离散力作用,以及土壤密度、粘度、内部摩擦角等原因都会导致实验验证工作量巨大^[1]。为了解决这个问题,Cundall 和 Strack 等^[2]提出了离散元理论(Discrete Element Method, DEM),将不连续的研究对象看成离散粒子的集合,然后运用牛顿运动方程求出各个粒子间的运动关系。通过此方法能求解机械和土壤间的相互作用关系。许多研究者对此进行了研究,杨洋^[3]等的研究成果充分证明了离散元法的可行性,胡励^[4]的研究证实了利用离散元法推导机械设备运作的可靠性。Takahashi^[5]也在 1998 年首次对装载机铲斗的装载过程进行离散仿真。

为实现简单快速地分析实际挖掘机的挖掘性

能,本文采用简单快捷的二维仿真模型进行分析,而非三维模型仿真。本文运用离散元法对土壤建立了 PFC^{2D} 二维模型^[6],同时进行了实机实验来进行比较,通过比较结果来判断模拟数据的精确性,以准确快速地对实际挖掘机挖掘生产性进行评测。

2 离散元法土壤分析

2.1 离散元法运动方程式

离散元法土壤分析示意图如图 1 所示,由粒子 i 和粒子 j 接触的法线方向的力 F_{nj} 和切线方向的力 F_{sj} 可得粒子运动方程。

$$m_i \frac{d^2 w_i}{dt^2} = m_i g + \sum F_{nj} + \sum F_{sj} \quad (1)$$

其中, m_i : 粒子 i 的质量; w_i : 粒子 i 的位置向量; g : 重力加速度。

离散元法土壤分析是通过图 1 右侧中的 Voigt 弹性模量模型来对切向和法向粒子间的力进行求解的。图中 η 为阻尼系数, K 为弹性系数,下角标 n 表示的是法向方向, s 表示的是切向方向。将式(1)右边所有的力分解为切向力和法向力,再分别列出运

2015-05-29 收稿, 2015-06-30 接受

* 通讯作者, E-mail: etwsrzxcop@sina.com; Tel: 18341847661

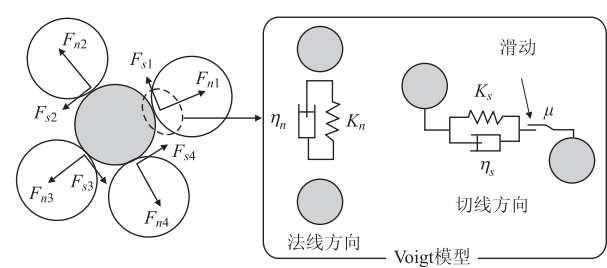


图1 离散元法土壤分析示意图

动方程,从而就能求解出粒子的运动^[7]。

2.2 粒子间的作用

粒子在接触中,法线方向上产生反弹力和阻尼力。反弹力可以运用胡克定律求解。*i,j* 两粒子法线方向的弹性系数 K_n 通过 Hertz 弹性接触理论求解,

$$K_n = \frac{4}{3} \frac{1}{\left(\frac{1-v_i^2}{E_i^2} + \frac{1-v_j^2}{E_j^2}\right)} \sqrt{\frac{\delta}{\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j}\right)}} \quad (2)$$

其中, v :泊松比; E :杨氏模量; r :粒子半径; δ :渗透量。

式(1)的数值解的收敛性会影响到 K_n 的值和时间间隔。杨氏模量 E 的值缩小导致数值解的收敛性上升,从而能够使仿真时的时间间隔设定得较大。本模型不仅要考虑仿真解的收敛性,还要考虑在减少解析成本的情况下,尽可能实现缩小解析对象土粒子杨氏模量在实验中的误差。

阻尼系数 η_{nj} 由阻尼比 ξ 决定,继而可得由粒子 j 产生法线方向的力 F_{nj} 、弹性系数 K_{sj} 和阻尼系数 η_{sj} 。

$$\eta_{nj} = 2\xi \sqrt{mK_{nj}} \quad (3)$$

$$F_{nj} = K_{nj}u_{nj} + \eta_{nj} \frac{du_{nj}}{dt} \quad (4)$$

$$K_{sj} = K_{nj}s \quad (5)$$

$$\eta_{sj} = \eta_{nj}\sqrt{s} \quad (6)$$

其中, u_{nj} 为两粒子间法线方向的相对位移量,变换系数 s 通过泊松比 ν 求解。

$$s = \frac{G}{E} = \frac{1}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

