

具有间隙非线性系统的控制加权 自适应控制¹⁾

韩存武 张竞新 顾兴源

(东北工学院自控系, 沈阳 110006)

摘 要

本文对具有间隙的非线性系统提出一种可控制开环不稳定及非最小相位系统的控制加权自适应算法, 并给出了稳定性收敛性定理及其证明. 仿真结果表明, 该算法可明显地改善系统的控制性能.

关键词: 自适应控制, 间隙非线性, 非最小相位系统, 稳定性, 收敛性.

一、引 言

线性系统的自适应控制已日臻完善. 但由于实际的控制系统中广泛地存在着非线性, 用普通的线性自适应控制方法不能得到满意的控制效果. 因此, 非线性系统的自适应控制近年来受到了人们的重视. 文[1—3]研究了具有分段非线性、饱和非线性和死区非线性系统的自适应控制, 文[4, 5]研究了 Hammerstein 系统的自适应控制. 然而, 以上所研究的几种非线性系统, 其非线性部分的输出都是输入的单值函数. 对于输出是输入的多值函数的非线性系统, 如间隙非线性, 其自适应控制则更加困难. 文[6]研究了具有间隙非线性系统的自适应控制, 但要求非线性部分的间隙宽度已知, 这在工程上是很难满足的. 文[7]提出了一种间隙宽度未知时的自适应控制算法, 但没有给出稳定性和收敛性证明, 并指出要证明此类自适应系统的稳定性和收敛性是非常困难的. 另外, 以上两种算法只适用于最小相位系统.

本文试图用一种简单的方法解决具有间隙非线性系统的自适应控制问题. 通过引入一个非线性补偿环节, 提出了一种间隙宽度未知时可控制开环不稳定及非最小相位系统的控制加权自适应算法, 并给出了稳定性收敛性定理及其证明. 间隙非线性是一种典型的非线性, 它广泛地存在于伺服系统和工业控制系统中. 因此, 本文算法具有一定的实际意义.

二、问题描述

考虑图 1 所示的非线性系统

本文于 1991 年 8 月 14 日收到.

1) 国家自然科学基金和霍英东教育基金资助项目. 本文曾在 1991 年全国控制理论及其应用年会(威海)上宣读.

