

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.014

基于极限轨迹的挖掘机工作装置动力学分析*

孙浩然¹, 任志贵^{1,2}, 王军利^{1,2}, 梁 杨¹, 魏万行¹

(1. 陕西理工大学 机械工程学院, 陕西 汉中 723000; 2. 陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723000)

摘要:针对液压挖掘机工作装置动态特性研究的问题,提出了一种工作装置铰点力动力学分析方法。采用理论挖掘力计算模型,分别计算得到了沿铲斗挖掘与斗杆挖掘两条极限挖掘轨迹上的理论挖掘力分布;通过对工作装置三维模型的合理简化,建立了其动力学仿真模型;通过对比仿真轨迹中最大挖深点与其实际坐标位置,验证了动力学模型的正确性;分别以铲斗挖掘力和斗杆挖掘力为载荷,进行了两条极限挖掘轨迹的动力学仿真。研究表明:工作装置铰点力在挖掘过程中随理论挖掘力而进行动态变化;该研究结果为液压挖掘机工作装置动态特性的研究及动应力分析提供了理论基础。

关键词:挖掘机;工作装置;极限挖掘轨迹;动载荷;动力学分析

中图分类号:TH113.22;TU621

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)09-1075-05

Dynamic analysis of working device of excavator based on limit trajectories

SUN Hao-ran¹, REN Zhi-gui^{1,2}, WANG Jun-li^{1,2}, LIANG Yang¹, WEI Wan-xing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723000, China)

Abstract: Aiming at the study of dynamic characteristics of the working device of hydraulic excavator, a method of force dynamic analysis of the hinge points of the working device was presented. Using the theoretical excavation force model, the theoretical excavation force distribution along the limit excavation trajectories of bucket excavation and bucket bar excavation was calculated. Through the reasonable simplification of the three-dimensional model of the working device, the dynamic simulation model was established. The correctness of the dynamic model was verified by comparing the maximum digging point and its actual coordinate position in the simulation trajectory. The dynamic simulation of two limit excavation trajectories was carried out with the bucket excavation force and the bucket rod excavation force as the load respectively. The results indicate that the hinge point force of the working device changes dynamically with the theoretical excavation force during the excavation process. This study provides a theoretical basis for the study of dynamic characteristics and dynamic stress analysis of hydraulic excavator working device.

Key words: excavator; working device; limit excavation trajectories; dynamic load; dynamic analysis

0 引 言

液压挖掘机作为常用的工程机械,其结构性能受到了国内外众多学者的广泛关注。

在以往的研究中,基于虚拟样机的动力学仿真是众多学者分析挖掘机工作装置的常用方法^[1-3]。曹永

利^[4]基于 RecurDyn 对工作装置铰点的受力情况进行了理论分析和仿真验证。冯豪^[5]基于整体动态模型与局部子模型相结合的方法对工作装置的局部焊缝进行了应力计算。靳龙^[6]将柔性联接方式代替了行走架联接螺栓组,得到了几种典型工况下受载最大的螺栓位置及受力曲线。黄鸣辉^[7]对工作装置刚柔耦合产生的非线性动力学效应、转动角速度变化产生的惯

收稿日期:2019-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605270);陕西省教育厅自然科学基金资助项目(15JK1136);陕西省科技厅自然科学基金资助项目(2019JQ-884)

作者简介:孙浩然(1996-),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事液压挖掘机优化设计方面的研究。E-mail:ysushr@163.com

性以及复合挖掘载荷的不确定性等动态特性进行了仿真分析及实测验证。

综上所述,学者们在考虑挖掘机的载荷时,只考虑了将某一工况下恒定数值的挖掘阻力作为工作装置的静载荷,而未考虑某条挖掘轨迹中随时间改变的动载荷,也未考虑动载荷所对应的工作装置的动态特性。

