

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.012

# 大型液压挖掘机斗杆挖掘阻力的 离散元素法研究\*

陈 焯<sup>1</sup>, 李爱峰<sup>2</sup>, 李 光<sup>2</sup>, 谭 磊<sup>2</sup>, 陈永春<sup>1</sup>, 余翊妮<sup>1</sup>, 宁晓斌<sup>1\*</sup>

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 太原重工股份有限公司 技术中心, 山西 太原 030023)

**摘要:** 针对由于缺乏铲斗挖掘阻力等关键数据而导致在大型正铲液压挖掘机工作装置、液压系统设计时只能采用类比法而造成整机性能差的问题, 对挖掘机斗杆挖掘阻力进行了离散元研究, 提出了一套仿真评估方法: 运用离散元素法, 在 EDEM 中建立了矿堆模型, 通过选择 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型计算了元素间接触力, 模拟了大型正铲液压挖掘机斗杆挖掘工况, 分析研究了挖掘过程中铲斗所受挖掘阻力。将 EDEM 中所得挖掘阻力加载到 ADAMS 挖掘机动力学模型, 进行工作装置和液压回路参数校核以及挖掘阻力实验验证。研究表明, 挖掘阻力的仿真与计算为大型液压挖掘机工作装置和液压系统设计提供了可靠依据。

**关键词:** 大型正铲液压挖掘机; 离散元素法; 挖掘阻力

中图分类号: TH122; TD422

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)06-0798-05

## DEM research for crowd force of large hydraulic excavator

CHEN Ye<sup>1</sup>, LI Ai-feng<sup>2</sup>, LI Guang<sup>2</sup>, TAN Lei<sup>2</sup>,  
CHEN Yong-chun<sup>1</sup>, SHE Yi-ni<sup>1</sup>, NING Xiao-bin<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;  
2. Technology Center, Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030023, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the poor performance for hydraulic excavator, which caused by the lacking of critical data of excavator's crowd force and it can only use analogy method to design working device and hydraulic system of large face-shovel hydraulic excavator, a simulation method in the evaluation of crowd force was proposed. The discrete element method was used in EDEM to establish the model of ore heap and select Hertz-Mindlin (no-slip) contact model to calculate the contact force. The crowd force was analyzed in the simulation of hydraulic excavator mining condition. Then MSC. ADMAS was used to calibrate the data of working device and hydraulic system of the excavator dynamic model by inputting the crowd force. The results indicate that the simulation and calculation of crowd force can provide the reliable basis for working device and hydraulic system design.

**Key words:** large face-shovel hydraulic excavator; discrete element method (DEM); crowd force

## 0 引 言

随着高效与节能减排要求, 液压挖掘机逐渐向高速、高压、大斗容、大功率发展。目前, 国外对于大型液压挖掘机的研制技术比较成熟, 而国内在大吨位的液压挖掘机领域还处于起步阶段。并且研究人员在进行

工作装置设计时主要采用类比法, 而真正运用到工程实践中经常会出现工作油缸不工作、闭锁油缸溢流、电动机功率不足以及斗杆或动臂失效甚至开裂等故障<sup>[1-2]</sup>, 产生上述问题的原因是国内在设计制造大型液压挖掘机时在挖掘阻力等关键数据方面存在空白, 不能为液压挖掘机工作装置以及液压系统的正向设计提

收稿日期: 2014-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375452); 山西省煤基科技重点攻关项目(MJ-2014-01)

作者简介: 陈 焯(1989-), 男, 浙江嘉兴人, 主要从事离散元素法方面以及多体动力学方面的研究。E-mail: 243234784@qq.com

通信联系人: 宁晓斌, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: nxb@zjut.edu.cn

供可靠数据支持。

国内许多学者在挖掘阻力方面的研究主要以理论计算为主,但由于挖掘过程的复杂性,并且考虑到大型液压挖掘机工作对象主要是爆破后的矿石或岩石(非均质各向异性材料且不连续),故很难对挖掘阻力进行直接分析,也没有准确的经验公式可循。而国内现有的设备不能检测大型液压挖掘机挖掘过程中铲斗的受力情况,目前为止也未有其他较好的仿真模拟方案对挖掘阻力进行可靠的评估。国外 VOLVOL 公司运用离散元素法在 EDEM 中模拟装载机挖掘工况,所得模拟数据与实验结果较为吻合,而国内在挖掘阻力离散元素法方面的研究尚处于起步阶段。

