

具有积分作用的自适应控制算法及其应用

王 伟

(东北工学院自控系, 沈阳)

摘 要

本文对存在有界扰动的 CARIMA 模型提出一种自适应控制算法, 并进行了稳定性分析. 该控制算法可用于非最小相位系统的控制, 并能保证输出无稳态误差. 文中还介绍了该算法在玻璃纤维拉丝炉漏板温度控制中的应用.

关键词: 自适应控制, 有界扰动, 稳定性, 跟随误差.

一、引 言

许多被控系统不得不在各种扰动下工作. 对于这些扰动通常很难预先知道它们的统计特性, 但是它们的变化范围则比较容易确定. 一些学者研究了存在有界扰动时系统的自适应控制问题^[1-3]. 然而这些研究仍有不足: 其一是不能控制非最小相位系统; 其二是未考虑稳态误差问题. 本文基于 CARIMA 模型^[4,5], 提出一种存在有界扰动时具有积分作用的自适应控制算法, 从而使得该算法不但能控制非最小相位系统, 而且能消除稳态偏差. 本文将提出的算法用于某厂的玻璃纤维拉丝炉漏板的温度控制, 取得了满意的控制效果.

二、自适应控制算法

设被控系统可用如下的 CARIMA 模型描述:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-k) + \xi(t)/\Delta, \quad (2.1)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \cdots + a_nq^{-n}, \quad B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \cdots + b_mq^{-m}.$$

其中 $b_0 \neq 0$; q^{-1} 是后移算子; Δ 表示 $1 - q^{-1}$; $u(t)$, $y(t)$ 和 $\xi(t)$ 分别表示被控制系统的输入、输出和有界扰动; k 为正整数, 表示系统的延迟.

使用下列多项式等式:

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})F(q^{-1})\Delta + q^{-k}G(q^{-1}), \quad (2.2)$$

其中 $P(q^{-1})$, $F(q^{-1})$ 和 $G(q^{-1})$ 是 q^{-1} 的多项式, 阶次分别为 p , $k-1$ 和 g ,

$$g = \max\{p-k, n\}.$$

利用 (2.2) 式, 不难将 (2.1) 式写成

$$P(q^{-1})y(t+k) = \mathbf{x}(t)^T \boldsymbol{\theta} + d(t+k). \quad (2.3)$$

其中 $\boldsymbol{\theta}^T = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_g, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{m+k-1}]$,

$$\mathbf{x}(t)^T = [y(t), y(t-1), \dots, y(t-g), \Delta u(t), \Delta u(t-1), \dots,$$

$$\Delta u(t-m-k+1)],$$

$$d(t+k) = \xi(t+k) + f_1 \xi(t+k-1) + \dots + f_{k-1} \xi(t+1).$$

显然 $d(t)$ 仍然是有界扰动. 设 M 为 $|d(t)|$ 的一个已知上界; 即

$$\sup |d(t)| \leq M, \quad \forall t \geq 0. \quad (2.4)$$

当参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 未知时, 用 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 表示 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计值. 考虑到有界扰动 $d(t)$ 对参数估计的影响, 使用具有估计死区的参数估计算法如下:

$$\varepsilon(t) = P(q^{-1})y(t) - \mathbf{x}(t-k)^T \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1), \quad (2.5)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) + \frac{\lambda(t)P(t-2)\mathbf{x}(t-k)\varepsilon(t)}{1 + \mathbf{x}(t-k)^T P(t-2)\mathbf{x}(t-k)}, \quad (2.6)$$

$$P(t-1) = P(t-2) - \frac{\lambda(t)P(t-2)\mathbf{x}(t-k)\mathbf{x}(t-k)^T P(t-2)}{1 + \mathbf{x}(t-k)^T P(t-2)\mathbf{x}(t-k)}, \quad (2.7)$$

$$\lambda(t) = \begin{cases} 0, & \text{如果 } |\varepsilon(t)| < 2M, \\ r, & \text{如果 } |\varepsilon(t)| \geq 2M. \end{cases} \quad (2.8)$$

其中 $r \in [\omega, 3(1-\omega)/4]$, 且 $0 < \omega < 3/7$.

由参数估计得到 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 后, 下式产生控制 $u(t)$.

$$\mathbf{x}(t)^T \hat{\boldsymbol{\theta}}(t) - P(q^{-1})y^*(t+k) + Q(q^{-1})\Delta u(t) = 0. \quad (2.9)$$

其中 $y^*(t)$ 为参考序列; $Q(q^{-1})$ 为 q^{-1} 的多项式. 式 (2.5)–(2.9) 组成一个自适应控制算法.

