

无持续激励和严格正实条件的 自适应控制系统

王柏林

(华中工学院)

摘 要

针对含不可测外扰的非最小相位对象,发展了一种不要求“持续激励”和“严格正实”条件的自适应控制系统。提出了这类系统的在线算法并证明了它的收敛性。所提出的算法保证了自适应系统的稳定性和足够小的控制误差。

关键词——自适应控制,持续激励条件,正实条件。

一、引 言

持续激励条件、严格正实条件、非最小相位特性、不可测外扰等是实际应用自适应控制技术时经常遇到的几个难点。

自校正控制器结构灵活、对被控对象的先验知识要求较少,但要求“持续激励”。对一个阶次不能准确知道的系统如何保证持续激励?一些不宜引入附加激励的系统又怎么办?直接式模型参考自适应控制系统不要求持续激励,但它不能用于非最小相位系统。

近年来,有些学者在放弃持续激励条件方面做了工作^[1,2,3,5]。总的说,对于无外扰的确定性系统和有外扰的逆稳定系统解决得较好^[1,3,7],对于含不可测外扰或随机干扰的非逆稳定系统未较好地解决。

在含外扰的逆稳定系统的解决办法中,大多附加了与对象模型或扰动模型有关的严格正实条件,有的还要求知道干扰的统计特性,这又从另一角度给应用带来了理论上的困难。

本文的工作是在 Goodwin 等人及作者本人工作^[9,10]的基础上发展而来的,但这里所导出的自适应系统与 Goodwin 等人所提出的自适应系统是不同的。后者用方程误差法进行辨识,前者则用输出误差法进行辨识;后者属于直接自适应系统,前者属于间接自适应系统。正因为如此,前者对非最小相位系统较易处理。

二、系统结构与基本原理

本文所采用的自适应控制系统基本结构如图1所示。其中, $G(z)$ 是被控对象的传

递函数, $\hat{G}(z)$ 是并联模型的传递函数, $H(z)$ 是控制器的传递函数. $G(z)$ 的参数是未知的, $\hat{G}(z)$ 实际上是关于 $G(z)$ 的估计, $H(z)$ 的参数则根据模型参数 $\hat{\theta}(t)$ 及时调整.

