

液压挖掘机挖掘阻力特性研究

任志贵¹, 陈进¹, 王树春², 庞晓平¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 三一重机有限公司, 江苏 昆山 215300)

摘 要: 基于3种常用挖掘方式, 研究并得到单次挖掘过程中挖掘阻力随时间和挖掘轨迹的变化规律。对比多次实验结果得到阻力系数和阻力矩系数在挖掘过程不同阶段的分布情况, 基于方向角变化规律研究各构件运动对挖掘阻力方向的影响。基于统计学原理计算出阻力系数、阻力矩系数、阻力角和差值角在挖掘阻力不同取值范围内的分布特性、主值区间和概率密度, 为理论挖掘力的计算、工作装置的设计和优化奠定基础。

关 键 词: 液压挖掘机; 挖掘阻力; 阻力角; 主值区间; 概率密度

中图分类号: TH 621 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)04-0551-06

Resistance Characteristics of Hydraulic Excavator

REN Zhi-gui¹, CHEN Jin¹, WANG Shu-chun², PANG Xiao-ping¹

(1. State Key Laboratory of Mechanic Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. SANY Heavy Industry Co., Ltd., Kunshan 215300, China. Corresponding author: REN Zhi-Gui, E-mail: ren_411@163.com)

Abstract: Based on three kinds of conventional digging patterns, the variation regularities of digging resistance with time and digging trajectory in a single digging process were studied. The characteristics of the resistance coefficient and the resistance moment coefficient in different stages of the digging process were obtained, which were based on the comparison of multiple experimental results. Based on the variation regularities of direction angles, the impact of each component motion on digging resistance direction was investigated. The distribution characteristics, the main value range and the probability density of the resistance coefficient, the resistance moment coefficient, the resistance angle and the difference angle in different value range of digging resistance were calculated on the basis of the statistical theory. The results lay a foundation for calculation of theoretical digging force and design and optimization of device.

Key words: hydraulic excavator; digging resistance; resistance angle; main value range; probability density

液压挖掘机广泛应用于工程建设、采矿、农林和水利等各个领域^[1-2]。由于长期在恶劣的工作环境下从事着随机重载作业, 其作业效率和稳定性成为挖掘机设计的主要目标^[2]。而挖掘阻力的变化规律和力学特性是液压挖掘机及其工作装置设计的前提, 是挖掘机轨迹规划和自动化控制的依据, 也是保证挖掘机高效稳定的关键因素^[3]。有关挖掘阻力的研究可以分为以下3个领域: 挖掘阻力计算和轨迹规划; 土壤特性评估; 土壤失效机制研究^[4]。基于经典土壤力学和土壤切削实验, 大量文献研究了土壤特性、切削方式和斗形参

数对挖掘阻力的影响, 并建立了挖掘阻力计算模型^[3-4]。依据这些模型, 文献[5-7]进行了挖掘阻力的预测和评估, 并将其应用于外星风化层的开采。文献[8]针对特定土壤研究了斗齿数量对挖掘效率和能量损失的影响。

然而, 却很少有关于液压挖掘机在实际作业过程中, 挖掘阻力自身特性的深入研究。仅有的文献中简单地将法向挖掘阻力与切向挖掘阻力看作定比关系^[9]。这使得笔者在实际测试试验中发现, 以此为依据计算得到的理论挖掘力与实际的挖掘阻力相差较大。因此, 有必要对挖掘阻力的自身特

性、其各部分的变化规律和相互关系进行深入研究。

1 挖掘阻力的力值特性

挖掘机工作对象的不确定性和挖掘方式的多样性及司机的操作习惯等都使得挖掘阻力表现出突出的动态特性和随机特性。基于试验样机针对三级土壤实地测试获得的大量数据,从挖掘阻力的变化规律和法向阻力、阻力矩与切向阻力之间的关系来研究挖掘阻力特性。

1.1 单次挖掘过程中挖掘阻力的整体特性

实际挖掘作业中,铲斗承受的是一个随时变化的复杂力系。不考虑侧向力时,由于挖掘机的对称性,该复杂力系可看作平面力系。将其合成为作用于铲斗切削刃中间位置 J 点的切向阻力 F_t 、法向阻力 F_n 和阻力矩 T_r 。取切向阻力与法向阻力的合成作为挖掘阻力的合力 F ,即 $F = F_t + F_n$ 。

