

基于 Hammerstein 模型的挖掘臂伺服系统参数辨识

严骏¹, 黎波¹, 郭刚¹, 曾拥华¹, 彭卓², 张梅军¹

(1. 解放军理工大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 总装备部 通用装备保障部, 北京 100720)

摘要: 液压挖掘臂伺服系统是复杂非线性系统, 针对线性模型难以准确反映系统动态的特性, 采用包含静态非线性模块和动态线性模块的 Hammerstein 模型来描述该系统。Hammerstein 模型中的线性模块采用离散自回归模型 (ARX), 非线性模块则采用分段多项式基函数。利用多频率正弦激励与角度输出信号, 采用带遗忘因子的递推最小二乘法实现线性与非线性模块参数的解耦辨识。通过对比实验分析辨识所得 Hammerstein 模型与 ARX 模型, 得 Hammerstein 模型误差比线性模型误差减小约 77%, 结论表明采用 Hammerstein 模型描述挖掘臂伺服系统是有效可行的。

关键词: 机械电子工程; 电液伺服系统; Hammerstein 模型; 递推最小二乘法; 非线性辨识
中图分类号: TP271⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2012)12-1527-06

Parameter Identification of Servo System for Excavator Arm Based on Hammerstein Model

YAN Jun¹, LI Bo¹, GUO Gang¹, ZENG Yong-hua¹, PENG Zhuo², ZHANG Mei-jun¹

(1. College of Field Engineers, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China;
2. The Department of General Equipment Supporting Chief, Equipment Staff, Beijing 100720, China)

Abstract: According to the complex nonlinear properties of hydraulic excavator arm's servo system, a Hammerstein model which contains static nonlinearity and dynamic linearity was adopted to describe the system instead of linear model. The dynamic linear module was described by a discrete Auto-Regressive eXogeneous (ARX) model, and the static nonlinearity module was described by a two-segment polynomial. The forgetting factor recursive least square method was applied to realize decomposition identification of the parameters for both linear and nonlinear module through multi-frequency sinusoidal input and angle output signal. The comparison experiments between the identified Hammerstein model and ARX model indicated that the error of Hammerstein model was reduced by 77%, the results demonstrated that Hammerstein model meets the need for describing the servo system of excavator arm.

Key words: mechatronics engineering; electrohydraulic servo system; Hammerstein model; recursive least square method; nonlinear identification

0 引言

为提高工程装备自动化、精确化水平,提升作业能力,给某型液压挖掘机加装了伺服控制系统^[1]。为设计精确的伺服控制器,需对改装后的挖掘机工

作装置(文中统称挖掘臂)伺服系统进行建模分析。挖掘臂的伺服系统主要包括先导比例阀和阀控非对称液压缸,以往人们大都采用简化线性模型来描述该系统^[1-2],但实际系统存在死区、饱和、间隙、非线性摩擦及正反方向运动时静、动态特性不对称等复

杂非线性现象^[3-6]。

为准确描述挖掘臂伺服系统动态特性,提高控制器的精度,采用了能有效描述包含死区、间隙、摩擦等非线性特性的 Hammerstein 模型来描述系统。Hammerstein 模型包含动态线性模块和静态非线性模块,线性模块采用离散自回归模型 (ARX)。针对阀控非对称液压缸正反方向静态特性不对称的特点,非线性模块采用分段多项式基函数来描述。Hammerstein 模型只需系统输入和输出数据就能实现线性和非线性部分的解耦辨识^[7-9],无需附加中间变量测试传感器。采用多组合正弦激励信号,利用递推最小二乘法实现线性模块与非线性模块参数的解耦辨识,并将辨识所得 Hammerstein 模型与不包含非线性部分的 ARX 模型进行对比分析。

