

大型矿用正铲液压挖掘机水平推压特性联合仿真*

朱小晶¹ 权 龙¹ 王新中² 吕晓林² 李 光²

(1. 太原理工大学机械电子工程研究所, 太原 030024; 2. 太原重工股份有限公司技术中心, 太原 030024)

【摘要】 在设计目前国内最大(斗容量为 15 m³, 质量 260 t)的正铲挖掘机中, 提出采用泵阀复合流量匹配的电液比例控制方法实现水平推压。通过计算机协调的比值关系确定平推中供给各液压缸的流量, 采用 ADAMS 和 AMESim 软件, 对设计的矿用挖掘机水平推压过程进行机械系统动力学与液压系统的联合仿真研究。在小型挖掘机上对斗杆挖掘过程各个液压缸的位移、速度和压力进行测试试验验证, 结果表明联合仿真研究能够较准确地模拟挖掘机的真实工作环境。

关键词: 正铲挖掘机 水平推压 特性 联合仿真

中图分类号: TH137.9; TD422.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0030-05

Co-simulation of Flat-pushing Characteristics of Large Mining Face-shovel Hydraulic Excavator

Zhu Xiaojing¹ Quan Long¹ Wang Xinzhong² Lü Xiaolin² Li Guang²

(1. Institute of Mechatronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. Technology Center, Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract

The method of electro-hydraulic proportional controlling means matched by pump valve compound flow rate was proposed to achieve flat-pushing while designing the national largest face-shovel hydraulic excavator with the bucket capacity of 15 m³ and machine weigh of 260 t. The ratio of hydraulic cylinders' flow rate was ascertained by computer coordinate control during the flat-pushing process, the co-simulation research of dynamics of mechanical systems and hydraulic system in developing mining excavators' flat-pushing process was carried out by using the software of ADAMS and AMESim. The displacement, velocity and pressure of arm mining process in various hydraulic cylinder on the small excavator were validated by the experiment. It is confirmed that co-simulation research methods can accurately simulate the practical working environment of excavator.

Key words Face-shovel excavator, Flat-pushing, Characteristics, Co-simulation

引言

目前国内斗容量大于 12 m³ 的大吨位液压挖掘机装备还处于空白, 所用机型完全依赖进口^[1]。本文设计研究斗容量 15 m³、质量 260 t 的大型矿用正铲液压挖掘机。

为了获得最大装载能力, 大型挖掘机大部分采

用正铲斗^[2~3]。正铲液压挖掘机一个主要工况是水平推压, 这一过程要通过动臂油缸、斗杆油缸和铲斗油缸配合进行, 使斗杆液压缸从全缩位置到全伸位置, 在停机水平面上作一定距离的水平挖掘, 在此过程中要求铲斗的切削角度保持不变^[4~6]。实现水平推压, 可以从机构和控制两方面着手, 为了既不影响机器的整体结构, 又不增加工作人员的劳动强度, 本

收稿日期: 2010-06-13 修回日期: 2010-07-26
* 国家自然科学基金资助项目(50775156)和山西省科技攻关资助项目(20100321025)
作者简介: 朱小晶, 硕士生, 主要从事工程机械电液控制技术及机械系统动力学分析研究, E-mail: zhuxiaojing022@163.com
通讯作者: 权龙, 教授, 博士生导师, 主要从事电液伺服技术及生产过程智能控制研究, E-mail: quanlong@tyut.edu.cn

文提出采用泵阀复合流量匹配和计算机控制的方法,通过手柄操作以自动联合动作实现机器水平推压作业。为了确定平推作业参数,对挖掘机平推工作过程进行多体动力学和液压系统的联合仿真。

1 联合仿真原理

联合仿真原理如图 1 所示,AMESim 液压模型将测得的液压缸的速度作为动力驱动输入到 ADAMS 动力学模型中;ADAMS 动力学模型将负载力及惯性变化转换为作用在液压缸每个铰点的力,进而输入到 AMESim 液压系统模型中。在仿真过程中,两种仿真软件通过接口程序实时数据交换。

