

短文

# 联合估计稳态算法及其在过程 辨识中的应用<sup>1)</sup>

俞星星 张大力 阎平凡

(清华大学自动化系 北京 100084)

**摘要** 时滞和滤波联合估计问题是自适应系统建模和时滞估计两方面的交叉。本文针对先时滞后滤波的串联模型,提出基于快速横向滤波器的递推最小二乘算法,并以合成氨生产过程现场数据为例进行模型预测。仿真结果表明,这种结合时滞跟踪的自适应滤波器适于变时滞低阶系统建模。

**关键词** 时滞,联合估计,递推最小二乘,自适应滤波

## 1 引言

在许多系统辨识问题中,如回声抵消,地球物理信号处理以及工业生产过程,尤其在具有大时滞的化工生产过程中,可以量测的输出信号关于输入信号不仅被滞后,而且被线性滤波。这给系统建模及其鲁棒控制带来了很大的困难<sup>[1-3]</sup>。而时滞和滤波的联合辨识算法的研究不仅有着广泛的应用背景,还具有理论意义。从方法上时滞和滤波联合估计问题是传统时滞估计问题的推广,也是自适应系统建模和时滞估计两方面的交叉。虽对单纯时滞有较多的研究,结合时滞跟踪的自适应滤波器设计除了文献[4-6]外则鲜见于文献。文献[6]提出了基于快速横向滤波器的递推最小二乘(RLS: Recursive Least Squares)算法,但它是针对时滞较滤波器为后的后时滞情形。本文将在文献[6]的基础上进行讨论,结合前时滞跟踪的自适应 FIR 滤波系统建模,提出的算法以某合成氨生产过程中的实测数据为仿真例,获得较为显著的效果。

## 2 模型及符号定义

假设输入输出序列分别为  $x(t), y(t), t=1, 2, 3, \dots$ ;  $t$  时刻时滞估计是  $l$ ; 自适应最小二乘滤波器的阶数为  $p$ 。图 1 描述了自适应前时滞跟踪的滤波系统模型的结构。

