

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.020

大型正铲液压挖掘机工作装置性能的优化仿真*

张羽林, 宁晓斌*, 王秋成

(浙江工业大学 车辆工程研究所, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对大型正铲液压挖掘机工作装置工作范围和挖掘力的性能优化问题, 首先采用 ADAMS/view 开发了液压挖掘机工作装置的运动学仿真模型, 通过对其进行运动学仿真得出了挖掘包络图与工作范围性能指标, 并通过调整铰接点位置的优化方法对工作范围的性能进行了优化; 然后利用 ADAMS/Hydraulics 开发了正铲液压挖掘机工作装置液压模型, 集成于工作装置运动学模型, 从而建立了工作装置动力学模型, 对其进行了挖掘力性能仿真研究, 通过调整铰接点位置的优化方法对最大挖掘力进行了优化。研究结果表明, 通过采用该仿真优化方法, 提升了工作装置的工作范围与挖掘力的性能, 筛选出的最终优化方案, 将作为研发大型液压挖掘机的设计依据。

关键词: 大型正铲液压挖掘机; 工作装置; 优化仿真; ADAMS/view; ADAMS/Hydraulics

中图分类号: TH122; TH137.51; TU621

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0329-04

Optimization simulation for performance of working device of large face-shovel hydraulic excavator

ZHANG Yu-lin, NING Xiao-bin, WANG Qiu-cheng

(Institute of Vehicle Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of performance optimization for the working range and the digging force of large face-shovel hydraulic excavator work device, kinematics simulation model of hydraulic excavator work device was developed by ADAMS/view firstly, to obtain the digging envelope diagram and the working range performance, through changing hinge point positions to optimize the working range performance. Then dynamics simulation on the work device dynamics simulation model was carried on, which integrated hydraulic model, that developed by ADAMS/Hydraulics, to research the digging force performance and optimize the biggest digging force by changing hinge point positions. The result indicates that this optimization method is an ideal approach to improve the performance of the working range and the digging force for the work device. The final optimization plan will become the design basis of research and development of large-scale hydraulic excavator.

Key words: large face-shovel hydraulic excavators; work device; optimization simulation; ADAMS/view; ADAMS/Hydraulics

0 引 言

大型正铲液压挖掘机的工作装置是由回转机构、动臂、斗杆、铲斗等多个构件组成的串联开链机构, 具有操作方便、运动灵活等优点, 得到越来越广泛的应用^[1]。但实物样机动辄上千万的成本使得大型正铲液压挖掘机的研发极具风险, 困难重重, 因此, 目前开发人员采用对

挖掘机的工作装置进行虚拟样机研究的方法, 能大大降低开发风险, 是大型液压挖掘机研发的首选^[2]。虚拟样机仿真技术能再现各种虚拟环境中挖掘机的真实工作状态, 使设计人员能够方便而快捷地获得系统级的最优设计方案, 避免或减少物理样机试验次数^[3-5]。

本研究采用 MSC.ADAMS 软件建立仿真模型, 以工作装置铰接点位置为设计变量, 工作装置的工作范围

收稿日期: 2012-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51145015)

作者简介: 张羽林(1987-), 男, 浙江海宁人, 主要从事液压挖掘机工作装置优化方面的研究。E-mail: 65351160@qq.com

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

和挖掘力性能为目标函数,对工作装置运动学仿真模型进行运动学仿真以优化工作范围;对工作装置液压模型进行动力学仿真以优化最大挖掘力,最后通过综合优化,挑选工作范围及挖掘力综合性能较好的几组设计方案,作为企业研发大型液压挖掘机的设计依据。

1 工作装置运动学仿真分析

1.1 工作装置运动学模型建立

液压挖掘机工作装置是一个复杂的机械系统,主要结构部件包括动臂、动臂液压缸及其活塞杆、斗杆、斗杆液压缸及其活塞杆、铲斗、铲斗液压缸及其活塞杆等^[6]。工作装置与机身连接点、各个部件之间的铰接连接点为关键点,铰接点的位置决定了工作装置的运动学性能。