图 1a 为动臂和斗杆液压缸闭锁,铲斗液压缸主动挖掘。从图中可看出,切向阻力曲线与挖掘阻力合力曲线变化规律几乎完全一致,且间隙很小。表明:切向阻力是挖掘阻力合力的主要组成部分,是阻碍挖掘过程的关键因素。法向阻力曲线在零值附近,呈现无规律的上下波动状态,表明法向阻力相对切向阻力较小,并且其方向有时指向斗内(正值),有时指向斗外(负值)。阻力矩曲线也在零值附近呈现波动状态,通过多张图谱可看出其整体的变化规律:在挖掘开始阶段为正,随着挖掘过程的进行变为负值,呈反方向波动式增大。本次测试样机为 35 t 中型反铲液压挖掘机,相对于切向阻力形成的力矩作用,阻力矩的作用较小。

图 1b 为动臂和铲斗液压缸闭锁,斗杆液压缸主动挖掘。在铲斗接触地面经过短暂的冲击之后,挖掘阻力随着挖掘土壤的深入而迅速增大,在第 3 s 时达到 200 kN 左右,并在该值附近呈现微小波动。实际上,第 3 s 时挖掘阻力已达到了测试样机在该挖掘姿态下斗杆挖掘的最大理论挖掘力,因而此时出现了挖不动的现象,直到 6 s 之后进行了动臂提升,挖掘阻力瞬间降低。该结果表明:在没有其他液压缸参与(尤其是铲斗液压缸)的情况下,斗杆单独挖掘很难完成一次完整的挖掘任务。因而,真实的挖掘过程中通常采用复合挖掘的方式。

图 1c 为动臂、斗杆和铲斗 3 个液压缸均不闭锁的自由复合挖掘工况。相对于单独挖掘而言,复合挖掘时法向阻力的波动幅值较大,这引起了复合挖掘时切向阻力曲线与挖掘阻力合力曲线之间

