

# 大型液压挖掘机工作特性联合仿真研究\*

朱小晶<sup>1</sup> 权龙<sup>1</sup> 王新中<sup>2</sup> 吕晓林<sup>2</sup> 李光<sup>2</sup>

(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】** 为了研究目前国内最大吨位(斗容量 15 m<sup>3</sup>、机质量 260 t)的矿用正铲液压挖掘机工作特性,首先在小型挖掘机上对采用的机械系统动力学与液压系统联合仿真方法进行验证,通过对比试验与联合仿真结果,确认了联合仿真研究方法能够较准确地模拟挖掘机的真实工作环境。在此基础上,采用 ADAMS 和 AMESim 软件,对斗容 15 m<sup>3</sup> 矿用挖掘机工作装置与液压系统进行联合仿真研究,通过仿真获得了挖掘机整个挖掘过程中工作部件对各个转动轴的转动惯量,计算出各个液压缸的位移曲线、速度曲线和压力变化曲线以及铲斗齿尖挖掘轨迹。

**关键词:** 液压挖掘机 工作特性 联合仿真

**中图分类号:** TD422.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)04-0027-06

## Co-simulation Analysis of Working Characteristic for Large Hydraulic Excavator

Zhu Xiaojing<sup>1</sup> Quan Long<sup>1</sup> Wang Xinzhong<sup>2</sup> Lü Xiaolin<sup>2</sup> Li Guang<sup>2</sup>

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

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

### Abstract

In order to study the working characteristics of mining face-shovel hydraulic excavator with bucket capacity of 15 m<sup>3</sup> and machine weight of 260 t, which is currently the largest tonnage of hydraulic excavator, co-simulation method of the dynamics of mechanical systems and hydraulic systems to the small excavator was authenticated. Then, by comparing the results of test and co-simulation, it was confirmed that co-simulation method could accurately simulate the practical working environment of excavator. On the base of before-mentioned research, mechanical devices and hydraulic systems of mining hydraulic excavator which bucket capacity is 15 m<sup>3</sup> were carried on with the help of ADAMS and AMESim software. Through simulation the rotation inertias of various parts of working mechanism to its rotation axis during working process were calculated. The displacement curves, velocity curves, force curves of each hydraulic cylinder and the excavating trajectory of bucket tooth crest could be obtained through co-simulation.

**Key words** Hydraulic excavator, Working characteristics, Co-simulation

### 引言

大型液压挖掘机是集成了机械、液压和计算机控制技术的复杂机电系统,与机械式电铲相比,具有整机重量轻、调速范围大、机动性好和卸载精确等优

点,代表着露天开采设备的发展方向<sup>[1]</sup>。目前,美国、日本和德国的大型液压挖掘机制造技术已非常成熟,而国内大吨位的液压挖掘机装备领域还处于空白,所用大吨位机型完全依赖进口<sup>[2-3]</sup>。现要研制国内首台斗容 15 m<sup>3</sup>、机质量 260 t 的大型矿用液

收稿日期: 2010-03-22 修回日期: 2010-04-21

\* 国家自然科学基金资助项目(50775156)和山西省科技攻关项目(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,主要从事电液伺服及生产过程智能控制技术研究,E-mail: quanlong@tyut.edu.cn

压挖掘机,可借鉴的设计仿真方法有:①采用 ADAMS 软件对挖掘机工作装置进行动力学仿真,设计机械结构<sup>[4-9]</sup>,但这种方法只能解决机构优化问题,ADAMS 软件虽已有设计液压系统的软件模块,但功能还不完善,无法建立复杂液压系统,如液压泵变量机构及大流量多路控制阀模型,也就不能较准确地施加液压系统对工作装置的驱动,更无法准确分析机器的作业效率及能耗。②利用 AMESim 等液压系统仿真软件对挖掘机液压系统进行设计<sup>[10-11]</sup>,但由于不能准确施加挖掘过程各执行器受到的负载力和分析各执行器所驱动负载质量随挖掘姿态和速度的变化关系,不能够准确模拟挖掘机真实的工作环境。为了克服两种方法的不足,本文采用多体动力学和液压系统的联合仿真方法,对大型液压挖掘机作业过程的特性进行研究。