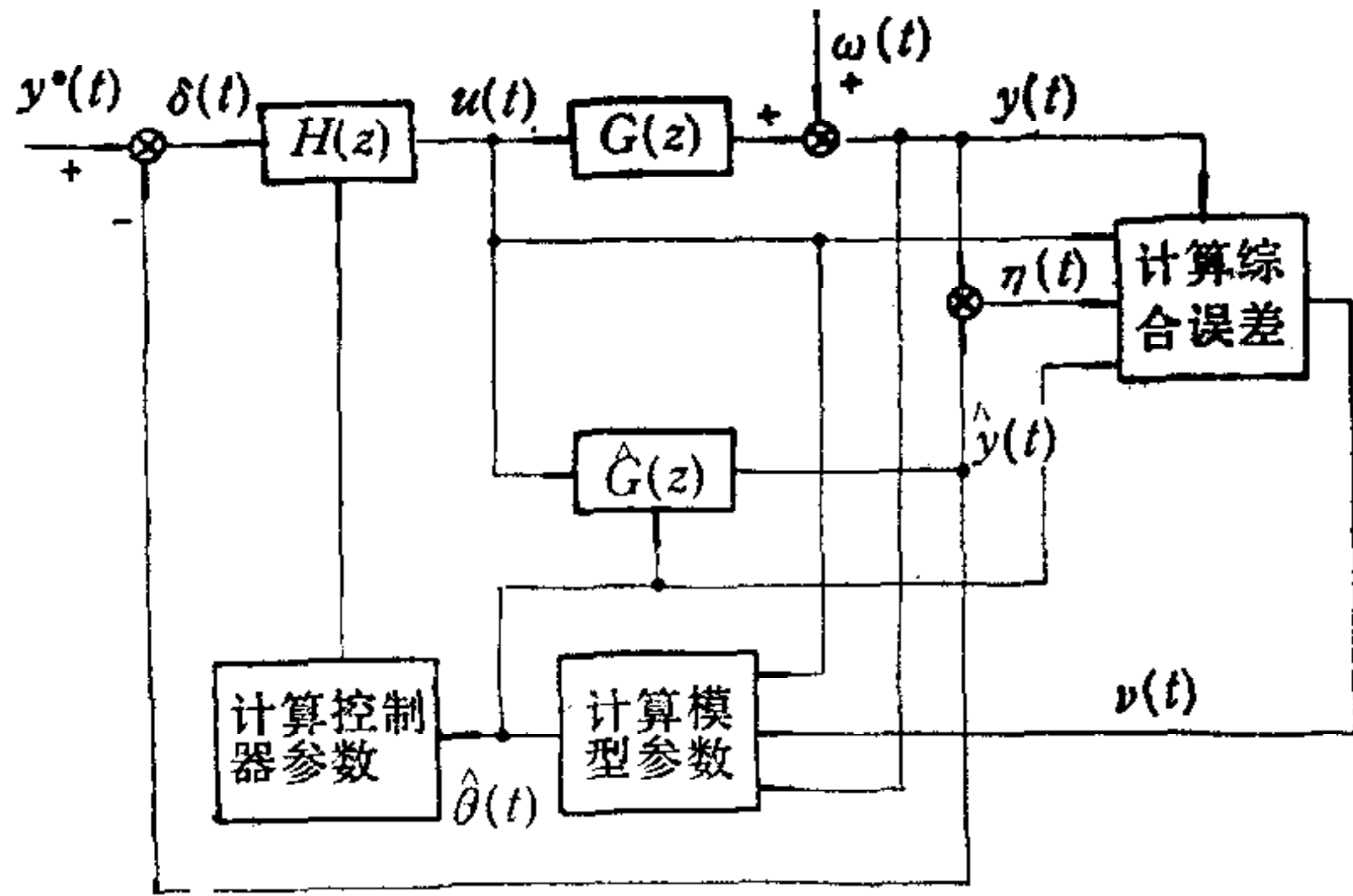


图 1 自适应控制系统基本结构

图 1 所示的自适应控制系统具有以下特性:

定理 1. 对于图 1 所示的自适应控制系统, 如果

$$|\eta(t)| \leq c_1 < \infty, |\delta(t)| \leq c_2 < \infty,$$

必有 $|y(t) - y^*(t)| \leq c_1 + c_2 < \infty$ ($t = 0, 1, 2, \dots$) (有界性); 如果

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} |\eta(t)| \leq \eta_0 < \infty, \limsup_{t \rightarrow \infty} |\delta(t)| \leq \delta_0 < \infty,$$

那么 $\limsup_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y^*(t)| \leq \eta_0 + \delta_0$; 特别当 $\delta_0 = \eta_0 = 0$ 时有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - y^*(t)| = 0$$

(跟踪特性).

注. 在不要求持续激励和严格正实条件、对象非逆稳定又存在外扰的情况下, 实现并联模型的输出跟踪过去尚未解决 (哪怕允许存在可以接受的跟踪误差 η_0). 当参考输入 $y^*(t)$ 的模型已知时, 设计 $H(z)$ 使 $\delta_0 = 0$ 并不困难.

三、模型参数的投影算法

设被控对象由下列差分方程描述:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + \omega(t). \tag{1}$$

式中

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n},$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_mq^{-m}.$$

控制延迟已包含于 $B(q^{-1})$ 中. $\omega(t)$ 是外扰, $|\omega(t)| \leq \Delta < \infty$.

式 (1) 也可写成

$$y(t) = \phi(t-1)^T \theta_0 + \omega(t). \tag{2}$$

式中

$$\phi(t-1)^T = [-y(t-1), \dots, -y(t-n), u(t-1), \dots, u(t-m)],$$

$$\theta_0 = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_m]^T.$$

并联模型用下列差分方程描述:

$$\hat{A}(t, q^{-1})\hat{y}(t) = \hat{B}(t, q^{-1})u(t). \tag{3}$$

式中

$$\hat{A}(t, q^{-1}) = 1 + \hat{a}_1(t)q^{-1} + \dots + \hat{a}_n(t)q^{-n},$$

$$\hat{B}(t, q^{-1}) = \hat{b}_1(t)q^{-1} + \cdots + \hat{b}_m(t)q^{-m}.$$

式(3)也可写成

$$\hat{y}(t) = \hat{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t). \quad (4)$$

