

DOI: 10.3969/j. issn. 1001-3881. 2015. 20. 030

# 液压挖掘机举升与回转复合动作实验与仿真研究

张浩, 许佳音

(天津工程机械研究院, 天津 300409)

**摘要:** 针对挖掘机回转与举升复合动作协调性存在的问题提出了一种实验与仿真方法, 根据液压系统模型建立 AMESim 模型, 变量泵、多路阀模型通过 HCD 库搭建; 将实验中提取的数据经过处理输入到仿真模型中, 并将仿真结果与实验结果对比, 验证仿真模型的准确性; 根据实验中存在的问题, 改进仿真模型, 将原始数据输入到改进的仿真模型中, 对比改进前与改进后的结果, 改进后的仿真结果显示回转与举升协调性有了较大改善。

**关键词:** 液压挖掘机; 复合动作; AMESim 仿真

**中图分类号:** TH137.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2015) 20-088-4

## Experiment and Simulation Research for Hydraulic Excavator Lifting and Rotating Compound Action

ZHANG Hao, XU Jiayin

(Tianjin Research Institute of Construction Machinery, Tianjin 300409, China)

**Abstract:** According to the problem of coordination in compound action of hydraulic excavator rotary and lifting, an experimental and simulation method was presented. AMESim simulation model was built according to the hydraulic system model; the simulation models of variable pump and hydraulic multi-way directional valve were built by HCD library. Experimental data were inputted into simulation model, so the accuracy of the simulation model was verified through the comparison of the experimental results and the simulation results. The simulation model was improved according to the problems in the experiment. The initial experimental data were inputted into the improved simulation model. According to the compared result of original model and improved model, the coordination in compound action of excavator rotary and lifting is improved greatly.

**Keywords:** Hydraulic excavator; Compound action; AMESim simulation

目前计算机仿真在工程机械领域已经应用较广, 但是仿真结果能否对实际生产加工制造有指导意义, 这就需要多方面的验证, 实验验证是较为理想的验证方法。根据某型号挖掘机回转与举升复合动作存在的问题, 在分析液压原理的基础上提出了一种实验与仿真方法, 可以较为准确与快速地解决实际存在的问题。

图 1 为实验与仿真流程图。

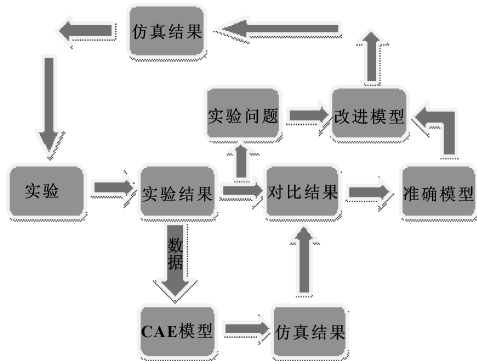


图 1 实验与仿真流程图

如图 1 所示, 首先对液压系统进行分析、建立 AMESim 模型, 将从实验中提取的数据输入到仿真模

型中, 通过模型输出结果与实验结果对比, 就可以验证模型搭建的合理性; 在搭建的模型的基础上, 根据实验存在的问题, 提出改进意见, 并验证改进的合理性。实验技术与仿真技术的结合, 将会提高研发的效率, 降低研发经费, 对于在实际中遇到的问题, 可以通过如图 1 所示的步骤来分析、解决问题, 通过该方法对挖掘机液压系统举升、回转复合动作协调性进行分析<sup>[1-3]</sup>。

### 1 AMESim 介绍

在如今的科学研究中, 仿真技术提高了科学研究水平, 缩短了研究周期, 降低了科学研究成本及风险, 促进了各个不同领域的融合, 加速了科研成果转换为生产力的进程。可以说仿真技术已成为科学研究不可或缺的一门实用技术。在设计仿真过程中, AMESim 软件为工程技术人员节约了大量时间, 以其友好的界面成为近些年来应用较为成功的一种系统仿真软件, 它尤其适合于液压控制系统的建模与仿真。

AMESim 是法国 IMAGINE 公司开发的一种新型的高级建模和仿真软件, 其全称为工程系统高级建模和仿真平台。它为用户提供了一个系统工程设计的完整平台, 特别是在液压系统设计过程中, 对于较为复

收稿日期: 2014-08-21

作者简介: 张浩, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事工程机械液压元件与系统的仿真研究工作。

通信作者: 许佳音, E-mail: zhanghaogod@163.com。

杂的液压元件可以通过 HCD (Hydraulic Component Design) 库来设计, 并能够较为方便地进行验证, 文中变量泵、多路阀都应用 HCD 库来建模。