注 1. 当 (2.1) 式中 $\xi(t)$ 为零均值的白噪声且参数估计 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \boldsymbol{\theta}$ 时, (2.9) 式给出的控制律对下列性能指标是最优控制律.

$$J = \mathbf{E}[P(q^{-1})(y(t+k) - y^*(t+k)) + Q(q^{-1})\Delta u(t)]^2.$$

其中 \mathbf{E} 表示数学期望.

对系统 (2.1) 作如下基本假设:

A1. n, m 和 k 已知;

A2. 离线选取 $P(q^{-1})$ 和 $Q(q^{-1})$ 使得多项式

$$f(q^{-1}) = P(q^{-1})B(q^{-1}) + Q(q^{-1})A(q^{-1})\Delta$$

是稳定的, 即对 $f(z) = 0, |z| > 1$.

定理 1. 在假设 A1 和 A2 下, 如果自适应控制算法 (2.5)–(2.9) 应用到被控系统 (2.1), 则闭环系统在下列意义下是全局稳定的.

1) $\sup \|\mathbf{x}(t)\| < \infty$,

2) 存在 $T < \infty$, 当 $t \geq T$ 时, $|\varepsilon(t)| < 2M$.

证明. 将 $\Delta u(t)$ 看作 $u(t)$, $A(q^{-1})\Delta$ 看作 $A(q^{-1})$, 结果可从文献 [6] 定理 1 获得.

定理 2. 在假设 A1 下, 如果自适应控制算法 (2.5)–(2.9) 应用到被控系统 (2.1) 且

$B(q^{-1})$ 是稳定多项式; 即 $B(z) = 0, |z| > 1$, 则存在 $T < \infty$, 当 $t \geq T$ 时,

$$|e(t)| < 2M.$$

证明. 参见文献 [6].

三、拉丝炉漏板温度自适应控制

本文提出的自适应控制算法对某厂玻璃纤维拉丝炉漏板进行了温度控制实验. 下面介绍一下拉丝炉工作原理.

原料玻璃球从炉子上端的进料孔不断进入炉内, 在炉内两侧加热电极电压的作用下, 玻璃球被加热、熔化, 并通过玻璃液高温导电的特性来维持电极间加热电流的连续. 玻璃液在本身的重力及炉子下方拉丝卷筒的拉力下, 流经炉子底部合金漏板上的小孔 (200 孔), 被连续拉制成丝径一定的一束玻璃纤维. 为保证产品的质量及作业稳定, 工艺上要求拉丝炉的漏板温度恒定不变.

自适应控制算法是用 ZD-065 微型机实现的. 输入模拟量是经热电偶测得的温度信号, A/D 转换器为 12 位, 温度控制范围为 1050°C — 1250°C . 微机输出的控制信号的数字量经过 8 位的 D/A 模出通道转换为连续电压信号, 然后去控制向漏板供电的可控硅系统. 算法的软件由 BASIC 语言和汇编语言共同组成.

模型 (2.1) 式中取 $n = 1, m = 1$ 和 $k = 1$. 算法中参数选取如下: $P(q^{-1}) = 1, Q(q^{-1}) = 0, M = 0.025, r = 0.7$. 采样时间为 3.27 秒. 温度设定值为 1174°C . 图 1 和图 2 分别表示了用本文算法控制漏板温度时的温度曲线和相应的控制信号. 图 3 表示了算法的参数估计. 同原来模拟仪表控制时的温度波动 ($\pm 12^{\circ}\text{C}$) 相比, 温度控制精度提高了. 从而稳定了作业, 提高了纤维丝的产量和质量.

