

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.007

基于多学科仿真的大型正铲液压 挖掘机工作装置动态强度研究^{*}

周 全¹, 李 光², 吕晓林², 李佳林², 宁晓斌^{1*}

(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:针对大型正铲液压挖掘机工作装置结构强度的评估问题,对大型正铲液压挖掘机工作装置的结构强度进行了研究。采用离散元技术对铲斗挖掘力进行了研究,得出了工作装置斗杆挖掘等挖掘工况的动态挖掘阻力。基于 MSC. Adams 建立了工作装置刚体模型和刚柔耦合模型,运用刚体模型进行了工作装置最大挖掘力普查研究。最后在工作装置刚柔耦合模型中,通过施加动态挖掘阻力,进行斗杆挖掘,分析了工作装置的结构强度;同时在工作装置刚柔耦合模型中,通过施加静态的最大挖掘力,分析了工作装置的结构强度。研究表明,工作装置的静态仿真存在着局限性,不能全面地反映工作装置的结构强度情况,并证明了动态仿真研究的重要性,初步探究了挖掘姿态、工作负载与结构强度三者之间的关系,为大型液压挖掘机工作装置的设计提供了具有价值的参考。

关键词:挖掘机;工作装置;结构强度;仿真

中图分类号:TH122;TU621

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0333-05

Dynamic strength of hydraulic excavator attachment based on multidisciplinary simulations

ZHOU Quan¹, LI Guang², LV Xiao-lin², LI Jia-lin², NING Xiao-bin¹

(1. School 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 structural strength assessment of working device, the structural strength of working device was researched during the development of large face-shovel hydraulic excavator. The dynamic digging resistance of working device was obtained by using DEM to analysis break force under the arm mining condition. The rigid and the rigid-flexible coupling system simulation model were established by MSC. Adams software. The data of dynamic digging resistance and maximum static break force was input into the rigid-flexible coupling system simulation model to analysis the structural strength of the working device. The results indicate that static simulation has its limitation, which can not fully response the structural strength of working device, and the importance of dynamic simulation by comparing the difference between the dynamic simulation and static simulation. The relationship between the digging posture, working load and the structural strength is preliminary researched, which provided the valuable reference for the design of working device.

Key words: excavator; attachment; structural strength; simulation

0 引 言

挖掘机大型化是提高矿石生产效率、节能减排的重要方法之一。目前,国内对大型正铲液压挖掘机的研究尚处在类比改良阶段,缺乏关键技术的深入研究。

工作装置是大型正铲液压挖掘机的关键结构件,强度和可靠性是工作装置设计的核心。大型挖掘机工作装置设计中当前存在的问题主要是:基本停留在对工作装置的静态结构分析,缺乏对工作装置的动态结构强度分析;缺乏工作装置铲斗动态挖掘阻力数据;缺乏挖

收稿日期:2014-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375452)

作者简介:周 全(1989-),男,湖北武汉人,主要从事液压挖掘机工作装置方面的研究。E-mail:Mattzjut@Gmail.com

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

掘力、挖掘姿态与工作装置强度关系;液压挖掘机挖掘作业时,工作装置铲斗与矿石的相互作用力与工作装置的姿态都在不断变化,挖掘土壤的经验公式,无法满足大型液压挖掘机工作装置进行矿石挖掘作业的研究需求^[1]。大型挖掘机不仅是质量与外观的改变,而是结构、系统等上的质变,因此需要完善这个设计体系^[2]。

本研究针对某大型正铲液压挖掘机的工作装置,采用 MSC. Adams,建立液压挖掘机工作装置的刚体模型和刚柔耦合模型。同时在 EDEM 中,得到铲斗的动态挖掘阻力,对工作装置刚柔耦合模型进行动态模拟仿真验证、可靠性分析与薄弱点分析,利用刚体模型挖掘力普查结果,对工作装置刚柔耦合模型进行仿真,探究挖掘负载、挖掘姿态与结构强度之间的关系。