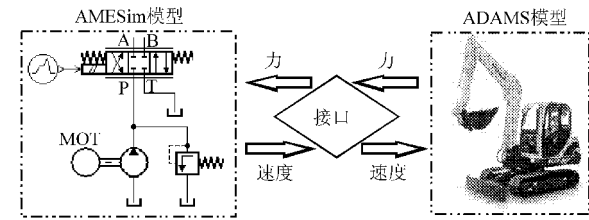


图 1 联合仿真原理
Fig.1 Schematic of co-simulation

2 联合仿真结果的试验验证

在 YC60-7 型小型挖掘机上进行挖掘试验,对联合仿真结果进行准确度验证。首先保证模型初始状态和实际试验一致,仿真时通过输入 0~40 mA 的电流信号来控制阀芯位移,并通过仿真延迟来实现实际中的动态操作,然后在 ADAMS 中施加模拟负载力,通过 ADAMS 和 AMESim 联合仿真的方法研究其结果与实际试验的符合程度。通过对比可知,采用联合仿真的手段对挖掘机进行研究能够反映实际工作过程各状态量的变化情况,其结果是可信的。

3 动力学仿真模型

矿用正铲液压挖掘机由动臂、斗杆、铲斗、动臂液压缸、斗杆液压缸、铲斗液压缸、开斗液压缸、回转机构、底盘等构件组成^[7~9]。利用 Pro/E 软件对其工作装置进行三维实体建模及虚拟装配。装配好的正铲液压挖掘机三维模型如图 2 所示。

挖掘机三维装配模型建好后,利用 MSC 公司开发的连接 Pro/E 和 ADAMS 的接口模块 MECH/Pro,将整机装配模型导入到动力学仿真软件 ADAMS 中。由于不研究回转及行走机构,因此将平台及底盘作为一个构件导入 ADAMS 中^[10~14]。结合实际对挖掘机各零件添加相应的约束、驱动和负载力,并经过模型效验,机构的自由度为零,没有冗余约束,表明建立的模型正确,建立的挖掘机 ADAMS 动力