## 2 试验方法

主泵采用负流量控制、恒率控制、交叉功率控制; 主动臂举升阀内合流, 动臂举升优先于回转, 优先程度由动臂大腔先导压力决定。挖掘机动臂举升和转台回转的复合动作中, 两个执行机构运动要达到协调一致, 就需要在转台回转到预定位置时, 动臂提升到卸载要求的高度。分析中以先导压力开始上升时间作为起始时间点, 以转台转过  $90^\circ$  为回转完成时间点, 计算回转马达所用的时间; 以动臂液压缸开始缓冲时间点作为动臂提升到了卸载要求高度的时间点, 计算动臂提升所用的时间; 以两者的时间差值  $\Delta t$  作为考察其复合动作协调性的参数。

回转举升复合动作分为空载测试和满载测试两种工况, 空载测试时 4 台被测样机的起始姿态均为最大挖掘半径姿态, 铲斗触地, 由于动臂油缸在举升时都具有缓冲功能, 且缓冲时间差异性较大, 数值计算时, 取动臂开始缓冲的时间点为动臂上升时间的截止点, 回转  $90^\circ$  的时间截止点根据回转支撑的周长计算获得<sup>[4-6]</sup>。

## 3 仿真模型的建立

马达回转与动臂举升复合动作是挖掘机复杂动作中重要的动作, 当回转马达与动臂存在复合动作时, 挖掘机其它部分可以认为相对静止, 因此把回转与举升复合动作的液压原理图单独提取出来, 进行仿真模

型的建立, 这样模型比较简单同时达到了与实际情况相符合的目的。

### 3.1 液压系统建模

复合动作液压系统模型如图 2 所示, 泵 1 流量同时供给回转马达和动臂, 泵 2 流量只供给动臂, 在回转马达前有动臂优先阀, 可以保证动臂的流量。由于采用的泵具有负流量控制、总功率控制、交叉功率控制功能, 所以用 AMESim 中 HCD 库对泵单独建模。在复合动作中用到的多路阀有控制回转马达换向功能、动臂缸换向功能、动臂 1 与动臂 2 合流功能, 用 AMESim 中 HCD 库对回转马达换向阀、动臂 1 换向阀、动臂 2 换向阀建模。建模过程中, 变量泵单独建模, 参考实际零件尺寸与原理, 建立变量泵模型, 变量泵单独进行了实验, 与仿真结果进行了对比, 确保泵模型的准确性; 在多路阀建模过程中, 参考实际零件图, 对回转换向阀芯、动臂换向阀 1 芯、动臂换向阀 2 阀芯上不规则节流边进行了测量, 并应用 MATLAB 对节流边进行了编程, 得到了各个节流边过流面积随位移变化的曲线, 输入到换向阀模型中, 并根据实际测量的尺寸对换向阀参数进行设置。建立的整体模型如图 3 所示<sup>[7-10]</sup>。

