

基于作业路径的液压挖掘机挖掘性能

陈 进, 庆 飞, 庞晓平

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:为了解决中国液压挖掘机挖掘过程中挖掘力不足的问题,提出一种基于作业路径的液压挖掘机挖掘性能分析新方法。充分考虑挖掘机连续挖掘的习惯特点,定义挖掘作业路径由铲斗挖掘轨迹和斗杆挖掘轨迹复合组成,依据动臂工作位置将可行挖掘域分成一系列作业路径,基于挖掘作业路径上离散点的整机挖掘力参数来评估挖掘机的挖掘性能。基于新分析方法对 1 台中国产液压挖掘机和同吨位日本产液压挖掘机进行挖掘性能分析对比。研究表明:中国产挖掘机和进口挖掘机作业路径上最大挖掘力相差达 20 kN,斗杆挖掘充分发挥比例相差达 12%,充分解释了中国自主生产的液压挖掘机挖掘性能不足的原因;该新方法对挖掘机的设计具有理论意义,同时推动了中国挖掘机研究工作的进一步发展。

关键词:机械工程;液压挖掘机;工作装置;挖掘性能分析;作业路径

中图分类号:TU621

文献标志码:A

Digging performance of hydraulic excavator based on digging paths

CHEN Jin, QING Fei, PANG Xiao-ping

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A new method about digging performance analysis of the hydraulic excavator based on digging paths was proposed to solve the problem that digging force of the hydraulic excavator designed independently in our country has been always insufficient in the digging process. With the characteristics in consecutive digging process of the hydraulic excavator considered, a digging path was defined to be composed of the bucket and arm digging trajectories and the feasible working region was divided into a series of uniform paths according to the position of the boom. Some discrete points of the machine digging force on the paths were calculated, which were used to evaluate digging performance. One hydraulic excavator designed independently in our country and another comparable one designed by Japan were analyzed respectively using the new method. The results show that the difference between the maximum digging forces of the hydraulic excavator designed independently in China and that imported is about 20 kN. The difference between full capacities of the two arm digging is about 12%. These are the reasons for the insufficient digging force of the hydraulic excavator designed independently in China. The new method plays an important theoretic role in design of the hydraulic excavator and improves the development of the research on the hydraulic excavator in China. 4 tabs, 3 figs, 8 refs.

Key words: mechanical engineering; hydraulic excavator; working device; digging performance analysis; digging path

0 引言

作为工程机械的排头兵,反铲液压挖掘机在国家基础建设中发挥着重要的作用,工作装置的设计质量直接影响着挖掘机的挖掘性能,在液压挖掘机的工作装置进行运动学分析和动力学分析的基础上,如何准确地评价挖掘机的挖掘性能指标是挖掘机工作装置优化设计的关键技术。在挖掘机设计过程中,国内外很多优秀企业已经摆脱传统的经验设计束缚,采用先进的基于虚拟样机技术的液压挖掘机性能分析方法^[1]。国外重视电子计算机技术在液压挖掘机设计过程中的应用,已经发展有总体、工作装置、液压系统等设计程序,可以在短时间内进行新产品的开发设计到批量生产。中国针对液压挖掘机的挖掘性能分析方法主要有 2 类:①建立完挖掘机的数学模型以后,对挖掘机进行运动学和动力学建模,选取挖掘机几个特殊工况进行性能评估,包括挖掘力大小及其整机挖掘力发挥受限制因素^[2];②同样建模完成以后,根据动臂油缸、斗杆油缸以及铲斗油缸的分级,针对挖掘区域内部的有限数量工作姿态进行挖掘性能评估,包括最大挖掘力的大小、平均挖掘力的大小以及各整机挖掘力发挥受限制因素所占比例^[3]。