其中, G 为切向弹性系数。

粒子 j 切向方向的力如式(8)所示。

$$F_{sj} = \begin{cases} \mu F_{nj}, \mu F_{nj} < \eta_{sj} \frac{du_{sj}}{dt} + K_{sj}u_{sj} \\ \eta_{sj} \frac{du_{sj}}{dt} + K_{sj}u_{sj}, \mu F_{nj} \geq \eta_{sj} \frac{du_{sj}}{dt} + K_{sj}u_{sj} \end{cases} \quad (8)$$

2.3 坐标变换

接着进行上述粒子间的法向和切向的作用力的坐标变换,如图 2 所示将粒子 i 所受 j 在坐标系中的垂直力 F_{xj} 和水平力 F_{yj} 分别用 i 所受 j 粒子间的真实法向力 F_{nj} 和切向力 F_{sj} 表示。

$$F_{xj} = -F_{nj}\cos\alpha_{ij} + F_{sj}\sin\alpha_{ij} \quad (9)$$

$$F_{yj} = -F_{nj}\sin\alpha_{ij} - F_{sj}\cos\alpha_{ij} - mg \quad (10)$$

其中, α_{ij} 和 α_{ji} 为粒子 i 与 j 的中心连线与水平方向的夹角,如图 2 所示。

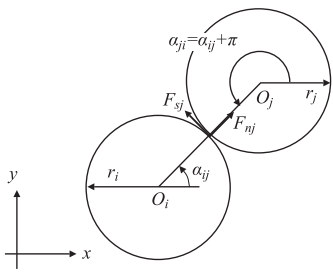


图2 粒子接触

2.4 挖掘解析

经过一次的挖掘仿真后,计算出了铲斗上的土壤粒子体积的二维挖掘量为 V_{2D} 。然后将二维仿真的挖掘量进行三维补正,如式(11)所示,其中 w_B 为铲斗宽度, d 为粒子直径。

$$V_{3D} = V_{2D} \frac{w_B}{d} \quad (11)$$

为了准确算出挖掘所需能量,需要算出铲斗挖掘时的扭矩。因此将铲斗分成 n_B 个铲斗粒子如图 3 所示,其中第 i 个粒子距离回转轴的距离为 l_i ,其 x 轴方向的作用力为 F_{xi} , y 轴方向的作用力为 F_{yi} , 粒子 i 到铲斗回转轴的连线与 x 轴的夹角为 φ_i 。首先算出第 i 个粒子的扭矩,之后求解 n_B 个粒子扭矩的总和,同时考虑到铲斗的宽度 w_B ,综合上述几点得出作用于铲斗回转轴的扭矩。

$$T = w_B \sum_{i=1}^{n_B} (F_{xi}l_i\sin\varphi_i + F_{yi}l_i\cos\varphi_i) \quad (12)$$

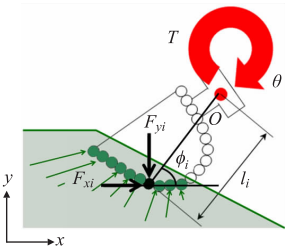


图3 计算挖掘扭矩

最后对算出的扭矩 T 进行时间积分,时间区间为一次挖掘开始的时间到一次挖掘结束的时间,从

而得出一次挖掘所需能量 $E_{digging}$ 。

$$E_{digging} = \int_{digstart}^{digend} Td\theta$$

(13)

2.5 检测指标

本研究主要是对挖掘机铲斗挖掘所需能量和挖掘量进行测定,从而对挖掘机的生产效率进行评测。将一次挖掘的挖掘量和所需能量的比称作挖掘效率 (Digging Efficiency)。

$$DiggingEfficiency = \frac{V_{3D}}{E_{digging}}[kg/J]$$

(14)

通过挖掘效率可以直观地看出挖掘机挖掘的生产性能,这个指标越大,证明其具有更高的生产效率,其挖掘性能就越好。下面本文将会通过实验和仿真两方面来对这一指标进行评测。

3 粒子参数的确定

为了再现粒子的运动,其中摩擦系数等参数的确定是十分重要的。确定这些参数的方法已经被提出^[8],证实了可以通过粒子运动仿真准确地分析出挖掘量。本仿真模型就是通过实际的球形粒子来再现二维模型,由此通过二维模型的分析来对三维现象的参数进行确定。将物理实验和仿真结果进行比较,从中得出物理实验所需要的的二维仿真的参数,并确定阻尼比和摩擦系数。