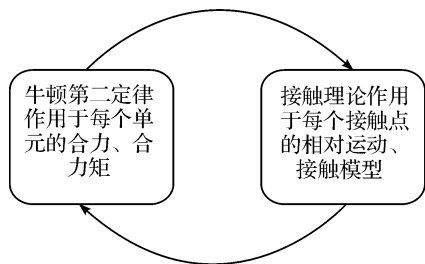
本研究为解决挖掘阻力的评估问题,在 ADAMS 中建立 15 m<sup>3</sup> 液压挖掘机机构仿真模型,然后运用离散元素法在 EDEM 建立矿堆模型,模拟液压挖掘机挖掘工况,分析研究挖掘过程中铲斗所受的挖掘阻力,最后将挖掘阻力加载到 ADAMS 模型中进行工作装置、液压系统参数校核以及挖掘阻力实验验证。

## 1 离散元素法原理

离散元素法是求解与分析复杂离散系统的运动规律与力学特性的一种新型非连续介质力学数值方法。目前离散元素法商业计算软件非常少,EDEM 是英国 DEM Solutions 公司开发的、在全球处于领先地位的离散元素法应用软件。EDEM 利用离散元素法进行计算,把介质看作由一系列离散的独立运动的单元(粒子)所组成,利用牛顿第二定律建立每个单元的运动方程,并用中心差分法求解,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。

进行离散元数值计算时,研究者往往通过循环计算的方式,跟踪计算材料颗粒的移动状况,其内部计算流程如图 1 所示。

单元的参数更新及接触判断



接触力的产生与计算

图1 内部计算关系

每一次循环主要包括两个计算步骤:

(1)由作用力、反作用力原理和相邻颗粒间接触

本构关系(接触模型)来确定颗粒间的接触作用力和相对位移;

(2)牛顿第二定律确定由相对位移在相邻颗粒间产生的新的不平衡力,直至要求的循环次数或颗粒移动趋于稳定或颗粒受力趋于平衡<sup>[3-5]</sup>。

## 2 挖掘机工作装置挖掘力建模

### 2.1 挖掘机工作装置机构仿真

本研究以太原重工提供的 15 m<sup>3</sup> 液压挖掘机相关数据建立的斗杆挖掘模型为例,来具体讲解挖掘阻力离散元素法仿真建模过程。

斗杆挖掘是大型液压挖掘机常见工作形式,斗杆挖掘工况通常以斗杆油缸进行挖掘,铲斗油缸起到调整铲斗姿态的作用以保证铲斗保持最优后角进行挖掘,挖掘仿真过程中,动臂油缸保持不动,斗杆油缸从最短伸至最长,完成一次挖掘。由此,本研究将 UG 模型中建立的挖掘机三维模型导入到 ADAMS 中,并且添加约束和运动关系,在 ADAMS 中建立挖掘机工作装置机构模型<sup>[6-11]</sup>,具体模型如图 2 所示。

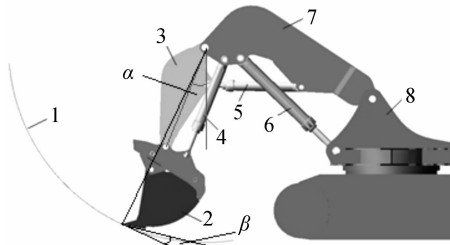


图2 挖掘机工作装置机构 ADAMS 模型

1—斗杆挖掘工况轨迹;2—铲斗;3—斗杆;4—铲斗油缸;5—斗杆油缸;6—动臂油缸;7—动臂;8—转台机构; $\alpha$ —斗杆角,定义为铲斗、斗杆铰接点和斗杆、动臂铰接点连线与竖直方向所成夹角; $\beta$ —挖掘后角,定义为斗杆、动臂铰接点和铲斗斗尖连线的垂直线与斗唇平面的夹角

