

## 基于阻力特性的液压挖掘机复合挖掘力建模

陈进<sup>1</sup>, 任志贵<sup>1,2</sup>, 吕梁<sup>3</sup>, 雍彬<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 陕西理工学院机械工程学院, 陕西 汉中 723000;

3. 三一重机有限公司, 江苏 昆山 215300)

**摘 要:** 基于挖掘过程中三缸联动的实际作业状态, 提出复合挖掘力概念. 根据动臂、斗杆和铲斗的各自分工确定复合挖掘力限制条件; 利用阻力角和差值角的主值区间确定复合挖掘力方向角的取值范围; 假设给定挖掘姿态下复合挖掘力大小随方向角渐变, 建立复合挖掘力计算模型. 以某 36 t 反铲液压挖掘机为例, 验证了该假设的正确性. 以真实挖掘轨迹和测试挖掘阻力为基准, 对比现有理论挖掘力模型和复合挖掘力模型的计算结果, 结果表明后者能够更准确地估算挖掘机的复合挖掘能力. 该研究为挖掘机工作装置的优化设计和强度分析提供了评价标准和计算依据.

**关 键 词:** 液压挖掘机; 理论挖掘力; 复合挖掘力; 阻力特性; 方向角; 挖掘能力

中图分类号: TU 621

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)07-1015-05

## Modeling of the Compound Digging Force of Hydraulic Excavator Based on Resistance Characteristics

CHEN Jin<sup>1</sup>, REN Zhi-gui<sup>1,2</sup>, LYU Liang<sup>3</sup>, YONG Bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanic Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China; 3. SANY Heavy Industry Co., Ltd., Kunshan 215300, China. Corresponding author: REN Zhi-gui, E-mail: ren\_411@163.com)

**Abstract:** The compound digging force concept was proposed based on the digging process in actual operation conditions of the composite motion of three hydraulic cylinders. According to the main function of boom, arm and bucket, the restricted conditions of the compound digging force were determined. The value range of orientation angle was up to the resistance angle and the difference angle. The calculating model of compound digging force was established based on a compound digging force hypothesis, which is changing gradually with the orientation angle. Taking a 36 t backhoe hydraulic excavator as an example, the validity of the hypothesis was proved. Taking the actual digging trajectory and the digging resistance obtained by testing as the reference, the calculating results of the existing theoretical digging force model were compared with that of the actual one. The comparative results indicate that the model can exactly estimate the real compound digging ability of the excavator. In this way, it can provide evaluation criterion and calculation basis to optimal design and strength analysis of the excavator working device.

**Key words:** hydraulic excavator; theoretical digging force; compound digging force; resistance characteristics; orientation angle; digging ability

由于自身功能的多样性和对多种工况的适用性, 液压挖掘机广泛应用于工程建设、土方作业、采矿、农林和水利等领域<sup>[1-2]</sup>. 作为其最主要的功能, 挖掘一直是挖掘机领域的研究热点. 一方面是对实际挖掘过程的研究, 如土壤刀具相互作用模

型、挖掘阻力评估、装土挖掘效率等<sup>[3-6]</sup>. 另一方面是对理论挖掘力的研究, 包括工作液压缸理论挖掘力、整机理论挖掘力和整机实际挖掘力等<sup>[7-10]</sup>. 在对理论挖掘力的研究中, Flores 等<sup>[7]</sup>基于运动学转换器使用线性优化方法, 探索正铲挖

掘机的最大挖掘力, Park<sup>[8]</sup> 首先计算各个工作液压缸的理论挖掘力, 然后将其叠加作为挖掘机能够发挥的总的挖掘力。

挖掘机的实际作业过程大多是复合动作, 挖掘过程尤其如此。然而, 现存的理论挖掘力计算模型主要是针对铲斗或斗杆单独挖掘的情况。为了建立一种适用于评价液压挖掘机复合挖掘能力的理论挖掘力模型, 使得理论挖掘力的计算更加符合挖掘机理和实际的复合挖掘作业过程, 基于对挖掘阻力特性的研究<sup>[8]</sup>, 本文提出复合挖掘力的概念: 挖掘机整机在工作装置三缸联动状态下能够发挥的最大理论挖掘力。