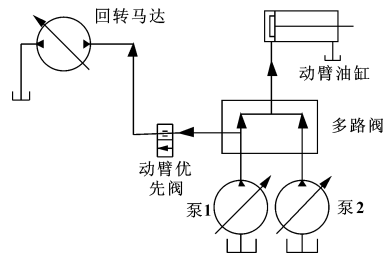


图 2 举升与回转复合动作液压原理图

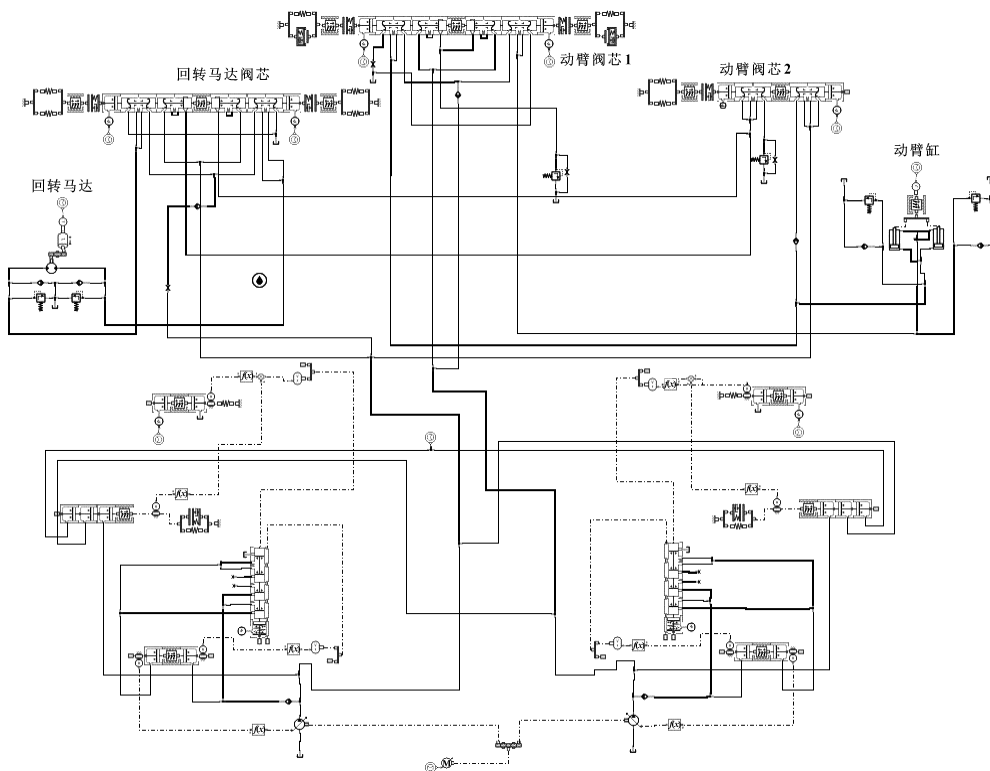


图 3 液压系统 AMESim 模型

### 3.2 参数设置

仿真参数设置见表 1。

表 1 参数设置

元件	项目	数值
泵、电机	泵排量/(mL · r <sup>-1</sup> )	112
	电机转速/(r · min <sup>-1</sup> )	输入实验数据
	负流量控制压力 p <sub>i1</sub> /Pa	输入实验数据
	负流量控制压力 p <sub>i2</sub> /Pa	输入实验数据
	总功率控制压力 p <sub>a4</sub> /Pa	输入实验数据
	典型泵转速/(r · min <sup>-1</sup> )	2 000
	排量/(mL · r <sup>-1</sup> )	121.6
回转马达及 换向阀联	机械效率	1
	容积效率	1
	负载/(N · m)	输入试验数据
	转动惯量/(mg · mm <sup>2</sup> )	2.760 27×10 <sup>11</sup>
	先导压力 p <sub>XAs</sub> /Pa	输入试验数据
	先导压力 p <sub>XBs</sub> /Pa	输入试验数据
	动臂优先阀等效节流面积/mm <sup>2</sup>	19.37
	活塞直径/mm	125
	活塞杆直径/mm	85
	行程/m	1.221
动臂缸及 换向阀联	活塞及活塞杆质量/kg	90
	泄漏系数	0
	负载/N	输入试验数据
	黏性摩擦因数	1
	先导压力 p <sub>XAb1</sub> /Pa	输入试验数据
	先导压力 p <sub>XBb1</sub> /Pa	输入试验数据

注:在建立泵模型及多路阀模型过程中,一些具体的参数没有给出。

### 3.3 输入数据

模型中需要输入的实验数据有动臂先导压力(图 4(a))、马达先导压力(图 4(b))、负流量控制压力(图 5(a))、总功率控制压力(图 5(b))、动臂缸负载(图 6(a))、回转马达负载(图 6(b)),其中动臂缸负载和马达负载需要根据实验数据计算得出。

动臂液压缸需要计算的输入数据。动臂液压缸是由两个液压缸并联组成,两个液压缸的参数一样,动臂液压缸活塞直径为 125 mm,活塞杆直径为 85 mm,液压缸的行程为 1.221 m,黏滞摩擦因数为 125 000 N · s/m,假设液压缸没有泄漏,液压缸负载由以下公式计算:

$$F = p_1 \cdot A_1 - p_2 \cdot A_2 - \mu v \quad (1)$$

式中: p<sub>1</sub> 为液压缸大腔压力; p<sub>2</sub> 为液压缸小腔压力; A<sub>1</sub> 为液压缸大腔活塞面积; A<sub>2</sub> 为液压缸小腔活塞面积于活塞杆面积之差; μ 为黏滞摩擦因数; v 为活塞运动速度。