因此,本文将不同极限挖掘轨迹中液压缸的理论挖掘力作为动载荷,对工作装置铰点力进行动力学仿真分析。

1 极限轨迹选择

液压挖掘机作业范围是由各液压缸行程决定的,液压缸的规律性伸缩使挖掘机完成各个复杂的挖掘动作,使用工作装置的结构参数计算可得挖掘机的包络图^[8]。挖掘机包络图是挖掘机性能参数的几何表示,也可看作是挖掘机极限挖掘轨迹的集合。

极限挖掘轨迹中涉及到众多典型的极限工况,如最大挖掘深度工况,并且挖掘机在极限工况下进行挖掘工作对挖掘机工作装置的性能要求较高,挖掘过程中关键铰点的受力比较复杂,所以极限挖掘轨迹是挖掘机工作装置动态特性的研究中极其重要的一环。

挖掘机工作装置各构件之间存在夹角,不同的夹角可使挖掘机工作装置处于不同的工作位置,改变夹角可得到不同的挖掘轨迹。

工作装置夹角范围如表 1 所示(其中最大角度和最小角度即为挖掘机工作装置的极限夹角)。

表 1 工作装置极限角度

角度	最大角度/(°)	最小角度/(°)
动臂与水平面夹角 θ_1	61.1	-42.3
斗杆与动臂夹角 θ_2	148.6	26.1
铲斗与斗杆夹角 θ_3	219.7	41.3

在选择挖掘轨迹过程中,动臂与车身、动臂与斗杆、斗杆与铲斗夹角的初始角与终止角可根据实际需要取值。在此,笔者选择了两条通过最大挖深点 D_2 的极限挖掘轨迹作为研究前提。通过改变斗杆与动臂的夹角 θ_2 ,其余夹角保持不变,则可以生成斗杆液压缸极限挖掘轨迹;改变铲斗与斗杆的夹角 θ_3 ,其余夹角保持不变,则可以生成铲斗液压缸极限挖掘轨迹。

本研究选择的两条极限挖掘轨迹如图 1 所示。

图 1 中,选择的斗杆液压缸挖掘轨迹为 D_1 至 D_4 ,该挖掘轨迹经过挖掘机的最大挖深点 D_2 。此时,动臂与水平面的夹角保持 -42.3° ,铲斗与斗杆的夹角为 180° 保持不变,斗杆液压缸伸出,使斗杆与动臂的夹角

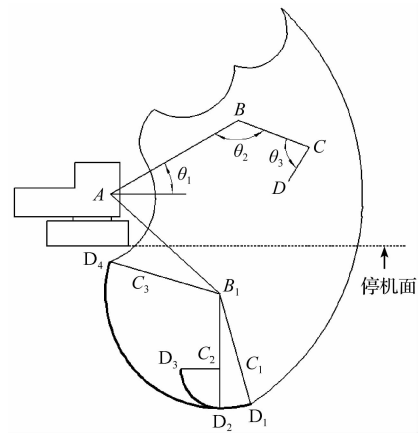


图 1 选择的挖掘轨迹

从 148.6° 变为 26.1° ,即完成了极限工作点 D_1 至极限工作点 D_4 运动过程;

选择的铲斗液压缸挖掘轨迹为 D_2 至 D_3 , D_2 为挖掘机的最大挖深点,此时,动臂与水平面的夹角保持 -42.3° ,斗杆与动臂的夹角为 137.7° 保持不变,铲斗液压缸伸出,改变铲斗与斗杆的夹角,使其从 180° 变为 90° ,即完成了挖掘机从最大挖深点 D_2 至工作点 D_3 的运动过程。

2 动载荷计算

挖掘力和挖掘阻力是一对相互作用力,液压挖掘机在实际挖掘过程中铲斗所受最大挖掘阻力,即挖掘机在实际工作过程中能发挥出的最大挖掘力。计算出了挖掘机能发挥出的最大挖掘力,也就求出了最大挖掘阻力,即挖掘机的动载荷。