## 1 复合挖掘力的计算模型

### 1.1 复合挖掘力的限制条件

作为理论挖掘力的一种, 复合挖掘力必然受到整机自身条件及约束的限制。整机自身条件即是工作装置各个液压缸能够提供的极限推力, 而整机约束条件则包括稳定性要求和附着性要求。

一般挖掘过程中, 动臂、斗杆和铲斗都处于连续运动的状态, 然而各自的分工有所不同。整个挖掘过程可分为 3 个阶段: 切入土壤、转斗装土和提升。其中, 三缸联动共同负责切入土壤的空间位置和角度; 斗杆和铲斗液压缸主动外伸负责挖掘和转斗装土; 动臂液压缸主动外伸负责提升动作。切入土壤和提升阶段所遇土壤阻力相对于转斗装土阶段较小。因而, 动臂液压缸的主动动作主要用于调整切削角度和提升, 斗杆和铲斗液压缸的主动动作主要用于克服挖掘阻力。从挖掘阻力的测试实验结果也可以看出: 在挖掘阻力较大的挖掘阶段, 动臂相对于斗杆和铲斗几乎没有动作或仅有被动动作。因此, 在复合挖掘力的计算中可以认为动臂液压缸处于闭锁状态, 其极限推力由动臂液压缸的最大闭锁压强确定; 斗杆和铲斗液压缸均处于主动工作状态, 其极限推力分别由斗杆和铲斗液压缸的最大工作压强确定。

稳定性是指在挖掘过程中挖掘机不能够发生倾翻, 主要是前倾和后倾限制。附着性是指不能因为克服挖掘阻力的原因而引起主机滑移。

图 1 为反铲液压挖掘机的机构简图,  $F$  代表给定方向的复合挖掘力, 则  $F$  的大小受到整机自身条件及约束的限制, 这些限制可细化为在  $F$  作用下, 动臂具有绕铰点  $A$  逆时针旋转趋势时, 由动臂液压缸小腔闭锁极限推力限制的最大理论挖掘力  $F_1$ ; 在  $F$  作用下, 动臂具有绕铰点  $A$  顺时针

旋转趋势时, 由动臂液压缸大腔闭锁极限推力限制的最大理论挖掘力  $F_2$ ; 由斗杆液压缸主动动作极限推力限制的最大理论挖掘力  $F_3$ ; 由铲斗液压缸主动动作极限推力限制的最大理论挖掘力  $F_4$ ; 在  $F$  作用下, 整机具有绕前倾线  $T$  顺时针旋转趋势时, 由防前倾条件限制的最大理论挖掘力  $F_5$ ; 在  $F$  作用下, 整机具有绕后倾线  $S$  逆时针旋转趋势时, 由防后倾条件限制的最大理论挖掘力  $F_6$ ; 在  $F$  作用下, 整机具有滑移趋势时, 由防滑移条件限制的最大理论挖掘力  $F_7$ 。

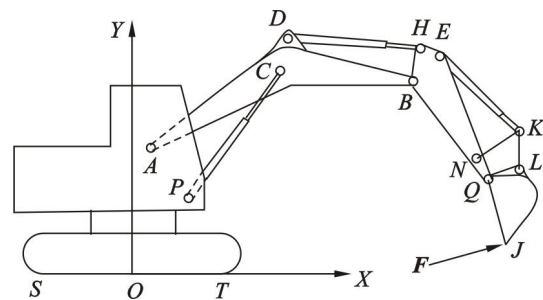


图 1 反铲液压挖掘机简图  
Fig. 1 The diagram of a backhoe hydraulic excavator

对于给定限制条件下, 最大理论挖掘力的具体求解方法可见文献[9-10], 此处不再赘述。解出各个限制条件下的最大理论挖掘力  $F_i (i=1, 2, \dots, 7)$  后, 便可以求出给定方向的复合挖掘力  $F$ 。  $F$  需满足所有的限制条件, 因此  $F = \min(F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7)$ 。