的间隙在某些时刻相对单独挖掘时较大。该结果表明,尽管在一般情况下法向阻力相对切向阻力要小很多,但偶尔也会出现较大的情形。

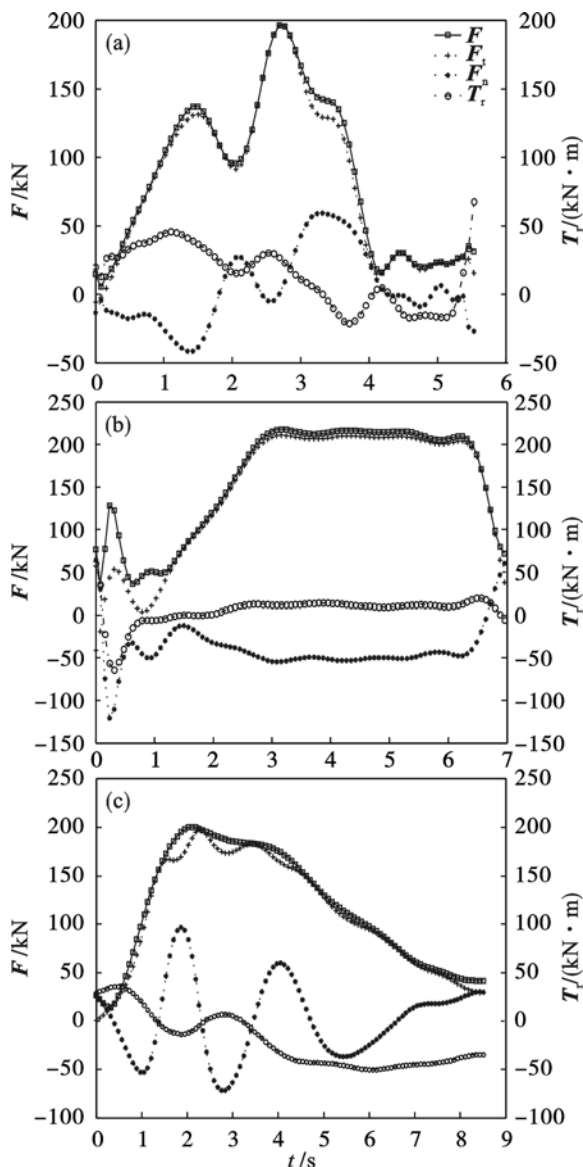


图 1 挖掘阻力随时间的变化曲线

Fig. 1 Curves of digging resistance with time

(a) — 铲斗单独挖掘; (b) — 斗杆单独挖掘;
(c) — 复合挖掘。

为了再现挖掘过程,利用测试记录的挖掘姿态可还原真实挖掘轨迹。图 2 为一次自由复合挖掘过程的还原图,月牙形包络线表示铲斗切削刃所能达到的空间范围,3 条相连的折线分别表示动臂、斗杆和铲斗,铲斗折线端点走过的轨迹即为真实的挖掘轨迹。

图 3 是图 2 中挖掘轨迹的放大,图中星号表示挖掘点,星号附近的数字表示对应挖掘点的挖掘阻力合力。每 2 个星号之间的时间间隔相同(星号越密说明用时越多,挖掘速度越慢),约 0.4 s。结合图 2 可以看出:在调整挖掘姿态的起

始阶段速度最快,当接触到土壤以后速度开始逐渐变慢;在最大挖掘深度附近挖掘阻力迅速增大到最大值,挖掘速度迅速降低到最小值;在动臂提升、铲斗转斗装土阶段挖掘阻力缓慢减小,挖掘速度缓慢增大,直到挖掘过程的完成.通过对多次自由复合挖掘过程的对比,发现最大挖掘阻力大多发生于当次挖掘过程的最大挖掘深度或其附近位置,并且在挖掘阻力最大时对应的挖掘速度最小.

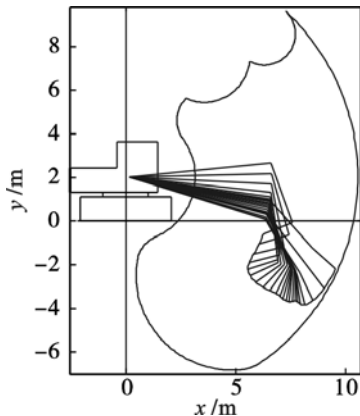


图2 复合挖掘时的挖掘轨迹

Fig. 2 Digging trajectory in combined digging process

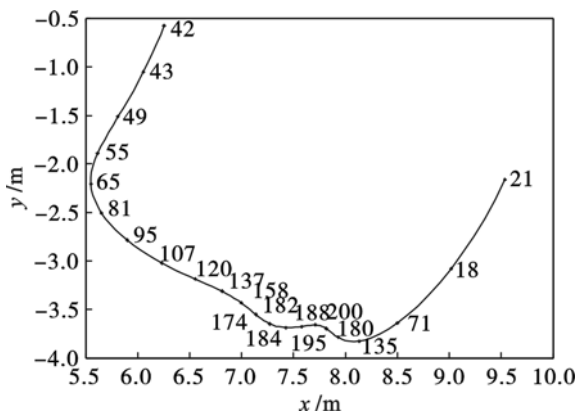


图3 复合挖掘时挖掘阻力沿挖掘轨迹的分布图

Fig. 3 Distribution of digging resistance along digging trajectory in combined digging process

1.2 多次挖掘中挖掘阻力的统计特性

切向阻力是挖掘阻力的最主要组成部分,而与切向阻力相对应的切向力(理论挖掘力的计算指标)也是衡量挖掘机性能的关键参数之一.因而,本节中以切向阻力 F_t 作为参考研究法向阻力 F_n 和阻力矩 T_r 的变化特性.令: $\varepsilon = F_n/F_t$, $\delta = T_r/F_t$, 其中 ε 为阻力系数, δ 为阻力矩系数.

图4为多次挖掘过程中阻力系数随时间的变化规律.为反映阻力系数的整体变化趋势,将每一时刻点对应的所有阻力系数求平均值,所得阻力系数均值线以正方形粗实线表示.阻力系数均值线在零值线上下波动,在挖掘过程的各个阶段并

无明显差异.为进一步研究阻力系数的分布特征,采用统计学的方法计算阻力系数在对应区间的分布概率,并绘制直方图,如图5所示.统计结果表明 ε 的主值区间为 $-0.4 \sim 0.5$, ε 值落在该区间的比例为 71.9%.