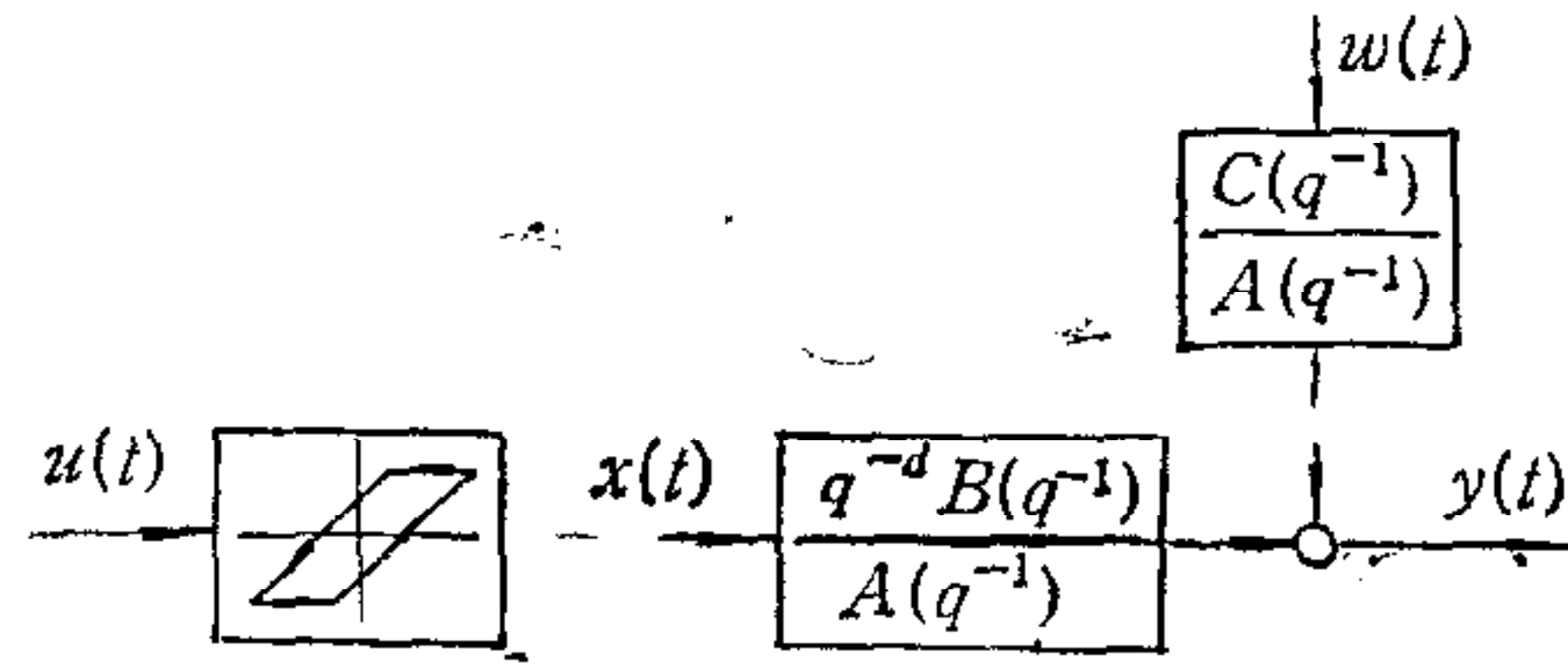


图 1 非线性系统的结构

系统的数学描述为

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})x(t) + C(q^{-1})w(t), \quad (1)$$

$$x(t) = \begin{cases} k[u(t) - D], & \dot{x}(t) > 0, \\ x(t-1), & \dot{x}(t) = 0, \\ k[u(t) + D], & \dot{x}(t) < 0, \end{cases} \\ = k[u(t) - D \operatorname{sgn} \dot{x}(t)]. \quad (2)$$

其中

$$\operatorname{sgn} \dot{x}(t) = \begin{cases} 1, & \dot{x}(t) > 0, \\ [ku(t) - x(t-1)]/kD, & \dot{x}(t) = 0, \\ -1, & \dot{x}(t) < 0. \end{cases} \quad (3)$$

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

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \cdots + b_mq^{-m},$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \cdots + c_lq^{-l}.$$

$\{y(t)\}$ 、 $\{x(t)\}$ 和 $\{w(t)\}$ 分别表示系统线性部分的输出、输入和干扰序列, $\{u(t)\}$ 是系统的输入序列, q^{-1} 是单位时延算子, d 是系统时延, $D > 0$ 是间隙宽度, $0 < k < \infty$ 是斜率. 干扰序列 $\{w(t)\}$ 是定义在概率空间 $\{\Omega, A, P\}$ 上, 且适应于增子 σ -代数 $\{\mathcal{F}_t, t \in N\}$ 的鞅差序列, \mathcal{F}_t 表示 t 时刻及其 t 时刻以前的观测值所生成的 σ -代数. 设

$$A1) E\{w(t)/\mathcal{F}_{t-1}\} = 0, \text{ a.s.}$$

$$A2) E\{w(t)^2/\mathcal{F}_{t-1}\} = \sigma^2, \text{ a.s.}$$

$$A3) \limsup_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N w(t)^2 < \infty, \text{ a.s.}$$

A4) d 和 k 已知,

A5) n, m 和 l 的上界已知,

A6) $C(q^{-1})$ 为稳定的多项式.

问题的关键是寻找一个控制序列 $\{u(t)\}$, 使系统稳定, 并使系统输出 $y(t)$ 尽可能地跟踪一有界参考信号 $y^*(t)$.

性能指标取为

$$J = E\{[P(q^{-1})(y(t+d) - y^*(t+d))]^2 + [Q'(q^{-1})u(t)]^2/\mathcal{F}_t\}, \quad (4)$$

其中, $P(q^{-1})$ 和 $Q'(q^{-1})$ 均为 q^{-1} 的多项式, $P(1) = 1$.

$$\text{定义} \quad \phi(t) = P(q^{-1})y(t). \quad (5)$$

$$\text{由等式} \quad P(q^{-1})C(q^{-1}) = F(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}), \quad (6)$$

$$1 = E(q^{-1})C(q^{-1}) + q^{-d}R(q^{-1}), \quad (7)$$

和式(1)可推出 $\phi(t)$ 的预报方程

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(t+d) &= \phi(t+d) - F(q^{-1})w(x+d) \\ &= \alpha(q^{-1})y(t) + \beta(q^{-1})x(t) + R(q^{-1})\hat{\phi}(t), \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\hat{\phi}(t) = \phi(t) - v(t), \quad v(t) = F(q^{-1})w(t), \quad (9), (10)$$

$$\alpha(q^{-1}) = E(q^{-1})G(q^{-1}), \quad (11)$$

$$\beta(q^{-1}) = E(q^{-1})F(q^{-1})B(q^{-1}), \quad \beta_0 = b_0 \neq 0. \quad (12)$$

记 $\deg[\alpha(q^{-1})] = n_1$, $\deg[\beta(q^{-1})] = n_2$, $\deg[R(q^{-1})] = n_3$, 则 $n_1 = n + d - 2$, $n_2 = m + 2d - 2$, $n_3 = l - 1$.