### 1.2 复合挖掘力的方向角

现有理论认为挖掘力与运动方向相切<sup>[7-10]</sup>, 即: 铲斗单独挖掘时, 挖掘力垂直于  $QJ$  连线, 其方向角如图 2 中  $F_{\text{铲斗}}$  所示; 斗杆单独挖掘时, 挖掘力垂直于  $BJ$  连线, 其方向角如图 2 中  $F_{\text{斗杆}}$  所示。陈世教等建立了整机理论复合挖掘力计算模型, 他们认为复合挖掘可分为两种方式: 方式 1 为铲斗缸主控斗杆缸复合动作; 方式 2 为斗杆缸主控铲斗缸复合动作<sup>[9]</sup>。方式 1 时, 切向挖掘力垂直于  $QJ$  连线, 方式 2 时, 切向挖掘力垂直于  $BJ$  连线。与单独挖掘不同的是, 该方法中增加了法向挖掘力, 令其垂直于切向挖掘力指向斗内, 并令法向挖掘力与切向挖掘力的比值  $\eta$  (法切比) 在  $-0.3 \sim 0.3$  之间以一定步长变化。实质上,  $\eta$  可变相当于切向力与法向力合成的复合挖掘力的方向角可变。由于  $\arctan 0.3 = 16.7^\circ$ , 则方式 1 时复合挖掘力方向角的范围为  $F_{\text{铲斗}} \pm 16.7^\circ$ , 如图 2 中实线剖面线区域所示; 方式 2 时复合挖掘力方向角的范围为  $F_{\text{斗杆}} \pm 16.7^\circ$ , 如图 2 中虚线剖面线区域所

示. 然而, 这样规定的复合挖掘力方向角取值范围并没有充分合理的理论或实验依据, 与单独挖掘时理论挖掘力的计算方法并无本质上的区别.

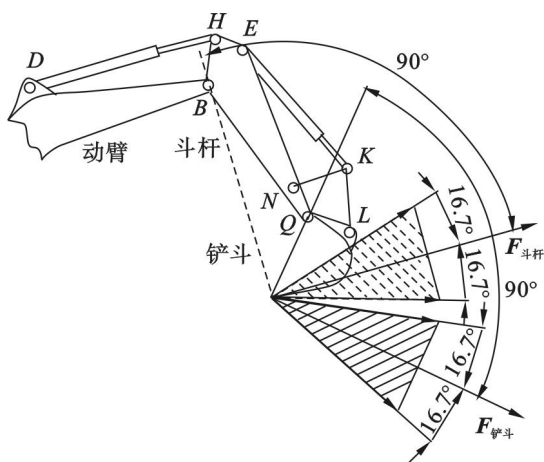


图2 现有挖掘力方向角确定方法  
Fig. 2 The determination method of the direction angle

理论挖掘力的计算目的在于求出在给定挖掘姿态下挖掘机理论上能够克服的最大挖掘阻力, 如果理论挖掘力偏离了实际的挖掘过程, 不能反映真实的挖掘阻力特性, 这样的理论挖掘力也就没有意义了. 因此, 本文提出以真实的挖掘阻力特性为依据来研究理论挖掘力, 确定复合挖掘力方向角.

在实际的挖掘过程中, 由于土壤阻碍作用的不同, 挖掘机并不是在所有挖掘姿态下都会遭遇其自身能够承受的最大挖掘阻力. 而理论挖掘力计算的正是给定挖掘姿态下挖掘机能够克服的最大挖掘阻力. 从统计结果发现, 挖掘阻力特性是随挖掘阻力大小程度而改变的<sup>[6]</sup>. 为了确保统计数据的可参照性, 必须选择阻力值较大(大于平均挖掘阻力)挖掘点的阻力特性作为理论挖掘力的计算依据.