根据以上 2 种性能分析方法,中国基于不同平台开发了一些性能分析软件,设计的产品整机挖掘性能显著提高。但是实际使用过程中,中国和国外的 2 款液压挖掘机在性能分析、软件分析的挖掘机挖掘性能相似的情况下,中国产挖掘机在挖掘过程中经常出现挖掘力不足的现象,究其原因主要因为挖掘性能分析时忽略了挖掘机的挖掘特点。斗杆挖掘时挖掘力的发挥与铲斗相对斗杆的夹角关系密切,同时为了保证斗前壁不与挖掘对象摩擦,不同型号的挖掘机斗杆挖掘时最有利于挖掘力发挥的铲斗相对斗杆的极限夹角是不同的。本文从工程实际问题出发,为了解决挖掘机在实际挖掘作业中出现挖掘力不足的现象,结合挖掘机专业知识提出基于作业路径的液压挖掘机性能分析方法。区别与已有的液压挖掘机挖掘性能分析方法,新方法既不独立的选取几个典型的工作姿态,也不可能挖掘区域内工作油缸自由组合出离散的任意多个工作姿态来评价挖掘机的挖掘性能。新的挖掘机性能分析方法,充分考虑了每台挖掘机的作业习惯,挖掘机在实际连续的

挖掘作业过程中将自己的挖掘性能尽量展现出来,所以每台挖掘机都具有自己习惯的作业路径。基于新方法,通过对比中国产挖掘机与国外先进挖掘机的挖掘性能,解释了中国产挖掘机挖掘力不足的同时验证新方法的准确性和有效性,对后续的中国产挖掘机优化设计提供了坚实的理论基础。

1 挖掘作业路径的描述

某中国产液压挖掘机与同吨位的进口挖掘机在铲斗相对斗杆的夹角相同的情况下,斗杆挖掘时整机挖掘力发挥相似,如图 1 所示^[4]。考虑到两型号的挖掘机在斗杆挖掘时铲斗允许的极限夹角不同,中国产挖掘机与进口挖掘机处在各自的极限夹角时斗杆挖掘,整机最大斗杆挖掘力发挥相差接近 20 kN。

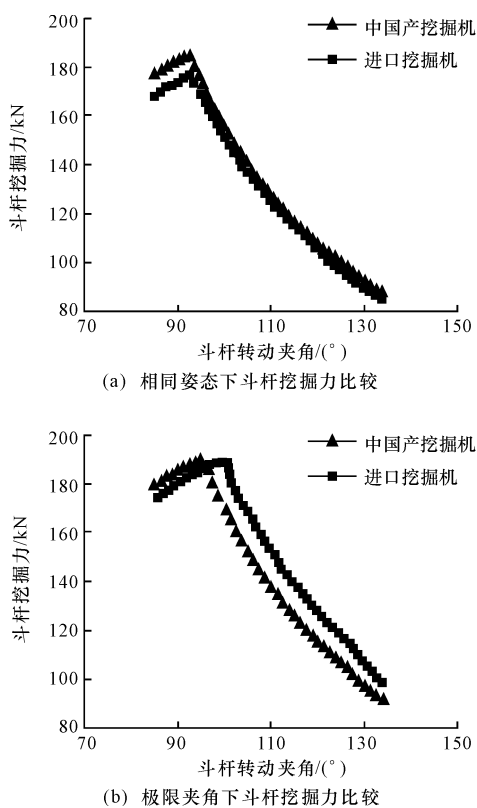


图 1 斗杆挖掘力比较

Fig. 1 Comparison of arm digging forces

由于进口挖掘机斗杆挖掘时铲斗相对斗杆的极限夹角可以转到较小值而发挥更大的斗杆挖掘力,挖掘机实际工作时,操作者为了获得更大的斗杆挖掘力就会选择最适合斗杆挖掘力发挥的工作姿态,而中国产挖掘机与进口挖掘机的工作装置尺寸决定了铲斗相对斗杆的不同极限夹角^[5],所以每款挖掘