## 1 联合仿真原理

首先在实验室已有的小型挖掘机上试验验证联合仿真效果,确认联合仿真的准确程度,然后用 ADAMS 软件对设计的矿用挖掘机工作装置建模,同时用 AMESim 软件建立液压系统模型,然后通过接口程序用两种软件对机器的工作特性进行联合仿真,通过仿真确定所开发机型的各项设计参数。

为满足挖掘机的工作要求,液压系统采用中位开式回路,主回路液压系统基本原理如图 1 所示。

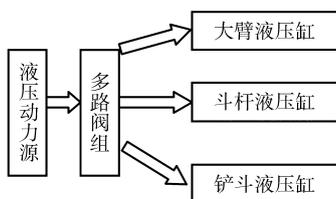


图 1 挖掘机液压系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of excavator's hydraulic system

联合仿真原理如图 2 所示。将 ADAMS 动力学模型中计算出的负载力及等效质量,转换为作用在每个液压缸铰接点的力,通过接口输入到 AMESim 的液压系统模型中;将 AMESim 仿真软件计算出的各液压缸速度作为驱动,通过接口输入到 ADAMS 动力学模型中。在仿真过程,经过每个确定的时间

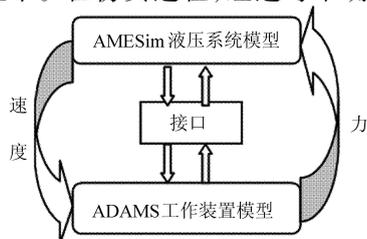


图 2 联合仿真原理图

Fig. 2 Schematic diagram of co-simulation

间隔,两种仿真软件通过接口程序实时交换数据。

## 2 联合仿真结果的试验验证

为了确定联合仿真方法的准确程度,首先在实验室现有的 6 t 小型挖掘机上用试验数据对仿真结果进行验证,通过在各液压缸上安装位移和压力传感器,对斗杆挖掘过程各个液压缸的位移、速度和压力进行测试并记录。在保证模型和实际挖掘机试验初始状态相同的情况下,输入相同的阀芯位移,采用 ADAMS 和 AMESim 联合仿真的方法研究机械系统与液压系统的耦合关系与实际测试的符合程度。图 3~6 为仿真结果与试验结果的对比。

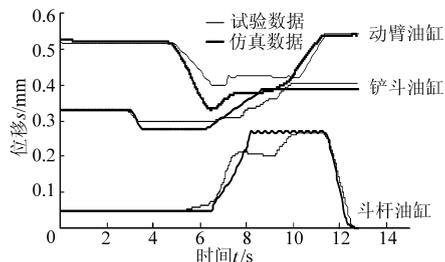


图 3 各液压缸位移曲线

Fig. 3 Displacement curves of all cylinders

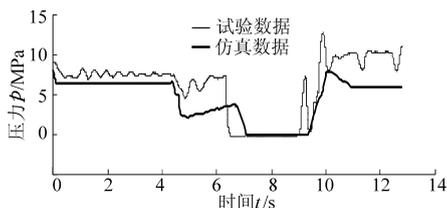


图 4 动臂液压缸无杆腔压力曲线

Fig. 4 Non-rod chamber pressure curves of boom cylinder

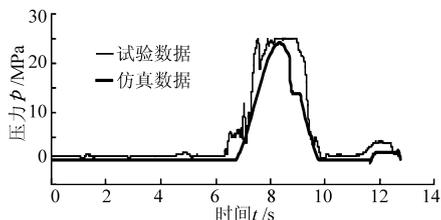


图 5 斗杆液压缸无杆腔压力曲线

Fig. 5 Non-rod chamber pressure curves of arm cylinder

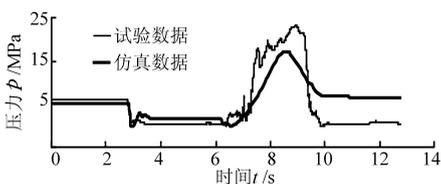


图 6 铲斗液压缸无杆腔压力曲线

Fig. 6 Non-rod chamber pressure curves of bucket cylinder

由图 3~6 中曲线可知,在仿真时按照试验的动作去控制各液压缸,所得各液压缸无杆腔压力与测试数据变化趋势相同,但各对比结果有一定误差,主要是由于试验时操作不稳定,且不可能给定与仿真