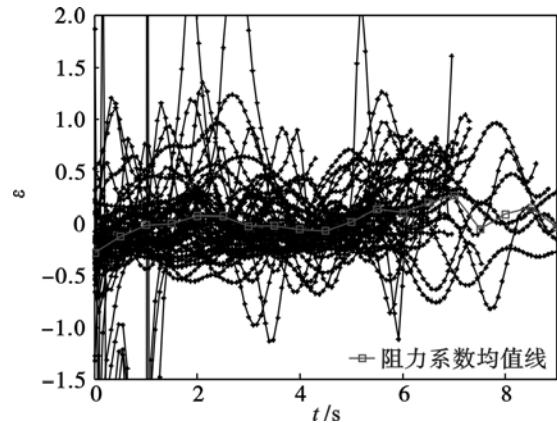


图4 阻力系数 ε 随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of resistance coefficient ε with time

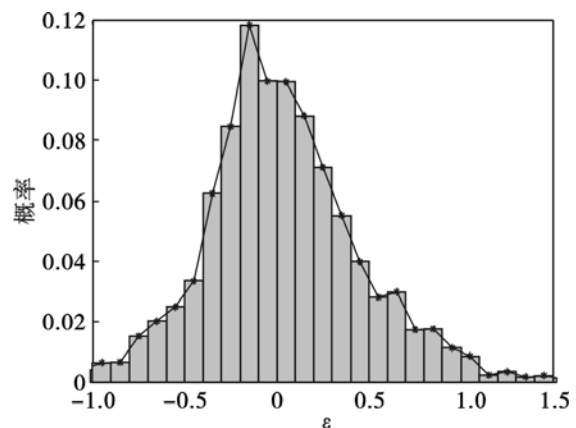


图5 阻力系数直方图

Fig. 5 Histogram of resistance coefficient

同理得到阻力矩系数变化规律和阻力矩系数直方图,如图6、图7所示.阻力矩系数均值线绕

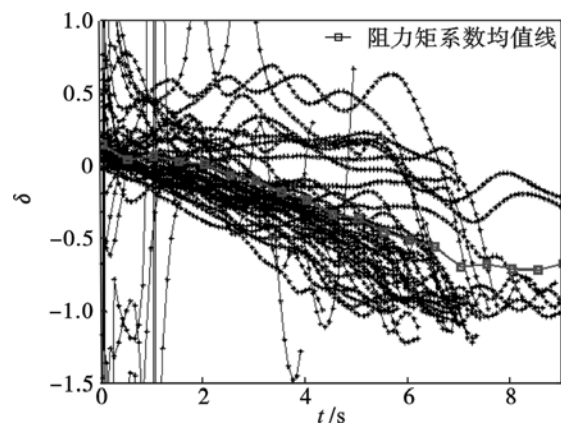


图6 阻力矩系数 δ 随时间的变化曲线

Fig. 6 Curves of resistance moment coefficient δ with time

一条斜率为负的直线上下波动,在挖掘起始阶段接近 0,随着挖掘和装土过程的进行变为负值并反向增大.可见,与阻力系数不同,阻力矩系数在挖掘的不同阶段具有不同的分布特性.图 7 是对本次测试所有数据进行的统计,该结果显示 δ 分布较广,其主值区间为 $-1.2 \sim 0.6$, δ 值落在该区间的比例为 93.4%.