当选定斗杆、铲斗液压缸挖掘轨迹以后^[9],笔者分别在斗杆、铲斗转动角度区间内取等距步长角,即将连续的挖掘轨迹分为等距的挖掘点。

笔者通过理论挖掘力模型,计算出不同夹角对应的挖掘力^[10],最后分别统计出斗杆液压缸挖掘轨迹和铲斗液压缸挖掘轨迹上的理论挖掘力,即铲斗齿尖所受的动载荷,并绘出选定的挖掘轨迹的理论挖掘力图。

液压缸理论挖掘力如图 2 所示。

斗杆、铲斗液压缸的理论挖掘力随夹角的变化情况分别如图 2(a,b) 所示。

由图 2 中可以得到,在挖掘过程中,斗杆、铲斗液压缸的挖掘力随角度的减小呈现先缓慢增大后急剧减小的情况;其中,斗杆液压缸在夹角 θ_2 为 86° 时最大,最大挖掘力为 88.391 kN ;铲斗液压缸在夹角 θ_3 为 131° 时最大,最大挖掘力为 104.289 kN 。

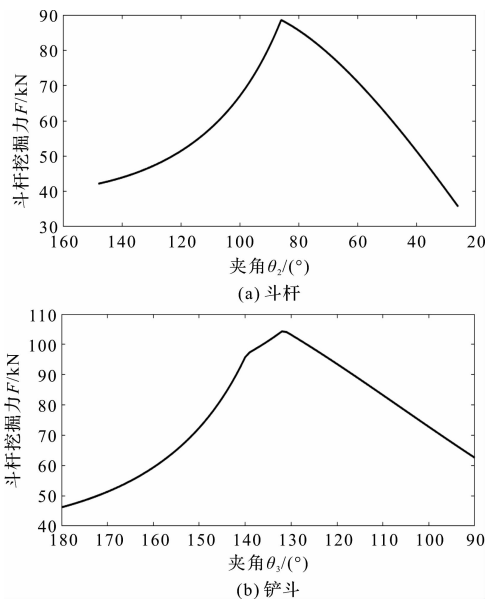


图2 液压缸理论挖掘力

3 动态特性仿真分析

3.1 动力学模型

为了减少动力学仿真时间且不影响仿真结果,在建模过程中,笔者对工作装置进行简化处理。

工作装置实体模型如图3所示。

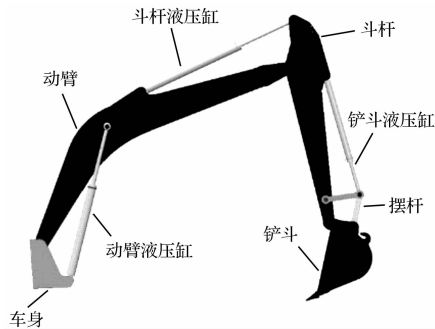


图3 工作装置实体模型

导入后的模型需要在 marker 点上对各构件建立相应约束,工作装置约束副如表2所示。

表2 工作装置约束

构件1	构件2	约束副
车身	动臂	旋转副
车身	动臂液压缸体	圆柱副
动臂	动臂液压活塞	圆柱副
动臂	斗杆液压缸体	圆柱副
斗杆	斗杆液压活塞	圆柱副
动臂	斗杆	旋转副
斗杆	铲斗液压缸体	圆柱副
摆杆	铲斗液压活塞	圆柱副
斗杆	摆杆	圆柱副
铲斗	摆杆	圆柱副
斗杆	铲斗	旋转副
动臂液压活塞	动臂液压缸体	移动副
斗杆液压活塞	斗杆液压缸体	移动副
铲斗液压活塞	铲斗液压缸体	移动副