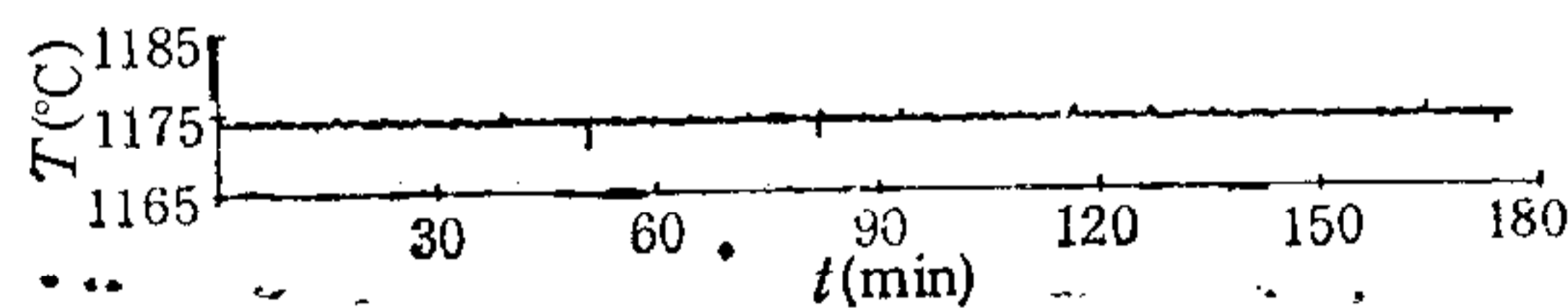


图 1 自适应控制时的漏板温度曲线

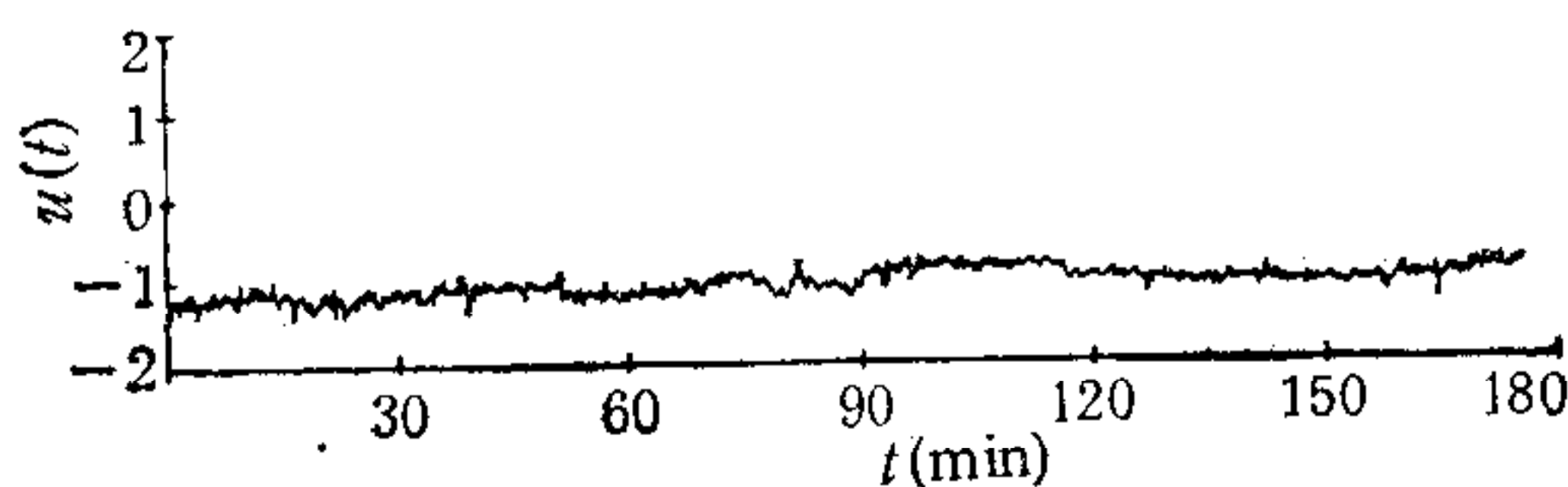


图 2 相应的控制 $u(t)$

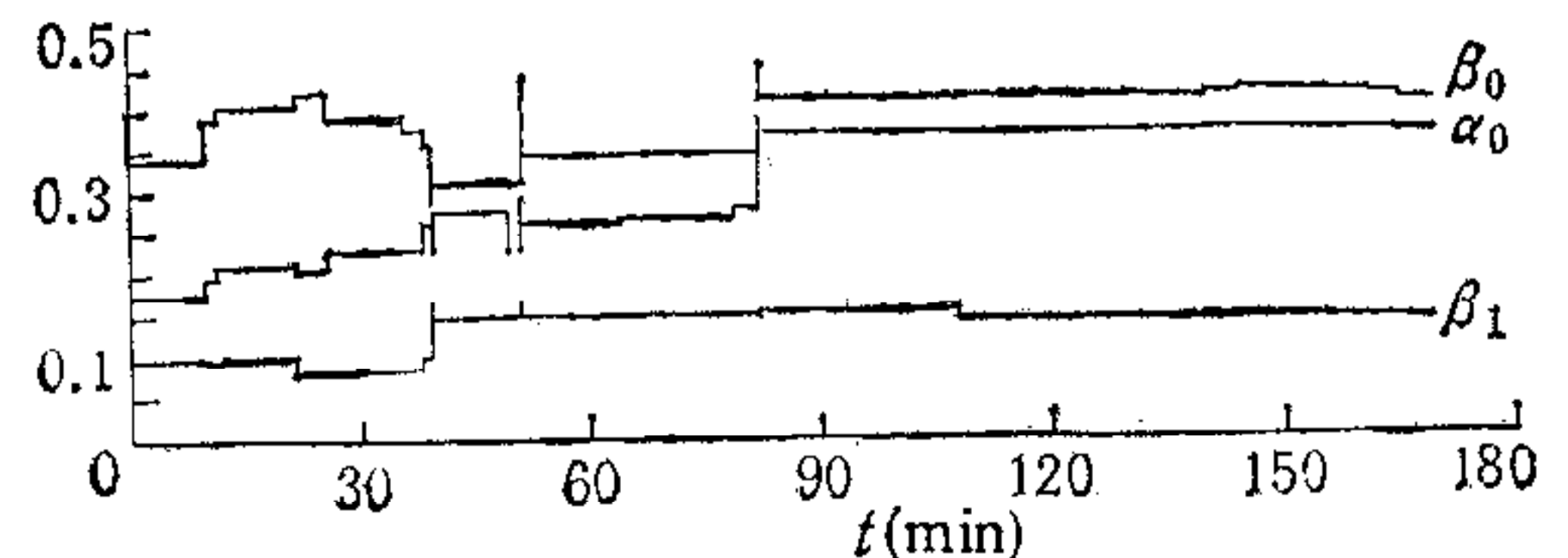


图 3 算法的参数估计

四、结 论

(1) 由于使用 CARIMA 模型来描述被控系统, 自适应控制算法可自动产生一个积

分作用,尽管实时控制时有较大的阶跃扰动存在,但稳态偏差可以消除。

(2) 不同于普通的最小二乘参数估计,本文使用了具有估计死区的最小二乘参数估计。所以只有当估计误差大于指定界限时,自适应才起作用。当估计误差小于指定界限时,估计算法关闭,自适应控制算法如同整定好的 PID 调节器。这样做的好处是一方面可以防止参数估计中的“激增”现象;另一方面保证参数估计当被控系统参数缓慢变化时的跟踪能力。

(3) 由于在自适应控制算法中引入了 $P(q^{-1})$ 和 $Q(q^{-1})$ 的加权,使得该算法可以控制非最小相位系统。同时合适地选取 $P(q^{-1})$ 和 $Q(q^{-1})$ 还可减少过大的控制 $u(t)$ 并使得系统输出具有好的动态性能。

(4) 拉丝炉漏板温度的控制结果表明,本文提出的自适应控制算法是可行的,因而可以应用于实际的生产过程控制。

参 考 文 献

- [1] Martin-Sanchez, J. M., A globally Stable APCS in the Presence of Bounded Noise and Disturbances, *IEEE Trans.* **AC-29**(1984), 461—464.
- [2] Ortega, R. and Leal, R. L., A Note on Direct Adaptive Control of Systems With Bounded Disturbances, *Automatica*, **23**(1987), 253—255.
- [3] 顾兴源、邵诚,按条件更新参数的自校正控制器,自动化学报,**15**(1989),232—241.
- [4] Scattolini, R. and Clarke, D. W., Multivariable Model-following Self-tuning Control With Offset Rejection, *Int. J. Control*, **42**(1985), 1309—1322.
- [5] Scattolini, R., A Multivariable Self-tuning Controller With Integral Action, *Automatica*, **22**(1986), 619—627.
- [6] Gu Xing Yuan and Wang Wei, On the Stability of a Self-tuning Controller in the Presence of Bounded Disturbances, *IEEE Trans.* **AC-34**(1989), 211—214.

AN ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM WITH INTEGRAL ACTION AND ITS APPLICATION

WANG WEI

(Northeast University of Technology)

ABSTRACT

In this paper, a direct adaptive control algorithm is presented for the controlled autoregressive integrated moving-average (CARIMA) model with bounded disturbances and the proof of its global stability is carried out. The algorithm can deal with nonminimum-phase systems and guarantee a steady-state zero-error output. An application of the adaptive control algorithm to temperature control of a glass fiber stove is also given.

Key words: Adaptive control; bounded disturbance; stability; tracking error.