机都拥有不同的作业习惯。为了体现挖掘机的作业习惯,本文提出了基于挖掘作业路径的性能分析方法。

对于中型液压反铲挖掘机挖掘较硬的作业对象时,工作过程中斗杆挖掘发挥越来越重要的作用,只有斗杆挖掘力不足时换成铲斗挖掘,改变铲斗相对斗杆的夹角后再斗杆挖掘,铲斗挖掘与斗杆挖掘交替进行,直到铲斗与斗杆的相对夹角转到保证斗杆挖掘切削后角非负的极限夹角以后斗杆挖掘就结束了,最后铲斗挖掘装满铲斗并提土^[6]。基于作业路径的性能分析方法与作业路径的选择密切联系作业路径体现出挖掘机的作业习惯。基于实际挖掘过程,作业路径选择了一条由铲斗挖掘与斗杆挖掘组合而成的曲线,如图 2 所示。

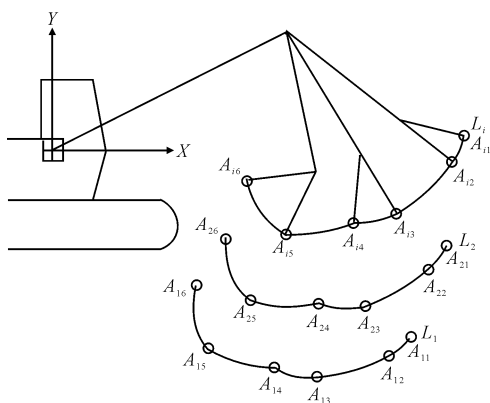


图 2 挖掘过程作业路径的组成

Fig. 2 Digging paths in digging process

注: A_{11} 、 A_{12} 、 A_{13} 、 A_{14} 、 A_{15} 、 A_{16} 为第 1 条作业路径上的特征点;

A_{i1} 、 A_{i2} 、 A_{i3} 、 A_{i4} 、 A_{i5} 、 A_{i6} 为第 i 条作业路径上的特征点;

L_1 、 L_2 、 \dots 、 L_i 为路径 1, 路径 2, \dots , 路径 i 。

作业路径密切联系实际作业过程,体现每台挖掘机挖掘特点的同时,还能够根据设计人员的需要调整作业路径的起始位置和结束位置^[7]。

作业路径的具体组成:① A_{11} ,作业路径的起始点,即斗杆夹角与铲斗夹角均处于起始位置;② A_{12} ,作业路径的第 1 段铲斗挖掘结束点,斗杆起始夹角不变,铲斗转到铲斗尖、铲斗与斗杆铰点、斗杆与动臂铰点三点共线;③ A_{13} ,作业路径的第 1 段斗杆挖掘结束点, A_{12} 点处的铲斗夹角保持不变,斗杆转至斗杆油缸作用力臂最大处;④ A_{14} ,作业路径的第 2 段铲斗挖掘结束点, A_{13} 点处的斗杆夹角保持不变,铲斗转至保证斗杆挖掘时切削后角非负的极限夹角;⑤ A_{15} ,作业路径的第 2 段斗杆挖掘结束点, A_{14} 点处的铲斗夹角保持不变,斗杆转至斗杆的夹角结

束位置;⑥ A_{16} ,作业路径的第 3 段铲斗挖掘结束点, A_{15} 点处斗杆夹角保持不变,铲斗转至铲斗夹角结束位置。

完整的作业路径由 A_{ij} ($j=1,2,\dots,6$) 6 个点划分成的 5 段挖掘轨迹组成,每个点都由工作装置的机构尺寸决定,同时设计过程中根据设计人员的需要,可以分别定义铲斗夹角和斗杆夹角的起始结束位置,相当于选取完整的作业路径上的几段连续的挖掘轨迹获得新的作业路径。然后,整个可行挖掘区域根据动臂的位置画出相似的多条作业轨迹,每条作业路径的组成都是一样的。