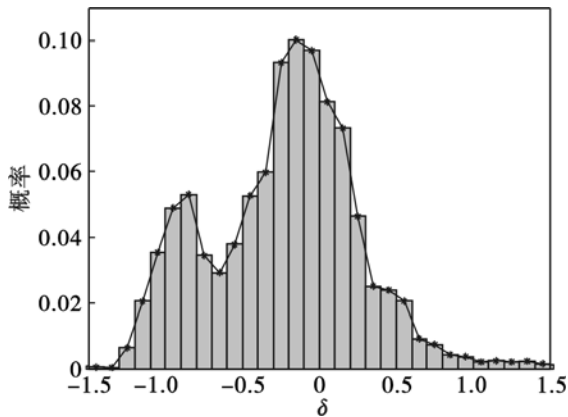


图 7 阻力矩系数直方图

Fig. 7 Histogram of resistance moment coefficient

挖掘阻力是影响挖掘机作业性能的关键因素,不同的挖掘阻力范围决定了不同的挖掘速度和挖掘方式,也对应着不同的阻力系数和阻力矩系数.本次实验样机机重 35 t,作业对象为 3 级土壤,其平均挖掘阻力(\bar{F})约为 160 kN.本文以平均挖掘阻力为界限,分别统计挖掘阻力 $F \geq \bar{F}$ 和 $F < \bar{F}$ 时阻力系数和阻力矩系数的分布规律.结果如图 8 和图 9 所示.由图 8 知,当 $F \geq \bar{F}$ 时, ε 的分布更集中,落在 $-0.4 \sim 0.5$ 的比例为 80.6%;当 $F < \bar{F}$ 时, ε 的分布更分散,落在 $-0.4 \sim 0.5$ 的比例为 69.4%.可见,当 $F \geq \bar{F}$ 时, ε 落在主值区间内的可能性比 $F < \bar{F}$ 时高 10% 以上.对比图 5 和图 8 可知,无论何种统计方法, ε 值落在 $-0.2 \sim -0.1$ 这一区间内的概率最高.该结果表明,无论挖掘阻力如何变化, ε 的最大概率区间不会改变.

由图 9 知,当 $F \geq \bar{F}$ 时, δ 的分布更集中,落在 $-0.4 \sim 0.3$ 的比例为 95.3%;当 $F < \bar{F}$ 时, δ 的分布更分散,落在 $-1.2 \sim 0.6$ 的比例为 92.1%.在图 9a 中, δ 值落在 $-0.2 \sim -0.1$ 的概率最高,达到 22%;在图 9b 中, δ 值落在 $-0.1 \sim 0$ 的概率最高,达到 7.6%,前者比后者高约 3 倍.该结果说明当挖掘阻力取两种不同范围时, δ 的最大概率区间不同,并且对应概率也有很大差异.相对图 9a,图 9b 中主值区间更广,并且概率密度函数在主值区间的分布也更平缓.这说明,当挖掘阻力较小时,对应的 δ 有更多的可能取值,并且每种取值

的可能性相当.

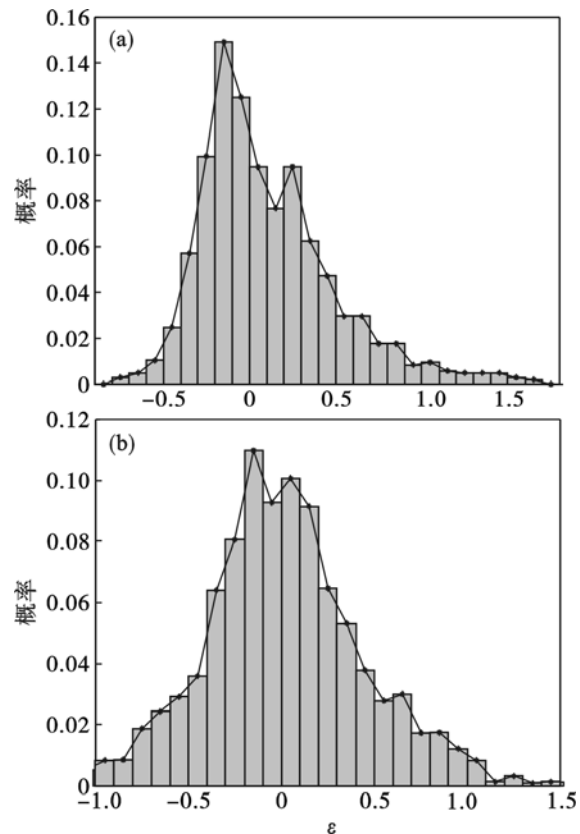


图 8 阻力系数直方图

Fig. 8 Histogram of resistance coefficient

(a) $-F \geq \bar{F}$; (b) $-F < \bar{F}$.