1 液压工作装置的建模

液压挖掘机主要由工作装置、回转装置、行走装置 3 部分组成。工作装置是最主要的作业执行部件,它的工作效率直接影响整机作业的挖掘效率。因此工作装置的结构强度分析与可靠性研究是大型正铲挖掘机设计过程中必不可少的部分。

工作装置主要由动臂、斗杆、铲斗 3 部分组成。首先,根据工作装置设计,在 UG 中建立液压工作装置的三维模型并加以特征细节的处理。工作装置中动臂与斗杆的结构强度与可靠性是关注的重点。

动臂与斗杆主要是由钣金材料焊接在一起的多箱体结构,在 HYPERMESH 中运用壳单元划分网格、赋予对应的厚度属性与材料属性并建立铰接处的“蜘蛛网格”,实现刚性体与柔性体间的运动耦合^[3,4]。本研究将 HYPERMESH 中计算生成的动臂与斗杆 MNF 中性文件导入 ADAMS 虚拟样机中所建立的整个液压工作装置的刚柔耦合动力学模型如图 1 所示。

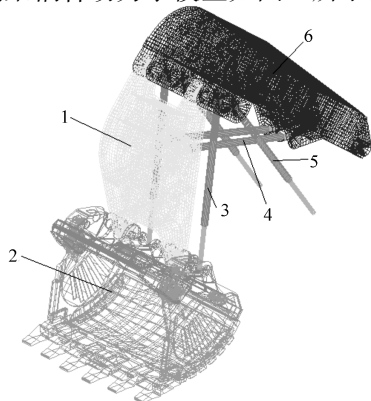


图 1 工作装置的刚柔耦合动力学模型

1—斗杆;2—铲斗;3—铲斗油缸;4—斗杆油缸;5—动臂油缸;
6—动臂

2 斗杆挖掘工况的动态仿真

2.1 工作装置挖掘阻力仿真

矿山作业的主要对象是非均匀、各向异性的颗粒矿堆。基于矿堆的离散特性,可以根据颗粒单元间的接触本构关系与牛顿第二定律,运用离散元分析软件进行工况分析与仿真求解。基于实验基础^[5]与 EDEM 仿真所标定的材料属性参数以及材料之间的接触参数如表 1、表 2 所示。

表 1 材料属性参数

材料属性表		
属性	rock	steel
泊松比	0.25	0.3
剪切模量/MPa	16	79 000
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3 948	7 800

表 2 材料之间接触参数

材料之间相互作用参数		
参数	接触类型	
	rock-rock	rock-steel
静摩擦系数	0.49	0.5
滚动摩擦系数	0.21	0.25
恢复系数	0.51	0.42

基于离散元分析软件 EDEM 建立矿石颗粒模型如图 2 所示,以此进行仿真获取铲斗挖掘矿石的动态挖掘阻力。

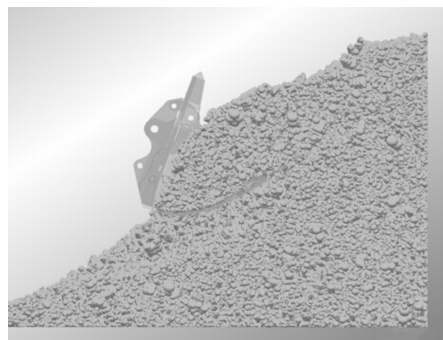


图 2 EDEM 中斗杆挖掘工况模拟仿真

斗杆挖掘是大型正铲液压挖掘机常见工况,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,完成斗杆挖掘。铲斗油缸在整个挖掘过程中,起调整铲斗姿态的作用,保证铲斗保持最优后角进行挖掘^[6]。仿真所得动态挖掘阻力如图 3 所示。