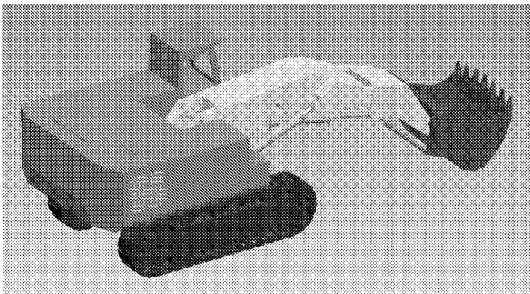


图 2 正铲液压挖掘机三维装配模型
Fig.2 3-D model of face-shovel hydraulic excavator
学模型如图 3 所示。

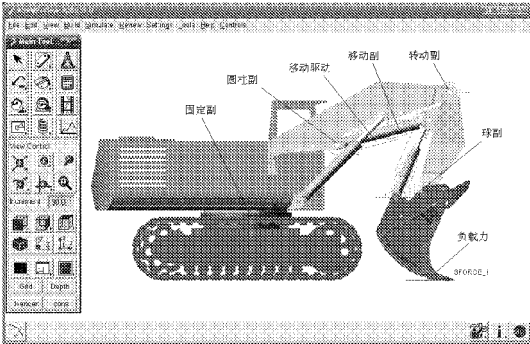


图 3 正铲液压挖掘机 ADAMS 模型
Fig.3 ADAMS model of face-shovel hydraulic excavator

4 水平推压力分析与负载模拟

4.1 水平推压力

正铲工作装置在作业中由斗杆液压缸动作,在不计效率、背压、自重及土壤中的条件下,铲斗斗齿尖运动轨迹切线方向产生的最大水平推压力 F_a ,如图 4 所示。

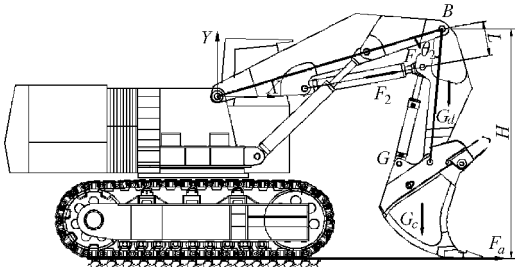


图 4 平推挖掘力分析
Fig.4 Analysis of flat-pushing excavate force

视斗杆液压缸和铲斗液压缸为均质等值杆,则各缸两铰点均受 1/2 重力。

取斗杆、铲斗为研究对象,对 B 点取矩得
$$F_2L - F_aH - G_d(X_d - X_B) - G_c(X_c - X_B) - \frac{G_3}{2}(X_c - X_B) - \frac{G_3 + G_2}{2}(X_F - X_B) = 0 \quad (1)$$

其中 $F_2 = p_2 A_2 n$
式中 F_2 ——斗杆液压缸的理论最大工作推力
 p_2 ——斗杆液压缸液压系统工作压力,取

32 MPa

- A_2 ——斗杆液压缸大腔工作面积
- n ——斗杆液压缸数(双缸 $n=2$)
- L —— B 点到斗杆液压缸中心线的力臂
- H —— B 点到地面的垂直距离
- $G_2、G_3$ ——斗杆液压缸、铲斗液压缸重
- $G_d、G_c$ ——斗杆、铲斗重
- X_k —— k 点横坐标($k=d、c、B、F、G$), 其中 $d、c$ 表示斗杆、铲斗的重心点

设

$$M = G_d(X_d - X_B) + G_c(X_c - X_B) + \frac{G_3}{2} \cdot (X_G - X_B) + \frac{G_2 + G_2}{2} (X_F - X_B)$$

则

$$F_a = \frac{F_2 L - M}{H} \tag{2}$$

4.2 挖掘负载的仿真模拟

在 ADAMS 模型铲斗中心齿尖处施加负载力 F_m , 利用 STEP 阶跃函数定义 F_m 进行模拟。因正铲挖掘机在水平推压过程中负载力是随着平推挖掘的进行而逐渐增大, 且为水平方向, 因此 STEP 函数定义 F_m 为: STEP(time, 0, 0, 12, 300 000), 仿真的负载模拟结果如图 5 所示。

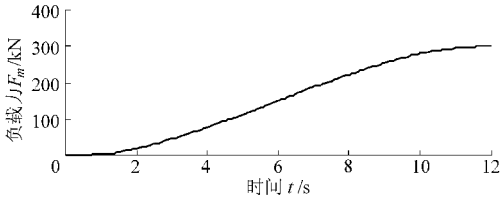


图 5 负载模拟曲线
Fig.5 Load simulation curve

5 联合仿真

通过定义输入、输出状态变量生成 ADAMS 和 AMESim 两软件之间的接口, 然后打开 AMESim 中的系统模型, 加载已生成的接口, 建立联合仿真模块如图 6 中的 14, 将模块与液压控制系统连接, 即可开始联合仿真, 整个联合仿真模型如图 6 所示。

图 7 是整个水平推压工作循环过程, 图 8 是联合仿真所得到的挖掘机水平推压过程的齿尖挖掘轨迹, 由图 7、8 可以看出该正铲液压挖掘机实现了水平推压作业。

由仿真可得式(2)中的 $L、H、M$ 随斗杆相对于动臂的转角 θ_2 的变化曲线如图 9、10 所示。

由此, 根据式(2)可得水平推压力随斗杆相对于动臂的转角 θ_2 的变化曲线如图 11 所示, 由图可知, 此正铲液压挖掘机平推时的最大推压力是在斗杆相对于动臂的转角 θ_2 为 105° 时, 其值为 890 kN。