通过对挖掘阻力特性的研究发现<sup>[6]</sup>, 在复合挖掘中当挖掘阻力较大时, 阻力角  $\theta$  具有明显的分布规律, 其值落在主值区间  $-40^\circ \sim 15^\circ$  的点占所有统计点的 96.4%; 阻力角  $\theta$  与铲斗逆角  $\beta$  具有显著的相关性, 其差值角  $\Delta\theta$  ( $\Delta\theta = \theta - \beta$ ) 落在主值区间  $-20^\circ \sim 15^\circ$  的点占所有统计点的 94.5%. 其中, 阻力角是指真实的挖掘阻力作用方向角, 铲斗逆角是指由铲斗液压缸单独作用引起的铲斗切削刃运动方向逆角(垂直于  $QJ$  连线, 如图3中  $\beta$  角). 该结果说明, 在给定挖掘姿态下, 挖掘阻力有无数种可能方向, 但是绝大部分的方向角都落在一个较小的范围, 并且阻力角和铲斗逆角具有显著的相关性, 这些可作为确定复合挖掘

力方向角的依据. 本文求解的复合挖掘力, 目的在于满足绝大多数实际挖掘情况, 而不是涵盖所有的可能性, 因为只有这样才能保证结果的一般普适性. 所以, 用于参照的差值角和阻力角并不是取其所有的可能值, 而是选择绝大多数取值(90%以上)的分布区间, 即主值区间.

既然差值角和阻力角都是分布区间而非定值, 那么给定挖掘姿态下的复合挖掘力方向角也应该是个区间而非定值. 确定复合挖掘力方向角范围的具体方法如下: 由给定的挖掘姿态求得铲斗逆角  $\beta$ ; 根据差值角的定义及其主值区间确定阻力角的可能范围  $H$ ; 将阻力角的主值区间作为限定条件, 满足限制条件的阻力角可能范围即为复合挖掘力方向角范围  $\gamma$ .

图3所示即为复合挖掘力方向角范围  $\gamma$  的确定过程: 由给定挖掘姿态确定铲斗的方位, 从而得到垂直于  $QJ$  连线的铲斗逆角  $\beta$ ; 根据差值角确定  $H$  (图中实线所围成的扇形区域); 在  $H$  中去掉阻力角  $\theta$  主值区间 (图中虚线所围成的扇形区域) 以外的部分即得到  $\gamma$ , 如图中剖面线所示区域.

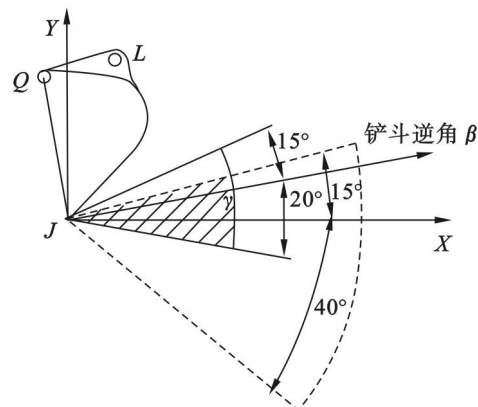


图3 基于阻力特性的复合挖掘力方向角范围  
Fig. 3 The orientation angle of the compound digging force based on resistance characteristics

### 1.3 复合挖掘力的计算流程

当方向角确定以后便可以依据整机限制条件计算给定挖掘姿态下的复合挖掘力. 复合挖掘力的计算流程如图4所示. 在没有回转运动的前提下, 给定挖掘姿态可以用3个转角  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  和  $\theta_3$  表征. 其中  $\theta_1$  表示动臂与停机面之间的夹角;  $\theta_2$  表示斗杆与动臂之间的夹角;  $\theta_3$  表示铲斗与斗杆之间的夹角. 根据铲斗逆角、差值角和阻力角确定复合挖掘力方向角范围  $\gamma$ . 假设给定挖掘姿态下不同的方向角对应的复合挖掘力是渐变的. 如果该假设成立, 便可以将  $\gamma$  以一定的步长  $d$  离散为一个数列, 该数列中的每一个值都是给定挖掘姿态