一样的设定值,工作环境温度较低(-10℃左右),土质比较硬所造成。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 矿用挖掘机动力学仿真模型

矿用正铲液压挖掘机是由动臂、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。采用 Pro/E 对其工作装置进行三维实体建模,并以底盘为基础进行虚拟装配。装配好的矿用正铲液压挖掘机三维模型如图 7 所示。

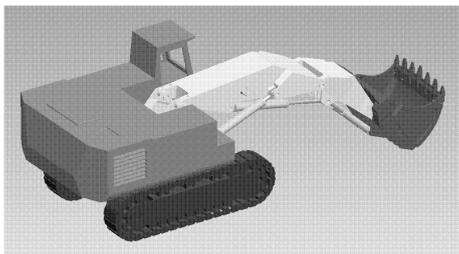


图 7 正铲液压挖掘机三维装配模型

Fig. 7 3-D model of face-shovel hydraulic excavator

利用 MSC 公司开发的采用无缝连接方式的接口模块 MECH/Pro,将 Pro/E 软件中建立的整机装配模型导入动力学仿真软件 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。在 Pro/E 建模时要注意单位和密度的设定,单位用 mm、kg、s,保持与 ADAMS 一致,否则在导入时会出错<sup>[12]</sup>。

导入的液压挖掘机模型要重新给各个零件施加约束,结合实际在动臂液压缸、斗杆液压缸、铲斗液压缸和开斗液压缸共定义了 4 个移动副;底盘与大地定义 1 个固定副;斗杆与动臂、动臂液压缸与平台、铲斗底与铲斗液压缸、铲斗体与开斗活塞杆共定义了 4 个转动副;动臂与平台、斗杆液压缸与动臂、斗杆与铲斗活塞杆、铲斗底与开斗液压缸共定义了 4 个圆柱副;动臂与动臂活塞杆、斗杆与斗杆活塞杆、铲斗底与斗杆、铲斗体与铲斗底共定义了 4 个球副;在液压缸缸筒与液压缸活塞杆之间直接添加移动驱动,共计 4 个移动驱动,如图 8 所示。经过模型校验,机构的自由度为零,没有冗余约束,表明建立的模型正确。

### 4 挖掘负载分析及模拟

#### 4.1 挖掘负载分析

挖掘机在工作过程中存在两种负载力:重力负载和挖掘阻力。重力负载是随着挖掘的开始,煤料逐渐充满铲斗,到挖掘过程结束达到最大值,动臂提

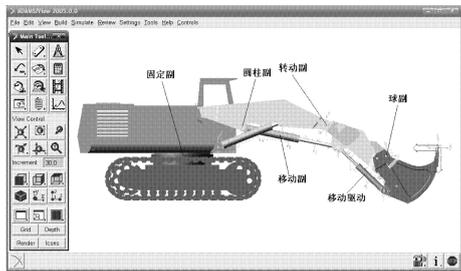


图 8 正铲液压挖掘机 ADAMS 模型

Fig. 8 ADAMS model of face-shovel hydraulic excavator

升到一定位置后随着开斗缸的动作,煤料被卸载,重力负载变为零。而挖掘阻力主要体现在挖掘过程中齿尖承受的切向挖掘阻力  $F_t$  和法向挖掘阻力  $F_n$ ,由于正铲挖掘主要以斗杆挖掘和复合挖掘为主,因此以斗杆挖掘工况为例对挖掘机的最大挖掘阻力进行分析,并将其模拟施加在模型中。挖掘阻力的分析过程如图 9 所示。