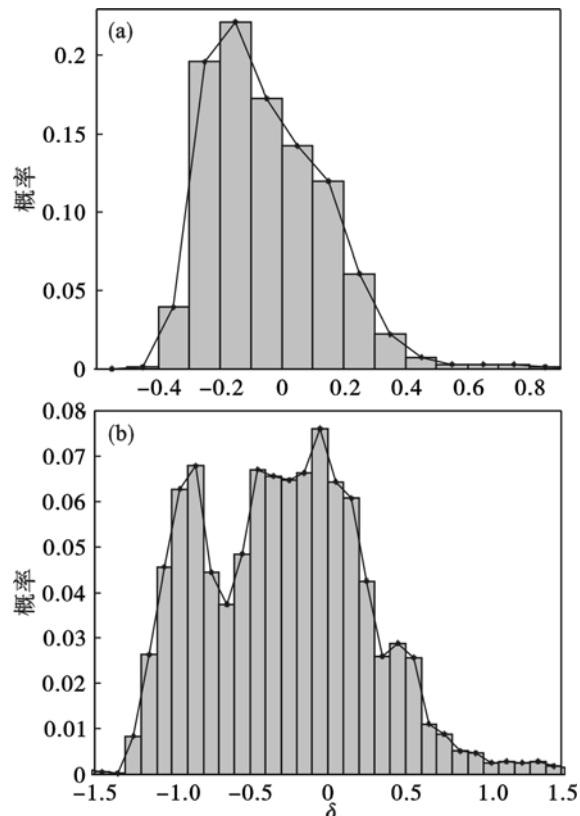


图 9 阻力矩系数直方图

Fig. 9 Histogram of resistance moment coefficient

(a) $-F \geq \bar{F}$; (b) $-F < \bar{F}$.

概括以上分析结果,可得:① ε 在挖掘过程的各个阶段具有相同的取值规律,在挖掘阻力的不同范围具有相同的主值区间和最大概率区间;② δ 从挖掘过程的起始阶段到终止阶段具有不同的取值规律,在挖掘阻力的不同范围也具有不同的主值区间和最大概率区间;③挖掘阻力较大时, ε 和 δ 取值更集中。

2 挖掘阻力的方向特性

图10反映了一次复合挖掘过程中,挖掘机工作装置各构件运动引起的铲斗切削刃中间位置J点速度逆方向角与挖掘阻力方向角之间的关系。铲斗与斗杆的运动与挖掘阻力方向的相关性较高,对挖掘阻力的影响较大。这一规律不只是单次挖掘过程的特有现象,而是多次挖掘过程所体现出来的普遍现象。该规律说明:①挖掘过程中,动臂运动的主要作用是调整工作装置到一个更有利的挖掘姿态,斗杆和铲斗运动的主要作用是克服挖掘阻力;②与挖掘阻力作用方向最相关的因素是铲斗逆角。

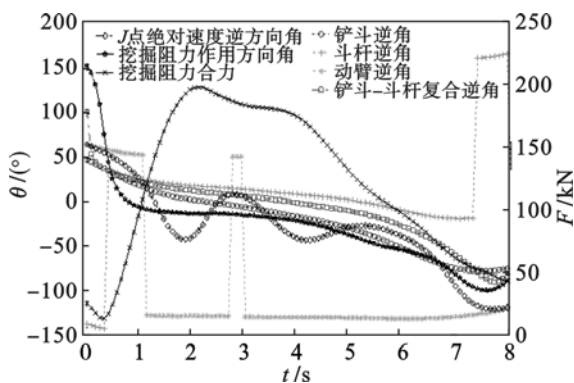


图10 复合挖掘时方向角关系图

Fig. 10 Direction angles in combined digging process

观察多张图谱发现:当挖掘阻力较小时阻力角变化范围较大,而当挖掘阻力较大时阻力角几乎固定在一个较小范围。为得到阻力角的普遍规律,对多次挖掘过程的数据结果进行了统计分析。图11为阻力角分布直方图。当 $F \geq \bar{F}$ 时阻力角 θ 的取值范围较小, θ 落在主值区间 $-40^\circ \sim 15^\circ$ 的比例为96.4%;当 $F < \bar{F}$ 时 θ 的取值范围较大,落在主值区间 $-90^\circ \sim 30^\circ$ 的比例为83.4%。当挖掘阻力较大时, θ 的主要取值范围相比阻力较小时小一半以上,并且取值在该范围的可能性高13%。这说明, θ 与挖掘阻力的大小有着非常密切的关系。