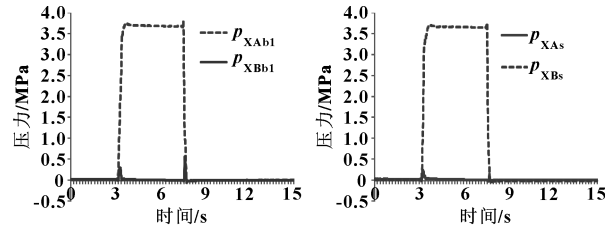


图 4 回转与举升先导控制压力

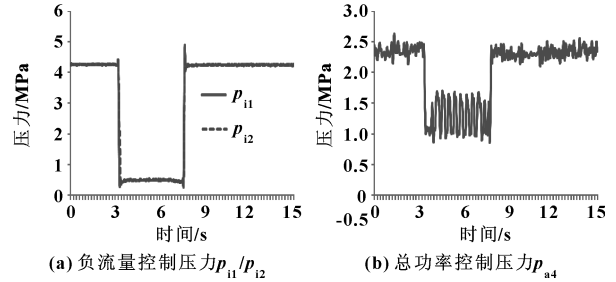


图 5 负流量控制压力与总功率控制压力

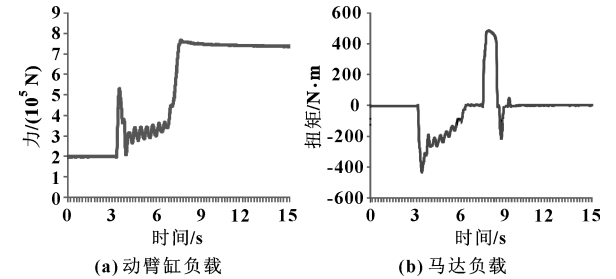


图 6 动臂缸负载与回转马达负载

回转马达需要输入的数据。马达模型是由定量马达、减速机、转动惯量、转动负载组成,马达的排量为 121.6 mL/r,减速机减速比为 20,马达负载扭矩由以下公式计算:

$$T = \frac{\Delta p \cdot V \cdot 10^{-6}}{2\pi} \quad (2)$$

式中: Δp 为马达前后压差,单位为 Pa; V 为马达排量,单位为 mL/r。

以上需要输入的数据均来自试验载荷谱提取的数据,输入到仿真模型中,根据仿真结果与试验结果的对比来验证仿真模型的正确性。

## 4 仿真结果与实验结果分析

### 4.1 泵流量对比

泵 1 和泵 2 的试验流量和仿真数据的对比分别见图 7(a) 和 (b)。

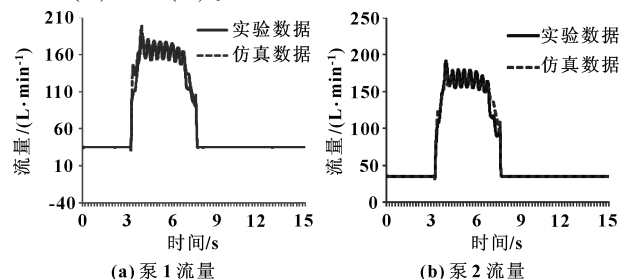


图 7 泵 1 流量与泵 2 流量

## 4.2 动臂缸流量/马达流量对比

动臂缸流量、马达流量的实验数据和仿真数据的对比分别见图 8 (a) 和 (b)。

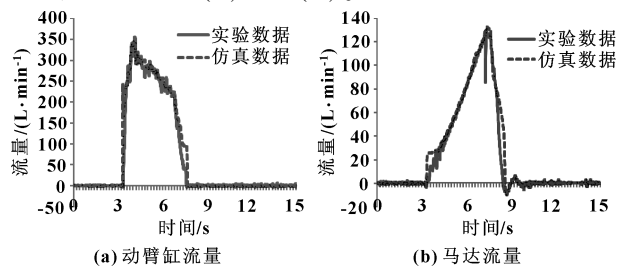


图 8 动臂缸流量与马达流量

## 4.3 马达回转角度与动臂缸位移对比

马达回转角度与动臂缸位移的实验数据和仿真数据的对比分别见图 9 (a) 和 (b)。

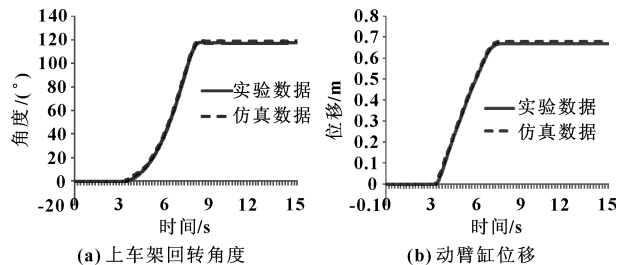


图 9 上车架回转角度与动臂缸缸杆位移 (改进前)

由图 7、图 8 可见: 仿真结果泵输出的流量、动臂缸流量、马达流量与实验结果基本吻合, 仿真结果比实验结果偏大一点。动臂缸黏性摩擦因数、泄漏系数的设置, 马达机械效率、容积效率的设置, 液压管路压力损失等都会影响到仿真结果。如图可见仿真结果与实验结果误差已经很小, 可以作为系统改进的依据。