2.2 工作装置的动态结构分析

本研究在 EDEM 中导出铲斗的动态挖掘阻力,并把动态挖掘阻力导入工作装置刚柔耦合模型,按照斗



图3 EDM 随机挖掘负载曲线

杆挖掘力(Crowd Force)定义,动态挖掘阻力施加在铲斗斗尖上,方向沿斗尖运动轨迹的切线方向^[7]。笔者在 ADAMS 虚拟样机中设定动态挖掘阻力函数,实现动态挖掘阻力与斗杆挖掘位置与姿态的无缝连接。最后通过 STEP 函数与 AKISPL 插值函数控制工作装置的运动与加载,实现斗杆挖掘仿真模拟,斗杆油缸的 STEP 驱动函数图如图 4 所示。

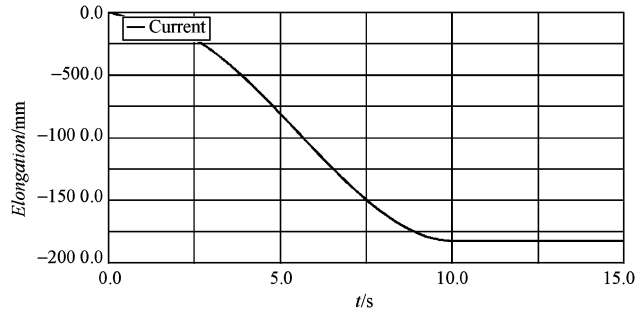


图4 斗杆油缸 STEP 驱动函数图

模拟仿真结束后,本研究提取的动臂与斗杆的最大应力值、节点位置等信息如表 3 所示。工作装置中动臂与斗杆分别在 9.5 s 与 5.1 s 时出现最大应力 52.65 MPa 与 37.37 MPa。

表3 最大应力点结果

部件	节点编号	仿真时间/s	最大应力/MPa
动臂	36 272	9.5	52.65
斗杆	95 752	5.1	37.37

动臂与斗杆出现最大应力时,工作装置的姿态与相应的应力云图如图 5、图 6 所示。

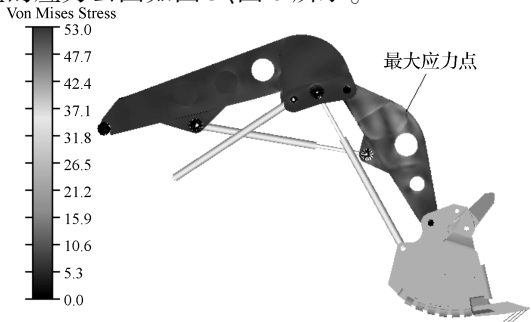


图5 工作装置 5.1 s 的姿态及其应力云图

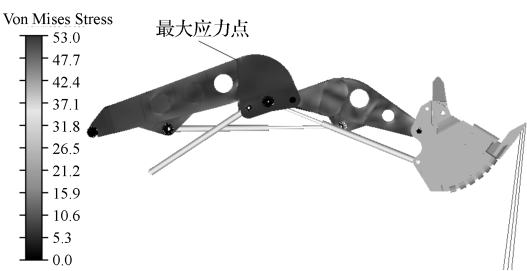


图6 工作装置 9.5 s 的姿态及其应力云图

笔者通过研究工作装置上各节点的应力波动,发现应力波动除了与挖掘工况相关,还受工作装置的液压驱动方式等因素的影响。动臂上最大应力节点的应力变化图如图 7 所示。

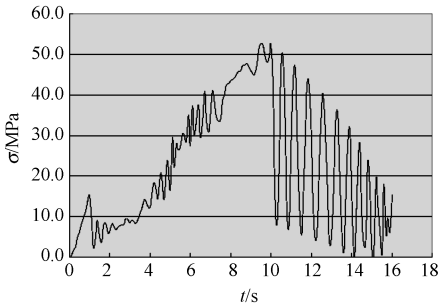


图7 动臂上最大应力节点的应力变化图

经分析研究得出,正常作业时,动臂上最大应力点的应力值比斗杆上的要大。工作装置出现最大应力的位置主要在动臂与斗杆、动臂与动臂油缸、斗杆与铲斗的铰接处、内板圆孔转角处。