3.1 崩落实验和仿真

为了能够形象地展现挖掘时土壤的加载压力,粒子选择体积比土壤相对大一些,但密度较小的圆石作为实验对象。对 200 个样本测量直径,得出平均直径为 14.1 mm。同时准备一个长 740 mm、高 457 mm、宽 300 mm 的容器并在中间安装一个隔板。隔板一侧堆满圆石,如图 4 所示,设定堆积的粒子高 250 mm、宽 300 mm。然后将隔板移开形成如图 5 所示的斜面。此试验要反复执行 5 次得出斜面的平均倾斜角为 24.5 deg。

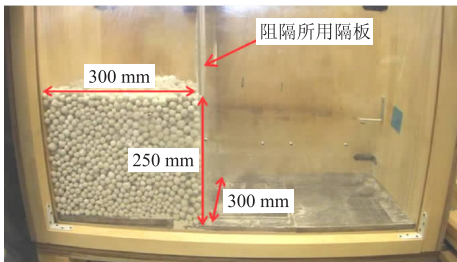


图 4 实验设备

崩落仿真方面和实验相同,先在宽为 300 mm 的容器中装入高 250 mm 的粒子,然后将宽度方向



图 5 滑落测试结果

迅速加大到无限,实现粒子自由下落并算出倾斜角。对阻尼比和摩擦系数的所有组合进行仿真,确定其中阻尼比分布在 0.3 ~ 0.8 之间,摩擦系数分布在 0.05 ~ 0.5 之间。最后将各个参数组合进行仿真。

3.2 响应曲线确定参数

根据得出的仿真结果进行 4 次多项式近似,得出如图 6 所示的响应曲面。图 7 是实验值和仿真值所求斜面角度误差平方和最小的参数组合并运用单纯形法所求得的图像^[9],其结果阻尼比为 0.68,摩擦系数为 0.11,从而确定实验所用参数。

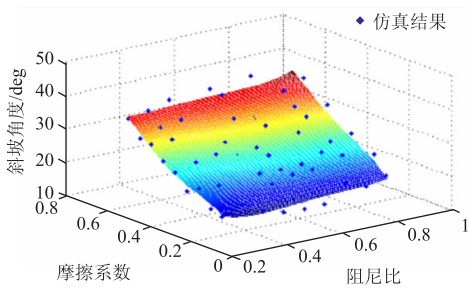


图 6 仿真结果和响应面

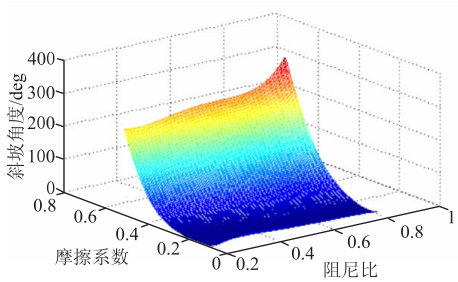


图 7 误差平方

4 挖掘试验机的仿真验证

4.1 实验机的结构与控制系统

挖掘实验机如图 8 所示。在这个装置中铲斗是通过电机 A 驱动的,沙土槽是由电机 B 以及 C 所连滚珠丝杠的回转来实现上下左右运动的。电机 A 还连接了减速比为 1/75 的减速机。通过此设备来实现液压挖掘机的挖掘模拟,其中电机 A、B、C 的额定输出扭矩依次为 9.55 Nm、2.50 Nm 和 1.27 Nm。

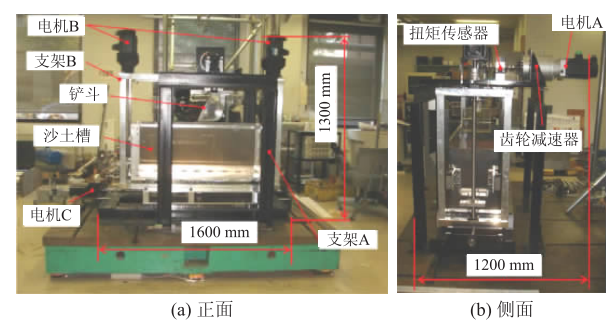


图 8 挖掘测试装置

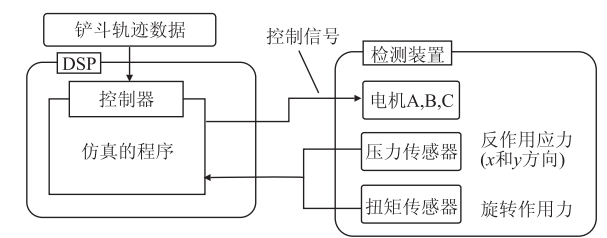


图 9 测试设备的控制系统

实验装置的控制和测量系统如图 9 所示。将 3 台伺服电机的控制信号分别输入到 DSP 中,3 台伺服电机内部有旋转编码器,根据编码器的信号测出铲斗运动轨迹数据,从而根据此数据来控制铲斗的旋转角度和沙土槽运动距离。电机 A 中装有转矩传感器,通过 DSP 来记录测量数据,通过转矩传感器测量的数据以及旋转编码器测量的角度来算出挖掘能量。