1 挖掘臂伺服系统模型分析

1.1 系统概况

图 1 所示为实验室电控挖掘机示意图。其中,挖掘臂的伺服系统包含先导电液比例阀、阀控液压缸、倾角传感器及采集控制器等。系统框图如图 2 所示。



图 1 电液控制挖掘机

Fig. 1 Electro-hydraulic controlled excavator

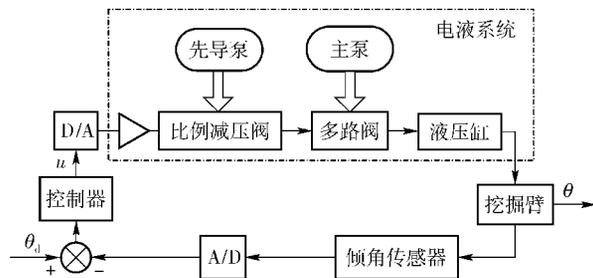


图 2 挖掘臂伺服系统框图

Fig. 2 Block diagram of excavator arm's servo system

1.2 电液系统简化线性模型

如图 2 所示,先导比例减压阀接受控制器的输

出信号,驱动主泵多路阀产生相应开度。该环节可用一阶线性微分方程描述^[2]

$$\tau_v \dot{x}_v + x_v = K_0 u, \quad (1)$$

式中: τ_v 为时间常数; x_v 为主阀芯位移; K_0 为比例阀增益; u 为系统输入。

挖掘臂伺服系统主回路为阀控非对称液压缸,如图 3 所示。其中,滑阀流量方程为

$$Q_1 = C_d w x_v \sqrt{2\Delta p_1 / \rho}, \quad (2)$$

$$Q_2 = C_d w x_v \sqrt{2\Delta p_2 / \rho}, \quad (3)$$

式中: Q_1 、 Q_2 和 Δp_1 、 Δp_2 分别为有杆腔、无杆腔流量和压差; C_d 为流量系数; w 阀开口梯度。

在局部范围内设 Δp_1 恒定,可将(2)式简化为

$$Q_1 = K_1 x_v, u > 0, \quad (4)$$

式中 $K_1 = C_d w \sqrt{2\Delta p_1 / \rho}$ 。

通常情况下忽略液压缸的泄漏,当 $u > 0$,即无杆腔进油时,得流量连续方程为

$$Q_1 = A_1 \dot{y} + V_1 \dot{p}_1 / \beta_e, \quad (5)$$

$$Q_2 = A_2 \dot{y} - V_2 \dot{p}_2 / \beta_e, \quad (6)$$

式中: A_1 、 A_2 分别为有杆腔、无杆腔活塞面积; V_1 、 V_2 分别为进、出油腔等效体积; β_e 为有效体积模量; y 为活塞位移。

设系统无负载,则液压缸的力平衡方程为

$$A_1 p_1 - A_2 p_2 = M \ddot{y} + B_p \dot{y}, \quad (7)$$

式中: M 为活塞杆等效质量; B_p 为活塞粘性阻尼系数。

令状态变量 $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$, $x_3 = p_1$, $x_4 = p_2$, $x_5 = x_v$ 。联立方程(1)式~(7)式,可得输入 $u > 0$ 时电液系统线性状态空间方程如下,其模型框图如图 4 所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = \frac{A_1 x_3}{M} - \frac{A_2 x_4}{M} - \frac{B_p x_2}{M}; \\ \dot{x}_3 = -\frac{\beta_e A_1 x_2}{V_1} + \frac{\beta_e K_1 x_5}{V_1} x_5; \\ \dot{x}_4 = \frac{\beta_e A_2 x_2}{V_2} - \frac{\beta_e K_1 x_5}{V_2} x_5; \\ \dot{x}_5 = \frac{K_0}{\tau_v} u - \frac{x_5}{\tau_v}. \end{cases} \quad (8)$$

1.3 系统非线性模型分析

实际挖掘臂伺服系统存在多种非线性效应,如比例阀死区、饱和、滑阀死区、关节间隙及液压缸的非线性摩擦等,图 5 列出了系统两种典型非线性特性^[3-6]。液压缸伸长度通过几何关系转化为角