2 基于作业路径的性能分析方法及其软件实现

挖掘区域被划分成一系列的作业路径以后,首先在作业路径上 6 个点 A_{ij} 之间增加多个离散点,然后以作业路径上每个点的挖掘性能作为评价标准,包括铲斗挖掘力、斗杆挖掘力、铲斗挖掘时受限制因素以及斗杆挖掘时受限制因素。最后,统计该挖掘机在整个挖掘区域内的综合挖掘性能,主要指挖掘区域内铲斗最大挖掘力、斗杆最大挖掘力、平均铲斗挖掘力、平均斗杆挖掘力、铲斗挖掘时整机挖掘力受限制因素所占比例以及斗杆挖掘时整机挖掘力受限制因素所占比例。挖掘区域内的点被连接在一系列连续的作业路径上,可以统计出每条作业路径上的最大铲斗挖掘力、最大斗杆挖掘力、平均铲斗挖掘力以及平均斗杆挖掘力。

基于作业路径的性能分析方法,充分考虑了挖掘过程的连续性以及挖掘机的作业特点。基于 VB 语言编写的基于作业路径的性能分析软件,操作人员只需要根据挖掘需要输入挖掘过程中的铲斗相对斗杆起始角、铲斗相对斗杆终止角、斗杆相对动臂的起始角和斗杆相对动臂的终止角,斗杆挖掘时斗杆油缸作用力臂最大处和铲斗相对斗杆的极限夹角由挖掘机的工作装置尺寸决定,这样每台挖掘机的作业路径就由此形成^[8]。计算结果包括铲斗挖掘时各限制比例所占因素、铲斗挖掘时各限制比例所占因素、各条轨迹上铲斗最大挖掘力以及各条轨迹上斗杆最大挖掘力。

3 基于作业路径的性能分析举例

以前的性能分析软件按照动臂油缸、斗杆油缸

以及铲斗油缸分级统计挖掘区域内综合挖掘性能,分析结果表明中国产挖掘机与进口挖掘机在综合挖掘性能上很相似,中国产挖掘机挖掘力甚至比进口挖掘机大,但实际作业中,中国产挖掘机却会出现挖不动现象。现在用基于作业路径分析方法分析 2 款挖掘机,斗杆起始夹角 95° ,斗杆终止夹角 125° ,铲斗起始夹角 85° ,铲斗终止夹角 205° ,比较其挖掘性能。

基于作业路径性能分析法分析挖掘区域内的最大挖掘力比较见表 1,中国产挖掘机的铲斗挖掘最大挖掘力大于进口挖掘机,但是中国产挖掘机斗杆最大挖掘力小于进口挖掘机。如表 2 所示,以往基于挖掘区域内离散点性能分析法分析中国产挖掘机与进口挖掘机在最大斗杆挖掘力方面,两者相近。基于作业路径性能分析法和传统的分析方法,2 种方法在分析挖掘区域内最大铲斗挖掘力和最大斗杆挖掘力时,没有多大区别。

表 1 基于作业路径性能分析挖掘区域内最大挖掘力统计

Tab.1 Statistic of maximum digging force in feasible region calculated with performance analysis method based on paths kN

分类	纵向斗杆挖掘	纵向铲斗挖掘
中国产挖掘机	189	220
进口挖掘机	195	218

表 2 传统分析法挖掘区域内最大挖掘力统计

Tab.2 Statistics of maximum digging forces in feasible region calculated with traditional performance analysis method kN

分类	纵向斗杆挖掘	纵向铲斗挖掘
中国产挖掘机	188	219
进口挖掘机	190	218

与以往传统挖掘性能分析方法的挖掘力比较,基于作业路径性能分析法的优点,在于挖掘区域内离散点分布在每段挖掘轨迹上,挖掘力更加符合实际作业习惯,考虑了挖掘的连续性。中国产挖掘机与进口挖掘机按照动臂与水平方向夹角划分每条挖掘轨迹上的最大铲斗挖掘力、最大斗杆挖掘力、平均铲斗挖掘力以及平均斗杆挖掘力比较,如图 3 所示。

