

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.005

挖掘臂电液伺服系统非线性辨识^{*}

黎波 严骏 刘安心 曾拥华 郭刚

(解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

【摘要】 针对机理建模存在未建模动态及其参数辨识难的问题,采用由分段非线性模块、线性时不变动态模块及间隙非线性模块串联组成的 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型来描述挖掘臂电液伺服系统。利用关键变量分离原理将系统模型化解为最小二乘格式,再采用带中间变量估计的改进递推最小二乘算法进行辨识。实验表明,辨识所得 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型能很好地逼近实际系统,误差比 Hammerstein 及线性模型分别减少 29% 及 68%。

关键词: 挖掘臂 电液伺服系统 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型 非线性辨识

中图分类号: TD422.2; TP271⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0020-06

Nonlinear Identification of Excavator Arm's Electro-hydraulic Servo System

Li Bo Yan Jun Liu Anxin Zeng Yonghua Guo Gang

(Engineering Institute of Corps of Engineer, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract

Aiming at the problem that there are unmodeled dynamics by theoretic modeling and it is also difficult to identify, a Pseudo-Hammerstein-Wiener model with cascade connection of a two-segment polynomial nonlinearity block, a time-invariant linear system, and a backlash nonlinear term was adopted to model the electro-hydraulic servo system of excavator arm. The key term separation principle was used to decompose the model into a linear-in-parameter format, and a refined recursive least square method supplemented with the estimation of internal variables was proposed to identify the decomposed parameters. Experiments demonstrated that the identified Pseudo-Hammerstein-Wiener model approximated the actual system well. Comparing with Hammerstein and ARX model, the error of the Pseudo-Hammerstein-Wiener was reduced by 29% and 68%, respectively.

Key words Excavator arm, Electro-hydraulic servo system, Pseudo-Hammerstein-Wiener model, Nonlinear identification

引言

对普通液压挖掘机进行伺服控制改造^[1~2],采用电液伺服阀代替原有的手动先导控制可提高其作业效率,降低人力成本。挖掘臂电液伺服系统主要包括电液比例阀及阀控非对称液压缸,是复杂非线性系统。目前,这类系统大都采用智能控制^[3]及自适应鲁棒控制^[4]等对系统模型要求不高的控制。

但这些方法往往设计周期长,获得系统精确模型仍是控制器设计的基础。

以往人们大都建立系统的线性传递函数模型^[5]或线性状态子空间模型^[6],并对模型参数进行辨识,但液压挖掘臂这样的大范围往复运动系统,线性模型往往精度不高^[6],它包含伺服阀死区、阀控非对称液压缸不对称性^[7]、液压缸非线性摩擦^[8]、流量非线性、滑阀及关节间隙等。Gu 等^[9]采用改进

收稿日期: 2011-06-27 修回日期: 2011-09-02

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50875261)

作者简介: 黎波,博士生,主要从事机械装备机电控制及自动化研究,E-mail: libomusic@163.com

通讯作者: 严骏,教授,博士生导师,主要从事工程装备保障与信息化研究,E-mail: 6219033@163.com

的辅助变量法辨识该系统非线性模型,但仍未给出系统死区、间隙及不对称非线性。

本文针对机理建模存在未建模动态及其参数辨识难的问题,采用由输入端静态非线性模块、线性时不变动态模块及间隙非线性模块串联组成的Pseudo-Hammerstein-Wiener模型描述系统。应用关键变量分离原理对模型参数进行线性解耦,在仅需输入、输出数据情况下,利用改进的递推最小二乘法辨识模型参数。最后,对比分析系统辨识误差。

1 机理建模与分析

1.1 系统概况

图1所示为实验室电控挖掘机^[1]。其中,挖掘臂电液伺服系统由先导电液比例阀、阀控液压缸、倾角传感器及采集控制器组成。系统闭环控制框图如图2所示。

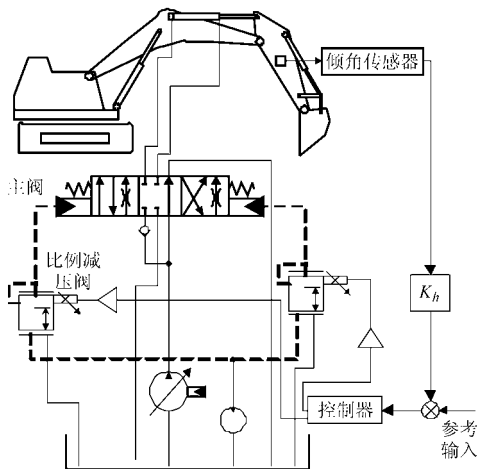


图1 改造后的电控挖掘机电液伺服系统

Fig.1 Retrofitted hydraulic excavator

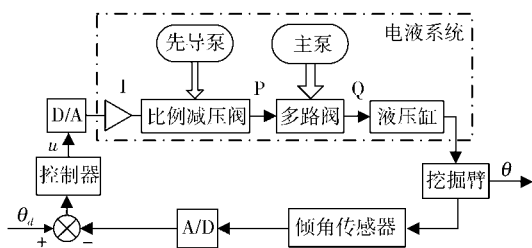


图2 系统闭环控制框图

Fig.2 Block diagram of closed loop control system

1.2 系统非线性模型

1.2.1 电液比例模块等效模型

电液比例系统包括先导比例减压阀及多路阀,比例阀存在死区,忽略次要因素,整个先导电液比例模块可简化为一阶模型^[2],即

$$\tau_v \dot{x}_v = -x_v + k_v u_v \quad (1)$$

式中 x_v ——多路阀芯有效位移

k_v ——增益 τ_v ——时间常数

u_v ——死区补偿后控制器有效输出

1.2.2 阀控液压缸非线性动力学模型

图3所示为先导控制的泵-阀-缸开环系统原理图。系统采用恒功率变量泵,但其通常工作在额定功率范围内,转速基本不变,忽略由压力变化引起的泄漏变化,可视其为定量系统。泵出口压力与负载相关,实测结果表明在额定功率内不同负载的阀口压差基本恒定,其微小变化可视作干扰,则系统等效为阀控液压缸模型^[5-6],它由滑阀负载流量方程、液压缸流量连续方程及液压缸力平衡方程组成^[7](类似于闭心系统)。图3中, y 为液压缸位移, M 为等效质量, B_p 为粘性阻尼系数, F_f 为非线性摩擦力, F_s 为非线性弹簧力, F_l 为等效负载力。 p_1 、 p_2 分别表示无杆腔、有杆腔压力, A_1 、 A_2 分别表示无杆腔、有杆腔作用面积, Q_1 、 Q_2 分别表示无杆腔、有杆腔流量, p_s 和 p_r 分别表示液压泵出口压力和系统回油压力。

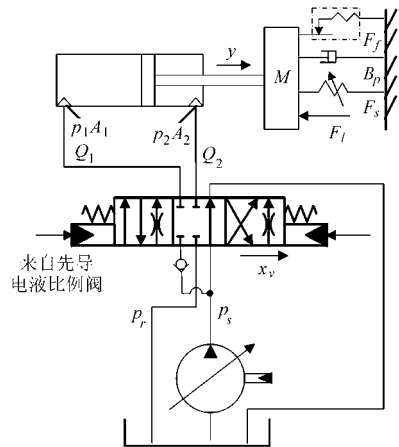


图3 泵-阀-缸开环系统示意图

Fig.3 Open loop system of pump-valve-cylinder

滑阀负载流量方程^[7]为

$$Q_1 = \begin{cases} C_d W x_v \sqrt{2(p_s - p_1)/\rho} & (x_v \geq 0) \\ C_d W x_v \sqrt{2(p_1 - p_r)/\rho} & (x_v < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_2 = \begin{cases} C_d W x_v \sqrt{2(p_2 - p_r)/\rho} & (x_v \geq 0) \\ C_d W x_v \sqrt{2(p_s - p_2)/\rho} & (x_v < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 C_d ——流量系数 ρ ——液压油密度
 W ——阀口面积梯度

液压缸流量连续方程为

$$Q_1 = A_1 \frac{dy}{dt} + C_i(p_1 - p_2) + C_e p_1 + \frac{V_1 dp_1}{\beta_e dt} \quad (4)$$

$$Q_2 = A_2 \frac{dy}{dt} - C_i(p_1 - p_2) - C_e p_2 - \frac{V_2 dp_2}{\beta_e dt} \quad (5)$$

式中 β_e ——体积弹性模量

C_i 、 C_e ——内、外泄漏系数

V_1 、 V_2 ——无杆腔、有杆腔有效容积

液压缸力平衡方程为

$$A_1p_1 - A_2p_2 = M \ddot{y} + F_s + F_f + F_c + F_l \quad (6)$$

其中 $F_c = B_p \dot{y}$

式中 F_c ——粘性力

1.2.3 系统整体非线性模型

令状态变量 $x_1 = y, x_2 = dy/dt, x_3 = p_1, x_4 = p_2, x_5 = x_v$ 。设回油压力 $p_r = 0$,联立式(1)~(6)得电液系统非线性状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{A_1x_3}{M} - \frac{A_2x_4}{M} - \frac{F_f(x_2)}{M} - \frac{F_s(x_1)}{M} - \frac{F_c(x_2)}{M} - \frac{F_l}{M} \\ \dot{x}_3 = -\frac{\beta_e A_1 x_2}{V_1} - \frac{\beta_e (C_i + C_e) x_3}{V_1} + \frac{\beta_e C_i x_4}{V_1} + \frac{\beta_e g_1(x) x_5}{V_1} \\ \dot{x}_4 = \frac{\beta_e A_2 x_2}{V_2} + \frac{\beta_e C_i x_3}{V_2} - \frac{\beta_e (C_i + C_e) x_4}{V_2} - \frac{\beta_e g_2(x) x_5}{V_2} \\ \dot{x}_5 = \frac{k_v}{\tau_v} u_v - \frac{x_5}{\tau_v} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $g_1(x) = \operatorname{sgn}\left((1 + \operatorname{sgn}x_5)\frac{p_s}{2} - x_3 \operatorname{sgn}x_5\right) \cdot$

$$C_d W \sqrt{\frac{2}{\rho} \left[(1 + \operatorname{sgn}x_5)\frac{p_s}{2} - x_3 \operatorname{sgn}x_5 \right]}$$

$$g_2(x) = \operatorname{sgn}\left((1 - \operatorname{sgn}x_5)\frac{p_s}{2} + x_4 \operatorname{sgn}x_5\right) \cdot$$

$$C_d W \sqrt{\frac{2}{\rho} \left[(1 - \operatorname{sgn}x_5)\frac{p_s}{2} + x_4 \operatorname{sgn}x_5 \right]}$$

整体系统模型框图如图4所示。

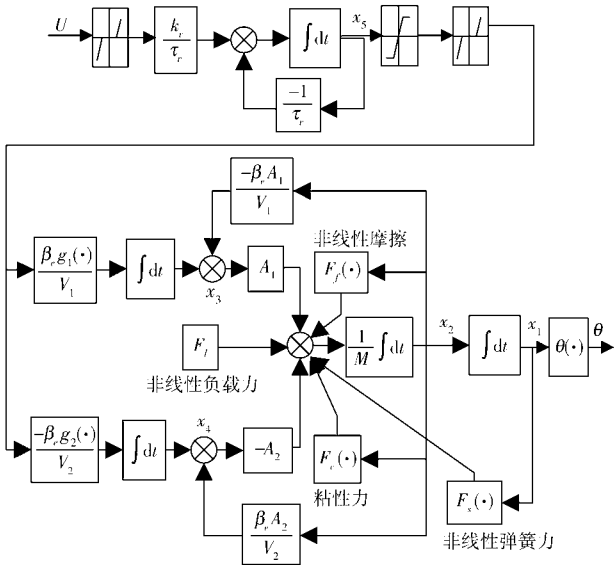


图4 系统非线性模型框图

Fig.4 Block diagram of nonlinear model for system

由机理建模知,挖掘臂电液伺服系存在死区、摩擦、不对称及流量非线性等。而且机理建模还存在未建模动态特性(如关节及滑阀间隙),难以精确描述系统。式(7)表示的系统模型包括5个状态参

数,模型中存在参数耦合,要实现参数辨识需测量多个状态信息,这增加了系统成本,引入了更多测量噪声,降低了系统辨识精度。所以,有必要选择一种结构简单、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 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型辨识

2.1 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型

传统的 Hammerstein-Wiener 模型^[10]由输入端静态非线性模块、中间动态线性模块及输出端静态非线性模块组成,能有效地描述大多数非线性系统,仅需系统输入、输出信息就能完成全部参数的解耦辨识^[11~15]。针对机理建模存在未建模动态及其参数辨识难的特点,受 Hammerstein-Wiener 非线性模型模型辨识的启发,将系统建立成由分段非线性模块、线性时不变动态模块及间隙非线性模块串联组成的 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型(图5)。该模型直观地描述了系统所具有的非线性动态特性,且能方便地将 Hammerstein-Wiener 模型辨识方法改进后应用。

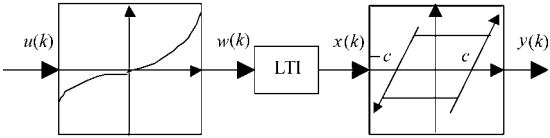


图5 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型

Fig.5 Pseudo-Hammerstein-Wiener model

针对系统执行机构存在的死区、摩擦、不对称及流量非线性,图5所示输入端静态非线性模块采用分段多项式基函数^[11]描述。输入-输出关系为

$$w(k) = \begin{cases} f(u(k)) = \sum_{l=0}^r f_l u^l(k) & (u(k) \geq 0) \\ g(u(k)) = \sum_{l=0}^r g_l u^l(k) & (u(k) < 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中 f_l, g_l ——多项式基函数参数

r ——模型阶数

定义分段函数为

$$h(u(k)) = \begin{cases} 0 & (u(k) \geq 0) \\ 1 & (u(k) < 0) \end{cases} \quad (9)$$

可将 $w(k)$ 表达式写为

$$w(k) = \sum_{l=0}^r f_l u^l(k) + \sum_{l=0}^r (g_l - f_l) u^l(k) h(u(k)) = \sum_{l=0}^r f_l u^l(k) + \sum_{l=0}^r p_l u^l(k) h(u(k)) \quad (10)$$

其中

$$p_l = g_l - f_l$$

模型中的线性时不变动态模块采用离散自回归

模型 (ARX) 描述为

$$A(z^{-1})x(k) = z^{-q}B(z^{-1})w(k) + \xi(k) \quad (11)$$

其中

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_{n_a} z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_{n_b} z^{-n_b}$$

式中 q ——系统延迟

$a_i (i=1, 2, \dots, n_a)$ ——线性系数

$b_j (j=0, 1, \dots, n_b)$ ——线性系数

$\xi(k)$ ——噪声序列

设输出端间隙非线性模块的增益为 1, 未知间隙为 c (图 5), 令中间变量表达式为

$$y'(k) = x(k) - 0.5c(\operatorname{sgn}(\Delta x(k)) + 1)g_1(k) + 0.5c(1 - \operatorname{sgn}(\Delta x(k)))g_2(k) \quad (12)$$

其中

$$\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$$

$$g_1(k) = \begin{cases} 0 & (y(k-1) + c \geq x(k)) \\ 1 & (y(k-1) + c < x(k)) \end{cases} \quad (13)$$

$$g_2(k) = \begin{cases} 0 & (y(k-1) - c \leq x(k)) \\ 1 & (y(k-1) - c > x(k)) \end{cases} \quad (14)$$

可得系统输出表达式为

$$y(k) = y'(k) + (y(k-1) - y'(k))(g_1(k) - 1)(g_2(k) - 1) \quad (15)$$

直接将以上串联模块各表达式相乘得到一个参数与变量都是非线性耦合的系统模型, 很难对其未知参数进行辨识。本文应用关键变量分离原理^[12]将以上各子模块表达式进行化解, 以得到一个易于辨识的参数线性化模型。

不失一般性, 设 $b_0 = 1$, 将式 (10) 代入式 (11) 中, b_0 项得

$$x(k) = \sum_{l=0}^r f_l u^l(k-q) + \sum_{l=0}^r p_l u^l(k-q)h(u(k-q)) + \sum_{i=1}^{n_b} b_i w(k-q-i) + \sum_{j=1}^{n_a} a_j x(k-j) \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (12) 右边第一项, 再代入式 (15) 右边第一项得

$$\begin{aligned} y(k) = & \sum_{l=0}^r f_l u^l(k-q) + \sum_{l=0}^r p_l u^l(k-q)h(u(k-q)) + \\ & \sum_{i=1}^{n_b} b_i w(k-q-i) + \sum_{j=1}^{n_a} a_j x(k-j) - \\ & 0.5c(\operatorname{sgn}(\Delta x(k)) + 1)g_1(k) + \\ & 0.5c(1 - \operatorname{sgn}(\Delta x(k)))g_2(k) + \\ & (y(k-1) - y'(k))(g_1(k) - 1)(g_2(k) - 1) \end{aligned} \quad (17)$$

2.2 递推辨识算法

上述 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型的输入

$u(k)$ 、输出 $y(k)$ 是可测的, 而中间变量 $w(k)$ 、 $x(k)$ 、 $y'(k)$ 不可测, 须在递推辨识过程中进行估计。

除参数 c 外, 式 (17) 中模型参数都是线性分离的。为方便辨识, 定义

$$y_c(k) = y(k) - (y(k-1) - y'(k))(g_1(k) - 1)(g_2(k) - 1) \quad (18)$$

则有最小二乘格式为

$$y_c(k) = \Phi^T(k)\theta \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \Phi(k) = & (1, u(k-q), \dots, u^r(k-q), \\ & h(u(k-q)), u(k-q)h(u(k-q)), \dots, \\ & u^r(k-q)h(u(k-q)), \\ & w(k-q-1), \dots, w(k-q-i), x(k-1), \dots, \\ & x(k-j), 0.5((1 - \operatorname{sgn}(\Delta x(k)))g_2(k) - \\ & (1 + \operatorname{sgn}(\Delta x(k)))g_1(k))) \\ \theta = & (f_0, f_2, \dots, f_r, p_0, p_1, \dots, p_r, b_1, \dots, \\ & b_{n_b}, a_1, \dots, a_{n_a}, c) \end{aligned}$$

式中 $\Phi(k)$ ——数据向量 θ ——参数向量

利用改进的最小二乘递推算法^[13]对式 (19) 未知参数进行辨识, 采用估计准则

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{k=1}^n \lambda^{n-k} (\hat{y}_c(k) - \hat{\Phi}^T(k)\theta)^2 \quad (20)$$

其中, $\lambda \leq 1$ 为遗忘因子, 数据向量 $\hat{\Phi}^T(k)$ 、输出 $\hat{y}_c(k)$ 以及模型的中间变量是在递推辨识过程中进行迭代估计得到的, 规整后可得辨识算法为

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)(\hat{y}_c(k) - \hat{\Phi}^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \quad (21)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\hat{\Phi}(k)}{\lambda + \hat{\Phi}^T(k)P(k-1)\hat{\Phi}(k)} \quad (22)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}(I - K(k)\hat{\Phi}^T(k))P(k-1) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \hat{w}(k) = & \sum_{l=0}^r \hat{f}_l(k-1)u^l(k) + \\ & \sum_{l=0}^r \hat{p}_l(k-1)u^l(k)h(u(k)) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) = & \sum_{j=0}^{n_b} \hat{b}_j(k-1)\hat{w}(k-q-j) - \\ & \sum_{i=1}^{n_a} \hat{a}_i(k-1)\hat{x}(k-i) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}'(k) = & \hat{x}(k) - 0.5\hat{c}(k-1)(\operatorname{sgn}(\Delta \hat{x}(k)) + 1)\hat{g}_1(k) + \\ & 0.5\hat{c}(k-1)(1 - \operatorname{sgn}(\Delta \hat{x}(k)))\hat{g}_2(k) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_c(k) = & y(k) - (y(k-1) - \hat{y}'(k))(\hat{g}_1(k) - 1)(\hat{g}_2(k) - 1) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k-1) = & (\hat{f}_0(k-1), \hat{f}_1(k-1), \dots, \hat{f}_r(k-1), \\ & \hat{p}_0(k-1), \hat{p}_1(k-1), \dots, \hat{p}_r(k-1), \end{aligned}$$

$$\hat{b}_1(k-1), \dots, \hat{b}_{n_b}(k-1),$$
$$\hat{a}_1(k-1), \dots, \hat{a}_{n_a}(k-1), \hat{c}(k-1)) \quad (28)$$
$$\hat{\Phi}(k) = (1, u(k-q), \dots, u^r(k-q), h(u(k-q)),$$
$$u(k-q)h(u(k-q)), \dots, u^r(k-q)h(u(k-q)),$$
$$\hat{w}(k-q-1), \dots, \hat{w}(k-q-i), \hat{x}(k-1), \dots, \hat{x}(k-j),$$
$$0.5((1 - \text{sgn}(\Delta \hat{x}(k)))\hat{g}_2(k) -$$
$$(1 + \text{sgn}(\Delta \hat{x}(k)))\hat{g}_1(k))) \quad (29)$$

其中

$$P(0) = \mu I \quad (0 < \mu < \infty)$$
$$\hat{g}_1(k) = \begin{cases} 0 & (y(k-1) + \hat{c}(k-1) \geq \hat{x}(k)) \\ 1 & (y(k-1) + \hat{c}(k-1) < \hat{x}(k)) \end{cases} \quad (30)$$
$$\hat{g}_2(k) = \begin{cases} 0 & (y(k-1) - \hat{c}(k-1) \leq \hat{x}(k)) \\ 1 & (y(k-1) - \hat{c}(k-1) > \hat{x}(k)) \end{cases} \quad (31)$$

3 实验结果

为观察系统在稳定换向条件下的非线性特性, 辨识实验采用低幅值多组合正弦激励信号, 得系统多次换向时的低速稳定输出如图 6 所示。可见, 随输入幅值的增大响应速度越大; 在换向过程中, 当激励信号在 0 附近时, 因死区特性, 输出角度基本维持不变, 响应速度为 0。从总体上可见, 当输入为正弦对称信号时, 输出角呈现上升趋势, 即正反方向响应特性不对称。

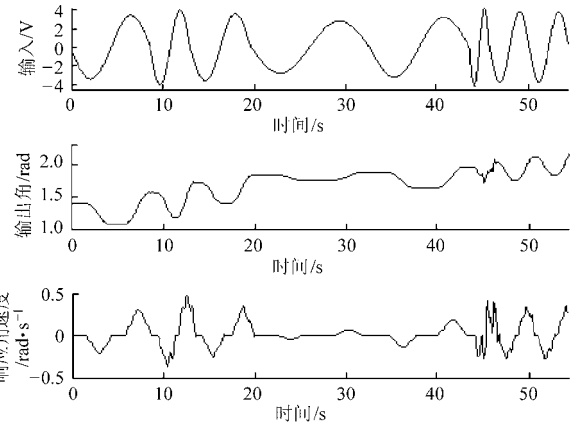


图 6 辨识实验输入-输出曲线

Fig. 6 Input and output curve of identification experiments

由文献[5]知挖掘臂电液伺服系统通常被简化为 3 阶线性时不变系统, 所以本文取 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型的动态线性模块阶次 $n_a = 3$ 、 $n_b = 2$, 延迟 $q = 8$, 输入非线性模块的多项式阶次 $r_1 = r_2 = 3$ 。设初值 $P(0) = 10^6 I$, $w(0) = 0$, $x(0) = 0$, $u(0) = 0$, $y'(0) = 0$, $y_c(0) = 0$, $c(0) = 0.001$ 。小的遗忘因子有助于减小先前数据的影响, 而大的遗忘因子对噪声抑制作用强^[11], 则在迭代过程的前 100 次取 $\lambda = 0.98$, 后 1 000 次取 $\lambda = 1$ 。根据实测的

输入和角速度响应信号, 采用上述改进的递推最小二乘法, 分别对 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型、Hammerstein 模型^[14]和 ARX 模型进行辨识, 结果如表 1 所示。

表 1 参数估计值
Tab. 1 Estimated value of parameters

参数	模型		
	Pseudo-Hammerstein-Wiener	Hammerstein	ARX
b_0	1	1	-0.027 6
b_1	0.031 5	0.010 5	0.012 4
b_2	0.029 5	0.014 7	0.051 4
a_1	-0.035 7	-0.059 6	-0.066 1
a_2	-0.035 0	-0.061 3	-0.065 3
a_3	-0.040 4	-0.061 0	-0.061 9
f_0	0.013 2	0.002 7	
f_1	-0.004 2	0.001 2	
f_2	-0.011 1	-0.001 2	
f_3	0.008 5	0.004 5	
p_0	-0.012 1	-0.005 5	
p_1	0.004 0	0.001 3	
p_2	0.005 9	0.003 6	
p_3	-0.006 2	$-8.685\ 8 \times 10^{-4}$	
c	0.122 6		

将表 1 中辨识参数代入式(10)~(15), 对所得系统 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型、Hammerstein 模型及 ARX 模型进行仿真, 与实机响应进行对比如图 7~8 所示, 从图 7 可见, Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型能很好地逼近实际系统, 可有效地反映系统非线性动态特性; Hammerstein 模型在一定程度上也能反映系统非线性特性, 但精度较前者差; ARX 模型则基本不能反映系统非线性特性。从图 8 和表 2 中误差对比可知, Pseudo-Hammerstein-Wiener 比 Hammerstein 及 ARX 模型的输出误差分别减少 29% 及 68%, 能更精确地描述系统动态特性。

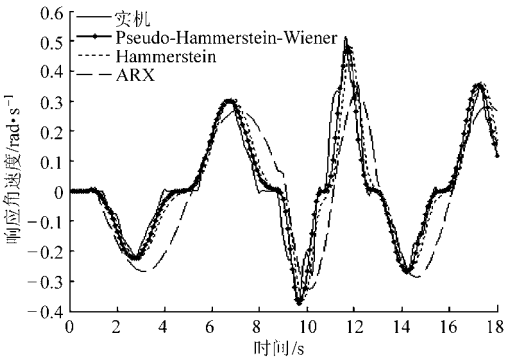


图 7 模型仿真与实机响应对比

Fig. 7 Comparison of identified models with actual system

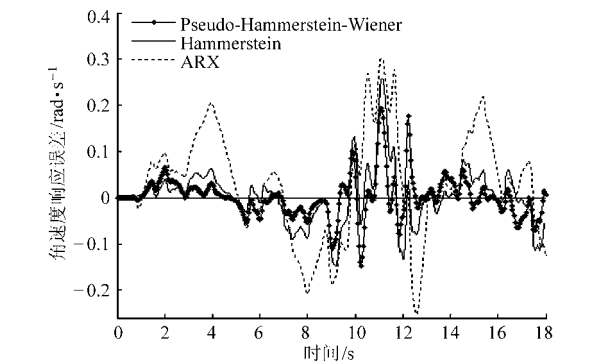


图 8 误差对比

Fig. 8 Comparison of model error

表 2 输出误差均方根

Tal.2 RMSE of identified model

参数	模型		
	Pseudo-Hammerstein-Wiener	Hammerstein	ARX
$\delta/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	0.029 5	0.041 7	0.093 9

4 结论

(1) 通过机理建模得到了系统的非线性状态空

间模型,该模型存在未建模动态。模型包含 5 个状态变量,存在参数耦合,参数辨识难。

(2) 在理论分析基础上,采用 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型来描述系统。其输入端非线性模块采用分段多项式基函数描述,线性动态模块采用离散 ARX 模型表示,输出端为间隙非线性模块。

(3) 利用关键变量分离原理,将 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型参数进行线性解耦,得到模型的最小二乘格式,采用带中间变量估计的改进递推最小二乘法辨识模型参数。实验表明 Pseudo-Hammerstein-Wiener 模型能有效反映系统非线性特性,比 Hammerstein 及 ARX 模型误差分别减少 29% 及 68%,具有更高的辨识精度。

(4) 辨识是在低幅值多组合正弦激励下进行的,能很好地反映系统稳定换向时非线性动态特性。但系统快速换向,甚至突然变向时,存在液压冲击及车身不稳定等复杂高、低频振动,本文未考虑该极端特性。

参 考 文 献

1 Yan Jun, Li Bo, Tu Qunzhang, et al. Automatization of excavator and study of its autocontrol [C] // Proceedings of 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shanghai, China, 2011,1: 604 ~ 609.

2 冯培恩,潘双夏,丁国富. 挖掘机器人虚拟样机技术的实现策略[J]. 农业机械学报,2002, 33(3):84 ~ 87.

Feng Peien, Pan Shuangxia, Ding Guofu. Research on implementation approach of virtual prototype for excavator-robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(3):84 ~ 87. (in Chinese)

3 Li Bo, Yan Jun, Guo Gang, et al. High performance control of hydraulic excavator based on fuzzy-PI soft-switch controller [C] // Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, Shanghai, China, 2011,2: 676 ~ 679.

4 白寒,王庆九,徐振,等. 阀控非对称缸系统多级滑膜鲁棒自适应控制[J]. 农业机械学报,2009, 40(10): 193 ~ 198.

Bai Han, Wang Qingjiu, Xu Zhen, et al. Multiple sliding mode robust adaptive control for valve controlled asymmetric cylinder system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 193 ~ 198. (in Chinese)

5 He Qinghua, Hao Peng, Zhang Daqing. 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.

6 Shahram T. Identification of frictional effects and structural dynamics for improved control of hydraulic manipulators [D]. Vancouver:University of British Columbia, 1997.

7 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 Junhong, Yin Ziqiang, Li Shengyi. Nonlinear modeling and feedback linearization of valve-controlled asymmetrical cylinder[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5):203 ~ 207. (in Chinese)

8 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 Linhong, Wu Bo, Du Runsheng, et al. Nonlinear dynamic characteristics of moving hydraulic cylinder[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 12 ~ 19. (in Chinese)

9 Gu J, Taylor J, Seward D. Modelling of an hydraulic excavator using simplified refined instrumental variable (SRIV) algorithm[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2007, 5(4): 391 ~ 396.

10 Bai E W. A blind approach to the Hammerstein-Wiener model identification[J]. Automatica, 2002,38(6): 967 ~ 979.

11 Vörös J. Recursive identification of Hammerstein systems with polynomial nonlinearities [J]. Journal of Electrical Engineering, 2006, 57(1):42 ~ 46.

试验点和预测试验点的符合程度,以试验值和预测值分别为横、纵坐标的点组成直线,从原点起始与坐标轴呈 45°,说明 Midilli-Kucuk 模型的预测效果很好。

4 结论

- (1)经测定,物料中的水分在浆状区中大量蒸发,浆状区中物料蒸发的水分含量随蒸气压力的升高而增大,水分含量最多可蒸发 54.8%。此外,浆状区中干燥速率也随蒸气压力的升高而加快。
- (2)膜状区中,物料干燥过程为降速干燥阶段,

不同蒸气压力下料膜的初始含水率不同,蒸气压力越高料膜初始含水率越低,初始阶段的干燥速率也越低,但是蒸气压力越高,干燥速率降低得越慢,物料干燥达到最终含水率所需的时间越短,因此膜状区的干燥时间决定物料整个滚筒干燥时间的长短。

(3)物料在膜状区的干燥遵循薄层干燥特点,不同蒸气压力下的南瓜浆滚筒干燥过程均只经历降速干燥阶段,经过试验数据与 10 种经典薄层干燥模型的拟合,得到拟合度最高的是 Midilli-Kucuk 模型,它可以很好地预测南瓜浆滚筒干燥过程中含水率随时间的变化。

参 考 文 献

1 张芳,蒋作明,章恩明. 南瓜的功能特性及其在食品工业中的应用[J]. 食品工业科技, 2000, 21(6):62~64.
Zhang Fang, Jiang Zuoming, Zhang Enming. Functional properties of pumpkin and its applications in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2000, 21(6):62~64. (in Chinese)

2 Sacilik K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 23~30.

3 Liamkaew R, Thipayarat A, Koetsinchai W. Kinetics model of vacuum microwave drying of dried pumpkin slices [C] // Proceedings of the 2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference(TISD 2008), 2008: 11~16.

4 段欣,薛文通,张泽俊,等. 甘薯全粉滚筒干燥生产工艺[J]. 农业机械学报,2010,41(3):117~122.
Duan Xin, Xue Wentong, Zhang Zejun, et al. Production of sweet potato flour with the method of drum dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(3):117~122. (in Chinese)

5 Ibrahim D. The kinetics of forced-convective air-drying of pumpkin slices[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 243~248.

6 Ebru K A. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(1):75~84.

7 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备, 2009, 7(1):51~56.
Wang Baohe. Review of drying kinetics[J]. Drying Technology and Equipment,2009, 7(1):51~56. (in Chinese)

8 Akpinar E K, Bicer Y, Cetinkaya F. Modeling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 308~315.

9 Daud W R b W, Armstrong W D. Pilot plant study of the drum dryer[C] //Mujumdar A S. Drying 87', 1987: 101~108.

10 Trystram G, Vasseur J. The modeling and simulation of a drum dryer [J]. International Chemical Engineering, 1992, 32(4):689~705.

(上接第 25 页)

12 Vörös J. Identification of nonlinear dynamic systems using extended Hammerstein and Wiener models[J]. Control Theory and Advanced Technology, 1995, 10(4):1 203~1 212.

13 Dong R, Tan Q, Tan Y. Recursive identification algorithm for dynamic systems with output backlash and its convergence [J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2009, 19(4): 631~638.

14 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 Xuesong. Nonlinear Hammerstein model and parameter identification for servo drive system[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2010, 44(3):42~46. (in Chinese)