本研究由前期研究所获数据建立挖掘机工作装置三维模型,导入 MSC.ADAMS 得到工作装置运动学模型,模型示意图如图1所示。

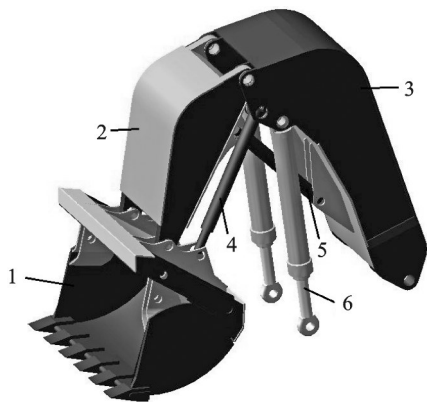


图1 工作装置运动学模型

1—铲斗;2—斗杆;3—动臂;4—铲斗油缸;5—斗杆油缸;6—动臂油缸

1.1.1 工作装置各部件之间的约束与运动驱动

图1所示模型中,9个关键铰接点的约束均设为转动副;动臂油缸、斗杆油缸、铲斗油缸的油缸与活塞杆之间的约束设为圆柱副。

工作装置的驱动是依靠在3个油缸上施加滑移驱动,从而控制各液压缸的伸长量,其驱动值为ADAMS/View提供的阶跃函数STEP函数。油缸的尺寸参数如表1所示。

表1 油缸尺寸参数

	最长/m	最短/m	行程/m
动臂油缸	8.25	4.95	3.3
斗杆油缸	6.3	3.95	2.35
铲斗油缸	6.7	4.25	2.45

1.1.2 工作装置参数化确定

ADAMS/View 提供了4种参数化方法^[7]:①使用参

数表达式;②参数化点坐标;③使用设计变量;④运动参数化。液压挖掘机机构系统模型参数化模型的建立主要采用前3种方法来实现。

为分析工作装置的包络线,本研究将9个铰点的X、Y坐标设为如表2所示的设计变量(共18个变量),分析铰接点位置对工作装置挖掘范围的影响^[8-10]。

表2 设计变量

铰点	变量	铰点含义
1	(DV_1,DV_2)	动臂液压缸与机身的铰点
2	(DV_3,DV_4)	动臂与机身的铰点
3	(DV_5,DV_6)	斗杆液压缸与动臂的铰点
4	(DV_7,DV_8)	动臂液压缸与动臂的铰点
5	(DV_9,DV_10)	铲斗液压缸与动臂的铰点
6	(DV_11,DV_12)	动臂与斗杆的铰点
7	(DV_13,DV_14)	斗杆液压缸与斗杆的铰点
8	(DV_15,DV_16)	斗杆与铲斗的铰点
9	(DV_17,DV_18)	铲斗液压缸与铲斗的铰点

1.2 工作装置工作范围分析

挖掘机工作装置工作范围是工作装置性能最重要的衡量指标,因此研究者需要在方案论证阶段,围绕工作装置工作范围对其进行评价和优化。

液压挖掘机在任意正常位置进行工作时,其铲斗齿尖所能达到的极限范围称为挖掘轨迹包络图,即工作装置的运动包络图。它能够直观地反映工作装置的作业范围和特殊工作尺寸。挖掘机的特殊工作尺寸如图2所示。

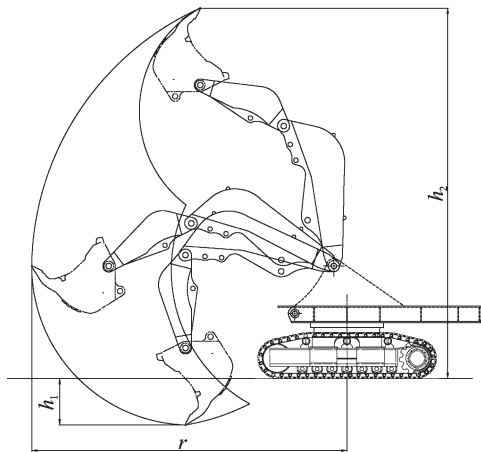


图2 工作装置工作范围特殊尺寸

r —最大挖掘半径; h_1 —最大挖掘深度; h_2 —最大挖掘高度

首先本研究采用DOE方法,考察工作装置每个设计变量的取值范围,确定每个设计变量的变化区间,确保形成的所有虚拟实验方案,工作装置机构无干涉。然后,本研究在ADAMS/Insight实验设计模块中按照蒙特卡罗方法,确定各设计变量的取值区间,对18个设计变量的取值进行排列组合,生成5 120组不

同的工作装置铰接点方案,目标函数为最大挖掘半径、最大挖掘深度、最大挖掘高度,对模型逐一仿真求解,得出各组方案的设计目标。本研究从结果中筛选出工作范围最大的一组方案作为最优方案,其工作范围包络线如图3所示。