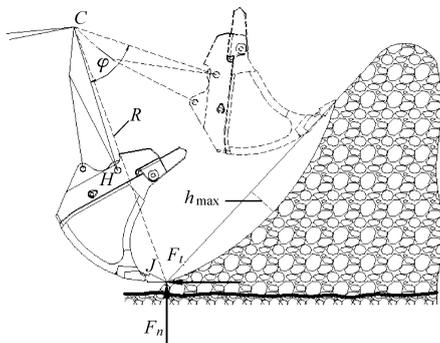


图 9 挖掘阻力分析原理图

Fig. 9 Analysis principle diagram of excavating resistance

斗杆挖掘时切削行程较长,斗杆在挖掘过程中的总转角  $\varphi$  为  $50^\circ \sim 80^\circ$ ,在这转角过程中铲斗被装满。此机型在设计时初步确定斗杆相对于动臂的转角为  $71^\circ \sim 144^\circ$ ,即斗杆总转角最大值为  $73^\circ$ 。

假设当转过  $\varphi$  角时刚好装满一铲斗  $15 \text{ m}^3$ ,即相当于图 9 中弧形面积等于铲斗中心截面积,则有

$$\varphi R^2/2 - R^2 \sin(\varphi/2) \cos(\varphi/2) = Q/B \quad (1)$$

式中  $R$ ——斗杆挖掘转角半径

$Q$ ——铲斗斗容量,  $Q = 15 \text{ m}^3$

$B$ ——切削宽度,  $B = 4 \text{ m}$

$R, Q, B$  皆为已知量,则由式(1)得  $\varphi = 54^\circ$ ,由此推知最大切削深度:  $h_{\max} = R(1 - \cos(\varphi/2)) = 0.831 \text{ m}$ 。

斗杆挖掘时挖掘阻力最大切向分力为

$$F_{t\max} = K_0 B h_{\max} \quad (2)$$

式中  $K_0$ ——挖掘比阻力,取挖掘煤料等级为Ⅲ级,

$$\text{则 } K_0 = 15.5 \text{ N/cm}^2$$

由式(2)得:  $F_{t\max} = 515.22 \text{ kN}$ 。

挖掘阻力最大法向分力为

$$F_{n\max} = \lambda F_{t\max} \quad (3)$$

式中  $\lambda$ ——挖掘阻力系数,取挖掘煤料等级为Ⅲ级,则对于正铲装置  $\lambda = 0.3$

由式(3)得:  $F_{n\max} = 154.566 \text{ kN}$ 。

由此则可以得出最大挖掘阻力  $F_{\max}$  为

$$F_{\max} = \sqrt{F_{t\max}^2 + F_{n\max}^2} \quad (4)$$

## 4.2 挖掘负载仿真模拟

在 ADAMS 模型中心齿尖处施加力  $F_t$ 、 $F_n$ ,在铲斗重心处施加重力负载  $G_m$ 。对其以 STEP 阶跃函数来定义模拟  $F_t$ 、 $F_n$  和  $G_m$ 。阶跃函数 STEP 设置格式为:STEP( $A, x_0, h_0, x_1, h_1$ )。其中  $A$  为函数自变量,  $x_0$  为函数自变量初始值,  $x_1$  为函数自变量最终值,  $h_0$  为函数初始值,  $h_1$  为函数最终值。

STEP 函数定义  $F_t$ 、 $F_n$  和  $G_m$ :  $F_t$ :STEP(time, 0, 0, 15.3, 0) + STEP(time, 15.3, 0, 16.9, 515 220) + STEP(time, 16.9, 0, 18.5, -515 220) + STEP(time, 18.5, 0, 30, 0)。  $F_n$ :STEP(time, 0, 0, 15.3, 0) + STEP(time, 15.3, 0, 16.9, 0.3 × 515 220) + STEP(time, 16.9, 0, 18.5, -0.3 × 515 220) + STEP(time, 18.5, 0, 30, 0)。  $G_m$ :STEP(time, 0, 0, 16, 0) + STEP(time, 16, 0, 19.9, 300 000) + STEP(time, 19.9, 0, 24.7, 0) + STEP(time, 24.7, 0, 26.3, -300 000) + STEP(time, 26.3, 0, 30, 0)。