图 2 中,斗杆挖掘工况挖掘路径:挖掘初始位置为斗杆角 7°,挖掘后角为 10°,挖掘过程中挖掘后角尽量保持不变,挖掘终止时斗杆角为 82°,整个挖掘过程历时 9 s,通过运动学仿真,确定了铲斗在挖掘过程中的姿态变化。

### 2.2 EDEM 挖掘机挖掘工况仿真

#### 2.2.1 EDEM 矿堆模型建立

本研究在 EDEM 中选择颗粒与颗粒之间、颗粒与机构之间的接触模型为 Hertz-Mindlin (no slip) 无滑动接触模型,该模型是以 Mindlin 的研究成果<sup>[12]</sup>作为理论基础的,具有准确而高效的计算性能<sup>[13]</sup>。

具体模型如下:

法向力  $F_n$ :

$$F_n = \frac{4}{3}E^*(R^*)^{1/2}(\delta_n)^{3/2} \quad (1)$$

式中: $E^*$ —等效杨氏模量, $R^*$ —模型颗粒的等效半径, $\delta_n$ —法向重叠量。

法向阻尼力  $F_n^d$ :

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^* v_n^{rel}} \quad (2)$$

式中: $m^*$ —等效质量, $v_n^{rel}$ —相对速度的法向分量。

$\beta$ (与恢复系数相关的参数)和  $S_n$ (法向刚度)分别为:

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

$$S_n = 2E^*\sqrt{R^*\delta_n} \quad (4)$$

式中: $e$ —恢复系数。

切向力  $F_t$  由切向重叠量  $\delta_t$  和切向刚度  $S_t$  确定

$$F_t = -S_t\delta_t \quad (5)$$

$$S_t = 8G^*\sqrt{R^*\delta_n} \quad (6)$$

式中: $G^*$ —等效剪切模量。

此外,切向阻尼力  $F_t^d$  为:

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^* v_t^{rel}} \quad (7)$$

式中: $v_t^{rel}$ —相对切向速度。切向力与摩擦力  $\mu_s F_n$  有关,其中: $\mu_s$ —静摩擦系数。

在 DEM 仿真中,滚动摩擦的影响非常重要,必须加以考虑。一般在接触面上施加一个力矩来表征滚动摩擦。

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \vec{\omega}_i \quad (8)$$

式中: $\mu_r$ —滚动摩擦系数, $R_i$ —颗粒  $i$  的质心到接触点的距离, $\vec{\omega}_i$ —颗粒  $i$  在接触点出的单位角速度向量。

如此,根据该接触模型可计算元素间接触力,再得到颗粒所受合力以及合力矩。

然后本研究通过实验和 EDEM 仿真相结合的手段来具体标定包钢某矿山铁矿石材料属性参数以及材料之间接触参数<sup>[12]</sup>,具体如表 1、表 2 所示。

表 1 材料属性参数

| 属性  | 材料    |        |
|---|-------|--------|
|   | rock  | steel  |
| 泊松比 $\nu$                                 | 0.25  | 0.3    |
| 剪切模量 $G/\text{MPa}$                       | 16    | 70 000 |
| 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 3 948 | 7 800  |

本研究根据铁矿石物料的具体形状导入矿石颗粒的 CAD 模型准确描述颗粒形状、大小,具体模型如图 3 所示。笔者建立矿石颗粒模型以及矿堆模型,矿堆物

表 2 材料之间接触参数

| 参数             | 接触类型      |            |
|----------------|-----------|------------|
|                | rock-rock | rock-steel |
| 静摩擦系数 $\mu_s$  | 0.49      | 0.5        |
| 滚动摩擦系数 $\mu_r$ | 0.21      | 0.25       |
| 恢复系数 $e$       | 0.51      | 0.42       |