设已知间隙的最大可能宽度为 D_{\max} . 引入如下间隙补偿环节

$$u(t) = u^*(t) + D_1 \text{sgn}\dot{x}(t), \quad D_1 \geq D_{\max}, \quad (13)$$

其中, $u^*(t)$ 为待定最优控制. 则(8)式可写成

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(t+d) &= \alpha(q^{-1})y(t) + \beta(q^{-1})k[u^*(t) + (D_1 - D)\text{sgn}\dot{x}(t)] + R(q^{-1})\hat{\phi}(t) \\ &= \alpha(q^{-1})y(t) + k\beta(q^{-1})u^*(t) + k\beta(q^{-1})(D_1 - D)\text{sgn}\dot{x}(t) + R(q^{-1})\hat{\phi}(t) \\ &= \alpha(q^{-1})y(t) + S(q^{-1})u^*(t) + L(q^{-1})\text{sgn}\dot{x}(t) + R(q^{-1})\hat{\phi}(t). \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$S(q^{-1}) = k\beta(q^{-1}) = s_0 + s_1q^{-1} + \cdots + s_{n_2}q^{-n_2}, \quad (15)$$

$$L(q^{-1}) = k\beta(q^{-1})(D_1 - D) = l_0 + l_1q^{-1} + \cdots + l_{n_2}q^{-n_2}, \quad (16)$$

注意到(15),(16)式, 可得

$$D_1 - D = \frac{l_0}{s_0} \quad \text{或} \quad D_1 - D = \frac{1}{n_2} \sum_{i=0}^{n_2} \frac{l_i}{s_i}. \quad (17)$$

由(9),(14)式, 可将性能指标 J 取极小的控制问题转化成使辅助变量

$$\Phi(t) = P(q^{-1})[y(t+d) - y^*(x+d)] + Q(q^{-1})u(t) \quad (18)$$

的条件方差取极小, 即

$$E\{\Phi(t)^2 / \mathcal{F}_{t-d}\} = \gamma^2 \quad (19)$$

的调节问题. 其中 $Q(q^{-1}) = \frac{q_0 Q'(q^{-1})}{b_0}$, $\gamma^2 = E\{v(t)^2 / \mathcal{F}_{t-d}\}$.

对于图 1 所示的含间隙的非线性系统, 使(19)式成立一般难以做到, 但可按下述方法设计自适应控制器, 使 $\Phi(t)$ 的条件方差采样均方有界, 并保证系统 BIBO 稳定.

三、自适应控制算法

算法 I ($C(q^{-1}) \neq 1$).

定义辅助变量 $\Phi(t)$ 的预报方程

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}(t+d) &= \Phi(t+d) - v(t+d) \\ &= \phi(t+d) - P(q^{-1})y^*(t+d) + Q(q^{-1})u(t) \\ &= \phi(t)^T \theta + q[Q(q^{-1}) - q_0]u(t-1) - P(q^{-1})y^*(t+d), \end{aligned} \quad (20)$$

式中, q_0 是 $Q(q^{-1})$ 的首项系数, $\phi(t)$ 、 θ 定义为

$$\phi(t)^T = [y(t), \cdots, y(t-n_1), u^*(t), u^*(t-1), \cdots, u^*(t-n_2)],$$

$$\text{sgn}\dot{x}(t), \dots, \text{sgn}\dot{x}(t - n_2), \hat{\phi}(t), \dots, \hat{\phi}(t - n_3)], \quad (21)$$

$$\theta^T = [\alpha_0, \dots, \alpha_{n_1}, (s_0 + q_0), s_1, \dots, s_{n_2}, l_0, \dots, l_{n_2}, r_0, \dots, r_{n_3}]. \quad (22)$$

由此,可导出自适应控制算法 1 如下:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t - d) + a(t - d)P(t - d)\bar{\phi}(t - d)^T e(t), \quad (23)$$

$$e(t) = P(q^{-1})y(t) + q_0 u(t - d) + \bar{\phi}(t - d)^T \hat{\theta}(t - d). \quad (24)$$

其中,时变增益 $a(t - d)$ 和矩阵 $P(t - d)$ 按文献[8]带有矩阵条件数监视的 d 步重迭修正最小二乘法更新. $\bar{\phi}(t)$ 是用验后预报 $\bar{\phi}(t - j)$ ($j = 1, 2, \dots, n_3$) 替换 $\phi(t)$ 中的最优预报 $\hat{\phi}(t - j)$ 各项所形成的数据向量. $\bar{\phi}(t)$ 定义为

$$\bar{\phi}(t) = \bar{\phi}(t - d)^T \hat{\theta}(t) - q_0 u(t - d). \quad (25)$$

控制律可由

$$\hat{\phi}(t + d) = \bar{\phi}(t)^T \hat{\theta} + q[Q(q^{-1}) - q_0]u(t - 1) - P(q^{-1})y^*(t + d) = 0, \quad (26)$$

求得. 不失一般性,以下均假设 $b_0 = \beta_0 > 0$, $q_0 > 0$. ($b_0 < 0$ 时亦可推出类似结果).