实际工作过程中,在忽略土壤摩擦力对工作装置运动影响的情况下,液压挖掘机工作装置所承受的外来负载主要包括挖掘阻力和斗中物料重力。笔者将第2节中计算得到的理论挖掘力看作铲斗所受的动载荷,其由切向力和法向力两部分组成,分别用 F_t 和 F_n 表示,并且根据经验定义法向挖掘力是切向挖掘力的0.2倍,即 $F_n = 0.2F_t$,方向分别为沿挖掘轨迹的切线和法线方向。

物料重力计算公式为:

$$G = \rho \cdot v \cdot g \quad (1)$$

笔者取挖掘土壤的疏松程度为Ⅲ级,挖掘的土方量为标准斗容 $v = 0.9 \text{ m}^3$,Ⅲ级土壤的密度为 $\rho = 1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,则铲斗装满物料时重力 $G = 15\ 876 \text{ N}$ 。

进行仿真时,笔者通过 STEP 函数来控制液压油缸的伸缩行程与动载荷的加载,在铲斗齿尖建立作为测量的 marker 点。

工作装置 STEP 函数如表3所示。

表3 工作装置驱动函数表

STEP 函数	铲斗挖掘	斗杆挖掘
动臂液压缸	STEP (time, 0, 0, 5, -200)	STEP (time, 0, 0, 5, -200)
斗杆液压缸	STEP (time, 0, 0, 5, 50)	STEP (time, 5, 0, 50, 1 150)
铲斗液压缸	STEP (time, 5, 0, 50, 400)	STEP (time, 0, 0, 50, -300)
物料重力	STEP (time, 5, 0, 50, 15 876)	STEP (time, 5, 0, 50, 15 876)
切向动载荷	STEP (time, 5, 0, 35, 104 289)	STEP (time, 5, 0, 35, 88 391)
	+ STEP (time, 35, 0, 50, -104 289)	+ STEP (time, 35, 0, 50, -88 391)
法向动载荷	STEP (time, 5, 0, 35, 20 858)	STEP (time, 5, 0, 35, 17 678)
	+ STEP (time, 35, 0, 50, -20 858)	+ STEP (time, 35, 0, 50, -17 678)

3.2 模型验证

本研究使用 Matlab 软件,结合工作装置结构参数对最大挖深点进行理论计算。挖掘机工作装置包络图如图4所示。

由图4可知,挖掘机工作装置最大挖深点在 YZ 平面内的坐标为(4 500, -6 300),单位为毫米。在仿真软件中对液压挖掘机模型进行运动学仿真。

仿真时间设置为 50 s,仿真步长为 200,可得到各关键零件和铰点的位移和受力变化情况。

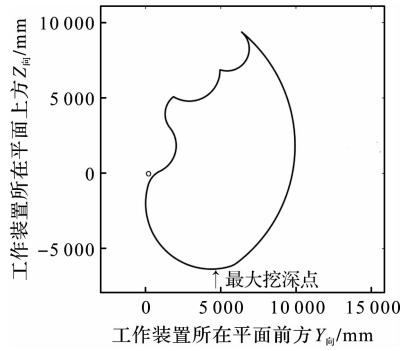


图 4 挖掘机工作装置包络图

铲斗斗齿齿尖的位移曲线如图 5 所示。

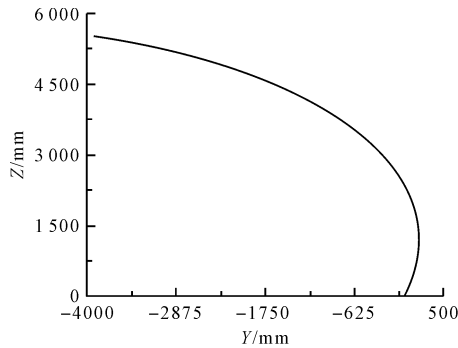


图 5 斗杆挖掘齿尖位移

由图 5 可以看出:在斗杆液压缸挖掘过程中,工作装置在 YZ 平面内的最大挖深点坐标为(4 200, -5 700),通过与理论计算得到的斗齿尖位移进行对比,Y、Z 方向上误差分别为 6.67%、9.52%。