图 10 为仿真的负载模拟结果。

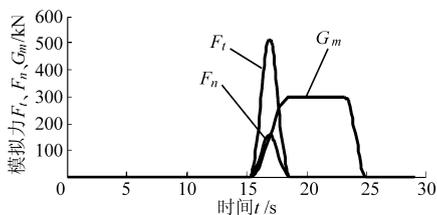


图 10 负载模拟曲线

Fig. 10 Curves of load simulation

## 5 联合仿真

在联合仿真时,首先要保证许可证与环境变量设置准确无误,在 AMESim 帮助文件的 interface manuals 中对具体操作有详细叙述。然后在 ADAMS 中设置连接变量,由于研究中 AMESim 液压系统是驱动环节,所以输入 ADAMS 的为速度,从 ADAMS 中输出各缸所受的力。具体设置在 ADAMS 中为 Build-System Elements-State Variable-New,其中速度变量值为 0,表明是从 AMESim 中输入的值,力变量值为 motion 的所受力方向,然后建立输入输出变量,具体是通过 ADAMS 中控制工具箱 Plant Input、Plant Output 来定义,最后通过 Controls-Plant Export

来定义接口。打开 AMESim 中的系统模型,选择生成的接口模块,如图 11 所示。将模块与液压控制系统连接,即可开始联合仿真。

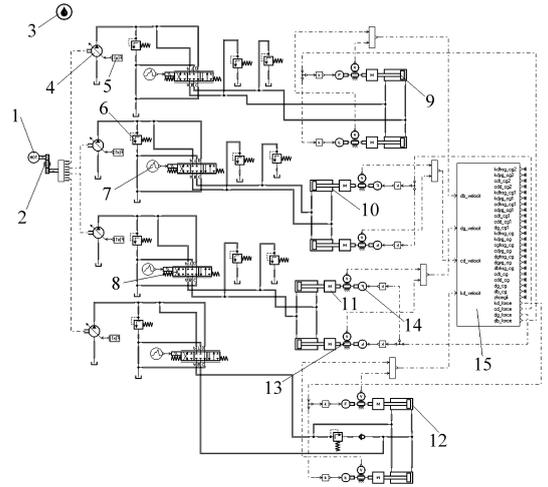


图 11 联合仿真模型

Fig. 11 Co-simulation model

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

各执行机构在仿真时的初始状态为动臂液压缸活塞伸出 0.2 m 处,斗杆液压缸全伸,铲斗液压缸全缩,开斗液压缸全伸。图 12 是联合仿真所得到的挖掘机斗杆挖掘时铲斗齿尖的挖掘轨迹。图中曲线 1 为大臂上升过程,曲线 2 为斗杆收缩过程,曲线 3 为铲斗收缩调整挖掘位置轨迹,曲线 4 为动臂下降直到齿尖到达地面,曲线 5 为平推阶段,曲线 6 为斗杆挖掘过程轨迹,曲线 7 为动臂提升及下降过程轨迹,曲线 8 为铲斗打开轨迹。