根据 \hat{s}_0 和 \hat{l}_0 的取值不同,可得出如下计算 $u^*(t)$ 、 $\text{sgn}\dot{x}(t)$ 的规则.

$$\begin{aligned} \text{记 } T(t) &= P(q^{-1})y^*(t + d) - \bar{\phi}(t)^T \hat{\theta} - q[Q(q^{-1}) - q_0]u(t - 1) \\ &\quad + (\hat{s}_0 + q_0)u^*(t) + \hat{l}_0 \text{sgn}\dot{x}(t) \\ &= (\hat{s}_0 + q_0)u^*(t) + \hat{l}_0 \text{sgn}\dot{x}(t) - \hat{\phi}(t + d). \end{aligned} \quad (27)$$

1) 若 $|T(t)| > \hat{l}_0$, 则取

$$\text{sgn}\dot{x}(t) = \begin{cases} 1, & T(t) > 0, \\ -1, & T(t) < 0, \end{cases} \quad (28)$$

$$u^*(t) = u^*(t - 1) + \frac{T(t) - \hat{l}_0 \text{sgn}\dot{x}(t)}{\hat{s}_0 + q_0}. \quad (29)$$

2) 若 $T(t) = 0$, 则取

$$u^*(t) = u^*(t - 1), \quad \text{sgn}\dot{x}(t) = \frac{x(t - 1) - ku^*(t)}{\widehat{k(D_1 - D)}}, \quad (30), (31)$$

3) 若 $0 < |T(t)| \leq \frac{1}{2} \hat{l}_0$, 则取

$$u^*(t) = u^*(t - 1), \quad \text{sgn}\dot{x}(t) = \frac{x(t - 1) - ku^*(t)}{\widehat{k(D_1 - D)}}. \quad (32), (33)$$

4) 若 $0 < \frac{1}{2} \hat{l}_0 < |T(t)| \leq \hat{l}_0$, 则取

$$\text{sgn}\dot{x}(t) = \begin{cases} 1, & T(t) > 0, \\ -1, & T(t) < 0, \end{cases} \quad (34)$$

$$u^*(t) = u^*(t - 1) + \varepsilon \text{sgn}\dot{x}(t), \quad (35)$$

其中, ε 是一个很小的任意正数, $\widehat{k(D_1 - D)} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{\hat{l}_0}{\hat{s}_0}$ 是 $D_1 - D$ 的估计值.

求出 $u^*(t)$ 后,由(13)式计算 $u(t)$, 而 $x(t)$ 则由(2)式决定.

在 1)和 2)情况下,上述规则使 $\hat{\phi}(t) = 0$; 但用 3)和 4)求出的 $u^*(t)$ 时,只能使

$$|\hat{\Phi}(t)| \leq \varepsilon(\hat{l}_0 + q_0) + \frac{1}{2} \hat{l}_0. \quad (36)$$

引理 1. 若假设 A1)–A6) 成立, $\left[\frac{1}{\bar{c}(z)} - \frac{1}{2}\right]$ 严格正实, 则修正最小二乘法具有下列性质:

p1) $\|\hat{\theta}(t)\| \leq M < \infty, \forall t, \text{ a.s.}$

p2) $e(t) = \frac{\eta(t)}{1 - \sigma(t-d)},$

$$\sigma(t) \triangleq a(t) \bar{\phi}(t)^T P(t) \bar{\phi}(t), \quad 0 < [1 - \sigma(t)] \leq 1, \forall t.$$

p3) $\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{t=d}^N Z(t)/r(t-d) < \infty, \text{ a.s.}$

p4) 当且仅当 $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Sup} \frac{1}{N} r(N) < \infty, \text{ a.s.}$ 时,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=d}^N [e(t) - v(t)]^2 = 0, \text{ a.s.}$$

其中 $\bar{c}(z) = E(z)c(z)$, $\eta(t) = \phi(t) - \bar{\phi}(t) = P(q^{-1})y(t) - \bar{\phi}(t)$,

$Z(t) = \eta(t) - v(t)$, $Z(t) F_t$ 可测,

$r(t) = r(t-1) + \bar{\phi}(t)^T \bar{\phi}(t)$, $[e(t) - v(t)] F_{t-d}$ 可测.

证明. 与文[9]相似, 略.

