确定性Hammerstein模型的自适应控制算法及其全局收敛性

林 威　　刘美华
（复旦大学）　　（国防科技大学）

摘　　要

本文对广义的 Hammerstein 模型描述的一类非线性系统,提出一种复合的自适应控制算法. 在适当的条件下,证明了这类非线性系统的稳定性和算法的全局收敛性. 本文提出的算法可以适用于开环不稳定且具有"非最小相位"特性的系统.

关键词——自适应控制,非线性系统,收敛性,动态补偿,最优化.

一、引　　言

对于确定性或随机的线性离散定常系统，已经提出了一些稳定且全局收敛的自适应控制算法[1]. 但是对于线性时变以及非线性离散时间系统，这方面目前仅有少量的结果. 本文研究较为广泛的一类非线性离散时间确定性系统——广义的 Hammerstein 模型的自适应控制问题.

一些学者已经研究了这类非线性系统的自适应控制[2-4]. 他们把现有的自校正控制理论推广到了 Hammerstein 模型,并进行了仿真研究，但没有从理论上严格分析所设计的非线性系统的闭环稳定性和自适应控制算法的全局收敛性. 文献 [5,6] 分别给出了全局收敛的确定性和随机自适应控制算法，但这些算法仅适用于具有"最小相位"特性的 Hammerstein 模型. 即 $B(q^{-1})$ 或 $B_p(q^{-1})$ 必须为稳定的多项式.

本文对开环不稳定或"非最小相位"的 Hammerstein 模型,提出了动态补偿加最优化的复合自适应控制方案. 首先对开环系统进行非线性动态补偿，使之具有"最小相位"特性;然后对经补偿具有"最小相位"特性的增广系统实行最优控制. 可以证明,只要适当地设计动态补偿器，本文给出的复合自适应控制能保证非线性闭环系统在输入输出有界意义下是渐近稳定的;自适应控制算法全局收敛并使一定的性能指标最优.

二、动态补偿加最优控制方案

离散时间确定性的广义 Hammerstein 模型可以用如下非线性差分方程表示:

本文于1987年9月29日收到.

$$A(q^{-1})\boldsymbol{y}(t)=q^{-d}\sum_{i=1}^{p}B_i(q^{-1})\boldsymbol{u}^i(t). \tag{2.1}$$

这里 d 为系统延迟时间常数；q^{-1} 为单位后向移位算子；$\boldsymbol{u}(t)$，$\boldsymbol{y}(t)$ 分别为系统输入、输出时间序列. $A(q^{-1})$，$B_i(q^{-1})$，$i=1,2,\cdots,p$ 均为 q^{-1} 的多项式，且可记为

$$A(q^{-1})=a_0+a_1q^{-1}+\cdots+a_{n_a}q^{-n_a},\quad a_0=1,$$

$$B_i(q^{-1})=b_{i0}+b_{i1}q^{-1}+\cdots+b_{n_{b_i}}q^{-n_{bi}},\quad b_{p0}\neq 0,\quad i=1,2,\cdots,p.$$

假定系统(2.1)具有有限初值 $\boldsymbol{y}(0)$，$\boldsymbol{y}(-1)$，$\cdots$，$\boldsymbol{y}(-n_a+1)$；$\boldsymbol{u}^i(-d+1)$，$\boldsymbol{u}^i(-d)$，$\cdots$，$\boldsymbol{u}^i(-d-n_{bi}+1)$，$i=1,2,\cdots,p$. 并假设

2A) 延迟时间常数 d 和输入信号最高阶 p 已知；

2B) 系统的阶数 n_a，$n_{bi}(i=1,2,\cdots,p)$ 的上界已知；

2C) $A(q^{-1})$，$B_p(q^{-1})$ 为互质多项式.

根据 2B)的假设，在以下分析中我们认为 n_a，n_{bi} 不小于系统的实际阶数. 假设条件 2C) 并不失一般性. 显而易见，若令 $B_i(q^{-1})=r_iB(q^{-1})(i=1,2,\cdots,p)$，(2.1) 模型即化为 Hammerstein 模型. 取 $r_i=1=p$，则(2.1)模型即为线性系统，则 2C)的假设即为通常的 $A(q^{-1})$，$B(q^{-1})$ 互质的条件.