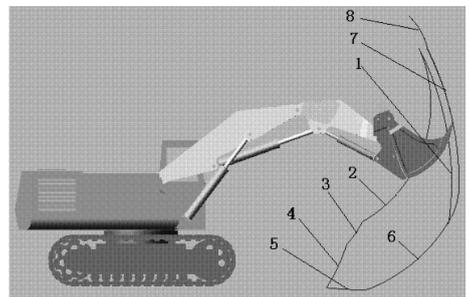


图 12 斗杆挖掘时的挖掘轨迹

Fig. 12 Excavating trajectory of arm excavating model

由联合仿真接口模块可调出各机构重心点位置,进一步由

$$J = \sum (J_{oi} + m_i r_i^2) \quad (5)$$

式中  $J$ ——工作装置的转动惯量

$J_{oi}$ ——某部件对通过其质心并与转动中心轴平行的轴的转动惯量

$m_i$ ——某部件质量  
 $r_i$ ——某部件质心到转动中心轴的距离

可计算出不同工作部件对其旋转轴的转动惯量,如图13中曲线所示。

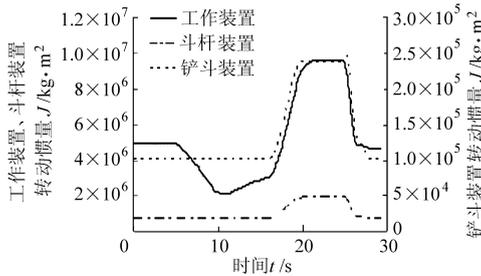


图13 工作装置、斗杆装置、铲斗装置对其转动轴的转动惯量曲线

Fig. 13 Rotation inertia curves of working device, arm device, bucket device to rotation axes

由图13可知,工作装置对动臂与平台的铰点转动轴的转动惯量最大,且最大值为满载动臂提升阶段处。

图14、15是各个液压缸位移和速度随时间的变化曲线。由图可知,用联合仿真的方法对挖掘机进行研究,各液压缸均已按预定要求完成斗杆挖掘动作。

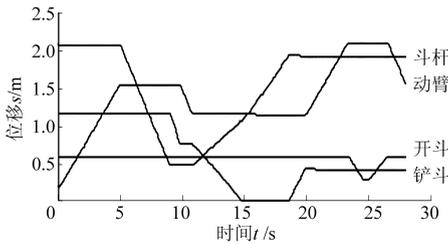


图14 位移变化曲线

Fig. 14 Displacement curves of all cylinders

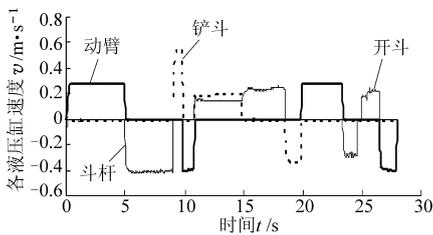


图15 速度变化曲线

Fig. 15 Velocity curves of all cylinders

图16是各个液压缸活塞杆的受力曲线,由图中曲线可知在18s的时候各个液压缸受力最大,且所有液压缸中斗杆缸受力最大,因为此时正是挖掘阻力最大的时候。

由仿真可得斗杆挖掘时整个工作过程各液压缸无杆腔压力曲线如图17所示,由图中曲线可知,在挖掘过程中斗杆液压缸的压力最大,因为斗杆挖掘

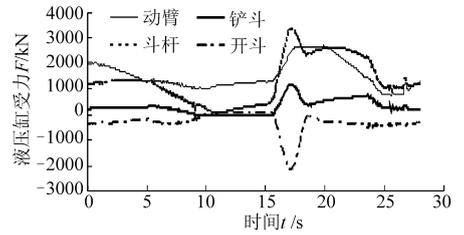


图16 各液压缸受力曲线

Fig. 16 Force curves of all cylinders

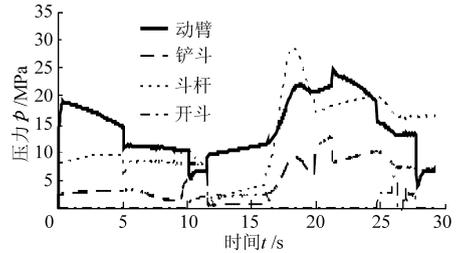


图17 各液压缸无杆腔压力曲线

Fig. 17 Non-rod chamber pressure of all cylinders

是斗杆液压缸做功,这与实际相符,表明了模型的准确性。

整个工作过程泵的输出功率如图18,可知,挖掘过程要求的最大功率为700 kW,满足装机功率的要求。经过计算图18中曲线所包络的面积,可得斗杆挖掘在前16s内共消耗4962.4 kJ的能量,平均每秒消耗310.1 kJ;16~25s内挖掘及提升过程共消耗4326.2 kJ的能量,平均每秒消耗480.7 kJ。由于前16s内只是克服杆件自重而做功,而16~25s是克服挖掘阻力及重力负载做功,所以平均每秒消耗的能量要大于前者。