4.2 实验条件

挖掘实验和仿真在同样的实验条件下进行。仿真研究对象土壤粒子的数据如表 1 所示。进行挖掘实验的实验斜面如图 10 所示。容器的左下角为原点,在容器上画出坐标(单位:mm)。在这个斜面上进行如图 11 所示 3 种挖掘轨迹,各个轨迹的实验分别进行 5 次。

表 1 仿真参数

直径[m]	1.41E -02
密度[kg/m ³]	3.00E +03
弹性模量[Pa]	6.50E +06
泊松比	0.23
阻尼比	0.68
摩擦系数	0.11

4.3 结果对比

表 2 为实验和仿真在三种轨迹下各个量的值,表 2 经过数据整理归一化后得到表 3。从表 3 可以看出,挖掘量上轨迹 3 最高,轨迹 1 最低。挖掘能量上轨迹 1 最高,轨迹 2 最低,挖掘效率上轨迹 2 高,轨迹 1 最低。实际测量和仿真的各个数值基本一致,因此能够实现通过仿真来对挖掘性能进行评测。

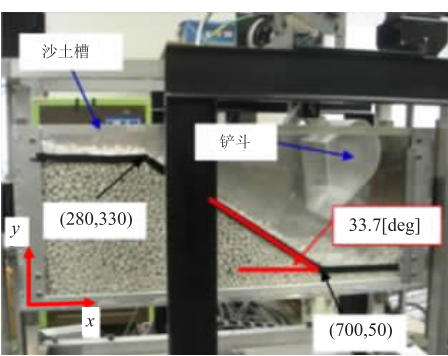


图 10 斜坡条件

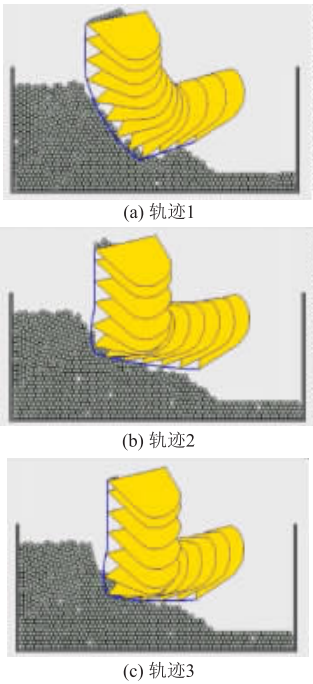


图 11 三种挖掘轨迹

表 2 实机和仿真的结果和误差

		实验	仿真	误差
挖掘量	轨迹 1	0.41	0.52	26.8%
	轨迹 2	0.48	0.65	35.4%
	轨迹 3	0.49	0.65	32.7%
能量	轨迹 1	3.20	2.70	-15.6%
	轨迹 2	2.40	2.00	-16.7%
	轨迹 3	2.70	2.10	-22.2%
效率	轨迹 1	0.13	0.61	50.3%
	轨迹 2	0.20	0.33	62.5%
	轨迹 3	0.18	0.31	70.6%

表 3 实机和仿真归一化的结果和误差

		实验	仿真	误差
挖掘量	轨迹 1	0.82	0.80	-2.2%
	轨迹 2	0.98	1.00	1.6%
	轨迹 3	1.00	1.00	0.0%
能量	轨迹 1	1.00	1.00	0.0%
	轨迹 2	0.73	0.75	2.6%
	轨迹 3	0.79	0.80	0.7%
效率	轨迹 1	0.62	0.61	-2.1%
	轨迹 2	1.00	1.00	0.0%
	轨迹 3	0.94	0.95	0.1%

(下转第 766 页)

大学,2010.

[16]赵鹏.深圳金融人才吸引力弱化原因及对策分析[J].人力资源管理,2015,10(1):121-122.

[17]何立华,杨崇琪.人才环境及其影响因素[J].经济与管理评论,2014,31(1):17-23.

[18]范宝月.浅析中西部中小城市人才吸引力发展现状[J].太原城市职业技术学院学报,2014,16(7):22-23.

[19]杨楚,尹梦洁.副省级城市人才环境对人才竞争力的影响[J].经营管理者,2015,31(2):148-149.