式中

$$\hat{\phi}(t-1) = [-\hat{y}(t-1), \cdots, -\hat{y}(t-n), u(t-1), \cdots, u(t-m)],$$

$$\hat{\theta}(t) = [\hat{a}_1(t), \cdots, \hat{a}_n(t), \hat{b}_1(t), \cdots, \hat{b}_m(t)].$$

定义

$$\eta(t) = y(t) - \hat{y}(t),$$

$$\bar{\eta}(t) = \hat{A}(t, q^{-1})\eta(t) = \bar{\eta}(t) + y(t) - \hat{y}(t), \quad (5)$$

$$\tilde{\eta}(t) = [\hat{A}(q^{-1}) - 1]\eta(t), \quad (6)$$

$$\tilde{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta_0.$$

显然

$$\begin{aligned} \bar{\eta}(t) &= \hat{A}(t, q^{-1})y(t) - \hat{A}(t, q^{-1})\hat{y}(t) \\ &= \hat{A}(t, q^{-1})y(t) - A(q^{-1})y(t) - \hat{B}(t, q^{-1})u(t) + B(q^{-1})u(t) \\ &\quad - \hat{A}(t, q^{-1})\hat{y}(t) + \hat{B}(t, q^{-1})u(t) + \omega(t) \\ &= -\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t) + \omega(t). \end{aligned} \quad (7)$$

模型参数算法

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{a(t-1)\phi(t-1)}{1 + \phi(t-1)^T \phi(t-1)} [\bar{\eta}(t) + y(t) - \hat{y}(t)]. \quad (8)$$

式(8)中 $\bar{\eta}(t)$ 由 t 时刻之前数据构成, $y(t)$ 是 t 时刻被控对象的输出, $\hat{y}(t)$ 也可用 t 时刻之前数据求得, 因为直接由式(4)和(8)有

$$\hat{y}(t) = \hat{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t-1) + \frac{a(t-1)\hat{\phi}(t-1)^T \phi(t-1)}{1 + \phi(t-1)^T \phi(t-1)} [\bar{\eta}(t) + y(t) - \hat{y}(t)].$$

由上式易解出

$\hat{y}(t) =$

$$\frac{[1 + \phi(t-1)^T \phi(t-1)]\hat{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t-1) + a(t-1)\hat{\phi}(t-1)^T \phi(t-1)[\bar{\eta}(t) + y(t)]}{1 + \phi(t-1)^T \phi(t-1) + a(t-1)\hat{\phi}(t-1)^T \phi(t-1)}. \quad (9)$$

由式(8)容易得到

$$\tilde{\theta}(t) - \frac{a(t-1)\phi(t-1)}{1 + \phi(t-1)^T \phi(t-1)} \bar{\eta}(t) = \tilde{\theta}(t-1).$$

由上式有

$$\begin{aligned} \|\tilde{\theta}(t)\|^2 &= \|\tilde{\theta}(t-1)\|^2 - \frac{a(t-1)^2 \phi(t-1)^T \phi(t-1)}{[1 + \phi(t-1)^T \phi(t-1)]^2} \bar{\eta}(t)^2 \\ &\quad + \frac{2a(t-1)\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t)}{1 + \phi(t-1)^T \phi(t-1)} \bar{\eta}(t), \end{aligned}$$

于是

$$\|\tilde{\theta}(t)\|^2 \leq \|\tilde{\theta}(t-1)\|^2 + \frac{2a(t-1)\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t)}{1 + \phi(t-1)^T \phi(t-1)} \bar{\eta}(t).$$

利用式(7), 上式可化为

$$\begin{aligned}\|\tilde{\theta}(t)\|^2 &\leq \|\tilde{\theta}(t-1)\|^2 - \frac{2a(t-1)[\bar{\eta}(t) - \omega(t)]\bar{\eta}(t)}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)} \\ &= \|\tilde{\theta}(t-1)\|^2 - \frac{2a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \omega(t)\bar{\eta}(t)]}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)}.\end{aligned}$$

若 $a(t-1) \geq 0$, 则有

$$\|\tilde{\theta}(t)\|^2 \leq \|\tilde{\theta}(t-1)\|^2 - \frac{2a(t-1)\bar{\eta}(t)^2 - [\bar{\eta}(t)^2 + \omega(t)^2]a(t-1)}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)}.$$