定理 1. 若假设 A1)–A6) 成立, $\left[\frac{1}{\bar{c}(z)} - \frac{1}{2}\right]$ 严格正实, 加权多项式 $P(q^{-1})$ 和 $Q(q^{-1})$ 的选择使

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

稳定, 则算法 I 与系统(1)所形成的闭环系统将以概率 1 保证

s1) $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{sup} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t)^2 < \infty.$

s2) $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Sup} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t)^2 < \infty.$

s3) $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Sup} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N u(t)^2 < \infty.$

s4) $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Sup} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N u^*(t)^2 < \infty.$

s5) $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Sup} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N E\{[P(q^{-1})(y(t) - y^*(t)) + Q(q^{-1})u(t-d)]^2 / F_{t-d}\}$

$$\leq 2\gamma^2 + \frac{1}{2} H(\omega).$$

其中, $|\hat{l}_0(t)| \leq H(\omega), \forall t, H < \infty, \text{ a.s.}$, $\hat{l}_0(t)$ 是 $l_0 = k\beta_0(D_1 - D)$ 的估计.

证明. 由(1), (20), (24)式以及引理 1 中性质 p2), 可得自适应控制下的闭环系统方

程

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A(q^{-1}) & -kB(q^{-1}) \\ P(q^{-1}) & Q(q^{-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(t) \\ u^*(t-d) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 - \sigma(t-d) \end{bmatrix} Z(t) \\ &+ \begin{bmatrix} C(q^{-1}) \\ 1 \\ 1 + \sigma(t-d) \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ P(q^{-1}) \end{bmatrix} y^*(t) \\ &+ \begin{bmatrix} k(D_1 - D) \\ 0 \end{bmatrix} \text{sgn}\dot{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \hat{\Phi}(t), \end{aligned} \quad (37)$$

如 $f(q^{-1})$ 稳定,由文献[9]引理 B3.3, 假设条件 A3), 式(2),(13)和(36), 引理 1 的性质 P1) 及 $y^*(t)$ 的有界性和迭加原理, 可得

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=d}^N [u^*(i-d)]^2 \leq c_1 + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_2}{N} \sum_{i=1}^N Z(t)^2, \text{ a.s.} \quad (38)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y(t)]^2 \leq c_3 + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_4}{N} \sum_{i=1}^N Z(t)^2, \text{ a.s.} \quad (39)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(t-d)]^2 \leq c_5 + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_6}{N} \sum_{i=1}^N Z(t)^2, \text{ a.s.} \quad (40)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u(t-d)]^2 \leq c_7 + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_8}{N} \sum_{i=1}^N Z(t)^2, \text{ a.s.} \quad (41)$$

由(20),(25)式, 可得

$$\bar{\phi}(t+d) = \hat{\Phi}(t+d) - Q(q^{-1})u(t) + P(q^{-1})y^*(t+d). \quad (42)$$

由(2),(13),(36),(37)式, 引理 1 的性质 p1) 及 $y^*(t)$ 的有界性, 可得

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\phi}(t+d)^2 \leq c_9 + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_{10}}{N} \sum_{i=1}^N Z(t)^2, \text{ a.s.} \quad (43)$$

由(38)–(43)式, 引理 1 的性质 p2) 以及 $\bar{\phi}(t)$ 、 $r(t)$ 和 $\eta(t)$ 的定义, 可得

$$\frac{1}{N} r(N) = c_{11} + \frac{c_{12}}{N} \sum_{i=1}^N Z(t)^2, \text{ a.s.} \quad (44)$$

由引理 1 性质 p3) 和随机技术引理^[9], 可证

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{Sup}r(N)/N < \infty, \text{ a.s.} \quad (45)$$

即可得到 s1)–s4)。

由(18),(37)的第二行方程和引理 1 的性质 p2), 可得

$$\Phi(t) = [e(t) - v(t)] + \hat{\Phi}(t) + v(t). \quad (46)$$

由许瓦茨不等式, $\hat{\Phi}(t) F_{t-d}$ 可测的性质以及引理 1 的性质 p4), 可得

$$\begin{aligned} E\{\Phi(t)^2/F_{t-d}\} &= E\{[e(t) - v(t) + \hat{\Phi}(t) + v(t)]^2/F_{t-d}\} \\ &\leq 2E\{[e(t) - v(t) + v(t)]^2/F_{t-d}\} + 2E\{\hat{\Phi}(t)^2/F_{t-d}\} \\ &= 2E\{[e(t) - v(t)]^2/F_{t-d}\} + 2E\{v(t)^2/F_{t-d}\} \\ &\quad + 2E\{\hat{\Phi}(t)^2/F_{t-d}\} = 2\gamma^2 + 2\hat{\Phi}(t)^2, \text{ a.s.} \end{aligned}$$

