

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.007

基于虚拟样机的液压挖掘机 工作装置最大挖掘力分析^{*}

张永明¹, 余翊妮², 宁晓斌²

(1. 太原重型机械集团 技术中心, 山西 太原 030024; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对液压挖掘机工作装置挖掘力的分析计算与优化问题,对工作装置在斗杆挖掘工况下的最大挖掘力及工作装置关键铰接点空间位置对其最大挖掘力的影响进行了研究,提出了采用机械系统与液压系统联合仿真的方法,建立了某液压挖掘机工作装置的虚拟样机模型,分析斗杆油缸以系统最大压力工作,铲斗油缸、动臂油缸闭锁时,在整个挖掘范围内,工作装置的挖掘力图谱,并确定了最大斗杆挖掘力。在此基础上,以最大斗杆挖掘力为设计目标,通过试验设计方法,研究了工作装置机构铰接点空间位置对斗杆挖掘工况下最大挖掘力的影响。研究表明,液压挖掘机最大挖掘力达到国外同类产品水平,同时找出了铲斗最大挖掘力位置及数值,为工作装置优化设计和结构强度分析提供了有效依据。

关键词:工作装置;液压挖掘机;挖掘力;试验设计

中图分类号:TH122;TD42

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1132-04

Analysis for max arm crowd force of hydraulic excavator attachments based on mechanism-hydraulics coupling system

ZHANG Yong-ming¹, SHE Yin-ing², NING Xiao-bin²

(1. Taiyuan Heavy Industry Co, Ltd., Taiyuan 030024, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of the analysis and optimization on the hydraulic excavator attachments' digging force, the research about the relationship of the key hinge points' location and the largest digging force was put forward. A co-simulation method of the dynamics of mechanical systems and hydraulic systems was introduced to establish the attachments virtual prototype model. On the condition of that the bucket and boom cylinder were locked and the stick cylinder pressure was closed to the largest system pressure, the digging force diagram within the working range was analyzed and the maximum stick digging force was also concluded. On this basis, the maximum digging force was selected to the design goal, through experimental design and Monte Carlo methods, the influence of the key hinge points' spatial location to the maximum stick digging force were studied. The results indicate that the hydraulic excavator digging force is close to similar foreign products, and at the same time, the location and value of the stick digging force are find out which provide a valid basis for the optimization design and structural strength analysis of attachments.

Key words: attachments; hydraulic excavator; digging force; experiment design

0 引 言

在液压挖掘机设计过程中,挖掘机工作范围和最大挖掘力是反映挖掘机作业性能的主要参数,是设计师关注的最重要的性能参数^[1]。液压挖掘机最大挖掘力与液压系统压力、工作装置结构、整机附着条件等

因素相关,对它的分析和计算十分复杂^[2]。传统的分析方法,是根据经验选择工作装置的工况和姿态,用解析法进行普查计算^[3]。传统方法进行了工作装置有限位置和姿态的计算,不能准确确定最大挖掘力工况和姿态,难以全面了解挖掘机的受力状况。

本研究针对大型正铲液压挖掘机的研发,利用多体

收稿日期:2014-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375452)

作者简介:张永明(1980-),男,山西太原人,高级工程师,主要从事大型挖掘机的开发方面的研究。E-mail:frankyming@126.com

动力学仿真方法,建立液压挖掘机工作装置机械-液压联合仿真的虚拟样机模型,仿真分析铲斗处的最大挖掘力,为研究分析挖掘机的工作性能、工作装置关键铰接点的受力情况和结构强度提供依据;通过试验设计分析研究正铲工作装置关键铰接点空间位置的改变对整机最大挖掘力的影响,为工作装置的优化设计提供依据。

1 挖掘机工作装置虚拟样机模型

液压挖掘机工作装置主要由动臂、斗杆、铲斗,以及控制动臂、斗杆、铲斗动作的油缸组成。本研究在某正铲液压挖掘机设计过程中,建立了工作装置机械-液压耦合仿真模型,包括工作装置机构的机械模型、驱动工作装置运动的液压系统模型、机械模型和液压模型之间的作用力相互引用。