最后得

$$\|\tilde{\theta}(t)\|^2 \leq \|\tilde{\theta}(t-1)\|^2 - \frac{a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2]}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)}. \quad (10)$$

取

$$a(t-1) = \begin{cases} 1, & \text{当 } |\bar{\eta}(t)| > \Delta, \\ 0, & \text{当 } |\bar{\eta}(t)| \leq \Delta, \end{cases} \quad (11)$$

则 $\{\|\tilde{\theta}(t)\|^2\}$ 是非负不增序列, 所以

$$\|\hat{\theta}(t) - \theta_0\| \leq \|\hat{\theta}(t-1) - \theta_0\| \leq \|\hat{\theta}(0) - \theta_0\|, \quad t \geq 1. \quad (12)$$

将式(10)两边求和得

$$\sum_{t=1}^N \frac{a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2]}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)} \leq \|\tilde{\theta}(0)\|^2 - \|\tilde{\theta}(N)\|^2.$$

由式(12)得

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^N \frac{a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2]}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)} < \infty. \quad (13)$$

因为 $a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2] \geq 0$, 直接从上式可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2]}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)} = 0. \quad (14)$$

如果 $\{\phi(t)\}$ 是有界序列, 由式(14)得

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} |\bar{\eta}(t)| \leq \Delta. \quad (15)$$

定理 2. 考虑由差分方程(1)描述的系统, 为它建立并联模型(3), 并联模型的参数按式(8)计算, 则算法有下列特性:

(i) $\|\hat{\theta}(t) - \theta_0\| \leq \|\hat{\theta}(t-1) - \theta_0\| \leq \|\hat{\theta}(0) - \theta_0\|, \quad t \geq 1;$

(ii) $\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^N \frac{a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2]}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)} < \infty;$

(iii) $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2]}{1 + \phi(t-1)^T\phi(t-1)} = 0,$

如果 $\{\phi(t)\}$ 是有界序列, 则

(iv) $\limsup_{t \rightarrow \infty} |\bar{\eta}(t)| \leq \Delta.$

如果 $\lim_{t \rightarrow \infty} A(t, z^{-1})$ 是稳定的, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\eta(t)| \leq \Delta_1 < \infty$, 尤其当 $\omega(t) = 0$ 时, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \eta(t) = 0.$$

四、模型参数的最小二乘算法

众所周知, 投影算法的收敛速度较慢, 最小二乘算法的收敛速度则较快. 此外, 为了使结论更为直接, 这里采用了稍微复杂的综合误差信号. 令

$$v(t) = e(t) - \varepsilon(t) + \tilde{\eta}(t). \quad (16)$$

其中 $\tilde{\eta}(t)$ 由式 (6) 定义,

$$e(t) = y(t) - \bar{y}(t), \quad \varepsilon(t) = \tilde{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t). \quad (17)$$

式中

$$\bar{y}(t) = \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1), \quad (18)$$

$$\tilde{\phi}(t-1) = \hat{\phi}(t-1) - \phi(t-1). \quad (19)$$

显然

$$\begin{aligned} \eta(t) &= y(t) - \hat{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t) = y(t) - \tilde{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t) \\ &= y(t) - \varepsilon(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t). \end{aligned} \quad (20)$$

模型参数算法

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{a(t-1)P(t-2)\phi(t-1)}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} v(t), \quad (21)$$

$$P(t-1) = P(t-2) - \frac{a(t-1)P(t-2)\phi(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)}, \quad (22)$$

$$P(-1) = P_0 = P_0^T > 0. \quad (23)$$

首先, 由式 (17) 和 (21) 有

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \tilde{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t-1) + \frac{a(t-1)\tilde{\phi}(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} \\ &\quad \cdot [e(t) - \varepsilon(t) + \tilde{\eta}(t)], \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} &\frac{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1) + a(t-1)\tilde{\phi}(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} \varepsilon(t) \\ &= \tilde{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t-1) + \frac{a(t-1)\tilde{\phi}(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} [e(t) + \tilde{\eta}(t)]. \end{aligned}$$

从而解出

$$\varepsilon(t) = \frac{\Gamma(t-1)\tilde{\phi}(t-1)^T \hat{\theta}(t-1) + \Pi(t-1)[e(t) + \tilde{\eta}(t)]}{\Gamma(t-1) + \Pi(t-1)}. \quad (24)$$

式中

$$\Gamma(t-1) = 1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1),$$

$$\Pi(t-1) = a(t-1)\tilde{\phi}(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1).$$

可见, $v(t)$ 可由 t 时刻的测量值及 t 时刻之前的数据构成.