虽然位移存在一定误差,但仍旧在允许的范围,因此,仍可认为所建立的动力学模型是合理且有效的。

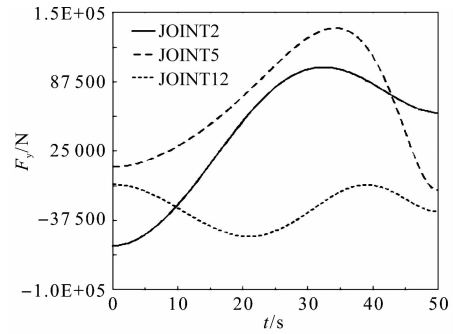
3.3 仿真结果分析

工作装置铰点受力情况如图 6 所示。

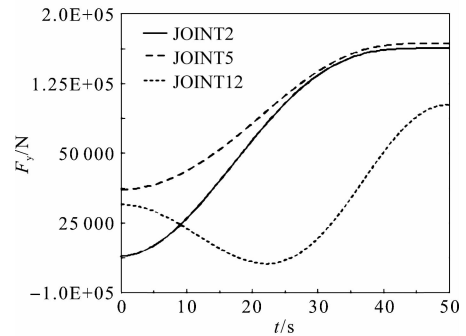
图 6(a)中,在使用斗杆液压缸进行挖掘过程中,即斗杆液压缸挖掘轨迹为 D₁ 至 D₄,动臂与车身铰点 JOINT2 的受力在 t=0~12 s 内由 62.5 kN 急剧减小至 0 kN;铰点力由 Y 轴负方向变为正方向,在 t=12 s~33 s 内急剧增长达到最大峰值,峰值铰点力为 100 kN,在 t=33 s~50 s 内缓慢减小至 56.25 kN;

斗杆与动臂铰点 JOINT5 的受力在 t=0~35 s 内缓慢增长,并在 35 s 时达到最大峰值,峰值铰点力为 140 kN;在 t=35 s~47 s 内急剧减小,47 s 时减小至 0 kN,同时铰点力由 Y 轴正方向变为负方向;

仿真过程中,铲斗与斗杆铰点 JOINT12 的受力方向一直为 Y 轴负方向,在 t=0~39 s 内先增后减直至变为 0 kN,t=22 s 时达到最大峰值,峰值铰点力为 53.125 kN,在 t=39 s~50 s 内缓慢增长。在挖掘过程中,斗杆与动臂铰点 JOINT5 的受力最大,最大铰点力



(a) 斗杆挖掘



(b) 铲斗挖掘

图 6 铰点受力

JOINT2—动臂与车身铰接点;JOINT5—斗杆与动臂铰接点;JOINT12—铲斗与斗杆铰接点

约为 140 kN。

图 6(b)中,在使用铲斗液压缸进行挖掘过程中,即铲斗液压缸挖掘轨迹为 D₂ 至 D₃,动臂与车身铰点 JOINT2 的力在 t=0~13 s 内由 62.5 kN 缓慢减小至 0 kN,在 t=13 s 时急剧增长,同时,铰点力由 Y 轴负方向变为正方向,40 s~50 s 时铰点力趋于稳定,并在 45 s 时达到最大峰值,峰值铰点力为 162.5 kN。

斗杆与动臂铰点 JOINT5 的受力由 t=0 s 开始缓慢增加,t=40 s 趋于稳定,并在 45 s 时达到最大峰值,峰值铰点力为 170 kN。铲斗与斗杆铰点 JOINT12 的受力在 0~35 s 内先增后减,t=35 s 时开始急剧增长;同时,铰点力由 Y 轴负方向变为正方向,并在 50 s 时达到最大峰值,峰值铰点力为 102.5 kN。在挖掘过程中,斗杆与动臂铰点 JOINT5 的受力最大,最大约束力约为 170 kN。