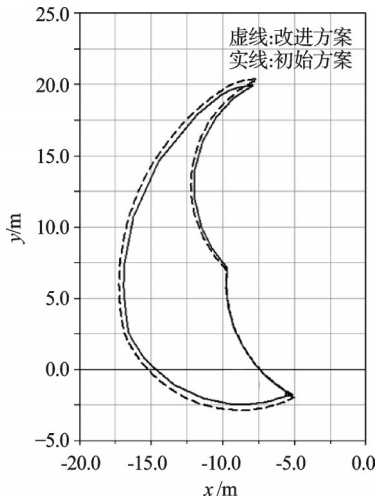


图3 最优与原始包络线对比

挖掘机设计铲斗斗容为32 m³,现将工作范围指标数据与国外同量级产品RH 340-B(铲斗斗容为34 m³)进行对比,如表3所示。

表3 工作范围指标对比

	RH 340-B	最优方案	原始方案
最大挖掘半径/m	16.4	17.2	16.9
最大挖掘高度/m	15.5	20.3	19.9
最大挖掘深度/m	2.7	2.9	2.5

对比结果表明,最优工作装置与国外产品的工作范围特殊尺寸基本吻合甚至相对更大,达到了工作装置工作范围的优化目标。

2 工作装置动力学仿真分析

工作范围和挖掘力是决定挖掘机工作装置性能最重要的两个指标。仅通过工作装置工作范围运动学仿真分析,无法对工作装置挖掘力进行分析计算,因此笔者需要通过动力学分析来研究工作装置挖掘力性能^[11]。

2.1 机械-液压耦合仿真模型的建立

挖掘机工作装置机械系统中主动力是由液压系统通过油缸作用在工作装置上。工作装置主动力引用液压系统中的液压力,同时液压系统的压力和流量则和机械系统的速度、位移等动力学参数有关,所以在仿真模型中,本研究需要把机械系统和液压系统集成,将上述相关的状态参数相互传递、引用,产生类似实际工作装置中两个系统间的有机关联。液压系统采用液压模块ADAMS/Hydraulics建立,其能够提供建

立工作装置液压系统所需的各种元件。本研究采用ADAMS/Hydraulics建立的工作装置液压系统模型如图4所示。

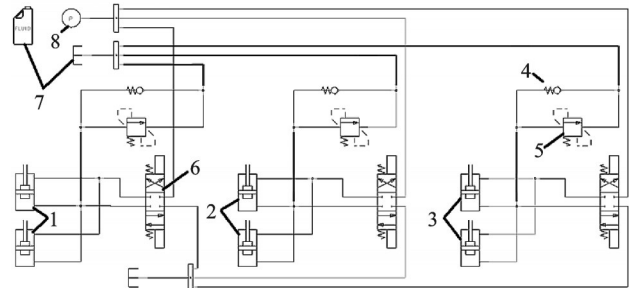


图4 液压仿真模型

1—动臂油缸;2—斗杆油缸;3—铲斗油缸;4—单向阀;5—溢流阀;6—方向控制阀;7—液压油;8—油泵

2.2 仿真模型参数敏感性分析

参数敏感性分析主要是针对单个变量的变化对目标函数影响的研究,在研究同一个目标函数时,分别针对每个设计变量进行研究,可以筛选出对该目标函数影响较大的一些设计变量。这种影响程度用敏感度“Sensitivity”表示,它是设计分析中相邻两次分析的目标函数值相对设计变量值斜率的平均值,公式为:

$$S_n = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{n+1} - Q_n}{V_{n+1} - V_n} + \frac{Q_n - Q_{n-1}}{V_n - V_{n-1}} \right) \tag{1}$$

式中:Q_n—第n次分析时的目标函数值;V_n—第n次分析时的设计变量值;S_n—各设计变量对最大挖掘力的敏感度,通过比较敏感度图的斜率即可得知敏感度的大小。

本研究确定输入参数为工作装置9个铰接点的坐标,目标函数为最大挖掘力,建立参数敏感性分析模型。利用参数敏感分析模型进行输入参数的敏感性分析,剔除对结果影响不显著的输入参数,使得优化分析仅针对其扰动对结果影响显著的输入参数进行,从而大大降低优化分析的复杂度和工作量。DV_1、DV_3、DV_6的敏感度分析数据如表4~6所示。

表4 DV_1敏感度分析

	最大挖掘力/kN	DV_1/m	敏感度
1	2 493	-0.80	11 040
2	2 494	-0.70	-88.867
3	2 493	-0.60	-11 218

表5 DV_3敏感度分析

	最大挖掘力/kN	DV_1/m	敏感度
1	2 417	-3.58	683 290
2	2 440	-3.55	744 410
3	2 467	-3.51	725 090
4	2 489	-3.48	644 650

表6 DV_6敏感度分析

	最大挖掘力/kN	DV_1/m	敏感度
1	2 451	3.40	-22 655
2	2 450	3.45	-261 060
3	2 425	3.50	-20 916
4	2 447	3.55	13 431
5	2 426	3.60	-430 770

由三者对比可见,DV_1对目标函数的敏感度相对其他变量小了一个数量级,选择剔除;DV_3对目标函数的敏感度相对较大,而DV_6不同的取值对目标函数的影响是波动的,非线性的,因此DV_3、DV_6可作为设计变量。