料粒径(直径)范围为 100 mm ~ 500 mm,具体粒径分布如表 3 所示,其中每组颗粒群都服从正态分布。

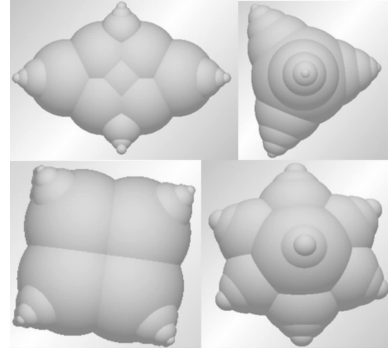


图 3 矿石颗粒模型

表 3 物料粒径分布表

| 项目       | 大颗粒       | 中颗粒       | 小颗粒       |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| 粒径/mm    | 500 ~ 250 | 270 ~ 150 | 170 ~ 100 |
| 数量/粒     | 1 000     | 5 000     | 150 000   |
| 数量分布/(%) | 0.6       | 3.2       | 96.2      |
| 重量分布/(%) | 13.7      | 12.1      | 74.2      |

矿堆物料在自然环境中堆垛会形成安息角,自然安息角指的是散料在堆放时能够保持自然稳定状态的最大角度(单边对水平面的角度)。根据包钢某矿山矿堆物料实际自然安息角,在 EDEM 中调整矿石形状、大小分布以及滚动摩擦系数来模拟矿堆自然坍塌,得到与实际相仿的矿堆自然安息角,此处安息角为 40°左右,具体分布情况如图 4 所示。

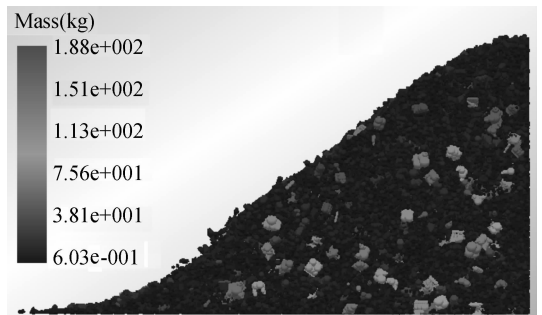


图 4 矿堆模型以及物料粒径分布情况

### 2.2.2 EDEM 挖掘机挖掘工况建模

本研究在 EDEM 中导入挖掘机工作装置 CAD 模型,然后根据挖掘机工作装置机构 ADAMS 模型在 EDEM 中定义工作装置运动,模拟斗杆挖掘工况,具体

模型如图5所示。该工况下,满载铲斗装载质量如图6所示。CAD模型导入时 EDEM 软件会自动对 CAD 模型进行网格划分,相应网格可记录受力以及力矩等信息。在 EDEM 后处理模块中导出整个铲斗所有网格受力的合力值,作为挖掘过程中整个铲斗所受挖掘阻力,具体曲线如图7所示。

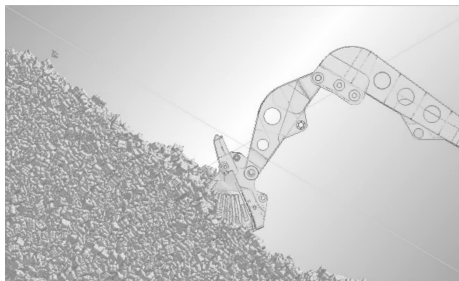


图5 挖掘机 EDEM 挖掘工况模型

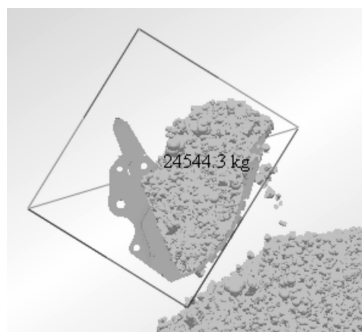


图6 铲斗装载质量

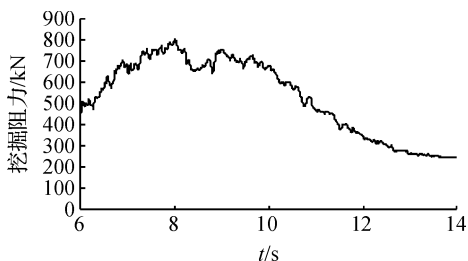


图7 挖掘过程中铲斗所受挖掘阻力

### 2.3 工作装置机构设计分析

本研究将 EDEM 中所得整个铲斗上的挖掘阻力载荷以二维数组文本形式加载到 ADAMS 挖掘机斗杆挖掘工况模型铲斗斗尖上,方向为斗尖轨迹切线方向,与运动方向相反,通过工作装置动力学仿真,测得3个油缸受力变化图如图8所示。