本研究采用三维绘图 UG 软件建立该型号正铲工作装置的三维实体模型,然后导入 ADAMS 中,模型如

图 1 所示。在 ADAMS 中,对挖掘机工作装置的各个零部件定义约束关系,如动臂、斗杆、铲斗之间接点处的约束设为转动副^[4-5]。动臂液压缸变化行程为 5 m~8.2 m,斗杆液压缸变化行程为 4 m~6.3 m,铲斗液压缸变化行程为 5 m~6.8 m,液压挖掘机工作装置的 9 个关键铰接点空间位置坐标如表 1 所示。

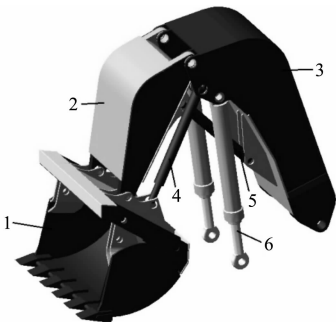


图 1 工作装置的 ADAMS 运动学模型

1—铲斗;2—斗杆;3—动臂;4—铲斗油缸;5—斗杆油缸;6—动臂油缸

表 1 工作装置 9 个关键铰接点空间位置坐标

	DV_1	DV_2	DV_3	DV_4	DV_5	DV_6	DV_7	DV_8	DV_9
初始值	-0.70	6.05	-3.48	6.30	-2.80	3.50	-6.51	7.70	-7.30
	DV_10	DV_11	DV_12	DV_13	DV_14	DV_15	DV_16	DV_17	DV_18
初始值	7.91	-8.40	8.36	-7.46	6.65	-5.40	3.30	-6.90	3.50

本研究采用 ADAMS/Hydraulics 模块建立的挖掘机工作装置液压系统模型如图 2 所示,将动臂、铲斗和斗杆油缸的驱动方式设为液压驱动来实现正铲工作装置机械系统与液压系统的相互关联。

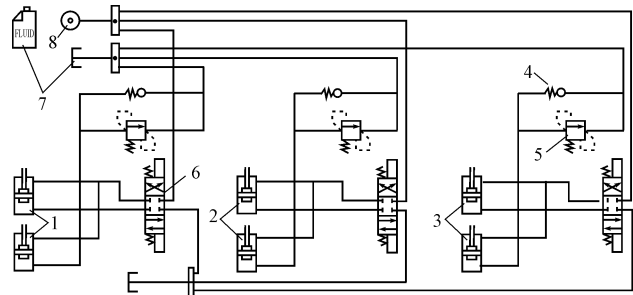


图 2 正铲工作装置液压系统模型

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

挖掘机工作装置液压系统最大工作压力为 32 MPa,液压缸闭锁压力为 40 MPa。液压系统采用控制各个方向控制阀开闭时间的方法,实现对各液压缸的压力控制^[6]。

2 整机理论挖掘力的仿真分析

在挖掘机进行挖掘作业时,铲斗对物料的作用力称为挖掘力,物料对铲斗的反作用力称为挖掘阻力。挖掘机在矿山工作时,在主要挖掘区域内,挖掘力分布是否合理,是否能够以较大的挖掘力进行挖掘,是挖掘机工作装置设计需要重点考虑的问题。

最大斗杆挖掘力(crowd force)与最大铲斗挖掘力(break force)是挖掘机产品目录上明确列出的挖掘机主要性能。斗杆挖掘力,是指以斗杆油缸挖掘为主,即斗杆油缸作为工作油缸,铲斗油缸和动臂油缸作为闭锁。铲斗挖掘力是以铲斗油缸作为工作油缸,其他油缸作为闭锁油缸所决定的挖掘力。由于铲斗挖掘方式主要是为了撬动物料、调整切削角及装载和卸料,不是挖掘机的主要挖掘方式,且仿真分析方法与斗杆挖掘力的仿真方法基本一致,受限于篇幅,本研究重点研究斗杆挖掘力,仿真分析挖掘机整个工作范围内,在铲斗斗齿一系列位置点上所能产生的斗杆最大挖掘力。