由图 9 可见: 上车架回转角度仿真结果比实验结果大  $2^\circ$  左右, 动臂缸位移仿真结果比试验记过大 10 mm 左右, 与仿真流量比实验流量大有关系, 仿真结果与实验结果误差很小, 上车架在  $t=3.31$  s 开始回转, 回转  $90^\circ$  的时间约为 4.26 s, 动臂缸在  $t=3.30$  s 时开始举升, 举升时间约为 4.00 s, 可见举升时间要比回转时间快 0.26 s, 这会造成举升与回转复合动作的不协调, 因此对液压系统进行改进, 使举升与回转复合动作协调一致。

## 4.4 改进后结果

由图 10 可见: 改进前动臂优先阀过流面积为  $19.37 \text{ mm}^2$  时, 改进后动臂优先阀过流面积为  $24.6 \text{ mm}^2$ , 仿真数据 1 为改进前的数据, 仿真数据 2 为改进后的数据, 可见改进后回转马达回转角度增大, 动臂缸位移减小, 回转马达达到  $90^\circ$  的时间为 7.34 s, 动臂缸达到最大位移时间为 7.33 s, 可见协调性有了很大的改进。因此根据仿真数值的变化, 可以调整回转马达回转到  $90^\circ$  和动臂达到最大位移的时间, 使复合动作更加协调。

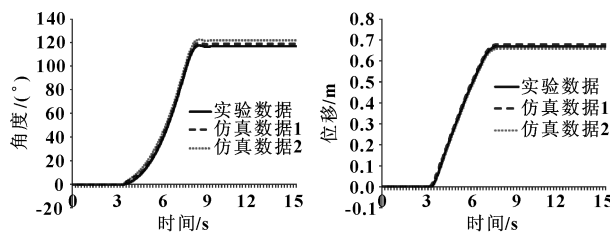


图 10 上车架回转角度与动臂缸缸杆位移

## 5 结论

(1) 提出了一种实验与仿真方法, 将实验数据输入到仿真模型中, 根据仿真结果与实验结果的对比, 改进仿真模型, 对具体实验系统提出改进意见, 并通过实验验证改进的合理性; (2) 对挖掘机回转与举升复合动作液压系统进行了分析, 并阐述了实验方法; (3) 根据对液压系统进行的分析, 建立了变量泵、多路阀、动臂缸、回转马达的 AMESim 模型, 涉及到篇幅, 具体的建模过程没有给出, 把提取的一个工作循环实验数据经过处理输入到模型中, 进行了仿真, 并通过实验与仿真流量的对比分析, 确定仿真模型的准确性; (4) 对实验结果进行分析, 发现回转动作较慢, 影响复合动作的协调性。通过对系统分析, 可以对动臂优先阀进行改进, 并对仿真模型进行具体数值改进, 运用原始实验数据进行了验证, 结果有了较大的改观, 复合动作相差 0.01 s, 验证了提出的实验与仿真方法的可行性。

## 参考文献:

- [1] 罗艳蕾, 李渊, 邱雪, 等. 基于 AMESim 的挖掘机负荷传感多路阀的建模与仿真[J]. 机床与液压, 2012, 40(3): 142-144.
- [2] DAVID A B, DEREK W S. The Development Control and Operation of an Autonomous Robotic Excavator[J]. Journal of Intelligent and Robotic System, 1998(21): 73-75.
- [3] 张德胜. 小型液压挖掘机动臂与回转复合动作协调性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [4] 熊艳伦, 魏洪波, 张民超, 等. 挖掘机用高压多路阀研制的核心技术[J]. 机床与液压, 2013, 41(20): 79-81.
- [5] 彭天好, 杨华勇, 傅新. 液压挖掘机全局功率匹配与协调控制[J]. 机械工程学报, 2001(11): 62-66.
- [6] 赵卫良, 王庆丰. 多执行器电液分流控制系统的实验研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 198-202.
- [7] 周宏兵, 刘峰, 郝鹏, 等. 挖掘机回转与动臂举升复合动作协调性的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(10): 158-162.
- [8] 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.
- [9] BORGHI Massimo, MILANI Massimo, PAOLUZZI Roberto. Influence of Notch Shape and Number of Notches on the Metering Characteristics of Hydraulic Spool Valves[J]. International Journal of Fluid Power, 2005, 8(6): 5-18.
- [10] 曾超, 罗艳蕾. 挖掘机换挡阀阀芯控制特性研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(7): 199-212.