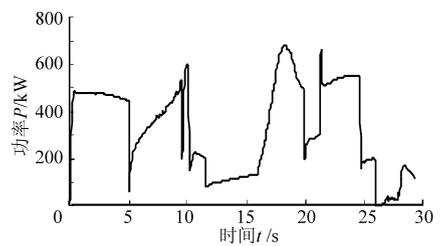


图18 泵的输出功率曲线

Fig. 18 Output power curves of bumps

## 6 结论

(1) 对比试验与联合仿真结果表明,采用联合仿真,可以较准确的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) 联合仿真结果表明:大型矿用液压挖掘机按既定要求挖掘,在斗杆挖掘过程中斗杆液压缸受力最大,能量消耗也最大。

## 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 王新中. 国内外矿用挖掘机发展状况[J]. 矿山机械, 2004(9):52~53.  
Wang Xinzong. Development status of national and foreign mine-used excavator[J]. Mining & Processing Equipment, 2004(9):52~53. (in Chinese)
- 3 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.
- 4 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 Pei'en. 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)
- 5 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):361~363.  
Ma Le, Zhao Keli, Zhai Hongyan. Simulation of working equipment of heavy mining excavator[J]. Computer Aided Engineering, 2006, 15(Supp.):361~363. (in Chinese)
- 6 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.  
Bai Yulin, Chen Jin, Li Shiliu, et al. Virtual prototyping research of large hydraulic face-shovel working device[J]. Construction Machinery, 2008(13):81~84. (in Chinese)
- 7 武宏伟, 权龙. 负载敏感型挖掘机液压系统能耗分析[J]. 液压气动与密封, 2009(6):34~38.  
Wu Hongwei, Quan Long. Energy loss research of load-sensing excavator's hydraulic system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2009(6):34~38. (in Chinese)
- 8 Ha Q P, Nguyen Q H, Rye D C, et al. Impedance control of a hydraulically actuated robotic excavator[J]. Automation in Construction, 2000, 5(9):421~435.
- 9 潘玉安, 程洪涛, 姜迪友, 等. 基于 ADAMS 挖掘机工作装置的仿真与优化设计[J]. 煤矿机械, 2009, 30(3):15~17.  
Pan Yu'an, Cheng Hongtao, Jiang Diyou, et al. Based on ADAMS of working equipment of excavator device simulation and design optimization[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(3):15~17. (in Chinese)
- 10 郭勇, 张德胜, 冀谦. 基于 AMESim 的挖掘机动臂液压回路仿真研究[J]. 建筑机械, 2007(23):96~98.  
Guo Yong, Zhang Desheng, Ji Qian. Study on hydraulic circuit simulation based on AMESim for boom of excavator[J]. Construction Machinery, 2007(23):96~98. (in Chinese)
- 11 郑小军, 陶薇. 基于 AMESim 的液压挖掘机运动和控制仿真[J]. 液压气动与密封, 2009(2):24~26.  
Zheng Xiaojun, Tao Wei. Motion simulation and control parameters of hydraulic excavator based on AMESim software[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2009(2):24~26. (in Chinese)
- 12 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.

~~~~~

(上接第 26 页)

- 6 阎清东, 宿新东. 湿式多片制动器摩擦衬片初始压力分布研究[J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(1):42~46.  
Yan Qingdong, Su Xindong. Lining initial pressure distribution of wet multidisc brake[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 20(1):42~46. (in Chinese)
- 7 Chen Wei, Messac A, Sundararaj G J. Exploration of the effectiveness of physical programming in robust design[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2000, 122(2):155~163.
- 8 范爱芳. 密封湿式圆盘制动器设计[J]. 工程机械, 1998(7):16~19.  
Fan Aifang. Design of sealed wet disk brake[J]. Construction Machinery and Equipment, 1998(7):16~19. (in Chinese)
- 9 刘宝璇, 赵瑞清, 王纲. 不确定性规划及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- 10 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:电子科技大学出版社, 2005.