斗杆油缸工作,其他二个油缸闭锁。在挖掘轨迹某个位置,受到挖掘阻力的限制,挖掘阻力大到一定数值时,铲斗或动臂油缸压力达到闭锁压力,或斗杆油缸达到最大工作压力,这时可以得出工作装置在这个位置的斗杆油缸挖掘的最大挖掘力^[7]。本研究对液压挖掘机工作装置的工作范围内各个位置,进行斗杆油缸最大挖掘力普查,最后将这些斗杆油缸最大挖掘力所对应的铲斗斗尖位置在挖掘范围图中标出,斗杆挖掘工况挖掘图如图 3 所示。同时在图 3 中给出最大、最小挖掘力位置点的工作装置姿态以及影响该点最大挖掘力发挥的因素。

影响斗杆最大挖掘力发挥的因素用以下序号表

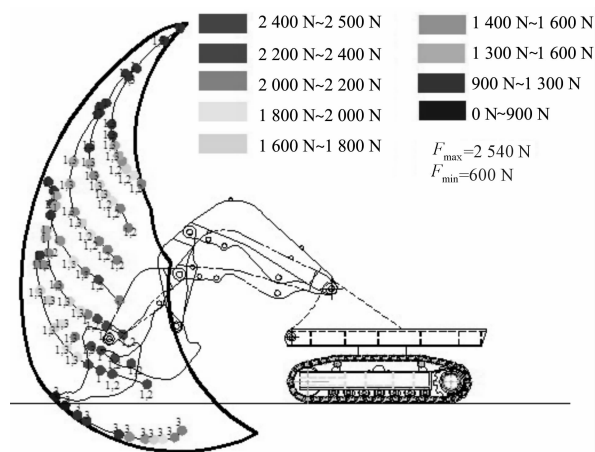


图 3 斗杆挖掘工况挖掘图

示。序号 1:斗杆油缸的工作能力;序号 2:铲斗油缸的闭锁能力;序号 3:动臂油缸的闭锁能力。对应每组动臂油缸伸长量 λ_2 变化,斗杆伸长量 λ_3 、铲斗伸长量 λ_4 、斗杆转角 θ_3 、铲斗转角 θ_4 和斗杆最大最小挖掘力的极值可参如表 1 所示。

表 2 斗杆挖掘工况每组动臂油缸伸长量与相关参数

组号	1	2	3	4	5	6	7	8
λ_2/m	5.00	5.63	5.95	6.32	6.90	7.30	7.80	8.20
$\lambda_{3\min}/\text{m}$	4.05	3.99	4.09	4.07	4.05	4.11	4.06	4.08
$\lambda_{3\max}/\text{m}$	6.20	6.16	6.11	6.17	6.04	6.17	6.14	6.207
$\lambda_{4\min}/\text{m}$	5.02	5.50	5.55	5.57	5.57	5.73	5.55	5.68
$\lambda_{4\max}/\text{m}$	5.20	6.70	6.70	6.67	5.99	6.68	6.77	6.67
$\theta_{3\min}/(^{\circ})$	60.1	58.1	61.4	61	60.2	62.3	60.4	61.0
$\theta_{3\max}/(^{\circ})$	131.7	130.1	128.3	130.4	125.6	130.3	129.3	132
$\theta_{4\min}/(^{\circ})$	127	110	111	109	108	107	110	102
$\theta_{4\max}/(^{\circ})$	184	130	128	129	142	115	114	115
$F_{w\max}/\text{kN}$	2 117	2 488	2 540	2 350	2 283	2 160	2 060	2 020
$F_{w\min}/\text{kN}$	600	1 190	1 260	1 060	925	1 060	1 100	1 035

从图 3、表 2 可知,该正铲工作装置的最大斗杆挖掘力为 2 540 kN,主要受限于斗杆油缸 32 MPa 的最大工作压力,此时工作装置的动臂、铲斗和斗杆油缸行程分别为 5.95 m、5.61 m 和 4.54 m,图 3 中挖掘机工作装置实线轮廓所示位姿。