工作装置各构件中铲斗逆角 β_1 与 θ 的相关性最高。为进一步研究 β_1 与 θ 之间的关系,令差

值角 $\Delta\theta = \theta - \beta_1$,分别统计多次挖掘过程中 $\Delta\theta$ 的分布情况。如图12所示,当 $F \geq \bar{F}$ 时, $\Delta\theta$ 落在主值

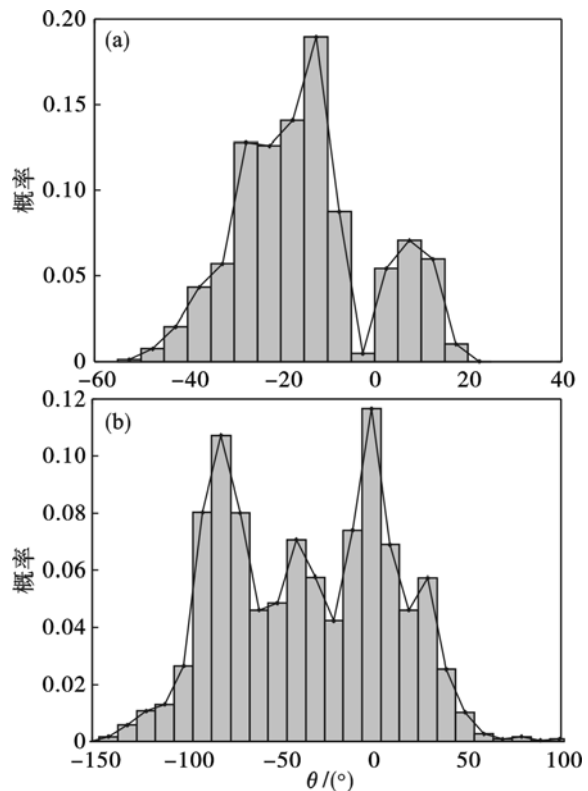


图11 阻力角分布直方图

Fig. 11 Histogram of resistance angle

(a) $F \geq \bar{F}$; (b) $F < \bar{F}$.

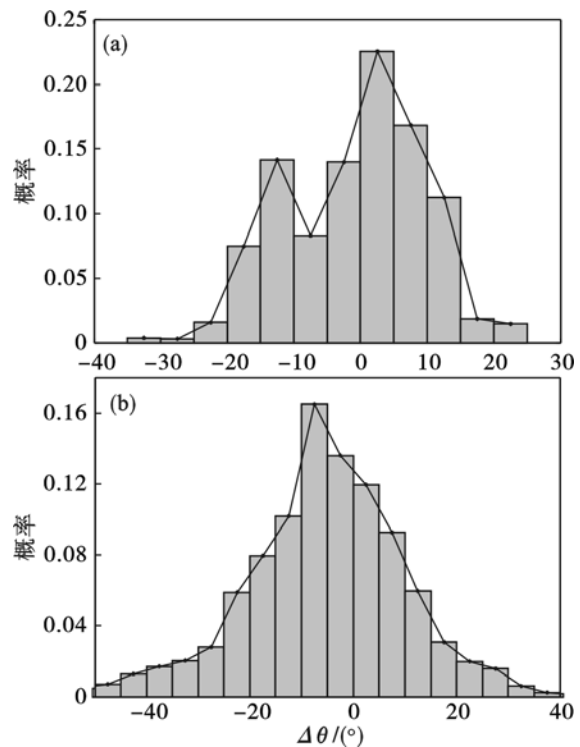


图12 差值角分布直方图

Fig. 12 Histogram of difference angle

(a) $F \geq \bar{F}$; (b) $F < \bar{F}$.

区间 $-20^\circ \sim 15^\circ$ 的比例为 94.5% ; 当 $F < \bar{F}$ 时, $\Delta\theta$ 落在主值区间 $-30^\circ \sim 20^\circ$ 的比例为 87.3% . 尽管当挖掘阻力较小时, $\Delta\theta$ 取值更为分散, 主值范围更大, 落在主值区间内的比例更小, 但是相比挖掘阻力大小对阻力角的影响而言, 其对差值角的影响要小很多.