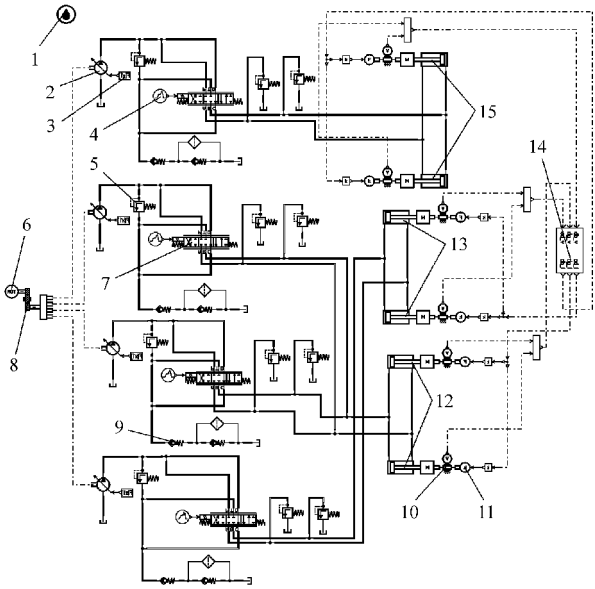


图 6 联合仿真模型

Fig.6 Co-simulation model

- 1. 液压油 2. 液压泵 3. 变量机构 4. 输入信号 5. 溢流阀
- 6. 电动机 7. 多路阀组 8. 减速装置 9. 背压阀 10. 速度传感器
- 11. 负载力 12. 斗杆液压缸 13. 铲斗液压缸 14. 联合仿真接口模块 15. 动臂液压缸