由上式,(36)式和引理 1 性质 p1), 立即得到 s5)。

算法 II ($c(q^{-1}) = 1$)。

若 $c(q^{-1}) = 1$, 则自适应控制算法可取如下简单的形式:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + P(t-d-1)\tilde{\phi}(t-d)\varepsilon(t), \quad (47)$$

$$\varepsilon(t) = P(q^{-1})y(t) + q_0u(t-d) - \tilde{\phi}(t-d)^T\hat{\theta}(t-1), \quad (48)$$

其中
$$\tilde{\phi}(t)^T = [y(t), \dots, y(t-n_1), u^*(t), u^*(t-1), \dots, u^*(t-n_2), \text{sgn}\dot{x}(t), \dots, \text{sgn}\dot{x}(t-n_2)], \quad (49)$$

$$\hat{\theta}(t)^T = [\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_{n_1}, (\hat{s}_0 + q_0), \hat{s}_1, \dots, \hat{s}_{n_2}, \hat{l}_0, \dots, \hat{l}_{n_2}], \quad (50)$$

矩阵 $p(t)$ 按文献[9] 9.3.2 节的算法更新。因 $C(q^{-1}) = 1$ 时 $E(q^{-1}) = 1$, $R(q^{-1}) = 0$, $n_1 = n - 1$, $n_2 = m + d - 1$, 所以, 采用此算法比多步重迭算法简捷, 节省内存空间, 详细比较请参见文献[8,9]中 $P(t)$ 矩阵计算公式。

$u^*(t)$ 、 $u(t)$ 和 $x(t)$ 的计算规则同算法 I。

定理 2. 若假设 A1)–A6) 成立, $C(q^{-1}) = 1$, 且 $f(q^{-1})$ (定义同定理 1) 稳定, 则算法 II 与系统(1)所形成的闭环系统以概率 1 保证 s1)–s5) 成立。

证明. 应用文献[9]的 9.3.2 节的结论及定理 1 的证明方法即可得到此定理。

四、仿 真

仿真所用系统模型为

$$y(t) = 1.2y(t-1) + x(t-2) + 1.5x(t-3) + w(t) + 0.7w(t-1) + 1.5,$$

这是一个开环不稳定的非最小相位系统, $w(t)$ 是零均值白噪声。仿真时取 $Q(q^{-1}) = 0.25(1 - q^{-1})$, $P(q^{-1}) = 1$ 。 $y^*(t)$ 是半周期为 25, 幅值为 5 的方波。间隙非线性部分取为 $D = 0.8$, $k = 1$ 。假定间隙的最大可能宽度为 1.0, 取非线性补偿环节中的 $D_1 = 1.0$ 。图 2 给出了系统输出 $y(t)$ 和非线性部分的输出 $x(t)$ 的响应曲线。由于 $Q(q^{-1})$ 包含单位圆上的零点, 所以尽管系统存在常值干扰, 但并没有稳态误差。作为比较, 图 3 给出了采用文[9]的线性控制加权自适应算法时 $y(t)$ 和 $x(t)$ 的响应曲线。从图中可以