综上所述, θ 在挖掘过程中不断变化, 在挖掘阻力的不同范围具有不同的主值区间; β_1 与 θ 有着高度的相关性, $\Delta\theta$ 在挖掘阻力的不同范围具有相近的主值区间, 在主值区间内具有较高的概率密度.

3 结 论

1) 与切向阻力相比, 法向阻力和阻力矩对挖掘过程的影响较小; 最大挖掘阻力一般发生在最大挖深位置附近, 且阻力和速度呈相反的变化趋势.

2) 挖掘阻力取值范围和挖掘阶段对阻力矩系数的影响比对阻力系数的影响较大.

3) 动臂的主要作用在于调整挖掘姿态, 铲斗和斗杆的主要作用在于克服挖掘阻力.

4) 挖掘阻力取值范围对阻力角的影响比其对差值角的影响较大.

参考文献:

- [1] 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.

- [2] 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: 18 - 21.
- [3] Blouin S, Hemami A, Lipsett M. Review of resistive force models for earth moving processes [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2001, 14(3): 102 - 111.
- [4] Patel B P, Prajapati J M. Soil-tool interaction as a review for digging operation of mini hydraulic excavator [J]. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2011, 3(2): 894 - 901.
- [5] Willman B M, Boles W W. Soil-tool interaction theories as they apply to lunar soil simulant [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1995, 8(2): 88 - 99.
- [6] Wilkinson A, De Gennaro A. Digging and pushing lunar regolith: classical soil mechanics and the forces needed for excavation and traction [J]. *Journal of Terramechanics*, 2007, 44(2): 133 - 152.
- [7] Patel B 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.
- [8] Maciejewski J, Jarzębowski A. Laboratory optimization of the soil digging process [J]. *Journal of Terramechanics*, 2002, 39(3): 161 - 179.
- [9] 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.)

(上接第 545 页)

- [2] 董霄, 韩清凯. 转子系统不对中故障的振动特性分析与实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
(Dong Xiao, Han Qing-kai. Vibration analysis and experiment research on misalignment of rotor system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.)
- [3] 罗忠, 陈晓兵, 于清文, 等. 轴承 - 转子系统中滚动球轴承的动力学相似设计 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(9): 1296 - 1299.
(Luo Zhong, Chen Xiao-bing, Yu Qing-wen, et al. Dynamic similarity design of rolling ball bearing in bearing rotor system [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2013, 34(9): 1296 - 1299.)
- [4] 胡培民. 刚性支承转子弯曲振动的试验相似律研究 [J]. 机械, 1998, 25: 270 - 271.
(Hu Pei-min. The similar law research of rigid support rotor bending vibration test [J]. *China Machine*, 1998, 25: 270 - 271.)
- [5] Wu J J. Prediction of lateral vibration characteristics of a full-size rotor-bearing by using those of its scale models [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2007, 43(10): 803 - 816.
- [6] Mohiuddin M A, Bettayeb M. Dynamic analysis and reduced

order modeling of flexible rotor-bearing systems [J]. *Computers & Structures*, 1998, 69(3): 349 - 359.

- [7] Young Y L. Dynamic hydroelastic scaling of self-adaptive composite marine rotors [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(1): 97 - 106.
- [8] 钟一湧, 何衍宗, 王正, 等. 转子动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
(Zhong Yi-e, He Yan-zong, Wang Zheng, et al. Rotor dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987.)
- [9] 罗忠, 闫宇龙, 韩清凯, 等. 轴承 - 转子系统的动力学相似及其轴承参数的影响分析 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(sup1): 12 - 16.
(Luo Zhong, Yan Yu-long, Han Qing-kai, et al. Analysis of dynamics similarity of the bearing-rotor system and its effects of bearing parameters [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(sup1): 12 - 16.)
- [10] 闻邦椿, 顾家柳, 夏松波, 等. 高等转子动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 17 - 18.
(Wen Bang-chun, Gu Jia-liu, Xia Song-bo, et al. The advanced rotor dynamics [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 17 - 18.)