分析文献 [2—4] 的结果可以看出，由于仍采用处理线性定常离散时间系统的方法讨论 Hammerstein 模型的自适应控制，导致算法复杂且无法保证自适应控制算法的稳定性和收敛性. 造成这种局面的主要原因是对于系统(2.1)的非线性特性中含有输入 $\boldsymbol{u}(t)$ 以及 $\boldsymbol{u}(t)$ 的幂指数项，因而仅仅对 $\boldsymbol{u}(t)$ 加权是不恰当的. 本节给出如下非线性动态补偿加最优化的复合控制方案，如图 1 所示.

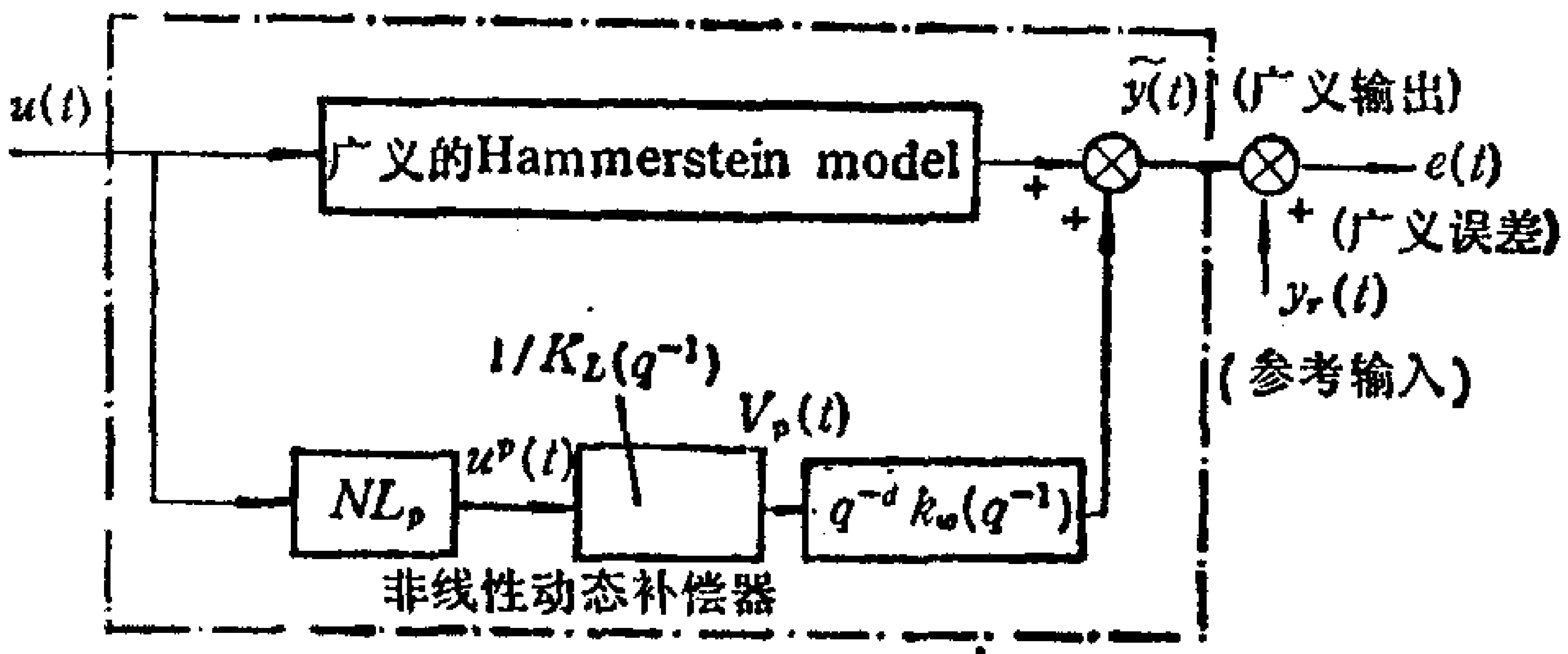

图 1 动态补偿加最优化复合控制方案.