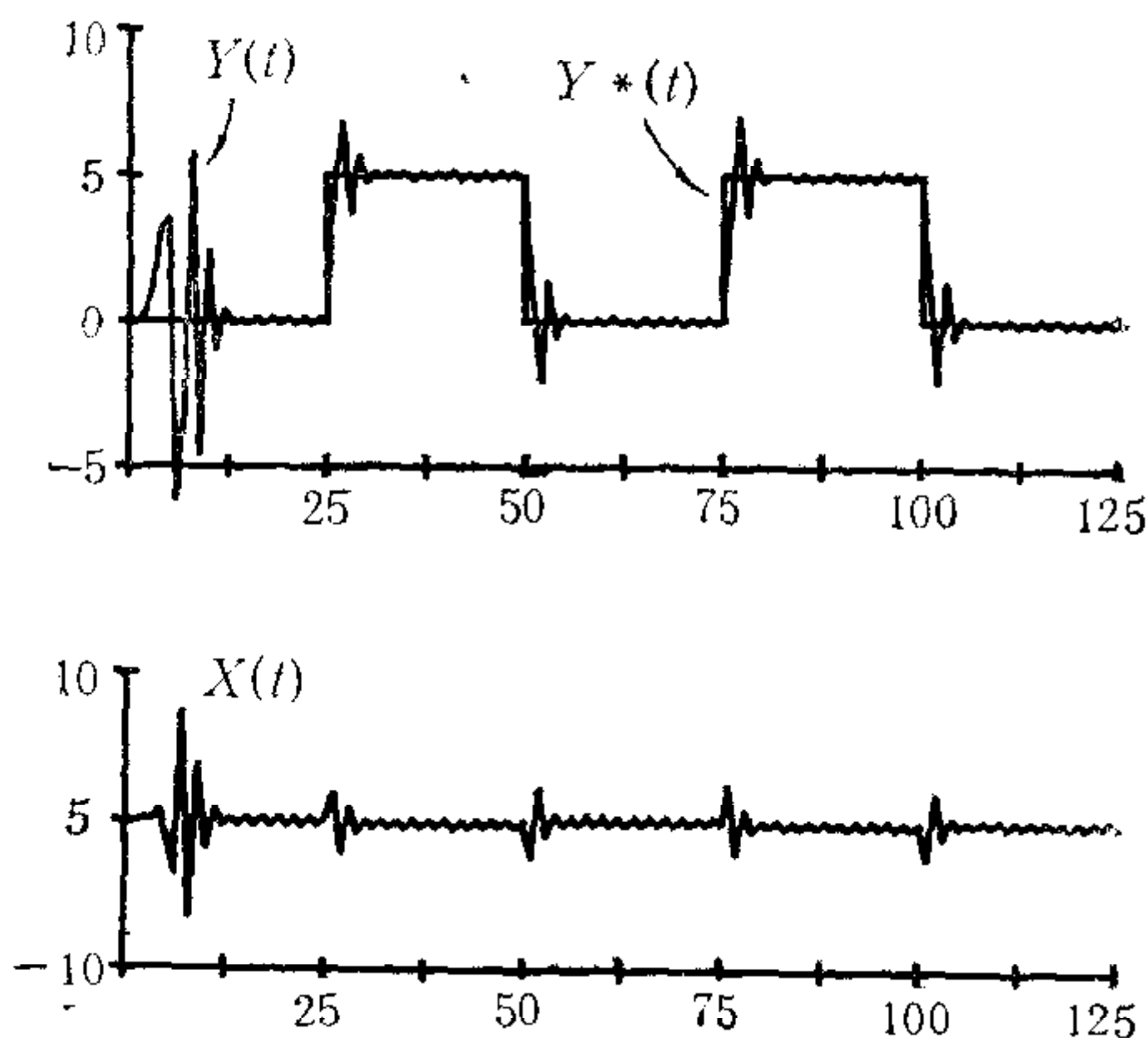


图 2 采用本文方法时的仿真结果

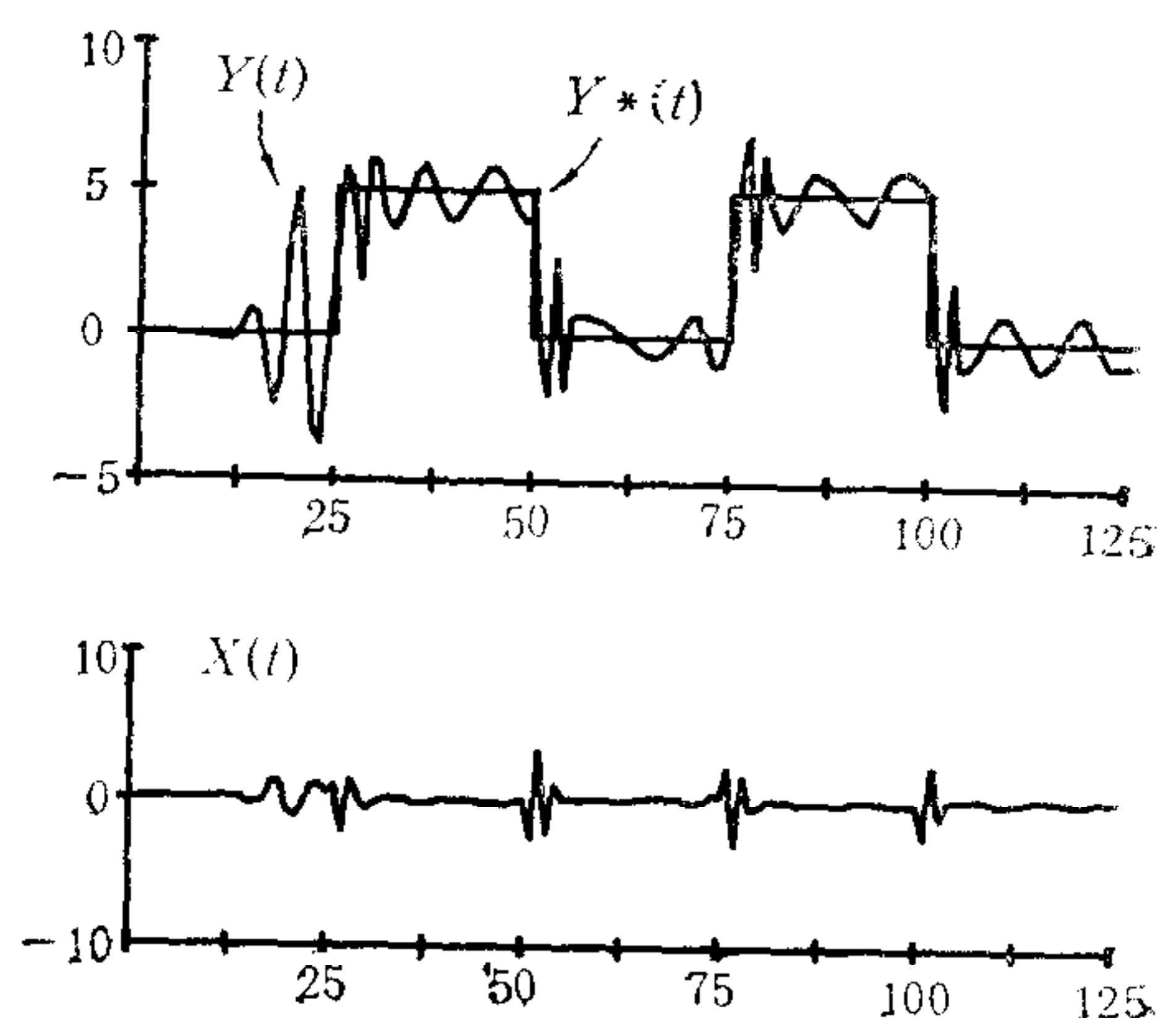


图 3 采用文[9]方法时的仿真结果

看出,本文方法可明显地改善系统的控制性能。

通过引入一个非线性补偿环节,本文对具有间隙的非线性系统提出了一种可控制开环不稳定及非最小相位系统的控制加权自适应算法,并给出了稳定性收敛性定理及其证明,从而把线性系统的控制加权自适应控制及其相应的稳定性收敛性结果推广到具有间隙的非线性系统。

参 考 文 献

- [1] Kung, M. C. and Womack, B. F., Discrete Time Adaptive Control of Linear Systems with a Two-Segment Piecewise-Linear Asymmetries Nonlinearity, *IEEE Trans. Automatic Control*, 29(1984), 170—172.
- [2] Zhang, C. and Evans, R. J., Amplitude Constrained Adaptive Control, *Int. J. Control*, 46(1987), 53—64.
- [3] 张竞新、郎世俊,具有控制死区的线性离散系统的自适应控制,控制与决策, 1(1986),38—45.
- [4] 张竞新、郎世俊, Hammerstein 系统控制加权自适应次优控制,控制理论与应用,6(1989),增刊II,35—42.
- [5] Zhang Jingxin and Lang Shijun, Explicit Self-tuning Control for a Class of Nonlinear Systems, *Automatica*, 25(1989), 593—596.
- [6] 孙西、史维,具有间隙非线性系统的自适应控制,控制理论与应用, 8(1991), 96—100.
- [7] Hu Fengzhang and Long Jianguo, Parameter Estimation and Adaptive Control of a Discrete Time System with Input Backlash, Proc. of Beijing Int. Conf. on System Simulation and Scientific Computing, (1989), 83—86.