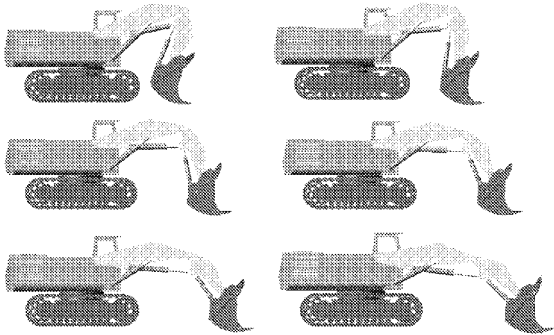


图 7 水平推压工作过程

Fig.7 Working process of flat-pushing

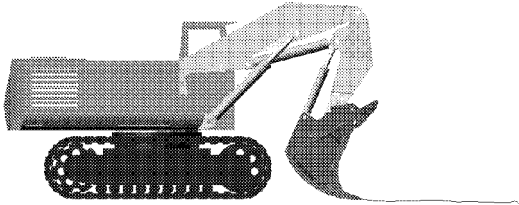


图 8 水平推压时的挖掘轨迹

Fig.8 Excavating trajectory of flat-pushing model

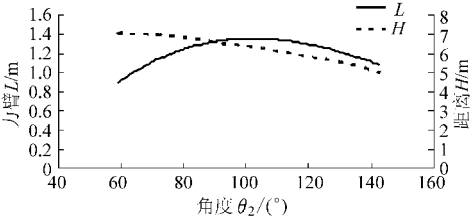


图 9 $L、H$ 的变化曲线

Fig.9 Change curves of $L、H$

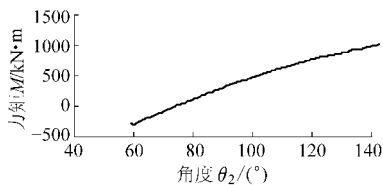


图 10 M 的变化曲线

Fig. 10 Change curve of M

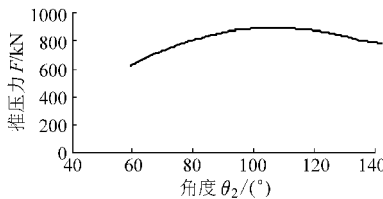


图 11 水平推压力的变化曲线

Fig. 11 Change curve of flat-pushing force

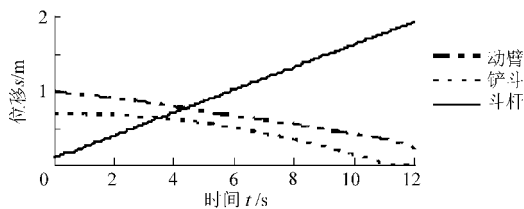


图 12 各液压缸位移变化曲线

Fig. 12 Displacement curves of all cylinders

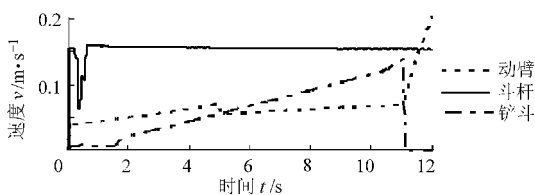


图 13 各液压缸速度变化曲线

Fig. 13 Velocity curves of all cylinders

图 12、13 是各液压缸随时间的位移和速度变化曲线。由图可知，在 12 s 内实现了水平推压。因在 11 s 后铲斗液压缸已位于最底端，需靠动臂液压缸来调整切削角度，所以在 11 s 后动臂液压缸速度增大。

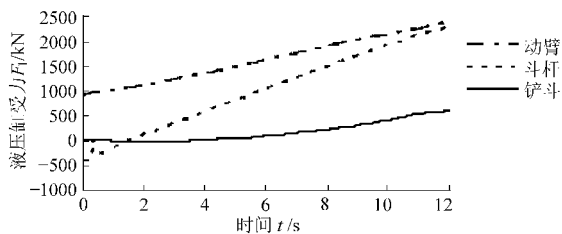


图 14 各液压缸受力曲线

Fig. 14 Forced curves of all cylinders

图 14 为各个液压缸的受力曲线。由图可知各缸受力随着平推过程的完成，受力在增大。在所有缸中动臂液压缸受力最大，因为此时各机构都已伸展，各部件的重心力臂最大。

图 15 是各液压缸无杆腔压力曲线。随着平推

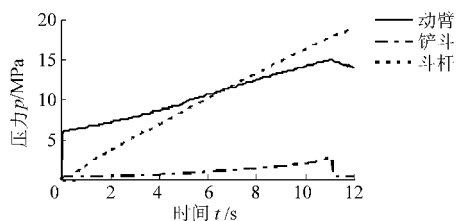


图 15 各液压缸无杆腔压力曲线

Fig. 15 Large chamber pressure of all cylinders

作业的进行，负载力逐渐增大，各液压缸无杆腔压力在增大，而平推作业主要靠斗杆液压缸伸出完成，所以斗杆液压缸无杆腔压力最大。

图 16 是各液压缸的无杆腔流量曲线。仿真时考虑了泵的响应时间，泵的响应时间大概为 300 ms，故在 0 ~ 0.5 s 内与其速度曲线有稍许偏差。设计时以斗杆液压缸流量为基准，对动臂、铲斗液压缸流量比例按图 16 所示在计算机中设置即可，这样当操纵手柄以图示斗杆流量控制泵输出时，便可以自动联合动作实现机器水平推压作业。

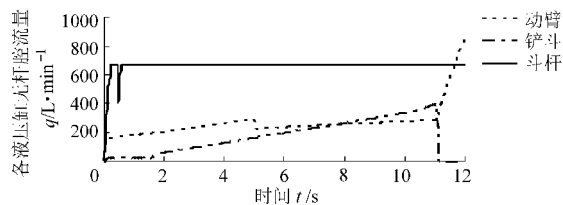


图 16 各液压缸无杆腔流量曲线

Fig. 16 Large chamber flow rate of all cylinders

整个水平推压过程泵的输出功率如图 17 所示，经过计算图中曲线所包络的面积，可得平推过程在 12 s 内共消耗 1 975 kJ 的能量，平均每秒消耗 164.58 kJ。由此可知平推时所需泵的输出功率远小于挖掘机的装机功率，满足设计要求。