前时滞跟踪递推最小二乘滤波算法中,误差总能量的优化实际上是沿着拟合权向量

1) 国家攀登计划认知科学(神经网络)重大关键项目资助课题。

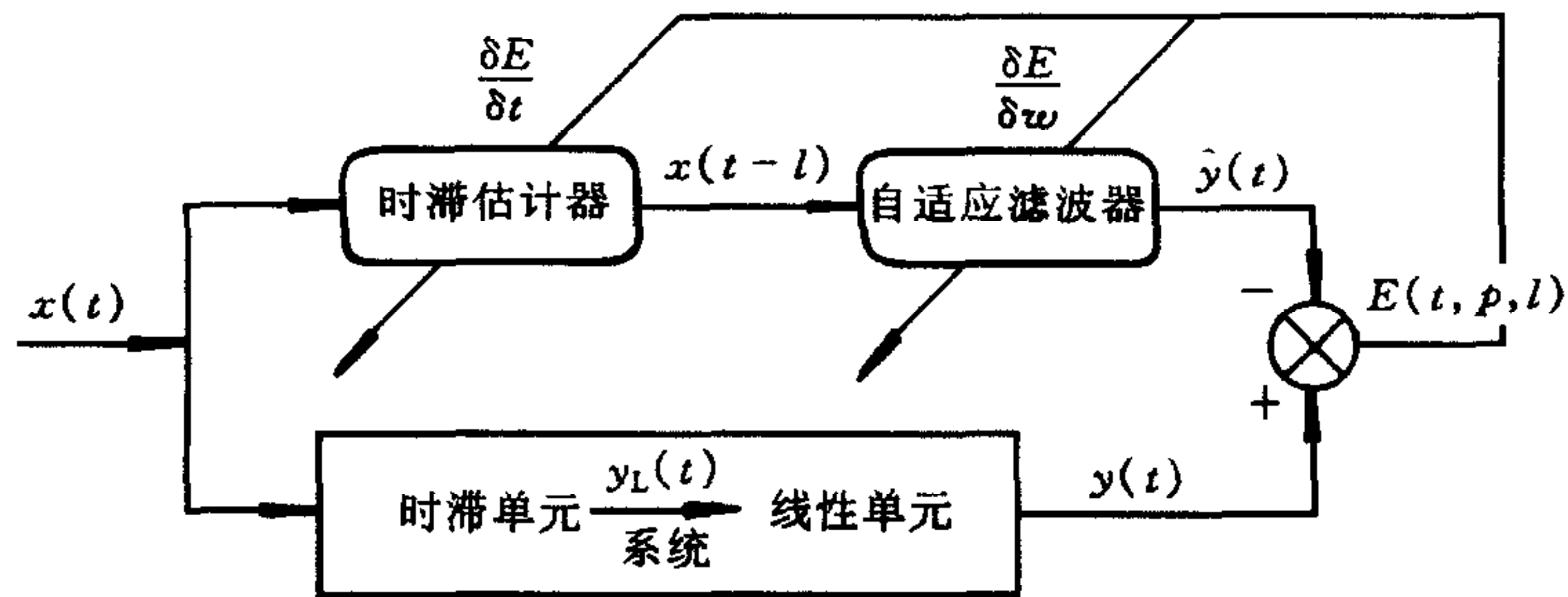


图1 结合前时滞跟踪的自适应滤波系统模型

和时滞估计值两个方向依次进行的,其优化目标函数为:

$$\min_l \min_{w(t,p,l)} e^T(t,p,l) \Lambda e(t,p,l),$$

其中,  $l$  是取非负整数值的离散变量;  $w(t,p,l)$  是  $t$  时刻时滞估计为  $l$  时  $p$  阶滤波器的拟合权向量;  $e(t,p,l)$  是  $t$  时刻时滞估计为  $l$  时  $p$  阶滤波器的拟合误差向量;  $\Lambda$  是指数遗忘律的加权矩阵,确切定义如下:

$$\begin{aligned} e(t,p,l) &= y(t) + X(t-l,p)w(t,p,l) \in R^{L \times 1}, \\ y(t) &= (y(t), y(t-1), y(t-2), \dots, y(1), 0, \dots, 0) \in R^{L \times 1}, \\ X(t,p) &= (x(t), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-p+1)) \in R^{L \times p}, \\ x(t) &= (x(t), x(t-1), x(t-2), \dots, x(1), 0, \dots, 0) \in R^{L \times 1}, \\ \Lambda &= \text{diag}(1, \lambda, \lambda^2, \dots, \lambda^{i-1}, 0, \dots, 0) \in R^{L \times L}. \end{aligned}$$

上面诸式中,  $\lambda$  是遗忘因子,  $L$  是一个充分大的常数. 采用对数据加权的形式可以把指数遗忘最小二乘问题转换为一般的最小二乘问题.

联合估计先验误差的定义为:  $e^p(t,p,l) = y(t) + \langle x(t-l,p), w(t-1,p,l) \rangle$ .

本文提出的前时滞跟踪递推最小二乘滤波算法基于输入数据的快速横向滤波器实现,它包括前后向预测滤波器  $A$ ,  $B$  以及  $\pi$  向量预测滤波器  $C$ .

前后向先验预测误差分别是:

$$f^p(t,p) = \langle x(t,p+1), A(t-1,p) \rangle, \quad g^p(t,p) = \langle x(t,p+1), B(t-1,p) \rangle.$$

### 3 递推更新关系式及联合估计稳态算法

前加窗型前时滞跟踪递推最小二乘滤波算法中,对滤波参数  $w(t,p,l)$  的优化是最小二乘意义下的,而对时滞变量  $l$  的优化则采用期望值局部比较的办法. 本文以最小二乘误差总能量函数在若干个时段上的平均值  $\underline{\epsilon}(t,p,l)$  作为其集合平均的估计. 假设比较周期是  $T$ , 比较周期内计数指标是  $\text{cmp}$ , 那么平均量的递推更新公式如下:

$$\underline{\epsilon}(t,p,l) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} \epsilon(t,p,l) = \underline{\epsilon}(t-1,p,l) + [\epsilon(t,p,l) - \underline{\epsilon}(t-1,p,l)] / \text{cmp}.$$

前时滞跟踪递推最小二乘滤波算法的线索是:  $t$  时刻,根据当前时滞估计  $l$ ,递推计算  $t-l$  时横向滤波器参数;由  $\epsilon(t-1,p,l)$  时滞减一递推得到  $\epsilon(t-1,p,l-1)$ ;计算并比较  $\underline{\epsilon}(t-1,p,l-1)$ ,  $\underline{\epsilon}(t-1,p,l)$ ,  $\underline{\epsilon}(t-1,p,l+1)$ ,确定新的时滞估计  $l_{\text{new}}$ ;根据  $l_{\text{new}}$  建立新的最小二乘误差权向量等参量系,并使得计算过程下次调用入口的  $t-l$  实际值对应横

向滤波器向前更新.