下复合挖掘力的可能方向角  $\gamma_i$ . 根据限制条件, 求解出第一个可能方向角  $\gamma_1$  对应的复合挖掘力, 如此循环直到所有可能方向角对应的复合挖掘力都计算完毕. 选择其中的最大值, 该值即是给定挖掘姿态的复合挖掘力.

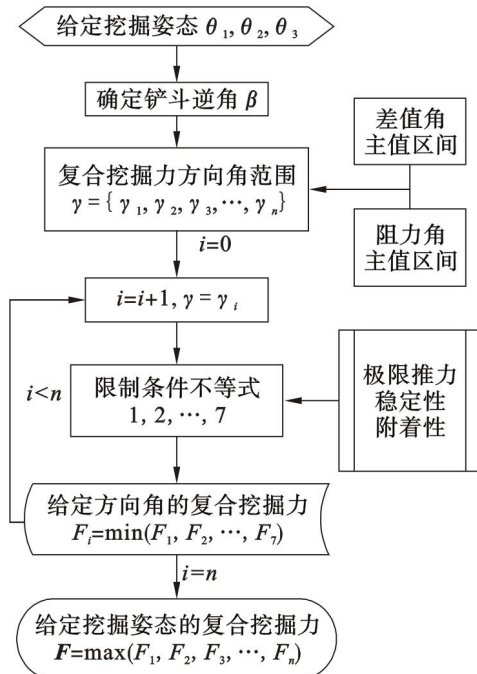


图 4 复合挖掘力计算流程

Fig. 4 Calculating process of the compound digging force

## 2 实例分析

### 2.1 给定挖掘姿态下的复合挖掘力

以某 36 t 反铲液压挖掘机为例, 当给定挖掘姿态为  $\theta_1 = -10^\circ$ ,  $\theta_2 = 120^\circ$  和  $\theta_3 = 135^\circ$  时, 按照图 4 所示的流程图计算该挖掘机的复合挖掘力. 根据定义, 铲斗逆角  $\beta$  应该等于铲斗  $QJ$  连线的方向角加上  $90^\circ$ , 即

$$\beta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - 360^\circ + 90^\circ = -25^\circ.$$

阻力角的可能范围为  $H = [\beta - 20^\circ, \beta + 15^\circ]$ , 即  $H = [-45^\circ, -10^\circ]$ . 因为  $H$  有一部分超出了阻力角的主值区间 ( $-40^\circ \sim 15^\circ$ ), 去掉超出部分后得到复合挖掘力方向角范围  $\gamma = [-40^\circ, -10^\circ]$ . 令步长  $d = 1^\circ$ , 将  $\gamma$  离散为一个数列. 当  $\gamma$  取定该数列的一个值即给定一个复合挖掘力可能方向, 根据 7 个限制因素不等式即可计算出满足整机自身限制和约束条件的复合挖掘力. 计算出  $\gamma$  数列中所有值对应的复合挖掘力, 即得到给定挖掘姿态下复合挖掘力随方向角的变化曲线, 如图 5 所示.