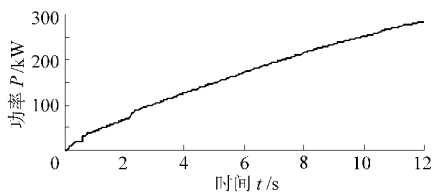


图 17 泵的输出功率曲线

Fig. 17 Output power curve of pumps

6 结论

(1) 通过对比试验与联合仿真结果，表明采用联合仿真，可以较准确地模拟挖掘机的真实工作环境和作业过程，验证了联合仿真结果的准确性。

(2) 该大型矿用正铲液压挖掘机通过采用泵阀复合流量匹配的电液比例控制方法实现了水平推压作业，其最大推压力为 890 kN，满足设计要求。

(3) 联合仿真结果确定了挖掘机平推过程供给

各液压缸的流量比值关系。功率消耗随着平推作业 其最大功率消耗值为 300 kW。
的进行而增大,且负载力最大时为最大功率消耗处,

参 考 文 献

- 1 王国彪. 国外大型矿用挖掘机的现状与发展[J]. 矿山机械, 1999(11):8~13.
- 2 马鹏飞,田齐. 超大型液压挖掘机的发展与进步[J]. 建筑机械, 2000(3):21~22.
- 3 王新中. 国内外矿用挖掘机发展状况[J]. 矿山机械, 2004(9):52~53.
- 4 同济大学. 单斗液压挖掘机[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986:66~101.
- 5 Pyung Hun Chang, Soo-Jin Lee. A straight-line motion tracking control of hydraulic excavator system [J]. Mechatronics, 2002,12(1):119~138.
- 6 王冬云,管成,潘双夏,等. 液压挖掘机功率匹配与动力源优化综合控制策略[J]. 农业机械学报, 2009,40(4):91~95.
Wang Dongyun, Guan Cheng, Pan Shuangxia, et al. Control strategy of power matching and power sources optimization for hydraulic excavators [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):91~95. (in Chinese)
- 7 四川邦立重机有限责任公司. 液压挖掘机正铲作业装置水平推压机构:中国,ZL 200520035287.8[P]. 2006-09-06.
- 8 Hirokazu Araya, Masayuki Kagoshima. Semi-automatic control system for hydraulic shovel [J]. Automation in Construction, 2001,10(4):477~486.
- 9 Masakazu Haga, Watanabe Hiroshi, Kazuo Fujishima. Digging control system for hydraulic excavator [J]. Mechatronics, 2001,11(6):665~676.
- 10 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(7):81~84.
Bai Yulin, Chen Jin, Li Shiliu, et al. Virtual prototyping research of large hydraulic face-shovel working device [J]. Construction Machinery, 2008(7):81~84. (in Chinese)
- 11 郑建荣. ADAMS—虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- 12 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.
Liu Jing, Pan Shuangxia, Feng Peien. Study on simulation technology of excavator hydraulic system based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):109~112. (in Chinese)
- 13 马乐,赵克利,翟洪岩. 大型矿用挖掘机工作装置仿真[J]. 计算机辅助工程, 2006,15(增刊1):361~363.
Ma Le, Zhao Keli, Zhai Hongyan. Simulation of working equipment of heavy mining excavator [J]. Computer Aided Engineering, 2006,15(Supp.1):361~363. (in Chinese)
- 14 张正兵,陈进,李晓娜. 基于正铲液压挖掘机挖掘轨迹的机构运动学分析[J]. 机械, 2008,35(5):9~12.
Zhang Zhengbing, Chen Jin, Li Xiaona. Mechanism movement analysis based on excavating track in hydraulic face-shovel excavators [J]. Machine, 2008,35(5):9~12. (in Chinese)

(上接第 6 页)

- 6 B+S Mutidata GmbH. Measured-data acquisition software ME5 user guide (ver. 0201-100-A)[EB/OL]. [2009-02-10]. <http://www.bsmultidata.de/index.php?id=2>.
- 7 Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Acquisition data synchronization mechanism of complex motor vehicle road way test system and its engineering implementation [C] // 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2010,3:390~394.
- 8 Racelogic Limited. VBOX III 100 Hz with RTK RLVB3R2G2 [M]. 2009.
- 9 Anthony Best Dynamics Limited. Robot controller (ver. 6. xx) software manual (ver. 6.01) [M]. 2008.
- 10 张小龙,冯能莲,宋健,等. 基于 SIMS/GPS 的汽车运动状态组合测量系统[J]. 农业机械学报,2008,39(10):30~35.
Zhang Xiaolong, Feng Nenglian, Song Jian, et al. Measurement system for vehicle motion state based on SIMS/GPS integrated technologies [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):30~35. (in Chinese)