第 17 卷 第 3 期　　自 动 化 学 报　　Vol. 17, No. 3
1991 年 5 月　　ACTA AUTOMATICA SINICA　　May, 1991

一种自动调整遗忘因子的快速时变参数辨识方法

阎晓明　李言俊　陈新海
(西北工业大学航天工程学院，西安)

摘　　要

本文介绍了一种自动调整遗忘因子的快速时变参数辨识方法. 这种方法主要是在文献[1,2]的基础上改进了遗忘因子的选取方法，引入了自动调整遗忘因子，以适应导弹控制系统等快速时变系统的参数估计要求. 数字仿真结果表明，这种辨识方法对于诸如参数的指数变化、斜坡变化、阶跃变化、正弦变化、方波变化以及由这些变化形式构成的混合变化，都有比较好的辨识效果.

关键词: 系统辨识，快速时变参数，遗忘因子.

一、前　　言

在导弹自适应控制系统设计中，关键的一个问题是系统参数辨识. 由于导弹在飞行过程中参数变化极其剧烈，现有的大多数辨识算法都无法使导弹自适应控制系统满足技术要求. 文献[1,2]曾提出一种时变参数辨识方法，对于慢时变系统有较好的辨识结果，而对于导弹控制系统之类的快速时变系统则具有比较大的辨识误差. 本文在文献[1,2]所提出的辨识方法基础上进行了改进，引入了自动调整遗忘因子，使得对于快速时变系统的辨识效果有了很大改善.

二、辨 识 算 法

设由时变 ARMAX 模型描述的对象为

$$y(t+1)=a_1(t)y(t)+\cdots+a_n(t)y(t-n+1)+b_1(t)u(t)+\cdots+b_m(t)u(t-m+1)+\xi(t), \tag{1}$$

式中 y 和 u 分别为对象的输出和控制变量; $a_i, b_j (i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m)$ 为系统时变参数; $\{\xi(t)\}$ 是均值为零的独立随机干扰序列; a_i, b_j 和 $\{\xi(t)\}$ 未知，假设对象阶数 n, m 已知，并且控制多项式是稳定的.

本文于 1989 年 4 月 14 日收到.

对象(1)可近似表示为

$$y(t+1)=(a_{10}+t_1a_{11})y(t)+\cdots+(a_{n0}+t_1a_{n1})y(t-n+1)+(b_{10}+t_1b_{11})u(t)+\cdots+(b_{m0}+t_1b_{m1})u(t-m+1), \tag{2}$$

式中 t_1 的定义在后面给出.

设

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}^T(t)=[\hat{\boldsymbol{\theta}}_1^T(t),\hat{\boldsymbol{\theta}}_2^T(t)], \tag{3a}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_1^T(t)=[\hat{a}_{10},\cdots,\hat{a}_{n0},\hat{b}_{10},\cdots,\hat{b}_{m0}], \tag{3b}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_2^T(t)=[\hat{a}_{11},\cdots,\hat{a}_{n1},\hat{b}_{11},\cdots,\hat{b}_{m1}], \tag{3c}$$

$$\boldsymbol{\phi}^T(t)=[\boldsymbol{\phi}_1^T(t),t_1\boldsymbol{\phi}_1^T(t)], \tag{4a}$$

$$\boldsymbol{\phi}_1^T(t)=[y(t),\cdots,y(t-n+1),u(t),\cdots,u(t-m+1)]. \tag{4b}$$

文献[1,2]给出的辨识算法为

$$e(t)=y(t)-\hat{\boldsymbol{\theta}}^T(t-1)\boldsymbol{\phi}(t-1), \tag{5a}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1)+\frac{P(t-2)\boldsymbol{\phi}(t-1)e(t)}{\lambda+\boldsymbol{\phi}^T(t-1)P(t-2)\boldsymbol{\phi}(t-1)}, \tag{5b}$$

$$P(t-1)=\frac{1}{\lambda}\left[P(t-2)-\frac{P(t-2)\boldsymbol{\phi}(t-1)\boldsymbol{\phi}^T(t-1)P(t-2)}{\lambda+\boldsymbol{\phi}^T(t-1)P(t-2)\boldsymbol{\phi}(t-1)}\right], \tag{5c}$$

式中 $\lambda\in(0,1]$ 为遗忘因子.