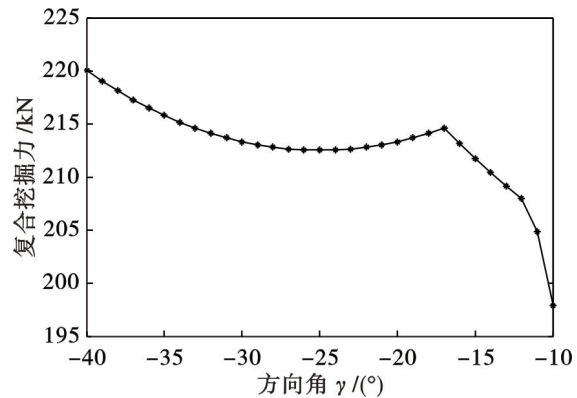


图 5 复合挖掘力随方向角的变化

Fig. 5 The variation of the compound digging force along with orientation angle

由图 5 可以看出, 在同一个挖掘姿态下, 由于可能的阻力方向角不同, 对应的挖掘机能够发挥的复合挖掘力大小也不同. 当方向角为  $-10^\circ$  时对应的复合挖掘力最小, 为 197.9 kN; 当方向角为  $-40^\circ$  时对应的复合挖掘力最大, 为 220 kN, 该最大值即为该给定姿态的复合挖掘力. 从图 5 中还可以看出, 复合挖掘力是随方向角平滑渐变的, 该结果证明了 1.3 节假设的正确性; 也证明了将方向角范围  $\gamma$  离散为数列, 计算每个离散值对应的复合挖掘力, 从而可找出整个方向角范围对应的最大复合挖掘力的正确性和有效性.

### 2.2 真实挖掘轨迹下的复合挖掘力

为验证模型的正确性, 特选择一段真实挖掘轨迹, 分别利用现有理论挖掘力计算模型和本文提出的复合挖掘力计算模型, 将两种模型得出的结果与测试得到的挖掘阻力进行对比分析. 由于理论挖掘力计算的是挖掘机本身能够克服的最大挖掘阻力, 而真实挖掘过程中由于土壤和作业环境等因素, 挖掘机遇到的真实阻力可能远远小于它能克服的最大挖掘阻力. 因此, 为了使相同挖掘轨迹和姿态下理论挖掘力与挖掘阻力更有可比性, 应选择阻力较大的挖掘过程进行对比分析.

图 6 所示为利用试验过程所记录的数据 (某 36 t 反铲液压挖掘机试验样机), 基于逆运动学反求得到的挖掘轨迹还原图. 如图中注释, 三段相连的折线表示动臂、斗杆和铲斗所处的空间位置, 即挖掘姿态, 每两个相邻挖掘姿态的间隔时间相等. 虚线表示铲斗切削刃所走过的轨迹, 即挖掘轨迹. 挖掘轨迹的其中一段以星号实线表示, 该段挖掘速度较慢而挖掘阻力较大. 因此选取该段挖掘轨迹所对应的挖掘过程进行理论挖掘力的求解.