完整的稳态算法还包括横向滤波器的时间更新,以及发散救援等递推最小二乘算法的常规部分,方法是类似的.初始化参数既可由某种先验知识获取,也可采用与稳态算法类似的递推方法获得初始时滞估计和初始权向量.

本算法的方案使得横向滤波器的更新(横向滤波器后验误差法的时间复杂度是 $O(5p)$ )与时滞调整无关.联合估计部分多为标量运算,空间复杂度为 $O(p)$ .多数情况下稳态算法联合估计部分的递推计算需 $O(2p)$ 次乘法.

## 4 算法实例

将前时滞跟踪递推最小二乘滤波算法应用于合成氨生产过程中的系统建模,所用数据为现场实测数据.实际过程机理如图 2 所示,新鲜氢及循环氢的相对预测误差曲线如图 3,4 所示.

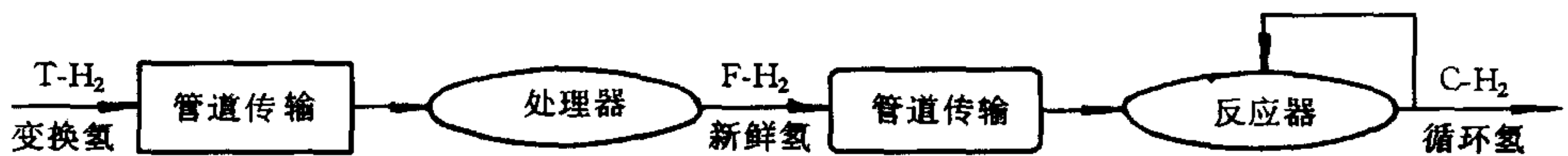


图 2 合成氨生产过程模型

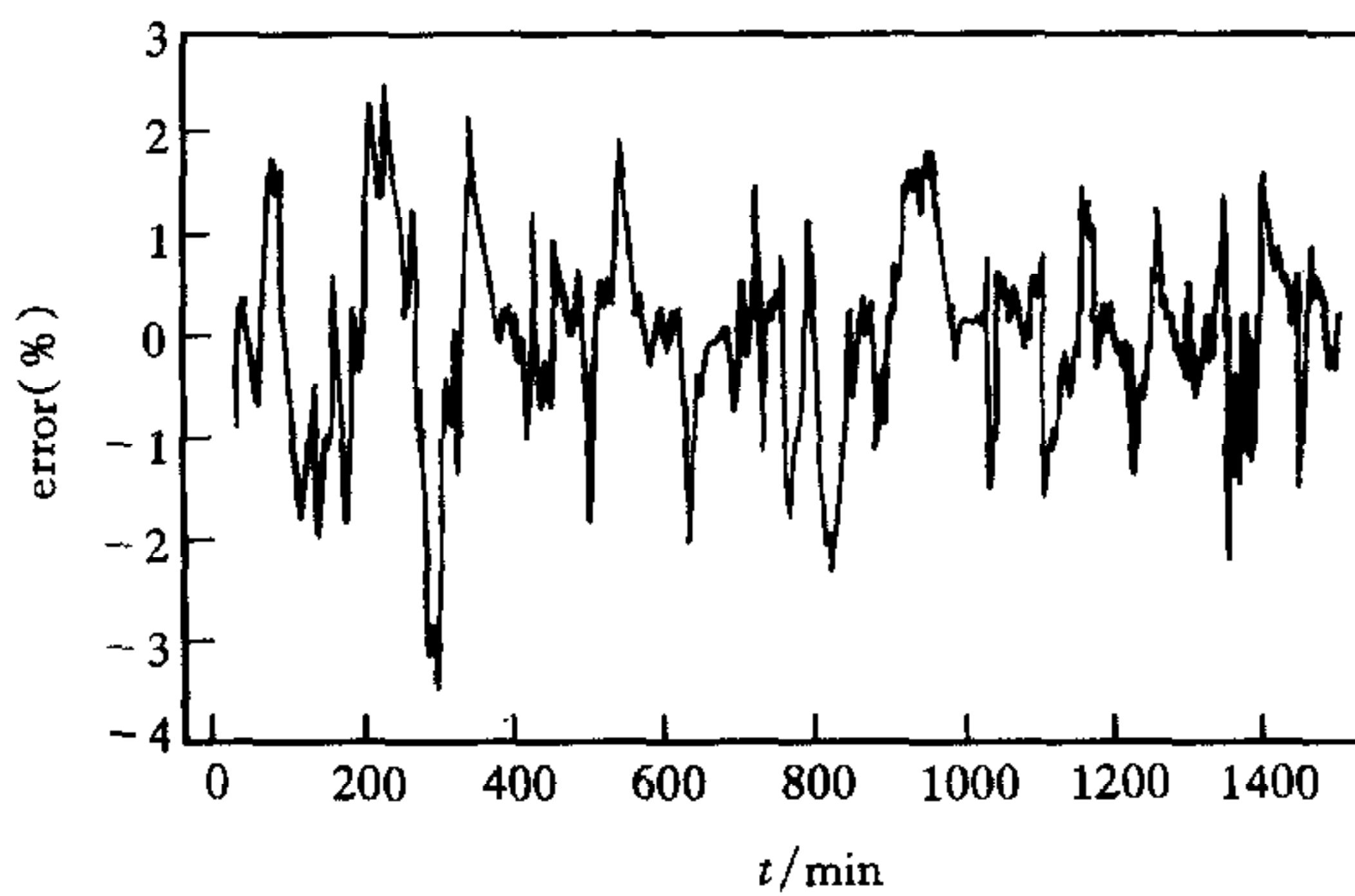


图 3 新鲜氢的相对预测误差曲线

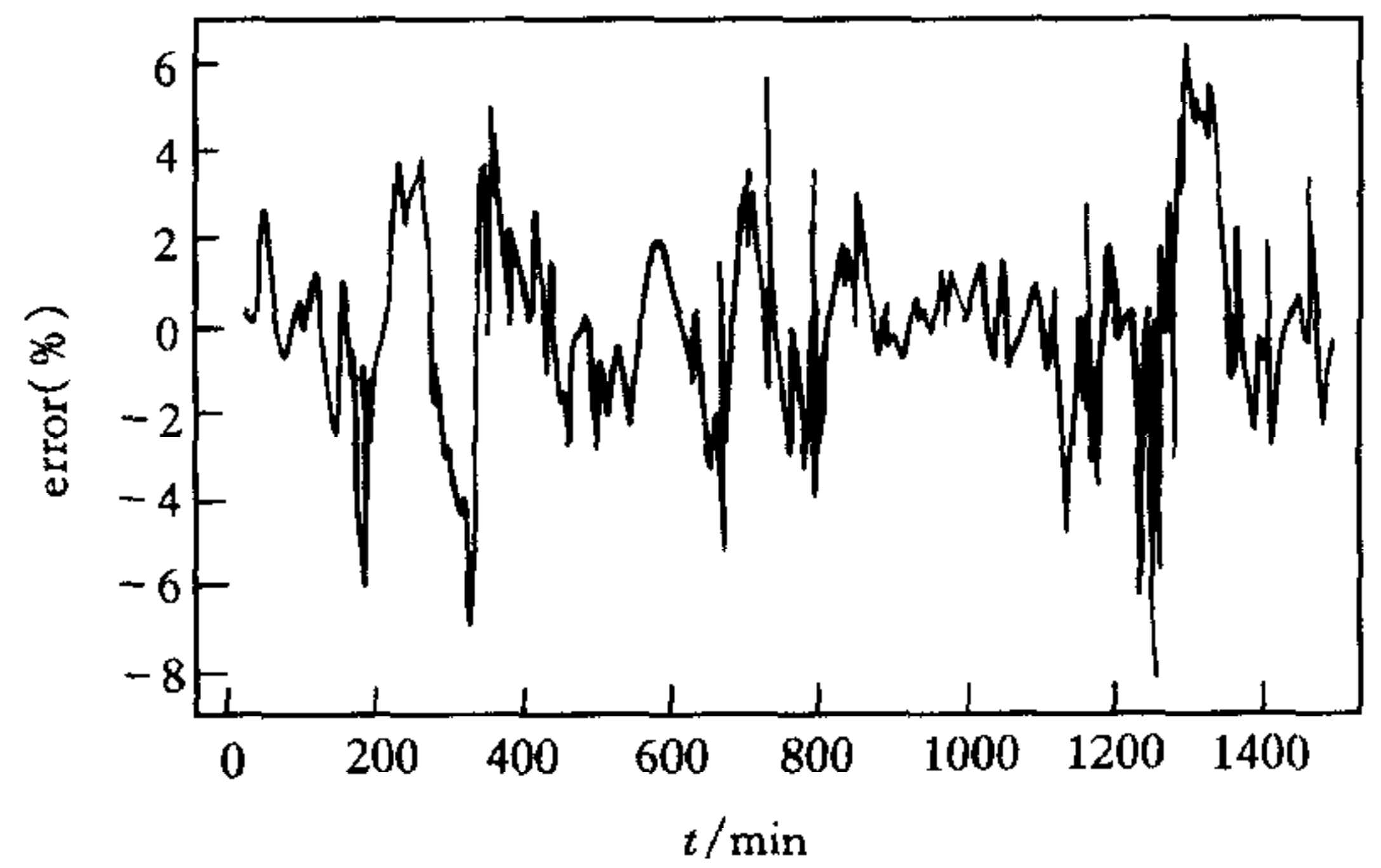


图 4 循环氢的相对预测误差曲线

结论:变换氢与新鲜氢之间可以认为是时滞不断变化,变换幅度较为稳定的模型关系.新鲜氢与循环氢之间,不仅有时变的管道传输,而且反应器经历的化学变化与其它参数(如温度,气体压力,体积比等等)有比较复杂的关系.上面的模型一方面展示了前时滞跟踪递推最小二乘滤波算法的有效性,另一方面就新鲜氢与循环氢的建模问题,还可以结合其它可测参量以及数据预处理等方法得到进一步改进.

## 5 结束语

本文针对先时滞后滤波的串联系统模型,提出基于快速横向滤波器的递推最小二乘

滤波算法,并以合成氨生产过程现场数据为例进行模型预测.该算法简单,不需要先验知识,时间复杂度仅为  $O(7p)$ .在仿真生产过程 25 个小时的数据中,变换氢到新鲜氢的相对预测误差不超过 4%,新鲜氢到循环氢的相对预测误差不超过 8%,这一效果比采用互相关技术获得固定时滞估计的许多自适应滤波模型有显著提高.