如图8所示,3个油缸最大受力值分别为5240 kN(动臂)、2157 kN(斗杆)以及2937 kN(铲斗)。根据太原重工提供的15 m<sup>3</sup> 液压挖掘机工作装置参数以及相关数据如表4所示,本研究设定工作压力为35 MPa,工作油腔的过载、补油回路,卸荷压力设定值为38 MPa。

可由公式(9)具体计算3个油缸理论最大受力,由于挖掘时由背压产生的受力较小,故此忽略。

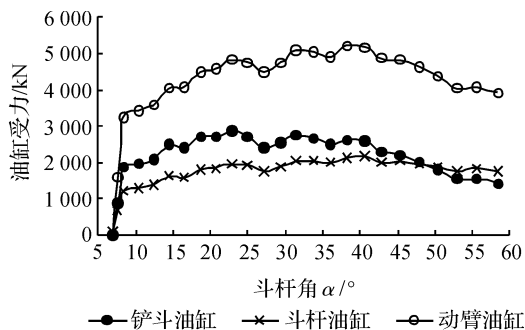


图8 3个油缸受力随斗杆角变化图

表4 油缸设计参数

| 15 m <sup>3</sup> | 缸径 D/mm | 杆径 d/mm |
|-------------------|---------|---------|
| 动臂油缸              | 320     | 220     |
| 斗杆油缸              | 230     | 170     |
| 铲斗油缸              | 250     | 180     |

$$F_{\max} = 2\pi R^2 \cdot p \quad (9)$$

式中: $R$ —无杆腔油缸半径, $p$ —工作压力或卸载压力。液压挖掘机为双缸工作,故都乘以2倍。

如此,由公式可计算的3个油缸理论最大受力分别为6109 kN(动臂)、2907 kN(斗杆)以及3434 kN(铲斗),对比挖掘机斗杆挖掘工况下3个油缸实际最大受力值与3个油缸理论最大受力可得15 m<sup>3</sup> 液压挖掘机斗杆挖掘工况下工作装置、液压回路设计参数满足要求。

### 3 实验及结果分析

由于无法直接检测大型液压挖掘机挖掘过程中铲斗的受力情况,该实验通过测量斗杆油缸无杆腔压力值,然后与仿真所得的斗杆油缸压力值进行对比,间接对挖掘阻力仿真数据进行实验验证。具体实验方案为太原重工技术中心某矿场实机挖掘条件下,将斗杆油缸无杆腔上的压力传感器信号线通过屏蔽线连接 INV-306U 智能数据采集分析系统,然后进行斗杆挖掘,得到斗杆挖掘时斗杆油缸无杆腔压力,与仿真所得数据进行对比,具体如图9所示。

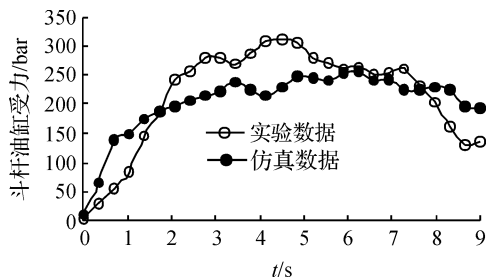


图9 实验与仿真数据对比图

实验与仿真数据对比,仿真所得的油缸压力值偏小,造成该结果的原因主要有3点:

(1) 矿堆非均质各向异性且不连续特性造成挖掘

阻力值在一定范围内随机性波动。

(2) 由于实际矿堆中矿石形状、尺寸分布的复杂性, 仿真所建矿堆模型在一定程度上进行了简化处理。

(3) 挖掘过程的不可逆性, 即相同条件下重复挖掘挖掘阻力亦不同。

本研究为挖掘机工作装置、液压系统设计提供了依据。在实际运用中, 工作装置液压系统较好地满足了挖掘工作要求, 该机型在某矿山挖掘工作现场如图 10 所示。



图 10 液压挖掘机生产现场

## 4 最优挖掘后角研究

本研究针对最优挖掘后角在 EDEM 中进行仿真试验研究。大型液压挖掘机在挖掘过程中, 挖掘后角对铲斗所受挖掘阻力影响较大。挖掘过程中斗杆角初始值仍然定义为  $7^\circ$ , 本研究控制挖掘后角为唯一变量, 设置挖掘后角分别为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  以及  $20^\circ$  4 组仿真试验, 模拟斗杆挖掘工况, 铲斗装载情况都为满载, 所得具体数据如表 5 所示。

表 5 不同挖掘后角试验组对比信息

| 挖掘后角/ $^\circ$ | 装载质量/t | 最大挖掘力/kN |
|----------------|--------|----------|
| 5              | 24.7   | 848      |
| 10             | 24.6   | 789      |
| 15             | 25.9   | 947      |
| 20             | 24.7   | 925      |

由数据可得其他条件相仿, 挖掘后角为  $10^\circ$  试验组挖掘过程中所受最大挖掘阻力最小。

## 4 结束语

(1) 本研究在挖掘阻力评估方面提出了一套较为可靠的仿真方法; 挖掘阻力的仿真和计算为挖掘机工作装置及液压系统设计提供了依据。

(2) 还需进一步完善工作装置动力学模型和液压系统, 做到液压系统、工作装置机构、挖掘矿石联合仿真, 为大型液压挖掘机设计提供更精确的设计依据。

(3) 由于实际矿堆中矿石形状、尺寸分布的复杂性, 本研究仿真所建矿堆模型在一定程度上进行了简化处理, 故仿真矿堆模型有待进一步细化。

## 参考文献 (References):

- [1] 张启君, 刘 伟. 国内挖掘机行业发展的探讨[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(2): 1-6.
- [2] 李渊博, 何清华, 张大庆, 等. 液压挖掘机工作装置动力学分析与仿真研究[J]. 机床与液压, 2006(10): 170-171
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 孙其诚, 光 谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] 张羽林, 宁晓斌, 王秋成. 大型正铲液压挖掘机工作装置性能优化仿真[J]. 机电工程, 2013, 30(3): 329-322.
- [7] 黄智奇, 吴维石, 张羽林, 等. 正铲液压挖掘机水平推压工作范围研究[J]. 工程机械, 2013, 44(4): 32-35.
- [8] 陈露丰, 宁晓斌. 液压挖掘机工作装置的动态强度仿真分析[J]. 机电工程, 2013, 30(8): 924-928.
- [9] 张 强, 李 楠, 侯 政, 等. 液压挖掘机中央回转接头综合试验台的研制[J]. 液压气动与密封, 2015(1): 53-56.
- [10] 杨 帆, 吴小平. 液压挖掘机工作装置有限元静强度分析[J]. 机械, 2013(4): 63-65, 84.
- [11] 崔洪新, 李军, 申金星. 液压挖掘机多领域建模与仿真[J]. 兵工自动化, 2014(04): 22-25.
- [12] FAVIER J. Industrial Application of DEM: Opportunities and Challenges[C]. DEMOT, Brisbane, Australia, 2007.
- [13] Cleary P W. Industrial particle flow modelling using discrete element method [J]. **Engineering Computations**, 2009, 26(6): 698-743.
- [14] BARRIOS G K P, CARVALHO R M, KWAVE A, et al. Contact parameter estimation for dem simulation of iron ore pellet handling[J]. **Powder Technology**, 2013(248): 84-93.

[编辑: 李 辉]

### 本文引用格式:

陈 烨, 李爱峰, 李 光, 等. 大型液压挖掘机斗杆挖掘阻力的离散元素法研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 798-802.

CHEN Ye, LI Ai-feng, LI Guang, et al. DEM research for crowd force of large hydraulic excavator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(6): 798-802.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>