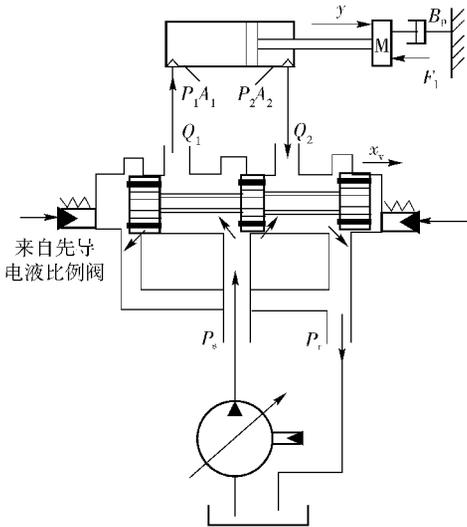


图 3 阀控液压缸

Fig. 3 Valve controlled hydraulic cylinder

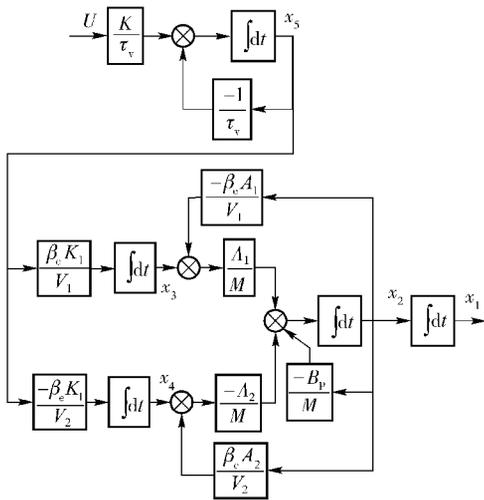


图 4 电液系统线性模型结构

Fig. 4 Linear model of the electro-hydraulic system

度输出。以斗杆关节为例,如图 6 所示, \$T\$ 为等效关节力矩, \$r\$ 为质心到关节的距离。为简化建模, 设 \$D\$、\$O\$、\$X\$ 三点一线, 且与水平面平行, 得如下关系

$$\theta = 180^\circ - \angle AOD - \angle COB - \arccos \left(\frac{AO^2 + BO^2 - y^2}{2AO \cdot BO} \right), \quad (9)$$

$$T = (I + mr^2) \ddot{\theta} + mgr \cos \theta, \quad (10)$$

$$T \dot{\theta} = F_1 \dot{y}. \quad (11)$$

将 \$\theta\$、\$\dot{\theta}\$、\$\ddot{\theta}\$ 都表示为液压缸伸长度的关系式:

\$\theta(y)\$、\$\dot{\theta}(y, \dot{y})\$、\$\ddot{\theta}(y, \dot{y}, \ddot{y})\$。代入(11)式可得液压缸的等效非线性负载力