在计算开始时刻选取 $t=t_1=1, P(-1)=C_0I, C_0>0$ 为常数. 在计算过程中,当 $kT<t<(k+1)T, k=0,1,\cdots$时,则令 $t_1=t-kT$, 式中T为由设计者选择的重置周期. 当 $t=kT$ 时,先用辨识算法(5)计算 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 和 $P(t-1)$,然后用下述公式进行重置:

$$t_1=0,\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(kT)=\begin{bmatrix}I_1 & TI_1\\ 0 & I_1\end{bmatrix}\hat{\boldsymbol{\theta}}(kT^-) \tag{6a}$$

$$P(kT-1)=\begin{bmatrix}I_1 & TI_1\\ \mathbf{0} & I_1\end{bmatrix}P(kT^--1)\begin{bmatrix}I_1 & \mathbf{0}\\ TI_1 & I_1\end{bmatrix}, \tag{6b}$$

式中 kT^- 表示在重置前的邻近时刻, I_1 和O分别为 $(m+n)\times(m+n)$ 单位阵和零阵.

上述辨识方法由于采用定常遗忘因子,只能用于慢时变系统. 但是,在实际工程问题中,常有一些时变系统的动态特性不是总按照基本相同的规律变化, 而是有时变化很快, 有时变化很慢,有时还发生突变. 对于这类系统,若选用定常遗忘因子, 无法得到满意的结果. 其原因是很清楚的: 若根据参数的快变化选择较小的遗忘因子, 则在参数变化慢时从数据中得到的信息就少,将导致参数估计误差按指数增大,这时对干扰非常敏感. 若根据参数的慢变化选择较大的遗忘因子,能记忆很远的数据,则会对系统参数的突然变化反应不灵敏. 所以,对于动态特性变化较大的系统,应随着动态特性的变化自动调整遗忘因子. 当系统参数突变时自动选择较小的遗忘因子, 以提高辨识灵敏度. 当参数变化较慢时,自动选择较大的遗忘因子,增加记忆长度, 使辨识精度提高. 根据这种指导思想所产生的新辨识算法为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1)+\frac{P(t-2)\boldsymbol{\phi}(t-1)e(t)}{F(t)+\boldsymbol{\phi}^T(t-1)P(t-2)\boldsymbol{\phi}(t-1)},\tag{7a}$$

$$P(t-1)=\frac{1}{F(t)}\left[P(t-2)-\frac{P(t-2)\boldsymbol{\phi}(t-1)\boldsymbol{\phi}^T(t-1)P(t-2)}{F(t)+\boldsymbol{\phi}^T(t-1)P(t-2)\boldsymbol{\phi}(t-1)}\right],\tag{7b}$$

$$F(t)=1-\left[1-\frac{\boldsymbol{\phi}^T(t-l_0-1)P(t-1)\boldsymbol{\phi}(t-l_0-1)}{1+\boldsymbol{\phi}^T(t-l_0-1)P(t-1)\boldsymbol{\phi}(t-l_0-1)}\right]\frac{e^2(t)}{R},\tag{7c}$$

式中 l_0 是由设计者选择的遗忘步长，R 为设计参数，可选为常数，也可根据需要选择按一定规律变化的变量，但需满足关系式 $0<F(t)<1$. 为防止意外的干扰使 $F(t)$ 变化过大，对 $F(t)$ 应加以限制：当 $F(t)>F_{\max}$ 时，令 $F(t)=F_{\max}$；当 $F(t)<F_{\min}$ 时，令 $F(t)=F_{\min}$. 这种新辨识算法的其余部分与原方法相同.

系统参数的估值用下式计算：

$$\hat{a}_i(t)=\hat{a}_{i0}(t)+t_1\hat{a}_{i1}(t),\ i=1,2,\cdots,n,\tag{8a}$$

$$\hat{b}_j(t)=\hat{b}_{j0}(t)+t_1\hat{b}_{j1}(t),\ j=1,2,\cdots,m.\tag{8b}$$

与原方法相比，这种自动调整遗忘因子的新算法在辨识快速时变参数时增加计算量不多，但性能却有很大改进.

三、数字仿真结果

笔者曾对许多具体实例进行了大量数字仿真，选择的参数变化形式有指数变化、斜坡变化、阶跃变化、正弦变化、方波变化以及由这些变化形式所构成的混合变化，将原方法与本文所提出的新方法进行了对比，获得了近百条曲线. 这些仿真结果表明，这种加入自动调整遗忘因子的新辨识算法优于原方法，更优于普通的衰减记忆递推最小二乘法. 受篇幅限制，在此仅举一例.