该产品针对的是 11 m ~ 12 m 高度的矿山作业面。以上分析计算可以看出,该挖掘机在挖掘地面以上物料时,铲斗转角变化不大,基本在 100° ~ 130° 之间变化,在挖掘机的常用挖掘作业区域,斗杆油缸挖掘力大于 2 000 kN,该款挖掘机最大斗杆油缸挖掘力的分布区间比较合理。同时在斗杆挖掘力的仿真研究中也发现,斗杆油缸最大挖掘力总是在初始开挖阶段较大,随着铲斗插入、切削物料,斗杆油缸最大挖掘力会受限于斗杆液压缸最大工作压力或铲斗油缸的闭锁压力,而后随着铲斗挖掘过程结束,挖掘力逐渐变小,此时斗杆最大挖掘力受限于动臂油缸的闭锁压力。

该液压挖掘机工作装置斗杆最小挖掘力为 600 kN,

其动臂、铲斗和斗杆油缸行程分别 5 m、5.02 m 和 6.2 m。在动臂油缸行程为 5.0 m 时,斗杆油缸从最短行程伸至最长行程的挖掘轨迹均在地平线以下。进行地下挖掘时,斗杆挖掘力较小,平均位于 1 000 kN 左右,最大值为 2 117 kN。液压正铲挖掘机在矿山作业时,基本不进行地平线以下挖掘。

对比同类型产品 EX8000 挖掘机,其斗杆最大挖掘力为 2 800 kN。而该型号的正铲液压挖掘机斗杆最大挖掘力 2 540 kN,说明该工作装置的斗杆最大挖掘力需要进一步提高。挖掘机工作装置铰接点空间位置,是影响斗杆挖掘力最主要的因素,因此,以下将分析研究工作装置关键铰接点位置对斗杆挖掘力的影响,优化空间铰接点位置,提高正铲工作装置的斗杆最大挖掘力。

3 挖掘力的试验设计

3.1 参数化模型

本研究进行工作装置的参数化建模,将参数值设置为变量。在分析过程中,改变样机模型中有关数值,可以形成多个工作装置样机模型。为此,笔者采用参数化点坐标的方式,将正铲挖掘机工作装置 9 个关键铰接点的 X、Y 坐标定义成 18 个设计变量,正铲工作装置的参数化模型如图 4 所示。

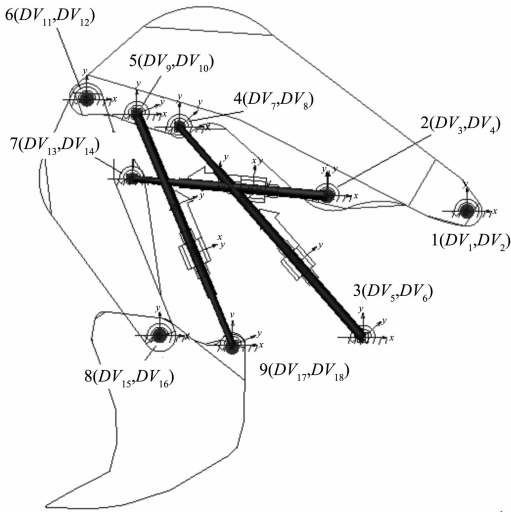


图 4 正铲工作装置的参数化模型

3.2 设计研究

笔者逐一分析上述设计变量对正铲工作装置斗杆最大挖掘力的影响,通过上述研究找出对斗杆最大挖掘力敏感的设计变量。斗杆最大挖掘力对设计变量的敏感度如表 3 所示。剔除对结果影响不显著的变量 DV_1 、 DV_2 、 DV_4 、 DV_5 、 DV_7 、 DV_8 ,使得试验设计分析仅针对结果影响显著的变量进行,从而降低试验设计分析的复杂度和工作量。

表3 变量初始值的敏感度

设计变量	敏感度	设计变量	敏感度
DV_1	-0.000 088 867	DV_{10}	-0.10 727
DV_2	-0.6 132	DV_{11}	-0.16 131
DV_3	0.74 441	DV_{12}	0.78 903
DV_4	0.036 171	DV_{13}	-0.44 275
DV_5	-0.0 079 688	DV_{14}	-0.13 222
DV_6	-0.020 916	DV_{15}	0.81 188
DV_7	-0.024 155	DV_{16}	0.36 226
DV_8	0.026 737	DV_{17}	-0.12 676
DV_9	0.74 253	DV_{18}	-0.52 828