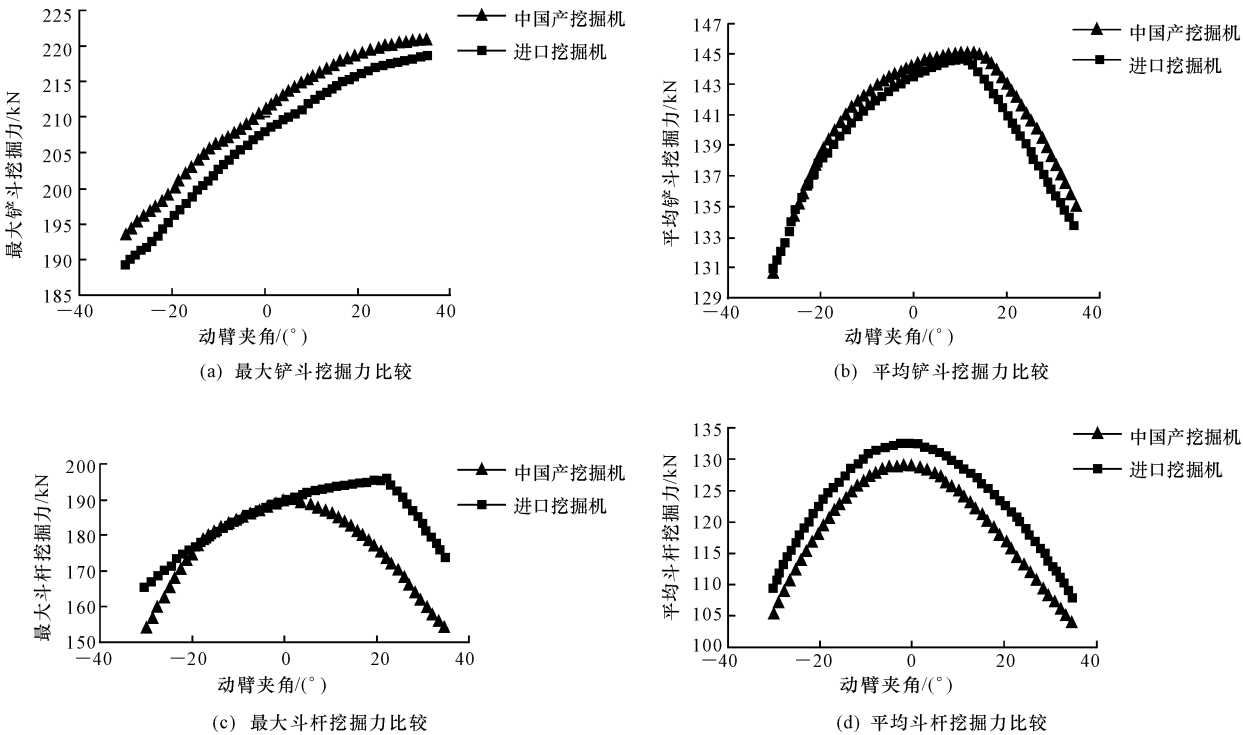


图 3 作业轨迹上挖掘性能比较

Fig.3 Comparison of digging performances based on paths

由图 3 可知,基于作业路径分析铲斗挖掘时中国产挖掘机在最大铲斗挖掘力、平均铲斗挖掘力 2 个方面比进口挖掘机好,但是斗杆挖掘时中国产挖掘机在最大斗杆挖掘力、平均斗杆挖掘力方面比进口挖掘机小。

基于作业路径分析方法,挖掘区域内挖掘力充

分发挥统计如下页表 3 所示,进口挖掘机按照规定的作业路径,斗杆挖掘斗杆缸充分发挥的比例要比中国产挖掘机高很多。以往基于挖掘区域内离散点性能分析法分析中国产挖掘机与进口挖掘机在挖掘区域内挖掘力充分发挥统计方面如下页表 4 所示,中国产挖掘机比进口挖掘机斗杆挖掘斗杆缸充分发

表 3 基于作业路径性能分析法挖掘区域内
挖掘力充分发挥统计

Tab. 3 Statistics of full capacities calculated with
performance analysis method based on paths in feasible region %

比例	中国产挖掘机	进口挖掘机
纵向铲斗挖掘铲斗充分发挥	24. 26	22. 84
纵向斗杆挖掘斗杆充分发挥	0. 40	12. 40

表 4 传统分析法挖掘区域内挖掘力充分发挥统计

Tab. 4 Statistics of full capacities calculated with
traditional performance analysis method in feasible region %

比例	中国产挖掘机	进口挖掘机
纵向铲斗挖掘铲斗充分发挥	50. 75	43. 50
纵向斗杆挖掘斗杆充分发挥	49. 45	48. 64

挥比例还要高一点。

4 结 语

(1)从工程应用实际问题出发,发现中国自主研发的挖掘机通过传统的性能分析法挖掘性能媲美国外引进的标杆产品,但实际挖掘过程中出现挖掘力不足、燃油经济性差等现象。为了从理论上解释挖掘性能缺陷,提出基于作业路径的液压挖掘机性能分析模型,并基于 VB 语言编制通用挖掘性能分析软件。

(2)通过两款吨位相同的挖掘机,基于新的挖掘性能分析方法进行挖掘性能对比,中国产自主研发的挖掘机在其习惯的作业路径上斗杆挖掘力均小进口标杆产品,解释了自主品牌挖掘机挖掘力不足的现象;同时挖掘力充分发挥比例上,中国产自主研发的挖掘机在其习惯的作业路径上也远小于进口标杆产品,解释了自主品牌挖掘机燃油经济性差的现象。

(3)挖掘性能对比结果证明了基于作业路径的液压挖掘机性能分析新方法的有效性,基于作业路径的液压挖掘机性能分析模型中抽取适当的机构尺寸作为优化变量,通过现代的优化设计算法,可以针对挖掘机的工作装置进行机构优化,设计出作业路径上挖掘力大小以及充分发挥比例尽可能大的改进产品。

参考文献:

References:

[1] Chen H H,Zi J P. The application of virtual prototype technology in the kinematic analysis of hydraulic excavator working device [J]. Advanced Materials Research,2012,538-541(6):3235-3239.

[2] 胡雄伟. 液压挖掘机反铲装置的力学性能分析与优化研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
HU Xiong-wei. Study on the mechanics performance analysis and optimization of hydraulic excavato’s attachment [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)

[3] 李永旭. 液压挖掘机工作装置与液压系统设计的研究[D]. 上海:同济大学,2006.
LI Yong-xu. Design study on the hydraulic excavator’s attachment and hydraulic system [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)

[4] 李秋波. 基于可行挖掘域的反铲液压挖掘机工作装置优化设计与强度分析[D]. 重庆:重庆大学,2011.
LI Qiu-bo. Optimum design and strength analysis of backhoe hydraulic excavator working device based on practical mining area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)

[5] Udwardia F E,Kalaba R E. Equations of motion for mechanical systems [J]. Journal of Aerospace engineering,1996,9(3):64-69.

[6] 林慕义. 单斗液压挖掘机构造与设计[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
LIN Mu-yi. Structure and design of single bucket hydraulic excavator [M]. Beijing: Press of Metallurgical Industry,2011. (in Chinese)

[7] Mrad F,Abdul-Malak M,Sadek S,et al. Automated excavation in construction using robotics trajectory and envelop generation [J]. Engineering Construction and Architectural Management,2002,9(4):325-335.

[8] 张艳. Visual Basic 程序设计教程[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2001.
ZHANG Yan. Visual Basic programming tutorial [M]. Xuzhou:China Mining University Press,2001. (in Chinese)