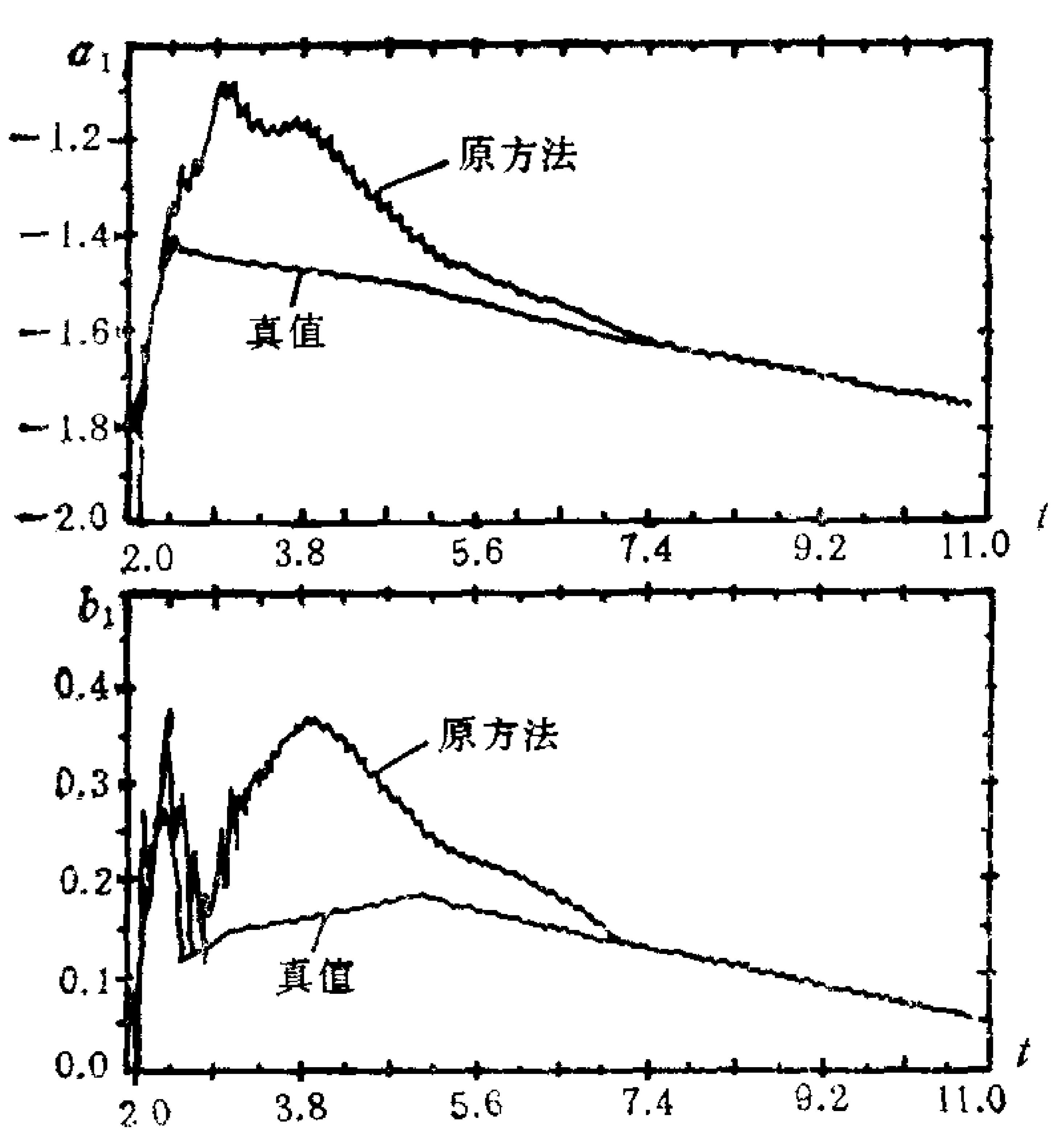

图 1 原方法对反坦克导弹控制系统参数辨识结果

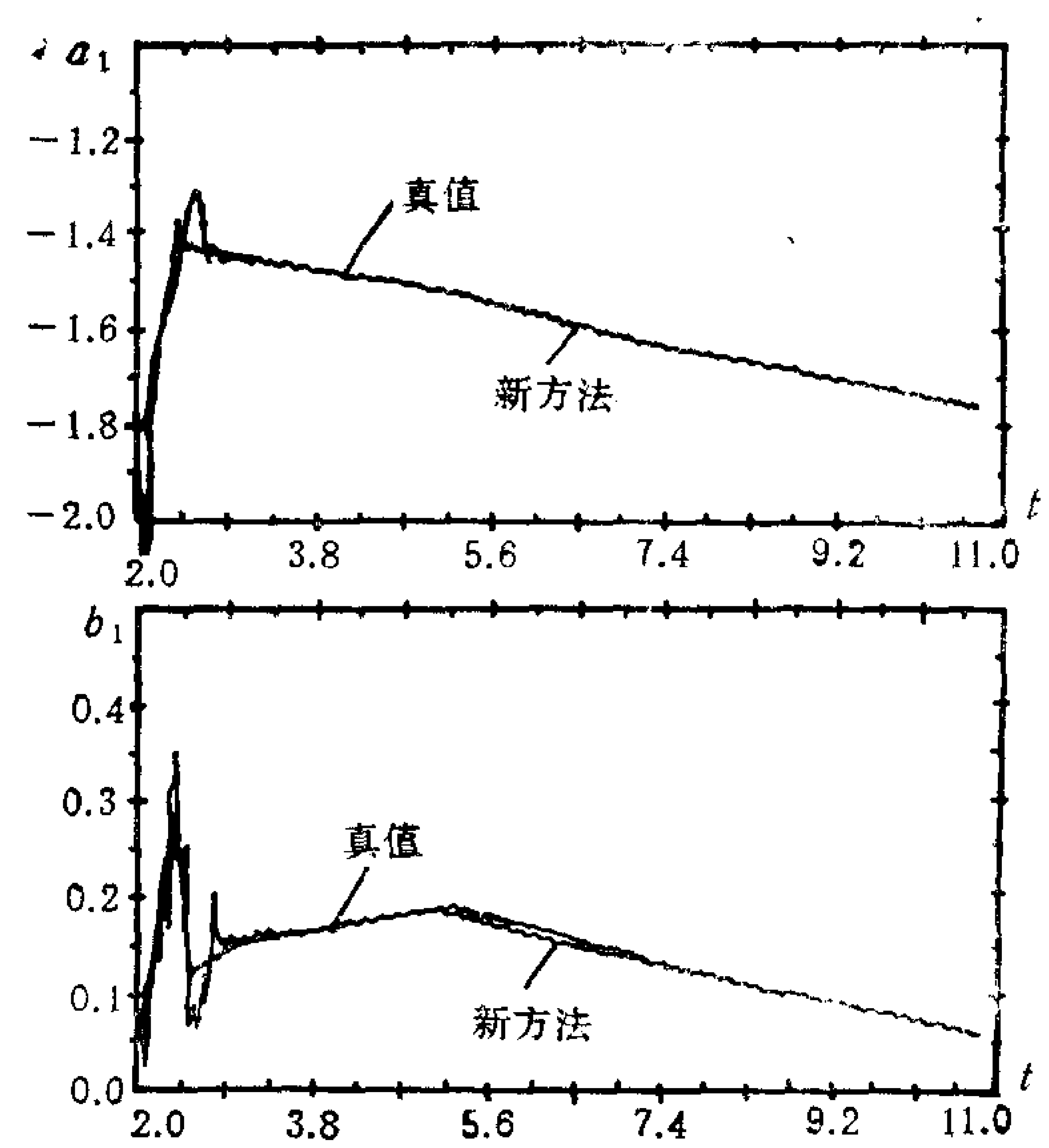

图 2 新方法对反坦克导弹控制系统参数辨识结果

反坦克导弹控制系统简化模型差分方程为

$$y(t+1)=a_1(t)y(t)+a_2(t)y(t-1)+b_1(t)u(t)+b_2(t)u(t-1), \tag{9}$$

图 1 和图 2 所示为反坦克导弹控制系统参数 a_1 和 b_1 的辨识结果。图 1 采用的是原方法，图 2 采用的是新方法。由这些曲线可以明显看出，新方法对于参数的快速变化有较强的适应能力，其辨识结果远优于原方法。

参 考 文 献

[1] Xie, X. and Evans, R. J., Discrete-time Adaptive Control for Deterministic Time-varying Systems, *Automatica,* **20**(1984), 309—319.

[2] Xie, X. and Evans, R. J., Discrete-time Stochastic Adaptive Control for Time-varying Systems, *IEEE Trans.,* **AC-29**(1984), 638—640.

[3] Fortescue, T. R., Kershenbaum, L. S. and Ydstie, B. E., Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors, *Automatica,* **17**(1981), 831—835.

[4] Bayoumi, M. M., Wong, K. Y. and Nuyan S., Comparative Study of Some Estimation Algorithms for The Self-tuning Control of Time-varying Systems, *Control and Computer,* **14**(1986), 1—7.

AN IDENTIFICATION ALGORITHM WITH AUTO-REGULATION FORGETTING FACTOR FOR FAST TIME VARING SYSTEM

Yan Xiaoming　Li Yanjun　Chen Xinhai

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University)

Abstract

This paper presents an identification algorithm with auto-regulation forgetting factor for fast time-varying systems. This algorithm is based on Ref[1,2] and perfectly improves the method for choosing forgetting factor, and in the algorithm the auto-regulation factor is introduced so as to cope with parameter estimation of fast time varying systems such as missile control system, etc.. Digital simulation results show that this algorithm is satisfactory for identifying the parameters which change in the form of some typical functions (e.g., exponential, slide, step, sine, square or their combination).

Key words: System identification; fast time varying parameter; forgetting factor.