为了导出算法的特性, 首先将式 (21) 简化, 由式 (20) 和 (21) 有

$$\begin{aligned} \eta(t) &= y(t) - \varepsilon(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1) \\ &\quad - \frac{a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} v(t) \\ &= e(t) - \varepsilon(t) - \frac{a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} v(t). \end{aligned} \quad (25)$$

由式(16)和(25)得

$$\begin{aligned} e(t) - \varepsilon(t) + \bar{\eta}(t) - v(t) &= \eta(t) \\ &= e(t) - \varepsilon(t) - \frac{a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} v(t), \end{aligned}$$

$$\therefore \bar{\eta}(t) = \frac{1}{1 + a(t-1)\phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)} v(t). \quad (26)$$

将式(26)代入式(21)并且等式两边减去 θ_0 得

$$\tilde{\theta}(t) = \tilde{\theta}(t-1) + a(t-1)P(t-2)\phi(t-1)\bar{\eta}(t). \quad (27)$$

令

$$V(t) = \tilde{\theta}(t)^T P(t-1)^{-1} \tilde{\theta}(t),$$

由式(27)得

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}(t)^T P(t-2)^{-1} \tilde{\theta}(t) &= \tilde{\theta}(t-1)^T P(t-2)^{-1} \tilde{\theta}(t-1) \\ &\quad + a(t-1)\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t)\bar{\eta}(t). \end{aligned} \quad (28)$$

由式(22)所确定的 $P(t-1)$ 有关系

$$P(t-1)^{-1} = P(t-2)^{-1} + a(t-1)\phi(t-1)\phi(t-1)^T. \quad (29)$$

利用关系式(27)和(29), 式(28)可以化为

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}(t)^T P(t-1)^{-1} \tilde{\theta}(t) &- a(t-1)[\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t)]^2 \\ &= \tilde{\theta}(t-1)^T P(t-2)^{-1} \tilde{\theta}(t-1) + 2a(t-1)\tilde{\theta}(t-1)^T \phi(t-1)\bar{\eta}(t) \\ &\quad + a(t-1)^2 \phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)\bar{\eta}(t)^2. \end{aligned}$$

再对上式右边第二项利用关系式(27)得

$$\begin{aligned} V(t) &= V(t-1) - a(t-1)^2 \phi(t-1)^T P(t-2)\phi(t-1)\bar{\eta}(t)^2 \\ &\quad + 2a(t-1)\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t)\bar{\eta}(t) + a(t-1)[\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t)]^2 \\ &\leq V(t-1) + 2a(t-1)\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t)\bar{\eta}(t) + a(t-1)[\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t)]^2. \end{aligned}$$

考虑到式(7), 则有

$$\begin{aligned} V(t) &\leq V(t-1) - 2a(t-1)[\bar{\eta}(t) - \omega(t)]\bar{\eta}(t) + a(t-1)[\bar{\eta}(t) - \omega(t)]^2 \\ &\leq V(t-1) - a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2]. \end{aligned} \quad (30)$$

按式(11)取 $a(t-1)$ 的值, 则 $\{V(t)\}$ 是非负不增序列, 所以有以下结论:

定理 3. 考虑由差分方程(1)描述的系统, 为它建立并联模型(3), 并联模型的参数按式(21)–(23)和(11)计算, 则算法有下列特征.

$$(i) \|\hat{\theta}(t) - \theta_0\|^2 \leq k\|\hat{\theta}(0) - \theta_0\|^2; \quad t \geq 1,$$

$$\text{其中, } k = \lambda_{\max} P_0^{-1} / \lambda_{\min} P_0^{-1}; \quad (31)$$

$$(ii) \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^N a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2] < \infty; \quad (32)$$

$$(iii) \lim_{N \rightarrow \infty} a(t-1)[\bar{\eta}(t)^2 - \Delta^2] = 0; \quad (33)$$

$$(iv) \limsup_{N \rightarrow \infty} |\bar{\eta}(t)| \leq \Delta. \quad (34)$$

注1. 算法(8)中用的误差信息是 $\bar{\eta}(t)$, 算法(21)用的信息是 $\nu(t)$, $\nu(t)$ 的求取比 $\bar{\eta}(t)$ 稍复杂一些, 但定理3给出的结论比定理2更简单、更直接. 实际上, 如果将算法(8)中的 $\bar{\eta}(t)$ 改成 $\nu(t)$, 定理2的结论几乎与定理3的相同, 不过最小二乘算法的收敛速度更快.