最后应当指出,如果系统的时滞单元变化较快,以致于线性单元的  $p$  阶输入线来自同一时滞的假设不能接受,那么图 1 描述的学习系统模型的时滞跟踪能力是不够的.所以本文提出的自适应前时滞跟踪递推最小二乘滤波算法适合于变时滞低阶系统建模.

### 参 考 文 献

- 1 杨保民,孙明,孙翔. 滞后不确定系统的鲁棒稳定调节器设计. 自动化学报,1994,20(2): 202-207
- 2 褚健,胡协和,钟镔,陈虹. 离散时滞系统最优跟踪控制及应用. 自动化学报,1995,21(1): 25-31
- 3 厉隽恂,席裕庚. 串联时滞工业系统的预测控制设计. 自动化学报,1995,21(2): 129-136
- 4 LIM, TENG JOON, MACLEOD, MALCOLM D. Adaptive algorithms for joint time delay estimation and IIR filtering. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1995, 43(4): 841-851
- 5 BOUDREAU, DANIEL, KABAL, PETER. Joint gradient-based time delay estimation and adaptive filtering, In Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., 1990. 3165-3169
- 6 BOUDREAU, DANIEL, KABAL, PETER. Joint time-delay estimation and adaptive recursive least squares filtering. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993, 41(2): 592-601

## JOINT ESTIMATION STEADY ALGORITHM AND ITS APPLICATION TO PROCESS IDENTIFICATION

YU XINGXING    ZHANG DALI    YAN PINGFAN

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** In industry production processes, there are many serial systems of delay and filter. Joint identification of delay and filter is the cross research area of adaptive system modeling and time delay estimation. For the system model in which the input signal is first delayed and then filtered, this paper develops a pre-delay tracking recursive least squares filtering algorithm based on fast transversal filter realizations. The algorithm is applied to model prediction of a chemical industry process for synthetic ammonia. the simulation results justify that this kind of delay tracking adaptive filter is suitable for low order and varying time delay system modeling.

**Key words** Time delay, joint estimation, recursive least squares, adaptive filtering