$$F_1 = J^{-1}(y, \dot{y}) T(y, \dot{y}, \ddot{y}), \quad (12)$$

式中 \$J(y, \dot{y}) = \dot{y} / \dot{\theta}\$。

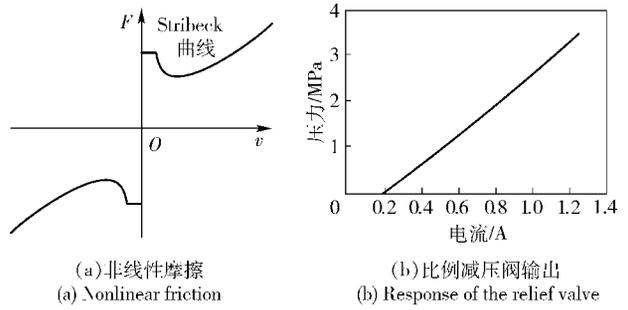


图 5 伺服系统非线性特征

Fig. 5 Nonlinear character of the servo system

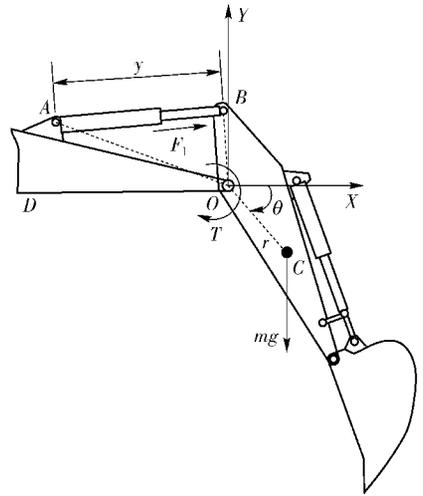


图 6 斗杆关节受力示意图

Fig. 6 Force on the dipper joint

将非线性模块加入上述线性模型中可得图 7 所示系统非线性模型框图。从图 7 可见, 系统仍存在着死区、间隙、摩擦等难以精确建模的非线性特性, 并且系统的线性部分与非线性部分呈交错状(多层 Sandwich 模型)。要直接辨识图 7 所示的系统参数需测量多个状态信息, 这会增加系统成本, 引入更多测量噪声, 降低辨识精度。所以, 有必要引入一种结构简单、易于辨识、且能准确表达系统非线性特性的模型辨识方法。

2 系统 Hammerstein 模型参数辨识

针对图 7 所示的多层 Sandwich 模型辨识难的问题, 采用了 Hammerstein 模型来近似原系统。该模型的参数辨识仅需系统输入和输出信号^[7], 可有效减少测量噪声, 提高辨识精度。Hammerstein 模型由一个静态非线性环节和动态线性环节串联构成, 能有效描述大部分非线性系统^[8]。其结构如图 8 所示, 图中: \$u(k)\$、\$y(k)\$、\$x(k)\$ 和 \$v(k)\$ 分别为辨识输

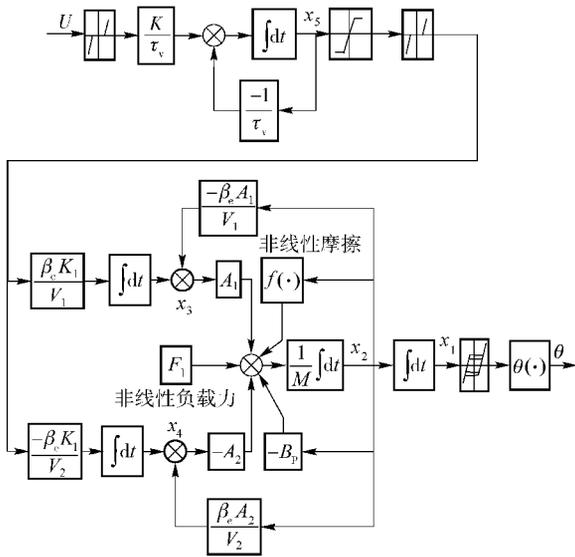


图 7 系统非线性模型框图

Fig. 7 Schematic diagram of nonlinear model

入、系统输出、中间状态和噪声序列, $N(\cdot)$ 、 $G(z)$ 分别为非线性和线性模块。

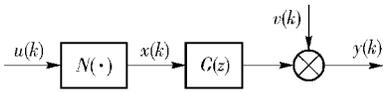


图 8 Hammerstein 模型结构

Fig. 8 Schematic diagram of Hammerstein model

Hammerstein 模型中的线性模块采用 ARX 模型来表示为

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-n_k}B(z^{-1})x(k) + v(k), \quad (13)$$

式中: $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$; $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b}$; n_k 为系统延迟; $a_i (i = 1, 2, \dots, n_a)$ 、 $b_j (j = 0, 1, \dots, n_b)$ 为线性系数。

考虑到伺服系统中包含阀控非对称液压缸模块,表现出非对称静、动态特性^[3-4], Hammerstein 模型中的非线性环节采用分段多项式来描述^[8-9]。非线性部分函数关系为

$$x(k) = \begin{cases} f(u(k)) = \sum_{l=0}^r f_l u^l(k), & u(k) \geq 0; \\ g(u(k)) = \sum_{l=0}^r g_l u^l(k), & u(k) < 0. \end{cases} \quad (14)$$

式中: f_l 、 g_l 为非线性系数; r 为多项式阶数。

定义分段函数

$$h(u) = \begin{cases} 0, & u \geq 0; \\ 1, & u < 0. \end{cases} \quad (15)$$

中间状态 $x(t)$ 可表示为

$$x(k) = f(u(k)) + (g(u(k)) - f(u(k)))h(u(k)) = \sum_{l=0}^r f_l u^l(k) + \sum_{l=0}^r (g_l - f_l) u^l(k) h(u(k)). \quad (16)$$