2.3 工作装置最大挖掘力的寻优

本研究通过敏感性分析结果确定DV_3,DV_6,DV_9、DV_18(单位:m)为工作装置设计变量,其他设计参数不做改变,以最大挖掘力(单位:kN)作为目标,在ADAMS/Insight实验设计模块中,生成108组工作装置铰接点方案,进行实验设计研究,各组设计方案挖掘力对比如表7所示,最后一组为原设计方案。

表7 多组方案最大挖掘力对比

	DV_3/m	DV_6/m	DV_9/m ~ DV_18/m	挖掘力/kN	
1	-3.48	3.6	-7.27	3.4	2 725
2	-3.48	3.4	-7.27	3.3	2 704
3	-3.48	3.4	-7.27	3.4	2 698
4	-3.58	3.4	-7.27	3.3	2 658
5	-3.58	3.4	-7.27	3.4	2 654
...	...	...	...	...	...
108	-3.48	3.6	-7.47	3.4	1 966
原始	-3.53	3.5	-7.36	3.3	2 540

3 工作装置设计方案的优化

设计方案的最终优化需要综合考虑工作范围及挖掘力性能,本研究取表7中前5组方案进行运动学仿真,得出工作范围性能指标,数据如表8所示。

表8 挖掘机工作装置的工作范围与挖掘力比较

方案	最大挖掘半径/m	最大挖掘高度/m	最大挖掘深度/m	挖掘力/kN
1	16.8	19.9	2.4	2 725
2	16.6	18.8	2.6	2 704
3	16.9	19.4	2.7	2 698
4	16.5	18.7	2.6	2 658
5	16.9	19.5	2.6	2 654
原始	16.9	19.9	2.5	2 540

通过以上分析可知,工作装置工作范围与挖掘力性能多个目标之间相互存在制约,研究者需要综合考

虑挖掘机工作装置的工作范围与挖掘力。笔者选定几组数据供企业参考,其中一组数据如表9所示。

表9 挖掘最大模型与RH 340-B的工作范围指标对比

	设计方案	RH 340-B
最大挖掘半径/m	16.8	16.4
最大挖掘高度/m	19.9	15.5
最大挖掘深度/m	2.4	2.7
挖掘力/kN	2 725	2 240

4 结束语

为优化液压挖掘机工作装置的工作范围和挖掘力性能,本研究开发了液压挖掘机运动学仿真模型,并通过进行运动学仿真得到了最大工作范围;通过对工作装置液压模型进行动力学仿真得到最大挖掘力,通过最终优化,得到了工作范围及挖掘力综合性能最好的几组设计方案,其性能指标数据已可达到甚至超越国外同量级产品。通过设计方案综合比对发现,工作装置工作范围与挖掘力性能的多个目标存在相互制约,研究者需要综合考虑挖掘机工作装置的工作范围与挖掘力,并可以提供几组设计方案作为企业研发大型液压挖掘机的设计依据。

参考文献(References):

- [1] 白玉琳,陈进,李世六,等.大型正铲液压挖掘机工作装置虚拟样机研究[J].建筑机械,2008(13):81-84.
- [2] 王桂新,杨彦龙.基于ADAMS的液压挖掘机工作装置的仿真分析[J].河北工业大学学报,2008,37(3):59-63.
- [3] ZWEIRI Y H. A generalized newton method for identification of closed-chain excavator arm parameters[J]. **Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation**,2003(1):103-108.
- [4] 祖旭,黄洪钟,张旭.虚拟样机技术及其发展[J].农业机械学报,2004,20(2):168-171.
- [5] 宁晓斌,孟彬,王磊,等.装载机虚拟样机技术应用、现状及展望[J].有色金属,2006,58(2):96-99.
- [6] 张林艳,邓子龙,张红亮,等.挖掘机工作装置虚拟样机的建立与动力学仿真[J].辽宁石油化工大学学报,2008,28(3):46-49.
- [7] 石博强,申焱华,宁晓斌,等. ADAMS基础与工程范例教程[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [8] 郭晓宁.基于ADAMS的液压挖掘机机械系统参数化模型[J].中国工程机械学报,2008,6(4):433-437.
- [9] HALL A S,MCAREE P R. Robust bucket position tracking for a large hydraulic excavator [J]: **Mechanism and Machine Theory**,2005,40(1):1-16.
- [10] 任锦江,管会生,刘泽鑫.基于ADAMS和ANSYS的挖装机工作装置仿真分析[J].机械,2011,38(11):1-4.
- [11] 林慕义,史青录.单斗液压挖掘机构造与设计[M].北京:冶金工业出版社,2011.

[编辑:李辉]