3 最大挖掘力普查与强度分析

3.1 斗杆最大挖掘力普查

斗杆最大挖掘力普查是在斗杆挖掘工况中各油缸与工作装置在理想情况下,工作装置能够实现最大挖掘力的一个测试工作,也是衡量挖掘机挖掘能力的重要指标^[8-10]。本研究通过 ADAMS 虚拟样机建立工作装置的刚体运动学模型对液压工作装置进行最大挖掘力普查研究。整个工作装置的液压系统中,斗杆油缸最大的工作压力是 32 MPa,系统自身的卸荷压力值是 40 MPa。

笔者根据液压系统设计,不考虑泄露,计算出斗杆最大推力。铲斗油缸、动臂油缸的内力一旦超过自身的临界值时,液压系统就会出现溢流现象。针对工作装置,笔者主要研究其在特定的姿态下,斗杆能够实现的最大负载。工作装置的模拟仿真试验中,重点地研究挖掘机工作装置沿着地面进行斗杆挖掘的工况。本研究通过阻尼弹簧的数学模型来模拟各个作用点的极

限负载^[11],通过 Adams 驱动函数来控制斗杆的最大挖掘力,工作装置在某一姿态下的负载驱动函数如图 8 所示。笔者通过施加必要的辅助部件来确保挖掘力在动态模拟中始终保持沿挖掘轨迹的切线方向。同时,本研究运用 IF 函数来控制油缸的溢流情况。

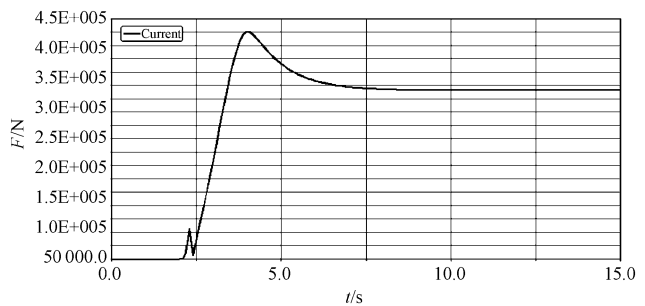
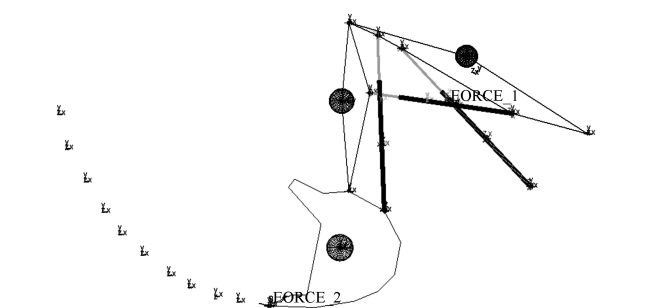


图 8 某一姿态下的负载驱动函数

ADAMS 虚拟样机中,挖掘机沿地面进行斗杆挖掘工况时,动臂油缸的伸长量为 4 643 mm,通过改变斗杆的伸长量控制工作装的挖掘姿态。工作装置的刚体运动学模型图如图 9 所示。本研究将斗杆挖掘工况按动臂油缸的伸长量等分成了 11 个试验点,然后利用控制变量法来研究斗杆油缸的伸长量与其对应的最大挖掘力^[12]。工作装置各个位置的最大挖掘力如表 4 所示。



根据各组仿真数据可知:最危险工况不仅与最大工作负载有关,还与挖掘姿态紧密相关。在动臂油缸保持不动,斗杆油缸不断伸长的工况变化中,工作装置的挖掘能力是不断减小的。由表4、表5可知:动臂上的最大应力值,在开始挖掘的姿态时,达到最大,然后在挖掘能力与挖掘姿态的影响下,先达到最小值,然后增大。斗杆上的最大应力值,在挖掘能力与挖掘姿态的影响下,呈一个不规律的变化状态。同时,动臂与斗杆上的最大应力值不同时出现在一个工况下。因此,只进行工作装置若干个工况下的静力分析研究是不全面的,无法准确定义动臂与斗杆的最大应力值与工作装置的挖掘能力、挖掘姿态三者之间的关系。

4 结束语

本研究基于多学科仿真对大型正铲液压挖掘机进行了动态与静态的结构强度分析,并对比了两种分析的差异性,得出以下研究结果:

(1)采用离散元技术,得到工作装置斗杆挖掘工况中矿石对铲斗的动态挖掘阻力。将动态挖掘阻力作用在工作装置刚柔耦合模型铲斗上,进行了工作装置动态挖掘仿真,得到了动臂与斗杆的动态应力变化情况,为工作装置的结构设计与薄弱位置的改进提供了依据。

(2)采用工作装置刚体模型,普查工作装置各个位置的最大斗杆挖掘力。将工作装置最大挖掘力数据,作用到工作装置刚柔耦合模型,进行了工作装置静态结构应力研究,得到了工作装置各个位置最大挖掘力下的强度的信息。

(3)铲斗动态挖掘阻力,在工作装置的各个位置,均小于最大挖掘能力。但工作装置动态挖掘的最大应力,比静态计算得到的最大应力大10%以上。研究结果表明,仅进行工作装置特定位置的静态结构强度分析,不能全面反映工作装置强度情况。该工作装置的动态仿真研究,为工作装置设计提供了具有实际应用价值的参考。

该研究工作为下一步工作装置的尺寸与结构优化

奠定了有力的基础。

参考文献(References):

- [1] SOLAZZI L. Design of aluminium boom and arm for an excavator[J]. **Journal of Terramechanics**, 2010, 47(4): 201-207.
- [2] PATEL B P, PRAJAPATI J M. A review on kinematics of hydraulic excavator's backhoe attachment[J]. **International Journal of Engineering Science and Technology**, 2011, 3(3): 1990-1997.
- [3] 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.
- [4] 任友良. 液压挖掘机工作装置结构性能分析[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2010.
- [5] BARRIOS G K P, DE CARVALHO R M, KWAD E A, et al. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling[J]. **Powder Technology**, 2013(248): 84-93.
- [6] 《液压挖掘机》编委会. 液压挖掘机[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- [7] 余婉妮. 基于多体动力学的大型正铲液压挖掘机工作装置的动载特性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械学院, 2013.
- [8] 张羽林, 宁晓斌, 王秋成, 等. 大型正铲液压挖掘机工作装置性能的优化仿真[J]. **机电工程**, 2013, 30(3): 329-332.
- [9] 崔洪新, 李 军, 申金星, 等. 液压挖掘机多领域建模与仿真[J]. **兵工自动化**, 2014(4): 18-21.
- [10] 吕晓林, 张永明, 郭世英, 等. 一种矿用液压挖掘机能量再生控制系统设计及仿真分析[J]. **液压气动与密封**, 2014(11): 73-75.
- [11] 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.
- [12] HALL A S, MCAREE P R. A study of the interaction between operator style and machine capability for a hydraulic mining excavator[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, 2005, 219(5): 477-489.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

周 全, 李 光, 吕晓林, 等. 基于多学科仿真的大型正铲液压挖掘机工作装置动态强度研究[J]. **机电工程**, 2015, 32(3): 333-337.

ZHOU Quan, LI Guang, LV Xiao-lin, et al. Dynamic strength of hydraulic excavator attachment based on multidisciplinary simulations[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015, 32(3): 333-337.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>