不失一般性, 设 $b_0 = 1$, 将 (16) 式代入 (13) 式, 则系统输出可表示为

$$y(k) = \sum_{j=1}^{n_b} b_j x(k - n_k - j) - \sum_{i=1}^{n_a} a_i y(k - i) + \sum_{l=0}^r f_l u^l(k - n_k) + \sum_{l=0}^r (p_l) u^l(k - n_k) h(u(k - n_k)), \quad (17)$$

式中 $p_l = g_l - f_l$. 将 (17) 式写成线性回归形式为

$$y(k) = \Phi^T(k)\theta + v(k), \quad (18)$$

式中:

$$\Phi^T = [1, u(k - n_k), \dots, u^r(k - n_k), h(u(k - n_k)) u(k - n_k) h(u(k - n_k)), \dots, u^r(k - n_k) h(u(k - n_k)), x(k - 1 - n_k), \dots, x(k - n_b - n_k), -y(k - 1), \dots, -y(k - n_a)]; \quad (19)$$

$$\theta = [f_0, f_1, \dots, f_r, p_0, p_1, \dots, p_r, b_1, \dots, b_{n_b}, a_1, \dots, a_{n_a}]^T. \quad (20)$$

Φ^T 中包含的中间状态 $x(k)$ 不能直接测量, 需用 (12) 式在迭代过程中进行估计。

$$x(k) = \sum_{l=0}^r f_l u^l(k) + \sum_{l=0}^r p_l u^l(k) h(u(k)). \quad (21)$$

基于 Hammerstein 模型的最小二乘格式可简化为

$$y(k) = \Phi^T(k)\theta. \quad (22)$$

(22) 式中的中间状态 $x(k)$ 是在迭代过程中通过 (21) 式估计得到, 所以 $\hat{\Phi}(k) = \Phi(k, \hat{\theta})$. 采用带遗忘因子的递推最小二乘法^[9] 辨识未知参数, 采用如下估计准则,

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{k=1}^n [y(k) - \hat{\Phi}^T(k)\theta]. \quad (23)$$

可得系统参数递推估计算法^[9] 如下:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\hat{\Phi}(k)[y(k) - \hat{\Phi}^T(k)\hat{\theta}(k-1)]}{\lambda + \hat{\Phi}^T(k)P(k-1)\hat{\Phi}(k)}, \quad (24)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \left[P(k-1) - \frac{P(k-1)\hat{\Phi}(k)\hat{\Phi}^T(k)P(k-1)}{\lambda + \hat{\Phi}^T(k)P(k-1)\hat{\Phi}(k)} \right], \quad (25)$$

$$\hat{x}(k) = \sum_{l=0}^r \hat{f}_l(k-1) u^l(k) +$$

$$\sum_{l=0}^r \hat{p}_l(k-1)u^l(k)h(u(k)), \quad (26)$$

$$\hat{\Phi}(k) = [1, u(k-n_k), \dots, u^r(k-n_k), h(u(k-n_k)), u(k-n_k)h(u(k-n_k)), \dots, u^r(k-n_k)h(u(k-n_k)), \hat{x}(k-n_k-1), \dots, \hat{x}(k-n_k-n_b), -y(k-1), \dots, -y(k-n_a)]^T, \quad (27)$$

式中:初值 $P(0) = \mu I, 0 < \mu < \infty; \lambda \leq 1$ 为遗忘因子。

3 实验结果分析

辨识实验中,系统采样周期设为 0.05 s,采用低幅值组合正弦激励信号(图 9(a)所示),得到系统多次换向的低速稳定输出信号(图 9(b)所示角度输出已归整为 0°初始角)。从图 9 中可见当激励信号在 0 附近时,因死区特性,输出基本维持不变;输入为正弦对称信号时,而输出呈现上升趋势,即正反方向响应特性不对称。