工作装置的关键铰接点空间位置变化太大,会造成某些工作装置机构设计方案在运动过程中出现运动死点,通过多次仿真分析,将设计变量的取值范围定义在原设计值±0.1 mm 范围内变动,如表4所示。

表4 设计变量取值范围(单位:mm)

	DV_3	DV_6	DV_9	DV_{10}	DV_{11}	DV_{12}
最大值	-3.44	3.6	-7.28	8.10	-8.30	8.39
最小值	-3.6	3.4	-7.44	7.94	-8.44	8.23
	DV_{13}	DV_{14}	DV_{15}	DV_{16}	DV_{17}	DV_{18}
最大值	-7.38	6.79	-5.32	3.45	-6.80	3.63
最小值	-7.54	6.63	-5.52	3.25	-7.00	3.43

3.3 试验设计分析

本研究针对设计研究中确定的12个设计变量,研究其变化时对斗杆最大挖掘力的影响。为减少试验次数,同时尽可能涵盖整个取值区间,采用蒙特卡罗方法来进行试验规划^[8,9]。考虑到工作装置铰接点的设计方案应尽可能在原有设计方案上进行调整,本研究选用正态分布的方法进行数据抽样,得出了108组工作装置关键铰接点的设计布置方案,并逐一仿真计算这些铰接点设计方案在对应动臂、铲斗和斗杆油缸行程分别为5.95 m、5.61 m和4.54 m的位姿下(该位姿时斗杆挖掘力最大)的斗杆挖掘力,计算数值按降序排列,最后一组为原设计方案,多组方案最大挖掘力对比如表5所示。

表5 多组方案最大挖掘力对比

方案	最大挖掘力/kN	方案	最大挖掘力/kN
1	2 780	7	2 653
2	2 760	8	2 653
3	2 753	9	2 649
4	2 712	...	...
5	2 709	108	2 268
6	2 682	初始	2 540

研究表明,108组铰接点设计方案中,有20多组数据的斗杆最大挖掘力超过了原设计方案,有几

组数据的最大挖掘力接近EX8000挖掘机的2 800 kN。由此说明,不考虑挖掘机倾覆等因素,仅通过对正铲工作装置关键铰接点空间位置的优化,可提高正铲挖掘机的斗杆最大挖掘力,改善挖掘机的挖掘性能。

4 结束语

通过对正铲液压挖掘机工作装置斗杆挖掘力的仿真研究及斗杆最大挖掘力的参数化优化设计,本研究得出对新产品开发具有价值的结论如下:

(1)利用工作装置机械-液压联合仿真模型,可普查分析挖掘机工作装置的最大挖掘力,为工作装置机构设计提供设计依据,判定挖掘机的常用挖掘区域挖掘力分布是否合理。

(2)通过最大挖掘力普查,可确定工作装置最大挖掘力的位置和姿态。并可在此基础上,对工作装置机构参数,进行最大挖掘力敏感性分析。通过工作装置机构参数优化,重新设计工作装置,提高工作装置的最大挖掘力。

斗杆最大挖掘力对挖掘机造成的力矩如果大于整机倾覆力矩,则增加挖掘机配重。本研究采用的大型液压挖掘机数字化设计方法对挖掘机设计具有工程应用价值。

参考文献(References):

[1] 史青录,连晋毅,林慕义. 挖掘机最大理论挖掘力的确定[J]. 太原科技大学学报,2007,28(1):32-36.

[2] HALL A S, MCAREE P R. A study of the interaction between operator style and machine capability for a hydraulic mining excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering Science,2005,219(1):477-489.

[3] 同济大学. 单斗液压挖掘机[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986.

[4] 张羽林,宁晓斌,王秋成. 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.

[5] 杨帆,吴小平. 液压挖掘机工作装置有限元静强度分析[J]. 机械,2013(4):63-65,84.

[6] 陈露丰. 挖掘机工作装置液压系统挖掘力与结构多柔体动力学研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2013.

[7] 余翊妮. 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:浙江工业大学机械工程学院,2013.

[8] 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.

[9] 刘静,潘双夏,冯培恩. 基于ADAMS的挖掘机液压系统仿真技术[J]. 农业机械学报,2005,36(10):109-112.

[编辑:张豪]

本文引用格式: