

7-2-2020

Application of Recursive Least Square Method in Identification of Dehydrogenation Reator

Guoyou Li

Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, 066004, China;

Ningning Gao

Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, 066004, China;

Wenhua Xia

Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, 066004, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application of Recursive Least Square Method in Identification of Dehydrogenation Reactor

Abstract

Abstract: The current production methods of styrene at home and abroad are mainly dhydrogenation of ethylbenzene which accounts for more than 90% of styrene production capacity in the world. To save energy, it was needed to optimize the system and its premise was to know the mathematical model of ethylbenzene dehydrogenation reactor. Due to the complexity of the reactor internal structure, mechanism modeling was more difficult to establish objective and accurate mathematics models. To solve this problem, it was used recursive least squares to conduct parameter identification. *On the basis of actual plant data, ethylbenzene dehydrogenation reactor mathematical model was assumed and the procedures was run by using matlab to estimate the model parameters. The effectiveness of the identification results were verified by another set of data. The simulation results show that the identified reactor mode is of higher precision, the model is effective and suitable for industrial application.*

Keywords

ethylbenzene dehydrogenation reactor, recursive least squares method, modeling, MATLAB simulation

Recommended Citation

Li Guoyou, Gao Ningning, Xia Wenhua. Application of Recursive Least Square Method in Identification of Dehydrogenation Reactor[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 249-254.

递推最小二乘法在脱氢反应器辨识中的应用

李国友, 高宁宁, 夏文华

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 目前国内外生产苯乙烯的方法主要采用乙苯脱氢法, 该方法的生产能力占世界苯乙烯生产能力的 90% 以上。为节能降耗, 需对系统进行优化, 优化前提则须知乙苯脱氢反应器的数学模型。由于反应器内部结构复杂, 机理建模很难建立较为客观且精确的数学模型。针对这一问题, 提出用递推最小二乘法进行参数辨识。先假定乙苯脱氢反应器的数学模型, 以实际工厂数据为基础, 利用 MATLAB 运行程序进行模型参数估计。得到模型参数后, 选择另外一组数据对辨识结果的有效性进行验证。仿真结果表明辨识出的反应器模型精度较高, 所建模型有效, 适于工业应用。

关键词: 乙苯脱氢反应器; 递推最小二乘法; 建模; MATLAB 仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0249-06

Application of Recursive Least Square Method in Identification of Dehydrogenation Reactor

Li Guoyou, Gao Ningning, Xia Wenhua

(Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, 066004, China)

Abstract: The current production methods of styrene at home and abroad are mainly dhydrogenation of ethylbenzene which accounts for more than 90% of styrene production capacity in the world. To save energy, it was needed to optimize the system and its premise was to know the mathematical model of ethylbenzene dehydrogenation reactor. Due to the complexity of the reactor internal structure, mechanism modeling was more difficult to establish objective and accurate mathematics models. To solve this problem, it was used recursive least squares to conduct parameter identification. *On the basis of actual plant data, ethylbenzene dehydrogenation reactor mathematical model was assumed and the procedures was run by using matlab to estimate the model parameters. The effectiveness of the identification results were verified by another set of data. The simulation results show that the identified reactor mode is of higher precision, the model is effective and suitable for industrial application.*

Keywords: ethylbenzene dehydrogenation reactor; recursive least squares method; modeling; MATLAB simulation

引言

苯乙烯是重要的基本有机化工原料, 广泛用于生产塑料、树脂和合成橡胶等^[1]。苯乙烯生产核心部分为乙苯脱氢反应部分, 是影响苯乙烯生产的重要

环节。为提高现有苯乙烯生产装置的节能降耗水平, 先进控制及优化技术是其中一项有效手段, 基于最顶层的系统优化需要知道描述乙苯催化脱氢系统的数学模型^[2]。

截至目前, 乙苯催化脱氢反应器的模型模拟研究受到了众多学者的关注。杨金根等人研究了乙苯脱氢轴径向反应器的数学模型, 通过各个参数的改变根据经验得到了系统的操作条件^[3]。Yu^[4]等人考虑到 H₂ 对反应平衡的影响, 开发了一种钯膜反应



收稿日期: 2014-08-08 修回日期: 2014-12-08;
基金项目: 秦皇岛市科学技术研究与发展计划 (201301B058);
作者简介: 李国友(1972-), 男, 河北秦皇岛, 博士, 教授, 研究方向为伺服控制、智能控制和化工 DCS 控制及仿真; 高宁宁(1986-), 女, 河北石家庄, 硕士生, 研究方向为化工 DCS 控制及仿真。

<http://www.china-simulation.com>

器,这种反应器在不以损失选择性的前提下将苯乙烯的转化率提高了 14.2%。这些方法均采用机理建模建立乙苯脱氢反应器的动态数学模型。

机理建模很难满足复杂控制系统研究的要求。李晓光等人考虑到建模过程涉及大量的化工动力学知识和不确定因素,使得机理建模十分复杂和困难,因此研究了混合建模的方法及其在三类化工对象中的应用^[5]。黄超等人针对热工过程机理建模存在的局限性,利用锅炉燃烧子系统在长期运行过程中积累的大量历史数据,采用 NNARMAX (NN-based AutoRegressive, Moving Average, external input) 辨识结合网络结构优化方法对运行数据进行辨识,得到能够描述含氧量以及其他锅炉运行参数同主蒸汽流量之间复杂的动态耦合关系的模型^[6]。

本文采用递推最小二乘法对乙苯脱氢反应器进行模型辨识。该算法只需知道反应器的输入输出数据而不一定要对其内部结构完全了解就可以建立数学模型^[7]。在本文中,将脱氢反应系统运行时实时更新的输入输出数据带入到最小二乘法中,这样辨识出的数学模型能更准确的反映出脱氢反应器变化的状态。

1 递推最小二乘法在乙苯脱氢反应器模型辨识中的应用

1.1 过程描述

乙苯脱氢反应系统由一个蒸汽过热炉、2 个串联的绝热式轴径向反应器 R-301, R-302 及若干个换热器组成,如图 1 所示。循环乙苯和新鲜的乙苯与部分水蒸气混合以后(这部分水蒸气约占总加入水蒸气量的 10%左右),经换热器及过热水蒸气(这部分水蒸气的量约占总加入水蒸气量的 90%左右)加热后进入 R-301 的轴心,沿着径向方向向外流动。R-301 出口物料进入蒸汽过热炉后再进入 R-302 的轴心继续反应,生成苯乙烯及副产品苯、甲苯等^[8]。

为节能降耗,反应系统中热交换很多,影响苯乙烯产量的变量较多且相互耦合非常严重,系统模型难以获得。

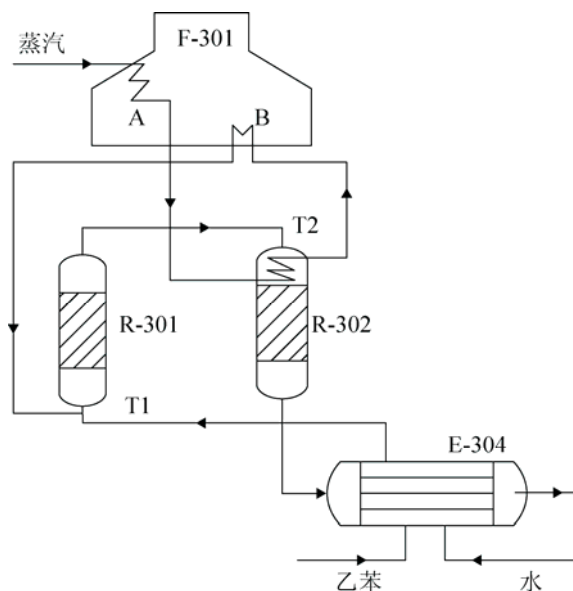
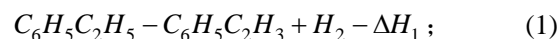


图 1 乙苯脱氢工艺流程示意图
F-301-蒸汽过热炉; R-301-第一脱氢反应器; R-302-第二脱氢反应器; E-304-乙苯蒸发器。

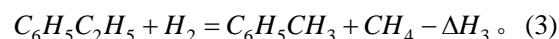
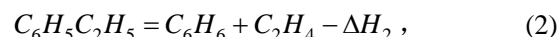
图 1 乙苯脱氢工艺流程示意图

乙苯脱氢反应过程主要有如下主副反应:

主反应



主要副反应



根据主要产物分析知必须考虑前 3 个反应,且其反应热可表示为:

$$-\Delta H_1 = -120679 - 4.56T; \quad (4)$$

$$-\Delta H_2 = -108750 - 7.95T; \quad (5)$$

$$-\Delta H_3 = 53145 + 13.18T. \quad (6)$$

其中: $T(k)$ 为反应温度。

在乙苯脱氢系统中,反应器 R-301, R-302 的操作条件往往通过经验获得,难以确保系统的整体操作处于最优。一直以来,建模精度在很大程度上决定着控制效果的优劣。一个有效、稳定、可靠的控制系统必定是建立在一个高精度的控制模型基

础上的。随着现代控制技术向更稳、更准、更快的方向发展, 建立起更加符合实际的高精度模型变得尤为重要。为使苯乙烯的产量最高, 操作条件达到最优, 建立反应器精确的数学模型显得尤为重要。

1.2 递推最小二乘法在模型辨识中的应用

由 1.1 可知, 乙苯脱氢反应系统是一个多输入参数、多输出参数且各参数之间相互影响的系统。由主副反应式(1)~(3)可知, 乙苯脱氢生成苯乙烯和氢气是一个强吸热、分子数增多的反应。从热力学角度看, 采用负压、提高反应温度、使用新型乙苯脱氢催化剂, 均可提高乙苯的单程转化率。R-302 除了尺寸和 R-301 有差别以外, 其它完全相同。故本文只对 R-301 进行模型辨识。R-301 输入参数分别为过热蒸汽温度、过热蒸汽压力、乙苯/水蒸汽温度、乙苯/水蒸汽压力 4 个参数。输出参数分别为反应产物温度、反应产物压力 2 个参数。乙苯脱氢生产苯乙烯过程中包含很多的干扰因素, 比如外界干扰(进料干扰、外界压力温度影响)及其他不确定因素等都会影响系统的输出。含噪声的多输入多输出系统如图 2 所示。

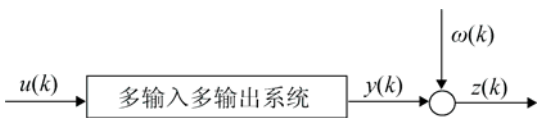


图 2 含噪声的多输入多输出系统

$u(k)$, $y(k)$, $z(k)$ 和 $\omega(k)$ 分别为多输入多输出系统的输入, 理想输出、实际输出和模型噪声。 $\omega(k)$ 由理想输出阶段引入。该系统可用如下差分方程(7)式表示:

$$z(k) = G(z)u(k) + \omega(k) \tag{7}$$

式中: $G(z)$ 为该系统的传递函数矩阵。如式(8)所示:

$$G(z) = \frac{1}{A^*(z)} \begin{bmatrix} B_{11}^*(z) & B_{12}^*(z) & \dots & B_{1r}^*(z) \\ B_{21}^*(z) & B_{22}^*(z) & \dots & B_{2r}^*(z) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{m1}^*(z) & B_{m2}^*(z) & \dots & B_{mr}^*(z) \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 $A^*(z) = z^n + a(1)z^{n-1} + a(2)z^{n-2} + \dots + a(n_a)$;

$$B^*(z) = b_{ij}(0) + b_{ij}(1)z^{n-1} + \dots + b_{ij}(n_{b_{ij}}),$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, r.$$

其中, $A^*(z)$ 为传递函数的特征方程。将传递函数矩阵各元素的分子和分母同时除以 z^n , 则传递函数如式(9)所示:

$$G(z) = \frac{1}{A^*(z)} \begin{bmatrix} B_{11}^*(z^{-1}) & B_{12}^*(z^{-1}) & \dots & B_{1r}^*(z^{-1}) \\ B_{21}^*(z^{-1}) & B_{22}^*(z^{-1}) & \dots & B_{2r}^*(z^{-1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{m1}^*(z^{-1}) & B_{m2}^*(z^{-1}) & \dots & B_{mr}^*(z^{-1}) \end{bmatrix} \tag{9}$$

$A^*(z^{-1})$, $B^*(z^{-1})$ 分别表示如下:

$$A^*(z^{-1}) = 1 + a(1)z^{-1} + a(2)z^{-2} + \dots + a(n_a)z^{-n_a};$$

$$B^*(z^{-1}) = z^{-d_{ij}} [b_{ij}(0) + b_{ij}(1)z^{-1} + \dots + b_{ij}(n_{b_{ij}})z^{-n_{b_{ij}}}],$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, r.$$

则系统过程可描述为:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + A(z^{-1})\xi(k) \tag{10}$$

其中: $\xi(k) = [\xi_1(k), \xi_2(k), \dots, \xi_m(k)]^T$, $\xi(k)$ 是方差为 σ_ξ^2 的白噪声。

多输入多输出系统(10)可写成 m 个多输入单输出的子系统, 其中第 i 个子系统如式(11)表示:

$$A(z^{-1})y_i(k) = \sum B_{ij}u_j(k) + e_i(k) \tag{11}$$

式中: $e(k) = A(z^{-1})\xi_i(k)$ 。令 $\theta = [a^T, \theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_m^T]^T$ 其中: $a = [a(1), a(2), \dots, a(n_a)]^T$; $\theta_i = [b_{i1}^T, b_{i2}^T, \dots, b_{ir}^T]^T$; $b_{ij} = [b_{ij}(0), b_{ij}(1), \dots, b_{ij}(n_{b_{ij}})]^T$; $y(k) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_m(k)]^T$; $e(k) = [e_1(k), e_2(k), \dots, e_m(k)]^T$;

$$\varphi(k) = \begin{bmatrix} y_1^T(k) & u_1^T & 0 & 0 \\ y_2^T(k) & 0 & u_2^T & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_m^T(k) & 0 & 0 & u_m^T \end{bmatrix} \tag{12}$$

式(10)可改写成

$$y(k) = \varphi(k)\theta + e(k) \tag{13}$$

递推最小二乘算法就是每获得一次新的观测数据就修正一次参数估计值, 随着时间的推移, 便能获得满意的参数结果^[9]。MIMO(多输入多输出)系统的最小二乘参数估计递推公式如式(14)~(16)所示:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi(k)\hat{\theta}(k-1)]; \quad (14)$$

$$K(k) = P(K-1)\varphi^T(k) [I_m + \varphi(k)P(K-1)\varphi^T(k)]^{-1}; \quad (15)$$

$$P(k) = [I - K(k)\varphi(k)]P(k-1)。 \quad (16)$$

(14)~(16)式即为 MIMO 系统递推最小二乘参数辨识算法。带入系统输入输出数据经过迭代计算就可以辨识出各子系统的参数。

2 MATLAB 仿真及辨识结果

2.1 输入输出观测数据

本文从工业应用的角度出发, 采集锦州某石化公司一段时间内工业反应器的历史运行数据和反应器进口、出口组成人工分析数据。由于乙苯/水蒸汽一般>25℃, 故将其初始温度设定为 25℃。将采集到的输入输出数据进行去除粗大误差和归一化处理, 将最终得到的 97 组数据带入到 1.2 节最小二乘法递推参数估计公式中。所用部分数据如表 1(为节约篇幅, 文中只列写出前 30 组数据)所示。

2.2 先验知识

在对给定的结构模型进行辨识之前, 掌握如下先验知识: 纯延迟 $d=0$, 且数据长度 $n=97$, $n_a=2$, $n_b=1$ 。

2.3 MATLAB 参数辨识

根据辨识准则和实验数据求取模型中的待定参数, 这是系统辨识定量研究的核心。利用 MATLAB 软件, 编写递推最小二乘法程序, 将上述处理过的输入输出数据带入到递推最小二乘法程序中, 运行后得到辨识结果。图 3 为反应产物的温度参数估计曲线。

表 1 输入输出观测数据

序号	蒸汽温度	蒸汽压力	乙苯/水温度	乙苯/水压力	产物温度	产物压力
1	818.11	97.88	25	0	685.4	99.75
2	826.59	97.27	121.28	0.54	674.34	98.79
3	835.31	96.8	262.69	9.15	576.94	91.84
4	842.77	96.49	355.58	25.69	499.99	80.2
5	846.99	96.81	415.31	41.4	482.35	70.05
6	846.81	97.01	451.89	53.47	495.21	63.44
7	842.46	97.57	472.35	61.57	510.39	59.99
8	836.86	98.3	483.44	66.62	520.85	58.63
9	831.18	98.92	490.06	69.88	526.57	58.4
10	826.55	99.49	494.07	71.89	529.26	58.75
11	823.34	99.97	496.56	73.09	530.48	59.3
12	821.24	100.39	498.3	73.87	531.1	59.94
13	820.1	100.74	499.51	74.37	531.49	60.53
14	819.51	100.83	500.37	74.68	531.81	61.06
15	819.15	100.72	501.01	74.9	532.11	61.51
16	818.9	100.53	501.52	75.05	532.35	61.87
17	818.71	100.3	501.94	75.16	532.57	62.14
18	818.57	100.08	502.4	75.28	532.8	62.4
19	818.46	99.8	502.81	75.35	533.55	62.56
20	818.42	99.56	503.05	75.41	533.31	62.66
21	818.51	99.28	503.45	75.49	533.11	62.73
22	818.6	99.18	503.65	75.53	533.5	62.75
23	818.57	98.92	503.82	75.56	533.69	62.77
24	818.49	98.64	503.98	75.59	533.76	62.77
25	818.43	98.44	504.14	75.62	533.81	62.76
26	818.41	98.32	504.29	75.64	533.89	62.74
27	818.38	98.14	504.43	75.67	533.96	62.72
28	818.31	97.87	504.56	75.69	534.03	62.69
29	818.26	97.68	504.67	75.71	534.08	62.66
30	818.29	97.64	504.78	75.73	534.14	62.63

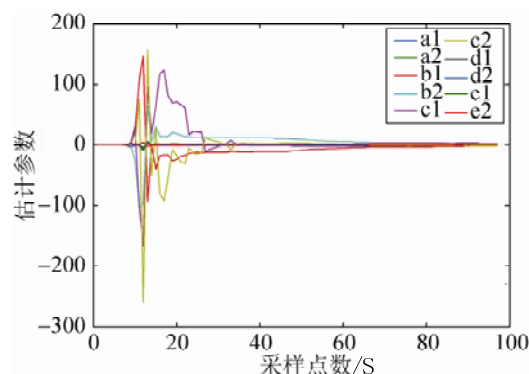


图 3 递推最小二乘法的温度参数估计的图像

运行程序后得到辨识参数依次为:

$a_1 = -1.7734$; $a_2 = 0.8248$; $b_1 = 0.0002$; $b_2 = 0.0004$;
 $c_1 = 1.8609$; $c_2 = -1.4944$; $d_1 = -0.1325$; $d_2 = 0.1093$;
 $e_1 = -0.1305$; $e_2 = 0.1490$ 。

由上面得到的辨识参数, 根据假定的模型结构, 可知对于输出变量 y_1 , 其辨识模型如式(17)所示:

$$y_1(k) = \frac{0.0002 + 0.0004z^{-1}}{1 - 1.7734z^{-1} + 0.8248z^{-2}}x_1(k) + \frac{1.8609 - 1.4944z^{-1}}{1 - 1.7734z^{-1} + 0.8248z^{-2}}x_2(k) + \frac{-0.1325 + 0.1093z^{-1}}{1 - 1.7734z^{-1} + 0.8248z^{-2}}x_3(k) + \frac{-0.1305 + 0.149z^{-1}}{1 - 1.7734z^{-1} + 0.8248z^{-2}}x_4(k) + \frac{1}{1 - 1.7734z^{-1} + 0.8248z^{-2}}e_1(k) \quad (17)$$

式(17)中, $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$, $x_4(k)$ 为乙苯脱氢反应器的 4 个输入参数, 分别代表过热蒸汽温度、过热蒸汽压力、乙苯/水蒸汽温度、乙苯/水蒸汽压力, $e_1(k)$ 为干扰量。程序运行后, 同理可得到反应产物的压力参数估计曲线, 如图 4 所示。

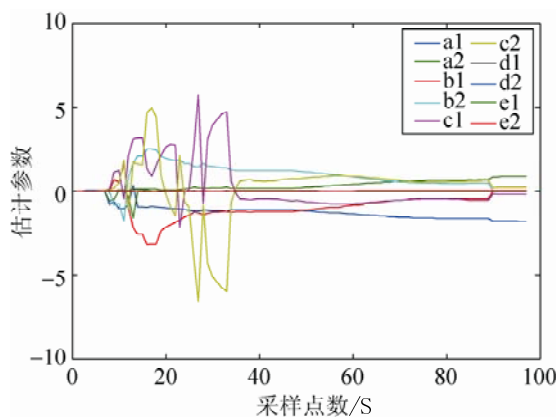


图 4 递推最小二乘法的压力参数估计的图像

运行程序后得到的辨识参数依次为:

$a_1 = -1.2657$; $a_2 = 0.3701$; $b_1 = -0.0014$; $b_2 = -0.0013$;
 $c_1 = -0.8704$; $c_2 = 1.0011$; $d_1 = 0.0020$; $d_2 = -0.0117$;
 $e_1 = 0.0076$; $e_2 = -0.0046$ 。

对于输出变量 y_2 , 其辨识模型如(18)式所示。

其中, $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$, $x_4(k)$, $e_2(k)$ 代表意义同(17)式。

$$y_2(k) = \frac{-0.0014 - 0.0013z^{-1}}{1 - 1.2657z^{-1} + 0.3701z^{-2}}x_1(k) + \frac{-0.8704 + 1.0011z^{-1}}{1 - 1.2657z^{-1} + 0.3701z^{-2}}x_2(k) + \frac{0.002 - 0.0117z^{-1}}{1 - 1.2657z^{-1} + 0.3701z^{-2}}x_3(k) + \frac{0.0076 - 0.0046z^{-1}}{1 - 1.2657z^{-1} + 0.3701z^{-2}}x_4(k) + \frac{1}{1 - 1.2657z^{-1} + 0.3701z^{-2}}e_2(k) \quad (18)$$

2.4 模型检验与分析

由于候选模型集的选择很大程度上取决于人的主观意识, 加上测量噪声和处理方法存在的误差, 都可能导致辨识的误差, 因此需对模型的合理性进行验证。模型验证没有统一的方法。本文采用的方法是将另外一组数据带入到辨识模型中, 将实际输出数据与模型输出数据进行比较。其中温度、压力实际输出与模型输出比较结果如图 5 所示。

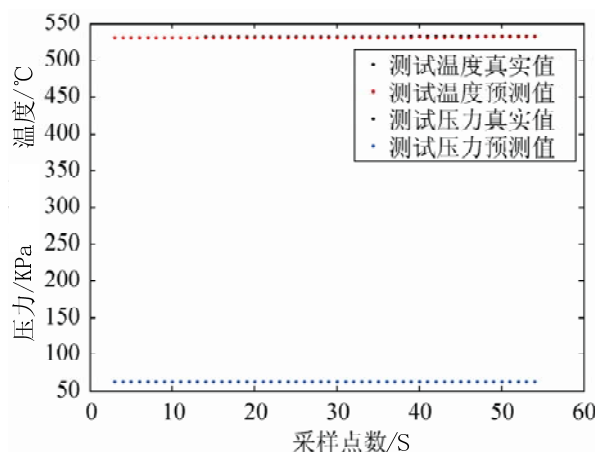


图 5 温度、压力输出值和预测值的图像

温度和压力的预测相对误差如图 6 所示。

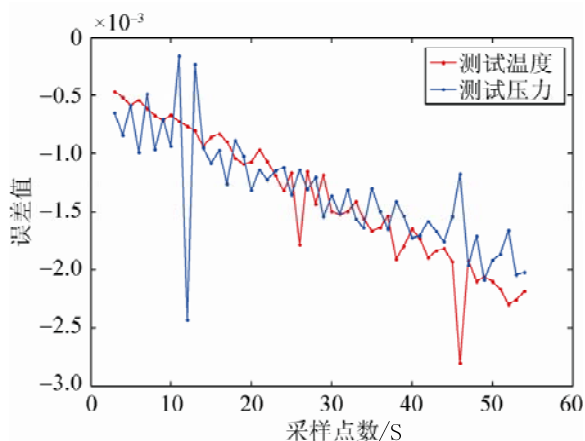


图 6 温度、压力预测相对误差值

由图 5 知, 温度、压力的实际输出曲线与模型输出吻合较好, 即最小二乘递推算法能快速准确地估计出系统输出。由图 6 的预测相对误差结果知, 温度预测相对误差值的绝对值在 0.05%~0.3%; 压力预测相对误差值的绝对值在 0.05%~0.2%。采取递推最小二乘算法进行参数估计最大的优点是给定模型一个初始参数, 算法会在每一次计算中, 选取较优的误差率进行循环运算, 达到所需的精度, 算法计算终止, 此时参数较平稳。由此可知温度和压力的预测误差极小, 达到所需的精度, 即拟合良好, 获得较好的辨识效果, 较好的描述了系统的动态特性。

3 结论

本文利用递推最小二乘法对脱氢反应器模型进行辨识。对输入输出数据进行处理, 选定模型结构及阶次, 然后利用该法进行参数辨识, 得到对象的辨识模型。另外通过另一组数据对得到的辨识模

型进行检验与分析。MATLAB 仿真结果表明辨识得到的模型精度较高, 模型合理, 适合在工业上应用。

参考文献:

- [1] 侯志扬. 我国苯乙烯产业分析[J]. 化学工业, 2010, 28(7): 26-29.
- [2] 张彬, 杨为民, 钱峰, 等. 乙苯催化脱氢制苯乙烯生产过程的机理建模与优化[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 903-908.
- [3] 杨金根, 黄祖耀. 乙苯脱氢制苯乙烯绝热式反应器的数学模型. [J]. 华东理工大学学报, 1994, 20(2): 159-163.
- [4] Rezaie N, Jahanmiri A, Moghtaderi B, et al. A comparison of homogeneous and heterogeneous dynamic models for industrial methanol reactors in the presence of catalyst deactivation [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification (S0255-2701), 2005, 44(8): 911-921.
- [5] 李晓光. 混合建模方法研究及其在化工过程中的应用 [D]. 北京: 北京化工大学, 2008: 1-8.
- [6] 黄超, 徐向东. 基于 NNARMAX 辨识的最佳含氧量自主寻优[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(2): 215-218.
- [7] 刘云龙. 热水锅炉燃烧系统建模与优化控制建模[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 15-21.
- [8] 翁剑锋, 叶贞成, 罗娜, 等. 乙苯脱氢反应器的动态建模与分析[J]. 计算机与应用化学, 2013, 30(3): 291-296.
- [9] 单东升, 张培强, 吴耀武, 等. 基于递推最小二乘法的炮控参数辨识仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8): 1726-1729. (Shan Dongsheng, Zhang Peiqiang, Wu Yaowu, et al. The Application of Recursive Least Squares Method in the Dehydrogenation Reactor Identification [J]. Journal of system Simulation (S1004-731X), 2013, 25(8): 1726-1726.)