取 Hammerstein 模型的线性阶次 $n_a = 3, n_b = 2$,取非线性部分的多项式阶次 $r = 3$,取 $n_k = 10$ 即 0.5 s 延迟。通过实测的系统输入、输出值,利用上述带遗忘因子的递推最小二乘法,根据文献[10]中关于递推算法的收敛性分析,取 $P(0) = 10^6 I, x(0) = u(0) = 0, \lambda = 0.99$,辨识得系统 Hammerstein 模型和不含非线性模块的 ARX 模型参数如表 1、2 所示。

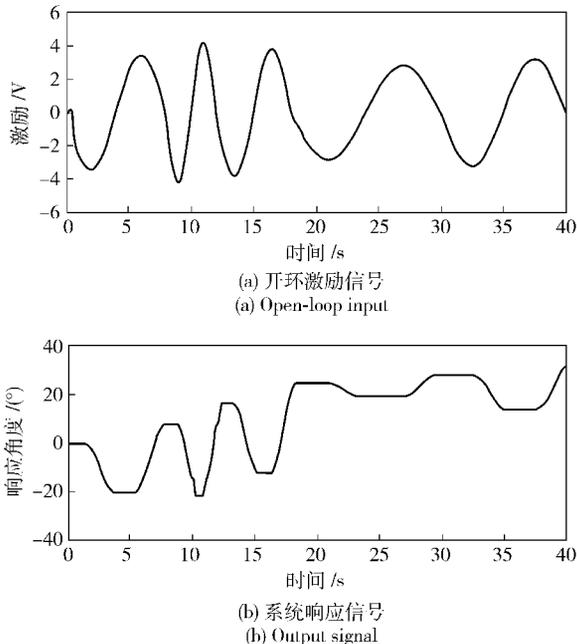


图 9 辨识实验输入与输出信号

Fig. 9 Input and output single of the identification experiment

表 1 Hammerstein 模型参数估计值

Tab. 1 Identified parameters of Hammerstein model

参数	估计值	参数	估计值
a_1	-0.642 7	b_0	1
a_2	-0.327 8	b_1	$-4.616 0 \times 10^{-4}$
a_3	-0.031 1	b_2	$6.935 9 \times 10^{-4}$
f_0	$-2.994 4 \times 10^{-4}$	p_0	0.002 0
f_1	$7.084 8 \times 10^{-4}$	p_1	$4.297 3 \times 10^{-4}$
f_2	$-6.494 6 \times 10^{-6}$	p_2	$1.432 4 \times 10^{-5}$
f_3	$1.913 8 \times 10^{-8}$	p_3	$9.751 2 \times 10^{-11}$

表 2 ARX 模型参数估计值

Tab. 2 Identified parameters of ARX model

参数	估计值	参数	估计值
a_1	-0.653 3	b_0	-0.020 8
a_2	-0.322 9	b_1	0.037 3
a_3	-0.023 7	b_2	-0.016 0