[20]高子平.基于层次分析法的上海市人才吸引力研究[J].华东经济管理,2012,26(2):5-9.

[21]万星辰,施洋,秦燕.城市人才吸引力评价指标体系的设计思路[J].产业与科技论坛,2013,12(10):253-254.

[22]李涛,陈彦桦,王嘉伟.地区人才吸引力与城镇化水平相关性研究[J].钦州学院学报,2014,29(8):68-74.

[23]王运红,王弋波,吴晓莉.区域人才政策竞争力对比研究[J].中国科技资源导刊,2014,46(6):82-89.

[24]刘丽君,徐姗姗.我国人才环境评价指标体系的构建研究[J].沈阳农业大学学报(社会科学版),2012,14(5):537-541.

[25]王乐杰.我国制造业基地人才吸引力评价[J].企业经济,2010,31(5):44-47.

[26]张洪潮,雒国.战略性新兴产业集群人才磁场效应研究[J].科技管理研究,2013,33(22):181-184.

[27]王张地,潘清泉.提高广西北部湾经济区人才引力对策[J].改革与开放,2013,(19):42-433.

[28]李健.基于因子分析的三大都市密集地区的城市发展优势[J].地理研究,2008,27(3):659-671.

[29]赵美英,李卫平,张丁榕.常州城市竞争力研究[J].江苏工业学院学报,2009,10(4):46-50.

[30]李乃文,李方正.基于人才集聚载体的人才吸引力研究[J].人口与经济,2011,32(6):41-48.

[31]勒温.拓扑心理学原理[M].竺培梁,译.浙江:浙江教育出版社,1997.

[32]王顺.我国城市人才环境综合评价指标体系研究[J].中国软科学,2004,19(3):148-151.

[33]李晋玲,刘人境.城市化测度方法研究[J].西北大学学报(哲学社会科学版),2007,37(3):174-176.

[34]李利梅,柳向东.R型因子分析模型描述[J].统计与决策,2003,(8):88-89.

(上接第 653 页)

4.4 挖掘量误差的原因分析

仿真的挖掘量比实际测量的挖掘量较大的原因主要是因为挖掘仿真采用的是二维模型,而实机实验采用的是三维的。实机实验中在铲斗挖掘抬起时土块的一部分会从铲斗两侧流出,而二维模型无法模拟计算出实机中两侧流出的土壤粒子的量。但是为了节省运算时间,实现简单快速的评测,其误差范围也是在允许范围之内的。

5 结束语

本文通过建立挖掘土粒的仿真颗粒模型,细致分析铲斗与土粒的接触力并列运动学方程,求出目标参数,为仿真比较提供了标准;合理运用崩落实验得出响应曲线,算出了仿真所需基本参数、阻尼比和摩擦系数;分别进行实机实验和仿真实验,运用实验的方法证实了仿真方法的准确性以及所推导指标的可靠性。

通过以上工作,本文证实了基于二维的离散元法土壤分析在挖掘铲斗生产性定量评测方面的可行性和可靠性,为优化挖掘机性能提供了一种可行的理论方法。

参考文献

[1]曾德超.机械土壤动力学[M].1版.北京:北京科学技术出版社,1995.

[2]CUNDALL P A,STRACK O D L. A discrete element model for granular assemblies[J]. Geotechnique,1979,29(1):47-65.

[3]杨洋,唐寿高.颗粒流的离散元法模拟及其进展[J].中国分体技术,2006,12:38-43.

[4]胡励.机械产品设计中的颗粒离散元仿真技术及实现[D].武汉:武汉大学,2013.

[5]TAKAHASHI H,NAMURA Y. Fundamental Study on Estimation of Internal Condition in Piled Fragment Rocks by Use of Resistive Forces Acting on the Bucket of Wheel Loaders[J]. Journal of the Mining & Materials Processing Institute of Japan,1996,112(8):511-517.

[6]周国庆,周杰,陆勇,等.颗粒程序(PFC^{2D})中阻尼参数的适用性研究[J].中国矿业大学学报,2011,40(5):667-672.

[7]王奎华,应宏伟.广义 Voigt 土模型条件下桩的纵向振动响应与应用[J].固体力学学报,2003,24(3):293-303.

[8]LI Yanjie,XU Yong,THORNTON C. A comparison of discrete element simulations and experiments for ‘sandpiles’ composed of spherical particles[J]. Powder Technology,2005,160(3):219-228.

[9]肖宏峰.基于单纯形多向搜索的大规模进化优化算法[D].长沙:中南大学,2009.