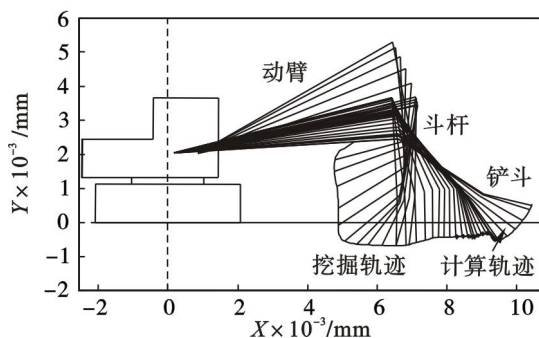


图6 复合挖掘轨迹还原

Fig. 6 The trajectory of compound digging

计算图6中所选定的计算轨迹及每一个轨迹点所对应的实际挖掘姿态下,该36 t试验样机的理论挖掘力,并将其与测试得到的挖掘阻力进行对比,其结果如图7所示。

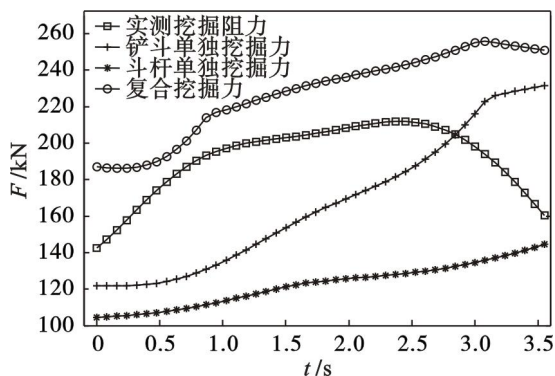


图7 理论挖掘力与挖掘阻力对比

Fig. 7 The contrast between theoretical digging force and digging resistance

如前所述,在相同的挖掘姿态下,理论挖掘力不可能小于实际挖掘阻力。但是,如图7所示,以现有方法计算的理论挖掘力中,斗杆单独挖掘力完全小于挖掘阻力,铲斗单独挖掘力大部分小于挖掘阻力;利用本文提出的复合挖掘力模型得到的复合挖掘力则完全大于挖掘阻力。该结果说明,现有的理论挖掘力计算模型并不适用于复合挖掘能力的评估,而复合挖掘力模型可以得到挖掘机在复合挖掘工况下能够克服的最大挖掘阻力,该模型能够更准确地评估挖掘机的复合挖掘能力。

### 3 结 论

1) 斗杆和铲斗不分主动和从动,均以其油缸最大工作压力计算极限推力。

2) 复合挖掘力方向角范围 $\gamma$ 是依据差值角 $\Delta\theta$ 和阻力角 $\theta$ 的主值区间来确定,符合真实挖掘作业的阻力特性。

3) 实例表明给定挖掘姿态下不同的方向角对应的复合挖掘力是渐变的,这一假设的正确性也证明了复合挖掘力计算流程的正确性。

4) 与实际挖掘阻力的对比结果表明,复合挖掘力模型能够更好地评估挖掘机的复合挖掘能力,为挖掘机工作装置的优化设计和强度分析提供了理论依据和评价标准。

### 参考文献:

- [1] Lee S J, Chang P H. Modeling of a hydraulic excavator based on bond graph method and its parameter estimation [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26 (1): 195 - 204.
- [2] Coetzee C J, Els D N J. The numerical modeling of excavator bucket filling using DEM [J]. *Journal of Terramechanics*, 2009, 46(5): 217 - 227.
- [3] Blouin S, Hemami A, Mike L. Review of resistive force models for earthmoving processes [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2001, 14(3): 102 - 111.
- [4] Maciejewski J, Jarzebnowski A, Trampczynski W. Study on the efficiency of the digging process using the model of excavator bucket [J]. *Journal of Terramechanics*, 2003, 40 (4): 221 - 233.
- [5] Bhaveshkumar P P, Prajapati J M. Evaluation of resistive force using principle of soil mechanics for mini hydraulic backhoe excavator [J]. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2012, 2(4): 386 - 391.
- [6] 任志贵, 陈进, 王树春, 等. 液压挖掘机阻力特性研究 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2015, 36(4): 551 - 556. (Ren Zhi-gui, Chen Jin, Wang Shu-chun, et al. Researching on the resistance characteristic of the hydraulic excavator [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2015, 36(4): 551 - 556.)
- [7] Flores F G, Kecskeméthy A, Pöttker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers [C]// *Proceedings of the 12th World Congress in Mechanism and Machine Science*. Besancon, 2007: 1 - 6.
- [8] Park B. Development of a virtual reality excavator simulator: a mathematical model of excavator digging and a calculation methodology [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute, 2002.
- [9] 陈世教, 荣洪钧, 冀满忠, 等. 液压挖掘机反铲工作装置整机理论复合挖掘力的计算及应用 [J]. 工程机械, 2007, 38 (4): 39 - 43. (Chen Shi-jiao, Rong Hong-jun, Ji Man-zhong, et al. Calculation of theoretical digging force under combined work condition for hydraulic excavator with backhoe attachment and its application [J]. *Construction and Equipment*, 2007, 38 (4): 39 - 43.)
- [10] 陈国俊. 液压挖掘机 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011: 137 - 158. (Chen Guo-jun. *Hydraulic excavator* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2011: 137 - 158.)