将辨识所得系统模型与实际系统进行对比分析,并进行伺服跟踪实验,得如图 10 所示结果,可见

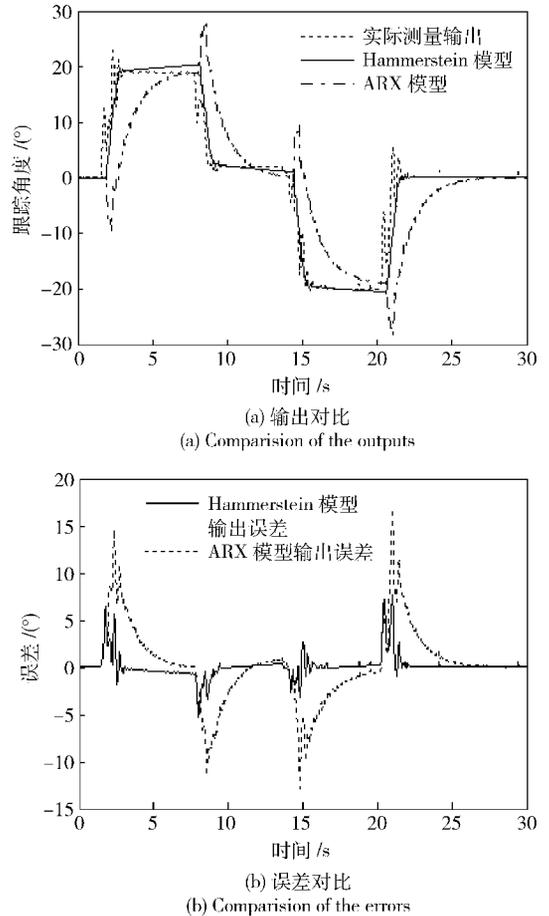


图 10 辨识模型对比结果

Fig. 10 Comparisons of the identified model

辨识所得 Hammerstein 模型比 ARX 模型具有更好的逼近精度。表 3 为辨识模型跟踪误差均方根值,可见 Hammerstein 模型误差比 ARX 模型减小约 77%,能更精确地表达挖掘臂伺服系统动态特性。

表 3 辨识模型跟踪误差均方根值

Tab. 3 RMSE of the identified model

RMSE	模型类型	
	Hammerstein	ARX
$\delta/(\circ)$	1.171 6	5.031 5

4 结论

在建立挖掘臂伺服系统简化线性模型基础上,分析了系统的复杂非线性特性。针对系统中存在难以精确建模的复杂非线性特性,采用带分段多项式基函数非线性的 Hammerstein 模型描述该系统,并通过带遗忘因子的递推最小二乘法辨识系统模型参数。对比实验表明,采用 Hammerstein 模型比线性的 ARX 模型辨识误差减少约 77%,能更精确地描述挖掘臂伺服系统动态特性。

采用最小二乘法辨识系统 Hammerstein 模型仅需系统输入与输出信息,在辨识过程中能获得系统中间状态信息 $x(k)$,可用于预报系统故障。辨识所得结论为电控挖掘机自适应控制提供了参考模型,可通过模型预测控制实现挖掘臂轨迹的精确跟踪。所采用的方法为同类工程装备伺服控制系统的建模与辨识提供了参考。

参考文献 (References)

- [1] Yan Jun, Li Bo, Tu Qun-zhang, et al. Automatization of excavator and study of its autocontrol [C] //Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2011: 604 - 609.
- [2] He Qing-hua, Hao Peng, Zhang Da-qing, Modeling and parameter estimation for hydraulic system of excavator's arm[J]. Journal of Central South University of Technology: English Edition, 2008, 15: 382 - 386.
- [3] 李洪人,王栋梁,李春萍. 非对称缸电液伺服系统的静态特性分析[J]. 机械工程学报,2003,39(2): 18 - 22.
LI Hong-ren, WANG Dong-liang, LI Chun-ping. Static property analysis of electro-hydraulic single rod cylinder servo systems[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(2): 18 - 22. (in Chinese)
- [4] 杨军宏,尹自强,李圣怡. 阀控非对称缸的非线性建模及其反馈线性化[J]. 机械工程学报,2006, 42(5): 203 - 207.
YANG Jun-hong, YIN Zi-qiang, LI Sheng-yi. Nonlinear modeling and feedback linearization of valve-controlled asymmetrical cylinder [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 203 - 207. (in Chinese)
- [5] 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.
WANG Lin-hong, WU Bo, DU Run-sheng, et al. Nonlinear dynamic characteristics of moving hydraulic cylinder [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 12 - 19. (in Chinese)
- [6] Shahram T. Identification of frictional effects and structural dynamics for improved control of hydraulic manipulators [D]. Vancouver: University of British Columbia, 1997.
- [7] 刘栋,陶涛,梅雪松. 伺服系统 Hammerstein 非线性模型及参数辨识方法研究[J]. 西安交通大学学报,2010, 44(3):42 - 46.
LIU Dong, TAO Tao, MEI Xue-song. Nonlinear Hammerstein model and parameter identification for servo drive system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(3):42 - 46. (in Chinese)
- [8] Voros J. Iterative algorithm for parameter identification of Hammerstein systems with two-segment nonlinearities[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(11): 2145 - 2149.
- [9] Voros J. Recursive identification of Hammerstein systems with polynomial nonlinearities [J]. Journal of Electrical Engineering, 2006, 57(1):42 - 46.
- [10] Bai E W, Li D. Convergence of the iterative Hammerstein system identification algorithm [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(11): 1929 - 1940.