注2. 定理2和定理3说明, 不管对象是否稳定或逆稳定, 只要外扰是有界的, 两种算法均保证了误差 $\bar{\eta}(t)$ 的有界性, 并且 $\limsup_{t \rightarrow \infty} |\bar{\eta}(t)| \leq \Delta$; 如果 $\hat{A}(t, z^{-1})$ 是稳定的, 那么输出误差 $\eta(t)$ 也一定有界, 并且 $\limsup_{t \rightarrow \infty} |\eta(t)| \leq \Delta_1 < \infty$, Δ_1 的具体数值与

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{A}(t, z^{-1})$$

的特征值直接有关. 为了保证 $\hat{A}(t, z^{-1})$ 的稳定性, 可以在投影算法和最小二乘算法中对 $\hat{\theta}(t)$ 加上合适的约束^[4].

五、极点配置控制律

设输入参考序列 $\{y^*(t)\}$ 满足

$$S(q^{-1})y^*(t) = 0. \quad (35)$$

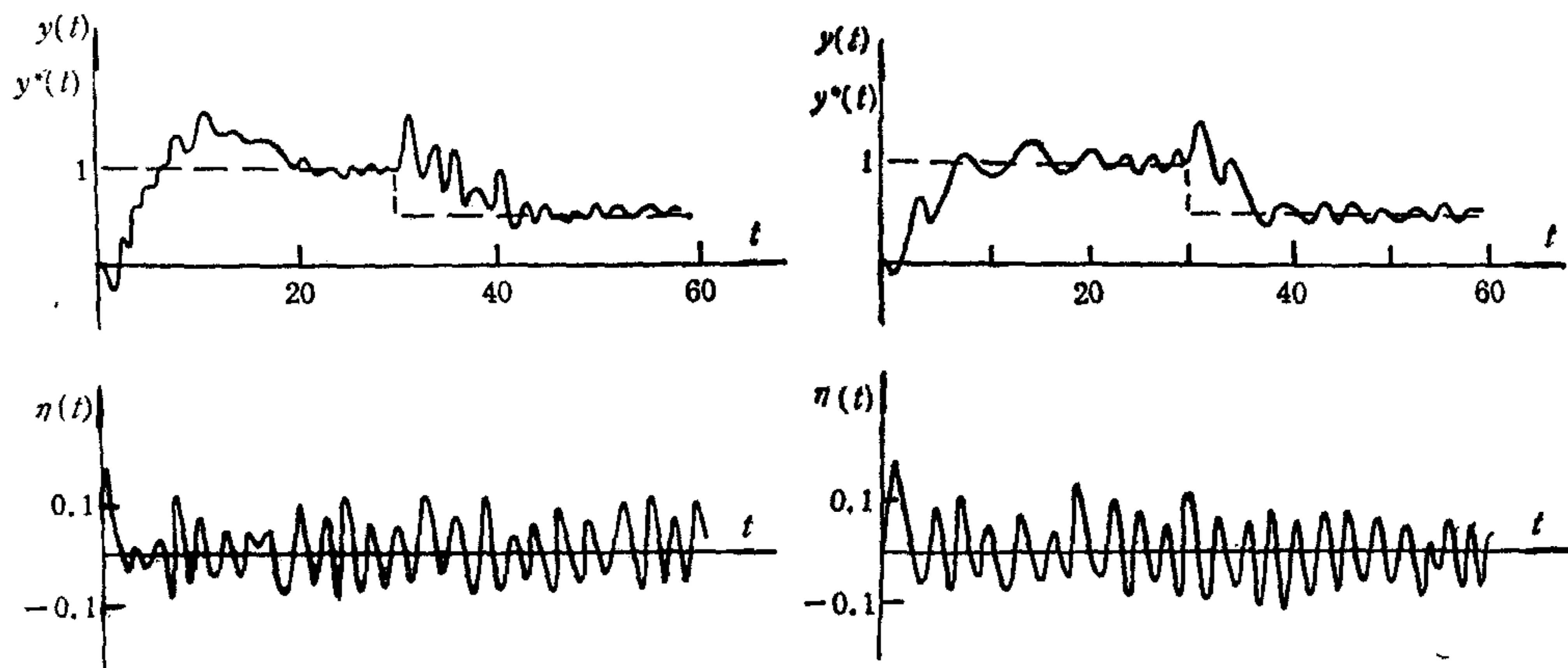
其中 $S(q^{-1})$ 是 q^{-1} 的 r 阶多项式. 按“内模型”原理取控制律