- [8] Zhang Youhong, Stochastic Adaptive Control and Prediction Based on a Modified Least Squares—the General Delay Colored-noise Case, *IEEE Trans. Automatic Control*, 27(1982), 1257—1260.
- [9] Goodwin, G. C. and Sin, K. S., Adaptive Prediction, Filtering and Control, Prentic Hall, (1984).

WEIGHTED ADAPTIVE CONTROL OF LINEAR SYSTEMS WITH BACKLASH NONLINEARITY

HAN CUNWU ZHANG JINGXIN GU XINGYUAN

(Dept. of Automatic Control, Northeast Univ. of Technology, Shenyang 110006)

ABSTRACT

This paper is concerned with the adaptive control of linear systems with a backlash nonlinearity. A weighted adaptive control algorithm is presented for the control of such systems whose linear part is unstable and of nonminimum phase. The global stability and convergence of the algorithm is established. Simulation results show that the algorithm can obviously improve the control performance of the system.

Key words: Adaptive control; backlash nonlinearity; nonminimum phase systems; stability; convergence.



韩存武 1961年生。1982年毕业于上海交通大学电工及计算机科学系,获学士学位。1990年在东北工学院获硕士学位。现为该院自控系博士研究生。曾在国内外发表论文十余篇。主要研究兴趣为:非线性系统的自适应控制及神经网络在控制中的应用。

张竞新 照片、简介见本刊第19卷第2期。



顾兴源 1951年清华大学电机工程系毕业,1961—1963年在莫斯科动力学院为访问学者,现为东北工学院教授,工业自动化专业博士研究生导师,《中国冶金百科全书》总编委会成员,兼《冶金自动化卷》编委会主任。研究领域:计算机控制系统,自适应控制,鲁棒控制,工业过程优化。