自适应控制的目的是使广义误差 $e(t)$ 渐近趋于零. 由图 1 可以得到

$$e(t)=y_r(t)-\boldsymbol{y}(t)-\boldsymbol{k}_w(q^{-1})\boldsymbol{v}_p(t-d), \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{k}_l(q^{-1})\boldsymbol{v}_p(t)=\boldsymbol{u}^p(t). \tag{2.3}$$

这里 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1})$，$\boldsymbol{k}_w(q^{-1})$ 也是 q^{-1} 的 n_{kl}，n_{kw} 阶多项式，且 $k_{l0}=1$，并取引入的辅助控制 $\boldsymbol{v}_p(t)$ 具有初值 $\boldsymbol{v}_p(t)=\{\boldsymbol{v}_p(t),1-d-n_{kl}\leqslant t\leqslant 1-d\}$. 不失一般性，令 $\boldsymbol{v}_p(-d)=\boldsymbol{v}_p(-d-1)=\cdots=\boldsymbol{v}_p(1-d-n_{kl})\equiv 0$，则由(2.3)式可得 $\boldsymbol{v}_p(1-d)=\boldsymbol{u}^p(1-d)$. 容易证明：从(2.3)式，$\boldsymbol{v}_p(t)$ 可以用 $\boldsymbol{u}^p(t)$ 以及 $\boldsymbol{v}_p(t-1)$，$\boldsymbol{v}_p(t-2)$，$\cdots\boldsymbol{v}_p(t-n_{kl})$ 线性表示. 现引入恒等式

$$1 = A(q^{-1})F(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}). \tag{2.4}$$

其中 $F(q^{-1}),G(q^{-1})$ 为 $d-1,n_a-1$ 阶的多项式，且 $f_0=1$. 显而易见 $F(q^{-1}),G(q^{-1})$ 由(2.4)式唯一确定.

在式(2.1)两边乘以 $q^dF(q^{-1})$，并注意到(2.4)式，化简得

$$\boldsymbol{y}(t+d) = \sum_{i=1}^{p} F(q^{-1})B_i(q^{-1})\boldsymbol{u}^i(t) + G(q^{-1})y(t). \tag{2.5}$$

代入(2.2)式，并令 $e(t)=0$，得到控制律应满足的方程

$$Y_r(t+d) = \sum_{i=1}^{p} F(q^{-1})B_i(q^{-1})\boldsymbol{u}^i(t) + G(q^{-1})y(t) + \boldsymbol{k}_w(q^{-1})\boldsymbol{v}_p(t). \tag{2.6}$$

动态补偿器 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1})$, $\boldsymbol{k}_w(q^{-1})$ 可以按预先给定的具有希望的零点分布的稳定多项式 $T_r(q^{-1})$确定，并满足

$$A(q^{-1})\boldsymbol{k}_w(q^{-1}) + B_p(q^{-1})\boldsymbol{k}_l(q^{-1}) = T_r(q^{-1}),\ \ T_r(0) = t_{r0} \neq 0. \tag{2.7}$$

取 $n_{kw}=n_{bp},n_{kl}=n_a,n_{tr}\leqslant n_a+n_{bp}-1$，则注意到$a_0=k_l(0)=k_{l0}=1$，以及假设条件2C)，则 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1})$, $\boldsymbol{k}_w(q^{-1})$ 可以由式(2.7)唯一确定.

