

# 液压挖掘机上车结构参数与液压缸摩擦力参数辨识

龚 文 王庆丰

浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州, 310027

**摘要:**在液压挖掘机上车机械臂的动力学分析基础上,提出利用液压缸平稳低速运行时的动力学特性建立与摩擦力无关的挖掘机臂动力学模型,并运用该模型通过离线辨识确定臂的结构参数。基于经典摩擦力模型建立液压缸的辨识模型,通过在线辨识实验得到了液压缸的摩擦力参数,为深入研究液压挖掘机的动力学特性、建立可靠的系统仿真模型及实现臂运动的精确控制提供了依据。

**关键词:**液压挖掘机;动力学模型;液压缸摩擦;参数辨识

**中图分类号:**TP391      **文章编号:**1004—132X(2010)09—1098—03

## Parametric Identification of Arm Structure and Cylinder Friction on a Hydraulic Excavator

Gong Wen Wang Qingfeng

The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control,  
Zhejiang University, Hangzhou, 310027

**Abstract:** On the basis of dynamics analysis of a hydraulic excavator's arm, when the hydraulic cylinder worked at a low and steady speed, a dynamics model, which was independent on the cylinder friction, was obtained. The model was applied on the off-line parametric identification of the hydraulic excavator's arm. According to the classical frictional model, an experimental on-line parametric identification was carried out on the excavator. The validation of the method is proved through the experimental data. The results provide a basis for the modeling the real-time simulation system of the excavator.

**Key words:** hydraulic excavator; dynamics model; hydraulic cylinder friction; parameter identification

## 0 引言

要建立准确的液压挖掘机实时仿真系统模型,必须考虑摩擦力对动力学系统特性的影响。在挖掘机上,摩擦存在于液压缸、阀芯、油管和有相对运动的关节角等地方。国内外学者的仿真和实验研究表明,存在于挖掘机液压缸内的摩擦是动力学系统特性的主要影响因素<sup>[1-3]</sup>。比较而言,关节角等处的摩擦对系统的影响可以忽略不计。在实时仿真系统模型中,液压缸是发生机械液压耦合作用的地方,其模型的准确程度很大程度上影响了系统模型的准确程度。因此,对液压缸摩擦力的研究具有重要的现实意义。

摩擦力的大小与液压油类型、液压缸负载、密封件表面状态及活塞缸筒润滑条件等诸多因素有关。液压缸摩擦力的参数一般可以在拉力实验台上通过实验测得。但拉力实验台上的测试过程无法完全模拟液压缸在挖掘机上的实际工作状态,测量结果会带来比较大的偏差。文献[2,4]在静力学平衡条件下进行挖掘机臂的动力学模型辨

识,没有考虑液压缸内存在的静摩擦力对动力学参数辨识的影响。文献[3]采用静力学方法来确定液压缸的库仑静摩擦力,并以此来代替其运动时产生的摩擦力。由于静摩擦力方向难以确定,而且其大小处于零到最大静摩擦力的整个域内,因此结果具有不确定性,而且用静摩擦力来近似表示滑动摩擦力,必然会带来误差。本文采用动力学和系统辨识的方法,建立了与摩擦力无关的挖掘机臂的数学模型,通过实验得到了挖掘机臂的动力学参数,并在此基础上,进一步得到了液压缸的摩擦力参数。辨识得到的参数为进一步研究挖掘机的动力学特性和建立准确的实时仿真系统模型奠定了基础。

## 1 考虑摩擦力的挖掘机臂数学模型

### 1.1 挖掘机动臂动力学模型

以动臂转动支点  $B$  为原点,过  $B$  点的水平线为  $x$  轴、竖直线为  $y$  轴,建立如图 1 所示的坐标系。 $B$  为臂的转动支点, $A$ 、 $C$  为液压缸的两端点, $G$  为臂的重心, $\beta$  为重心  $G$  关于臂的位置参数,在动臂运动过程中,只要保持斗杆和铲斗液压缸的锁闭状态, $\beta$  值是不变的。基于坐标系建立挖掘

收稿日期:2009—07—13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875233);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2009AA044402)

机臂绕 B 点转动的动力学模型:

$$|M| = |M_g| + J_B \alpha \quad (1)$$

式中,  $M$  为液压缸产生的驱动力矩;  $M_g$  为臂的自重产生的转动力矩;  $J_B$  为挖掘机臂相对 B 点的转动惯量;  $\alpha$  为臂关于 B 点转动的角加速度。

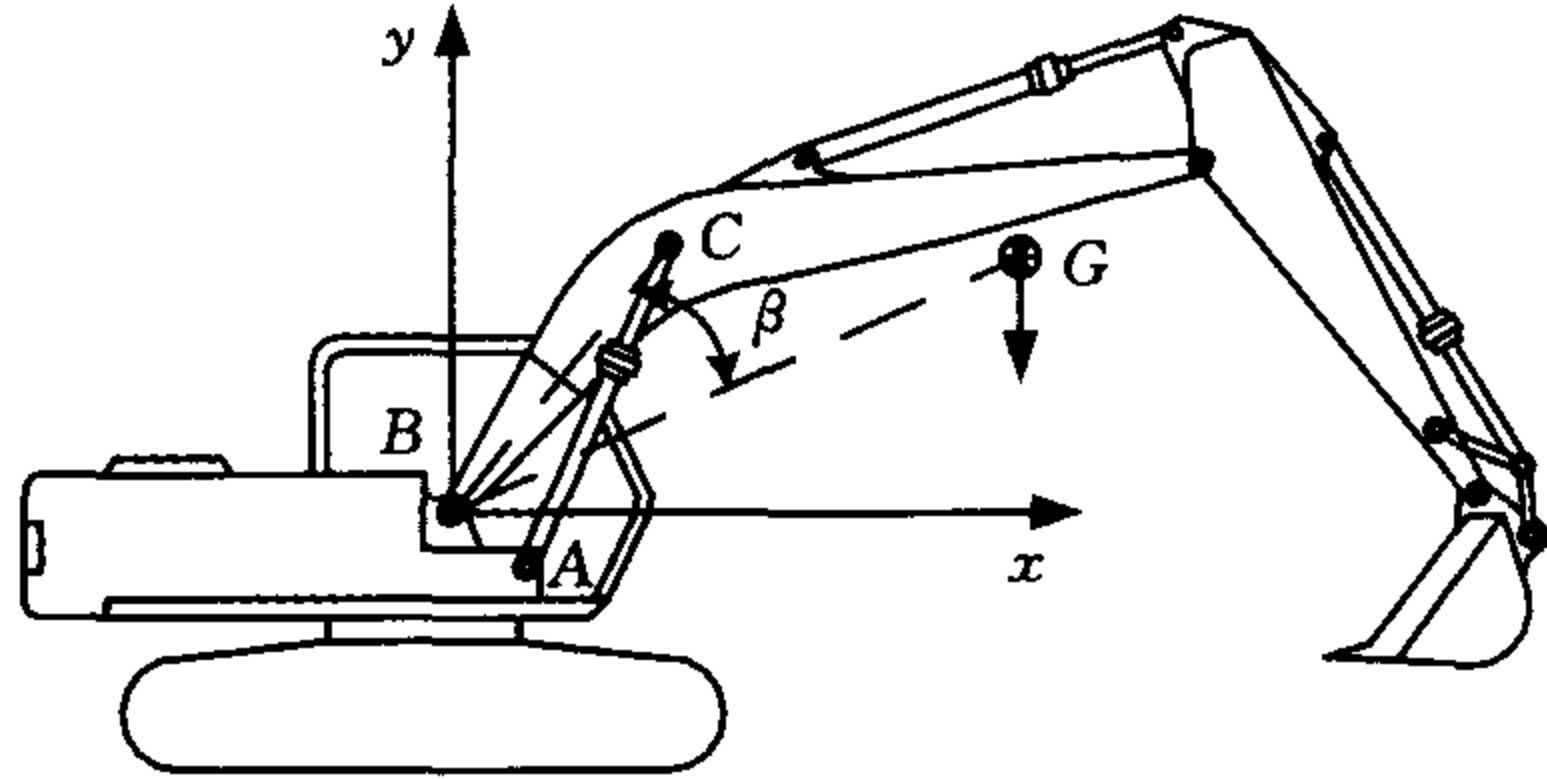


图1 挖掘机臂动力学坐标系

设  $\theta = \angle CBx$ ,  $\beta = \angle CBG$ , A 点坐标为  $(x_A, y_A)$ , 臂重为  $G$ , 液压缸驱动力为  $F$ , 则

$$|M| = |l_{BC} \times F| = \frac{|F| \cdot |l_{BC}|}{|l_{AC}|} (x_A \sin\theta - y_A \cos\theta) \quad (2)$$

$$|M_g| = |l_{BG} \times G| = |G| \cdot |l_{BG}| \cos(\theta - \beta) \quad (3)$$

### 1.2 考虑摩擦力的臂动力学模型

如图 2 所示, 对动臂液压缸进行受力分析, 得到其作用于等效负载的驱动力为

$$|F| = p_1 S_1 - p_2 S_2 - f \quad (4)$$

式中,  $p_1$ 、 $p_2$  分别为液压缸无杆腔压力和有杆腔压力;  $S_1$ 、 $S_2$  分别为液压缸无杆腔面积和有杆腔面积;  $f$  为液压缸的摩擦力。

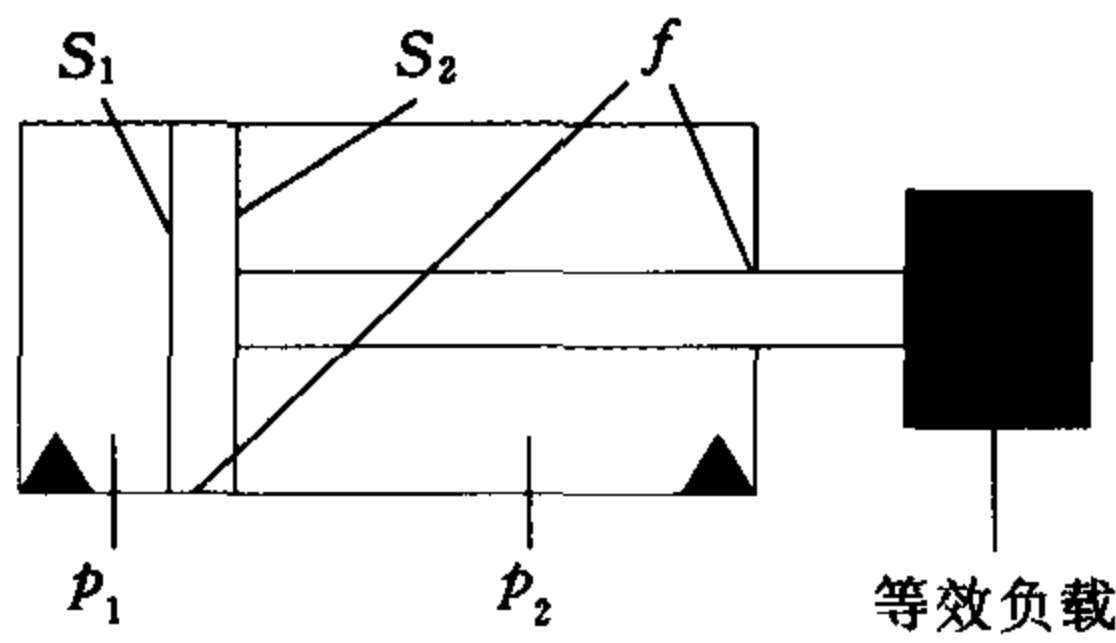


图2 液压缸受力分析示意图

如记  $L(\theta) = \frac{|l_{BC}|}{|l_{AC}|} (x_A \sin\theta - y_A \cos\theta)$ ,  $T =$

$|G| \cdot |l_{BG}|$ ,  $F_h = p_1 S_1 - p_2 S_2$ , 则将式(1)进一步整理, 可得到臂的动力学模型:

$$(F_h - f)L(\theta) = T \cos(\theta - \beta) + J_B \alpha \quad (5)$$

## 2 挖掘机臂结构参数辨识模型

### 2.1 臂结构参数辨识条件

从前述分析可知, 要对摩擦力参数进行辨识, 需要获得挖掘机臂的自重力矩和转动惯量两个结构参数。由之前建立的臂动力学模型式(5)可知, 当液压缸在稳定低速 ( $v \leq 0.01\text{m/s}$ ) 条件下运动时, 认为此时液压缸速度是恒定的, 对挖掘机臂的角加速度进行分析可知:

$$\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{v^2}{(|l_{AB}| \cdot |l_{BC}|)^2}$$

$$\frac{|l_{AB}| \cdot |l_{BC}| \sin^2 \angle ABC - |l_{AC}|^2 \cos \angle ABC}{\sin^3 \angle ABC} \quad (6)$$

当  $v = 0.01\text{m/s}$ ,  $|l_{AC}| \in (a, b)$ , 其中  $a$  和  $b$  为选定的液压缸的缩回和伸出长度范围, 通过 MATLAB 仿真得到液压缸匀速运动时, 挖掘机臂的角加速度变化情况如图 3 所示。从仿真结果可以看出, 角加速度  $|\alpha| \leq 0.001\text{rad/s}^2$ 。由于  $J_B$  的数量级为  $10^4$ , 因此, 在稳定低速运动条件下, 可以忽略角加速度项的影响, 这样就可将式(5)进一步简化为

$$(F_h - f)L(\theta) = T \cos(\theta - \beta)$$

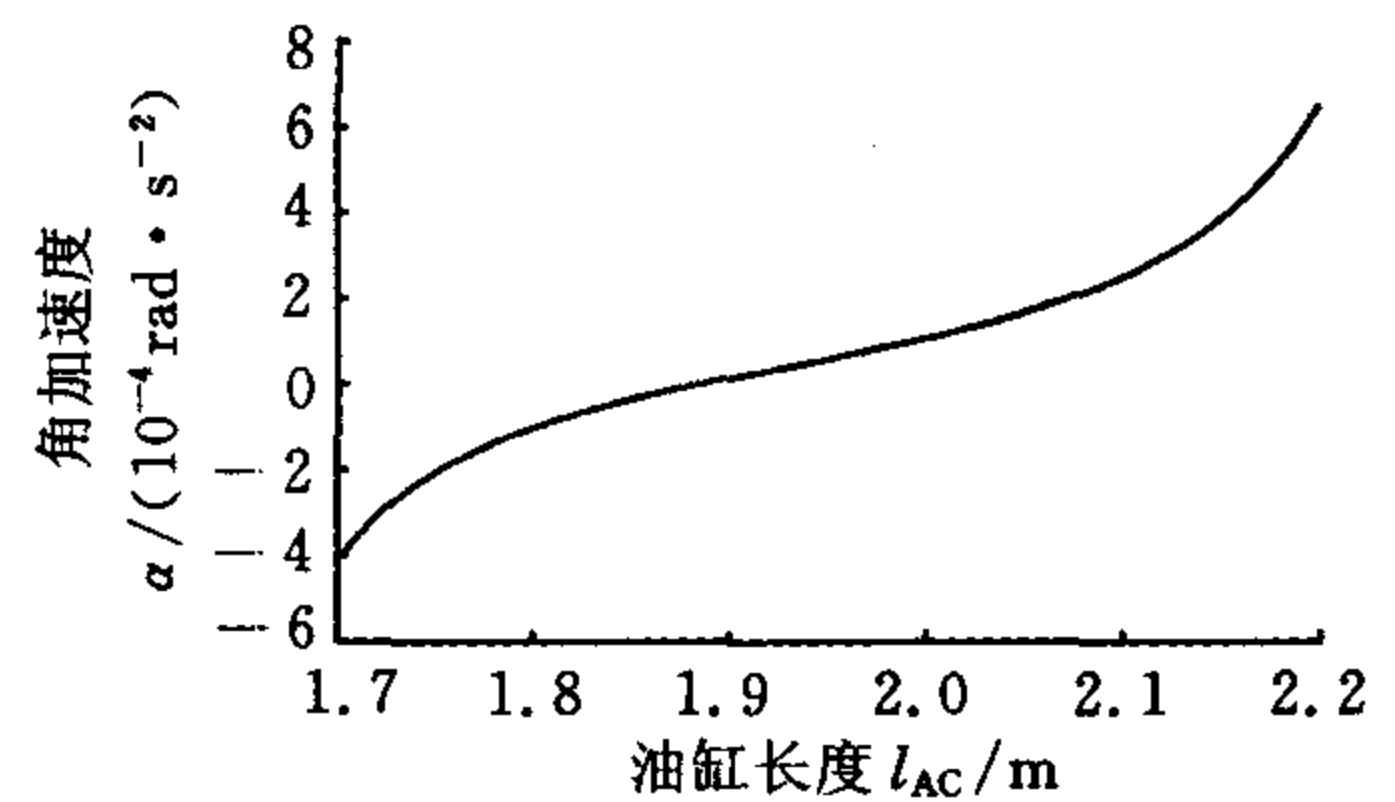


图3 挖掘机臂角加速度变化曲线

### 2.2 摩擦力和结构辨识模型

根据经典摩擦学理论<sup>[5-6]</sup>, 可以将液压缸摩擦力模型表示为

$$f = f_c \text{sgn}(v) + f_v v \quad (7)$$

式中,  $f_c$  为液压缸库仑摩擦力;  $f_v$  为液压缸黏性摩擦因数;  $v$  为液压缸速度。

由式(4)和  $F_h = p_1 S_1 - p_2 S_2$  可知: 液压缸以低速  $v_1$  伸出时, 驱动力  $F_1 = F_{h1} - |f_1|$ ; 以低速  $v_2$  缩回时, 驱动力  $F_2 = F_{h2} + |f_2|$ 。由式(7)可知: 当  $v_1 = -v_2$  时,  $f_1 + f_2 = 0$ 。利用摩擦力模型的这一特点, 得到与摩擦力无关的臂动力学方程如下:

$$\frac{F_1 + F_2}{2} L(\theta) = \frac{F_{h1} + F_{h2}}{2} L(\theta) = T \cos(\theta - \beta) \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 利用液压缸稳定低速条件下的小角加速度特性来辨识挖掘机臂的动力学参数, 可以避免文献[2-4]中由于静摩擦力的方向和大小带来的不确定性而带来的误差。

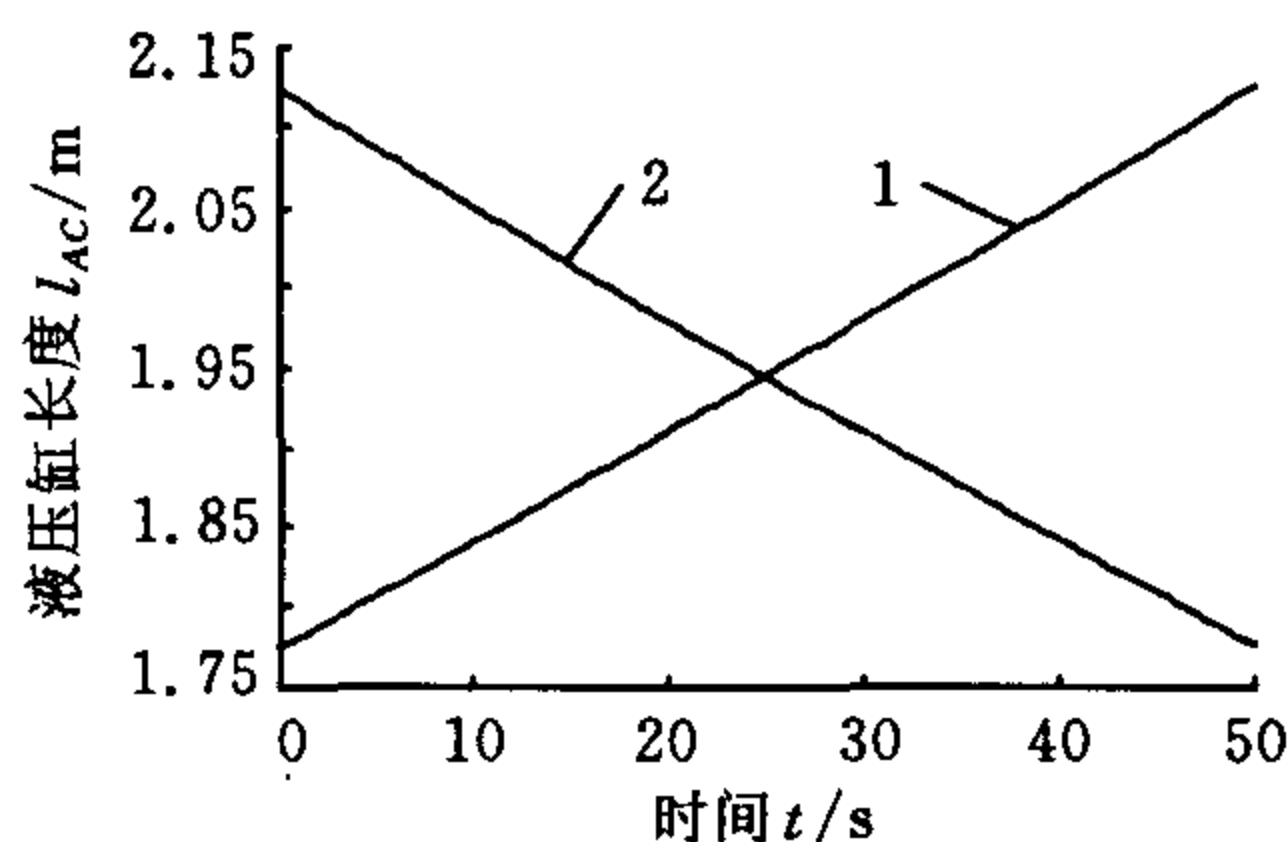
## 3 实验与分析

实验中所用的挖掘机为自重 7t 的挖掘机, 首先对已有的挖掘机进行改造: 在动臂液压缸的两腔安装用于测量两腔压力的压力传感器; 同时在臂上安装拉绳式位移传感器, 用于测量液压缸的位移和速度; 利用 dSPACE DS1103 实时采集实验过程中液压缸位移和两腔的压力数据<sup>[7]</sup>。

### 3.1 臂动力学参数 T 和 beta 的离线辨识

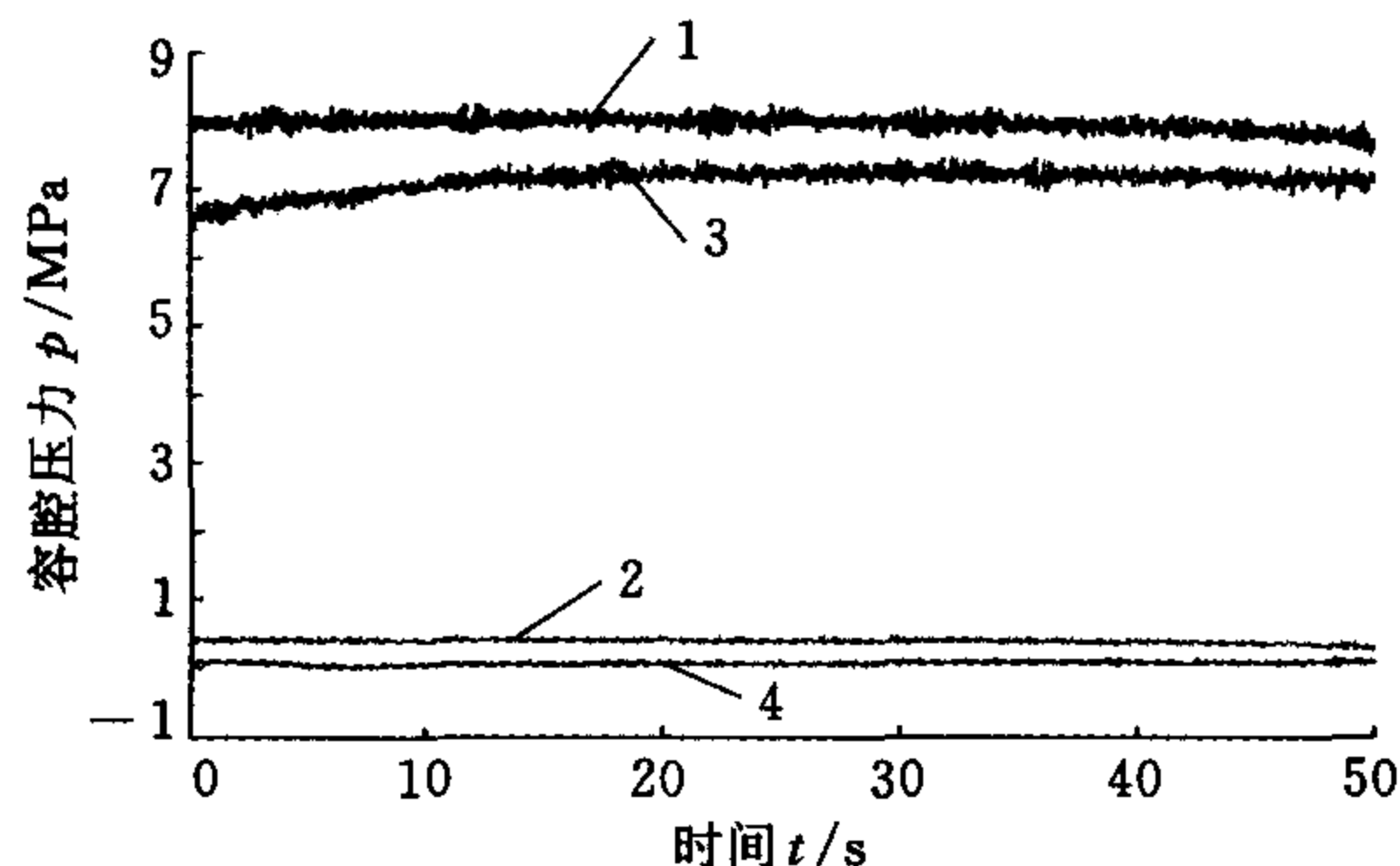
根据式(6)和式(7)的分析, 需要保证液压缸

速度不大于 0.01m/s,并且液压缸的伸出速度和缩回速度大小应尽可能相等。实验中得到的液压缸长度变化曲线如图 4 所示,对实验数据进行分析可知:整个行程速度波动小,可以将过程视为匀速运动;液压缸速度  $v \approx 0.0075\text{m/s}$ ,满足速度不大于 0.01m/s 的要求;液压缸伸出速度和缩回速度相对误差在 5% 以内,满足两者数值近似相等的要求。



1. 伸出时,液压缸长度曲线 2. 缩回时,液压缸长度曲线  
图 4 低速运动时液压缸长度变化曲线

液压缸低速伸出和缩回时,两腔压力的变化情况如图 5 所示。当液压缸伸出时,挖掘机臂被抬升,重力相对于支点的力矩减小,因此液压缸无杆腔压力减小,此时有杆腔压力大于油箱压力;反之,液压缸缩回时,挖掘机臂被放下,无杆腔压力增大,有杆腔压力较油箱压力小。

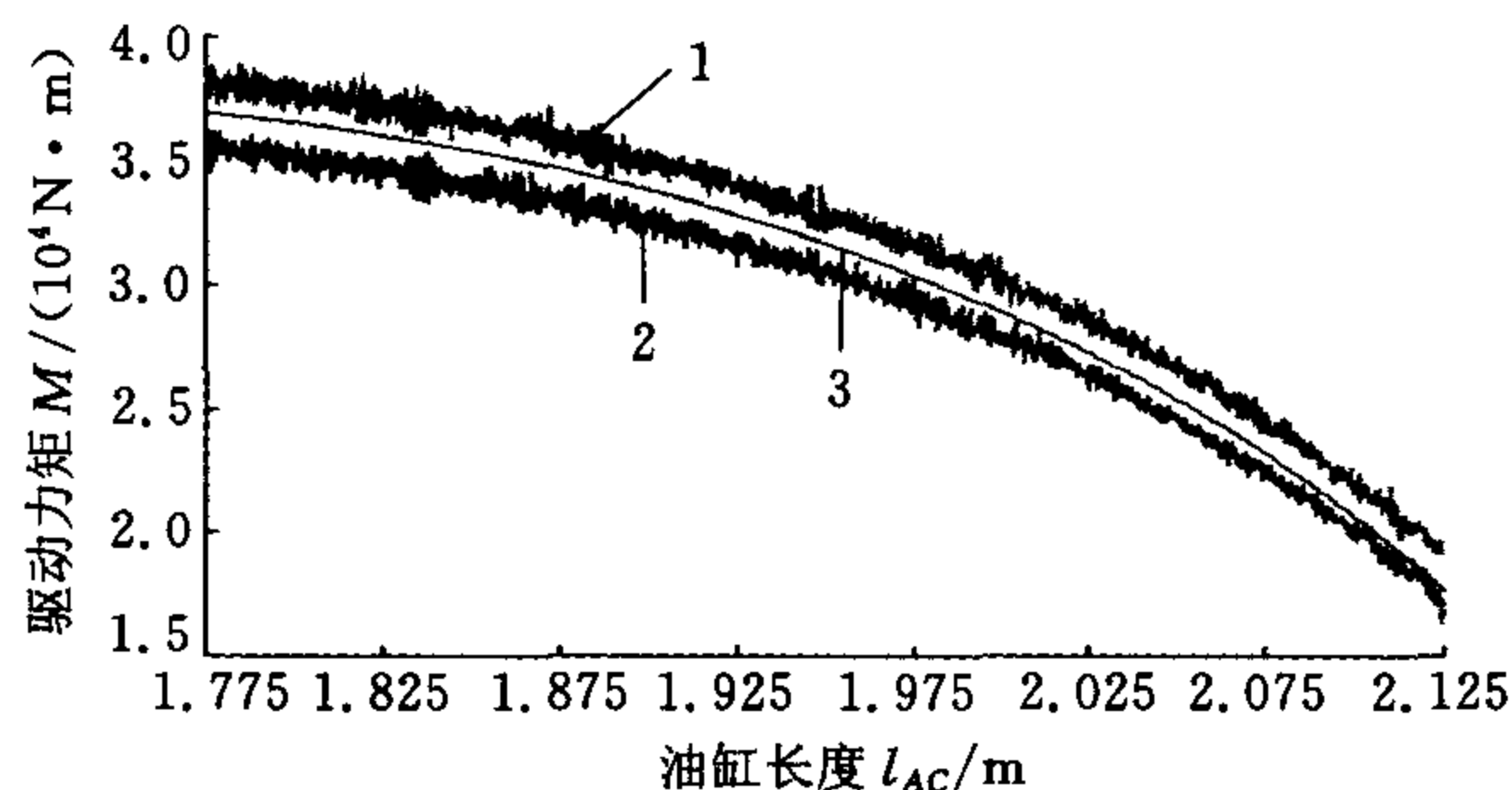


1. 液压缸伸出时,无杆腔压力曲线 2. 液压缸伸出时,有杆腔压力曲线 3. 液压缸缩回时,无杆腔压力曲线 4. 液压缸缩回时,有杆腔压力曲线  
图 5 低速运动时容腔压力变化曲线

实验过程中驱动力矩的变化曲线如图 6 所示。根据式(8)在 MATLAB 中建立辨识模型,利用最小二乘法对 dSPACE 采集的数据辨识得到挖掘机臂的结构参数  $T = 37\ 466\ \text{N} \cdot \text{m}$  和  $\beta = 0.56\text{rad}$ 。将参数代入式(8)中,得到模型的仿真结果与实验结果的数据对比如图 6 所示。当液压缸伸出时,摩擦力与驱动力方向相反,此时的驱动力矩还需要克服摩擦力;反之,摩擦力与驱动力方向相同,成为驱动力的一部分。

### 3.2 液压缸摩擦力参数的在线辨识

根据式(5)和式(7)得到摩擦力参数辨识模型



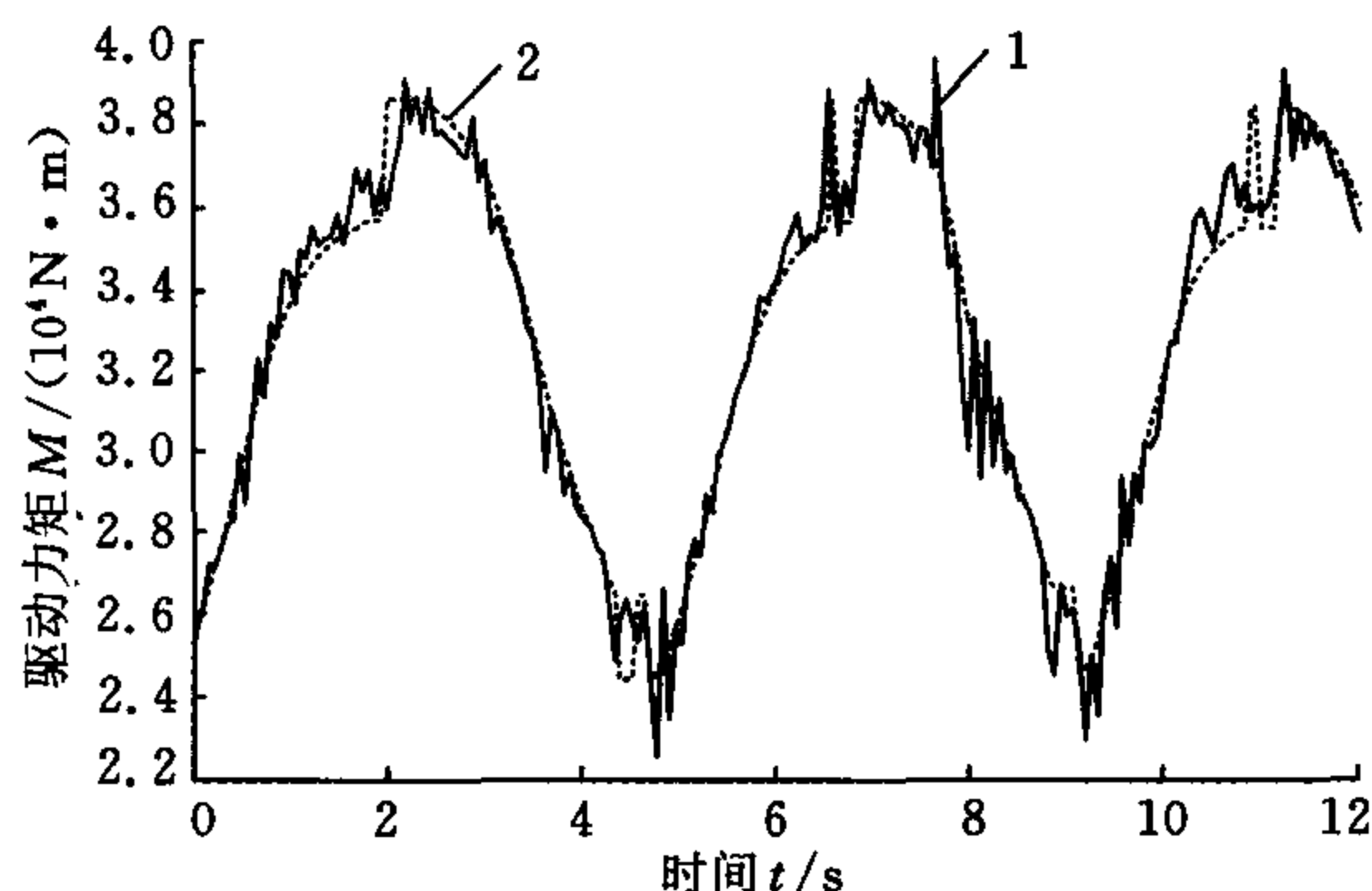
1. 液压缸伸出时的实验曲线 2. 液压缸缩回时的实验曲线  
3. 辨识模型仿真曲线  
图 6 臂结构参数离线辨识实验和仿真曲线

的最小二乘法<sup>[8]</sup>为

$$F_h L(\theta) - T \cos(\theta - \beta) = \begin{bmatrix} L(\theta) \operatorname{sgn}(v) \\ L(\theta) v \\ \alpha(v) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f_c \\ f_v \\ J_B \end{bmatrix} \quad (9)$$

将离线辨识得到的结构参数代入式(9),得到关于摩擦力参数的数学模型。通过 dSPACE 在线实时采集在正常速度下工作的挖掘机臂液压缸的位移和压力,利用最小二乘递推算法,辨识得到液压缸的摩擦力参数及相对支点的转动惯量结果分别为  $f_c = 3009\text{N}$ ,  $f_v = 13\ 413\text{N} \cdot \text{s/m}$  和  $J_B = 23\ 135\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

将辨识结果代入模型中,与另一组正常工作条件下未用于参数辨识的实验结果进行比较,对比曲线如图 7 所示。发现当液压缸出现启动、停止等运动状态突变的情况时,由于缸内压力的突变、液压油的可压缩特性和运动状态突变时液压缸内的润滑条件不理想等原因,导致压力波动较大,液压缸运动不平稳,模型结果仅能表征不稳定过程的平均值。当液压缸稳定运动时,模型结果能与实验结果很好地吻合。



1. 实验曲线 2. 辨识模型仿真曲线  
图 7 辨识模型与实验数据对比

## 4 结束语

液压挖掘机上液压缸的摩擦力是影响其动力学特性的重要因素,是建立挖掘机系统模型过程

(下转第 1105 页)

- (2):14-17.
- [3] Li Qinchuan, Huang Zhen. Type Synthesis of 4-DOF Parallel Manipulators[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Taipei: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003:755-760.
- [4] 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] Chen Wenjia, Zhao Mingyang, Chen Shuhong, et al. A Novel 4-DOF Parallel Manipulator and Its Kinematic Modelling[C]//Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2001:3350-3355.
- [6] 陈文家, 赵明扬, 房立金, 等. 基于四自由度并联机构的数控机床研究[J]. 扬州大学学报, 2001, 4(2): 50-54.
- [7] 陈文家, 陈书宏, 张波. 一种四自由度并联机构及其运动学建模[J]. 机械设计, 2001(10): 6-8.
- [8] Liu Hongjun, Liu Bin, Sun Cuilian. Calibration of a 4-DOF Parallel Manipulator [C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2006:7958-7962.
- [9] Liu Hongjun, Qin Yongfa, Zhao Mingyang. The Reachable Workspace Analysis of a Kind of 4-DOF Parallel Mechanism Based on Constraints[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing. Changsha: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2003:799-803.
- [10] 汪劲松, 刘辛军, 段广洪, 等. 两维移动两维转动四轴并联机床结构: 中国, 00105936[P]. 2000-09-27.
- [11] 伞红军, 钟诗胜, 王知行. 新型 2-TPR/2-TPS 空间四自由度机构并联机构[J]. 机械工程学报, 2008, 36(11): 298-303.
- [12] 于靖军, 刘辛军, 丁希仑, 等. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] Herve J M. The Lie Group of Rigid body Displacements, a Fundamental Tool for Mechanism Design [J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(5): 719 - 730.
- [14] Lee C C, Herve J M. Translational Parallel Manipulators with Doubly Planar Limbs[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(2): 433-455.
- [15] Zeng Daxing, Huang Zhen, Lu Wenjuan. A family of Novel 2 DOF Rotational Decoupled Parallel Mechanisms[C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, 2007:2478-2483. (编辑 马尧发)

作者简介: 范彩霞, 女, 1976 年生. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院博士研究生, 焦作大学机电工程学院讲师. 主要研究方向为机构学与并联机器人构型设计. 发表论文 7 篇. 刘宏昭, 男, 1954 年生. 西安理工大学机械与精密仪器学院教授、博士研究生导师. 张彦斌, 男, 1974 年生. 河南科技大学建筑工程学院副教授.

(上接第 1100 页)

中需要重点关注的对象。考虑到静摩擦力大小和方向的不确定性给系统辨识带来的偏差, 基于经典摩擦学理论, 提出了一种可避免静摩擦力影响的挖掘机臂动力学参数的辨识方法, 并进行了实验研究, 得到了挖掘机臂的动力学参数和液压缸的摩擦力参数。参数辨识结果与实验结果的对比说明了模型的有效性, 表明本文采用的液压缸摩擦力参数测定方法是可行的。实验得到的参数为后续进一步研究挖掘机动力学性能和建立可靠的实时仿真模型提供了参考依据。

#### 参考文献:

- [1] Shahram T. Identification of Frictional Effects and Structural Dynamics for Improved Control of Hydraulic Manipulators[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1997.
- [2] Shahram T, Lawrence P D, Salcudean S E. Identification of Inertial and Friction Parameters for Excavator Arms[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(5): 966-971.
- [3] 刘静, 甘屹, 潘双夏. 基于虚拟样机的挖掘机器人液压缸内摩擦力确定方法研究[J]. 机械设计, 2008, 25(8): 30-32.
- [4] Zweiri Y H. Identification Schemes for Unmanned Excavator Arm Parameters[J]. International Journal of Automation and Computing, 2008, 5(2): 185-192.
- [5] Brian A H, Pierre D, de Wit C C. A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction[J]. Automatica, 1994, 30(7): 1083-1138.
- [6] 王林鸿, 吴波, 杜润生, 等. 液压缸运动的非线性动态特征[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 12-19.
- [7] dSPACE GmbH. dSPACE Real-time Interface Implementation Guide[M]. Paderborn: dSPACE GmbH, 2004.
- [8] 侯媛彬, 汪梅, 王立琦. 系统辨识及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (编辑 王艳丽)

作者简介: 龚文, 男, 1986 年生. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室硕士研究生. 主要研究方向为机电系统仿真. 王庆丰, 男, 1963 年生. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室教授、博士研究生导师.