从图 6 可见:

(1)在斗杆、铲斗两种挖掘轨迹仿真过程中,动臂与车身铰接点 JOINT2、斗杆与动臂铰接点 JOINT5 的受力变化趋势基本一致,而铲斗与斗杆铰接点 JOINT12 受力变化比较明显。并且,斗杆与动臂铰接点 JOINT5 受力变化最平稳,且峰值最大;铲斗与斗杆铰接点 JOINT12 受力变化最剧烈,且峰值最小;

(2)液压挖掘机动臂、斗杆上的各铰点的受力情

况随动载荷的变化而变化,最大值与理论挖掘力的峰值出现时间基本一致。

4 结束语

为了对液压挖掘机工作装置的动态特性问题进行研究,笔者将不同极限挖掘轨迹中液压缸的理论挖掘力作为动载荷,对工作装置铰点力进行了动力学仿真分析与研究。

研究结论如下:

(1) 通过对比仿真轨迹中最大挖深点坐标与其实际坐标位置,其误差在允许范围内,证明了所建立的动力学模型的正确性;

(2) 笔者分别选择了通过挖掘机最大挖深点的铲斗挖掘、斗杆挖掘两条极限挖掘轨迹,并通过理论挖掘力模型计算得到了极限挖掘轨迹上铲斗液压缸和斗杆液压缸的理论挖掘力;

(3) 笔者将理论挖掘力作为挖掘机的动载荷,对挖掘机工作装置进行动力学仿真分析,得到了铲斗挖掘、斗杆挖掘两条极限挖掘轨迹中的铰点力,验证了挖掘机工作装置动力学分析方法的可行性。

参考文献 (References):

[1] YUAN Y. Rigid-flexible coupling analysis of backhoe hydraulic excavator working device [C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences. Szklarska Poreba : [s. n.], 2018: 02020.

- [2] CAO L, WANG Q, CAO L, et al. Dynamics simulation of hydraulic excavator working device based on ADAMS [C]//International Conference on Mechanical Design. Singapore: Springer, 2017:899-909.
- [3] XIAO C, ZHANG G. Dynamic simulation analysis of working device for hydraulic excavator based on ADAMS [J]. *Telkomnika*, 2016,14(3):194-201.
- [4] 曹永利,董致新. 基于 RecurDyn 液压挖掘机工作装置动力学分析与仿真 [J]. *机床与液压*, 2018,46(8):50-53,57.
- [5] 冯 豪,杜群贵,孙有平. 基于子模型的挖掘机结构瞬态动力学研究 [J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2018,46(3):29-34,57.
- [6] 靳 龙,李玉奇,曾 昊. 基于 ADAMS 的某大型液压挖掘机建模与仿真分析 [J]. *现代制造工程*, 2017(11):100-104,109.
- [7] 黄鸣辉,黄冠雅,孙中林,等. 考虑作业动态特性的挖掘机工装结构强度分析 [J]. *中国工程机械学报*, 2017,15(5):426-429.
- [8] 陈 进,庆 飞,庞晓平. 基于作业路径的液压挖掘机挖掘性能 [J]. *长安大学学报:自然科学版*, 2014,34(2):115-119.
- [9] 梁明锋,陈 进,庞晓平,等. 基于极限挖掘力的组合挖掘性能分析 [J]. *机械研究与应用*, 2018,31(3):32-35.
- [10] 陈 进,任志贵,庞晓平,等. 液压挖掘机挖掘力计算新方法 [J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2014,42(4):596-603.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

孙浩然,任志贵,王军利,等. 基于极限轨迹的挖掘机工作装置动力学分析 [J]. *机电工程*, 2020,37(9):1075-1079.

SUN Hao-ran, REN Zhi-gui, WANG Jun-li, et al. Dynamic analysis of working device of excavator based on limit trajectories [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(9):1075-1079.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>