$$M(t, q^{-1})S(q^{-1})u(t) = N(t, q^{-1})[y^*(t) - \hat{y}(t)]. \quad (36)$$

式中 $M(t, q^{-1})$ 和 $N(t, q^{-1})$ 都是 q^{-1} 的 $n+r-1$ 阶时变多项式. 若 $M(t, q^{-1})$ 和 $N(t, q^{-1})$ 满足

$$M(t, q^{-1})S(q^{-1})\hat{A}(t, q^{-1}) + \hat{B}(t, q^{-1})N(t, q^{-1}) = A^*(q^{-1}). \quad (37)$$

式中 $A^*(q^{-1})$ 是给定的 $2(n+r)-1$ 阶稳定多项式. 易证, 采用控制律(36)后有



(a) 投影算法

(b) 最小二乘算法

图2 数字仿真结果

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\hat{y}(t) - y^*(t)] = \delta_0 = 0.$$

六、数字仿真

被控对象的精确模型为

$$\begin{aligned} & (1 - 1.2q^{-1} + 0.4q^{-2})y(t) \\ & = (0.03 + 0.045q^{-1})u(t) + 0.08 \sin(1.27\pi t) (t = 0, 1, 2, \dots). \end{aligned}$$

假设对象参数“未知”但上、下界已知,扰动“不可测”但知道 $|\omega(t)| \leq 0.1$. 按三一五节的算法设计自适应控制系统,数字仿真结果如图 2 所示. 可见,这种自适应控制系统是有效的.

参 考 文 献

- [1] Goodwin, G. C., K. S. Sin, Adaptive Filtering prediction and Control, Prentice-Hall, 1984.
- [2] Goodwin, G. C., K. S. Sin, Adaptive Control of Nonminimum Phase Systems, *IEEE Trans.* AC-26 (1981), 478—483.
- [3] Goodwin, G. C., P. J. Ramadge, and P. E. Caines, Discretetime Stochastic Adaptive Control. *SIAM J. Control and Optimization*, 19(1981), 829—853.
- [4] Kreisselmeier, G., On Adaptive State Regulation, *IEEE Trans.* AC-27(1982), 3—17.
- [5] Kreisselmeier, G., An Approach to Stable Indirect Adaptive Control, *Automatica*, 21 (1985), 425—431.
- [6] Ioannou, P., and J. sun, Theory and Design of Robust Direct and Indirect Adaptive Control Schemes, University of southern California EE-systems, SAL 300, Los Angeles, CA 90089-0781, Report 86-06-01, 1986.
- [7] 冯纯伯,史维,自适应控制,电子工业出版社,1986.
- [8] 韩曾晋,自适应控制系统,机械工业出版社,1983.
- [9] 王柏林,极点配置模型参考自适应控制系统,控制与决策,第4期(1986),129—135.
- [10] 王柏林,水轮发电机组的模型参考自适应控制,自动化学报,第6期(1987),408—415.

A TYPE OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM WITHOUT PERSISTENT EXCITATION AND STRICTLY POSITIVE REAL CONDITIONS

WANG BAILIN

(Huazhong University of Science and Technology)

ABSTRACT

In this paper, an adaptive control system without “persistent excitation” and “strictly positive real” conditions is developed for non-minimum phase plant disturbed by unmeasurable disturbance. An on-line algorithm for the system is presented and its convergence is proved. Using the algorithm the adaptive system is stable and the control error is small enough.

Key words —— Adaptive control; persistent excitation condition; positive real condition.