三、自适应控制算法及其全局收敛性

定义

$$\left.\begin{aligned}&\alpha_i(q^{-1}) \triangleq F(q^{-1})B_i(q^{-1}), i=1,2,\cdots,p,\\&\beta(q^{-1}) \triangleq G(q^{-1}).\end{aligned}\right\} \tag{3.1}$$

引入数据向量

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\phi}^T(t) = [&\boldsymbol{u}(t),\cdots,\boldsymbol{u}(t-n_{b1}-d+1);\cdots;\boldsymbol{u}^p(t),\cdots,\\&\boldsymbol{u}^p(t-n_{bp}-d+1);\boldsymbol{y}(t),\cdots,\boldsymbol{y}(t-n_a+1)];\end{aligned} \tag{3.2}$$

参数向量

$$\boldsymbol{\theta}_0^T = [\alpha_{1,0}\cdots,\alpha_{1,n_{b_1}}+d-1;\cdots;\alpha_{p,0},\cdots,\alpha_p,n_{bp}+d-1;\beta_0,\cdots,\beta_{n_a-1}]. \tag{3.3}$$

因此式(2.5)可以记为

$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{\phi}^T(t-d)\boldsymbol{\theta}_0. \tag{3.4}$$

由(2.6)式，使 $e(t)=0$ 的控制方程可以被等价地表示成

$$\boldsymbol{\phi}^T(t)\boldsymbol{\theta}_0 + \boldsymbol{k}_w(q^{-1})\boldsymbol{v}_p(t) = \boldsymbol{y}_r(t+d). \tag{3.5}$$

当对象模型参数未知时，以(3.4)式作为参数估计模型，采用投影算法估计参数，则可建立如下的直接自适应控制算法:

$$\theta(t) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) + \frac{a(t)\boldsymbol{\phi}(t-d)}{1+\boldsymbol{\phi}^T(t-d)\boldsymbol{\phi}(t-d)}[\boldsymbol{y}(t) - \boldsymbol{\phi}^T(t-d)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1)]. \tag{3.6}$$

自适应控制 $\boldsymbol{u}(t)$ 满足

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{\phi}^T(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) + \boldsymbol{k}_w(q^{-1})\boldsymbol{v}_p(t) = \boldsymbol{y}_r(t+d),\\&\boldsymbol{v}_p(t) = \boldsymbol{u}^p(t) - H(q^{-1})\boldsymbol{v}_p(t-1).\end{aligned}\right\} \tag{3.7}$$

其中

$$H(q^{-1}) = q[\boldsymbol{k}_l(q^{-1}) - 1] = q[\boldsymbol{k}_l(q^{-1}) - \boldsymbol{k}_l(0)]$$

$$= h_0 + h_1 q^{-1} + \cdots + h_{n_k l-1} q^{-(n_k l-1)}. \tag{3.8}$$

$$a(t) = \begin{cases} 1, & \text{如果(3.7)关于 } \boldsymbol{u}(t) \text{ 的 } p \text{ 次代数方程有解}, \\ \gamma, & \varepsilon < \gamma < 2 - \varepsilon,\ \gamma \neq 1 \text{ 且 } 0 < \varepsilon < 1. \end{cases} \tag{3.9}$$

而动态补偿器可以按预先给定的稳定多项式 $T_r(q^{-1})$ 以及对 (2.1) 的对象模型参数 $A(q^{-1}), B_p(q^{-1})$ 的先验信息的了解未确定.

为了分析上述自适应控制算法的收敛性,首先证明两个引理.

引理 3.1. 考虑如下线性离散定常系统

$$A_m(q^{-1})\boldsymbol{s}(t) = \sigma(t). \tag{3.10}$$

假定 $A_m(q^{-1})$ 的零点全部落在单位圆内,则有

$$|\boldsymbol{s}(t)| \leqslant \boldsymbol{c}_s' + \boldsymbol{c}_s'' \max_{0\leqslant\tau\leqslant t} \{|\sigma(\tau)|\},\ 0 \leqslant \boldsymbol{c}_s' < \infty,\ 0 \leqslant \boldsymbol{c}_s'' < \infty. \tag{3.11}$$

此引理可直接从 n 阶差分方程解的表示定理得证.

引理 3.2. 考虑如下非线性离散定常系统

$$\bar{B}_p(q^{-1})\boldsymbol{u}^p = \bar{A}(q^{-1})y(t+d) + \sum_{i=1}^{p-1} \bar{B}_i(q^{-1})u^i(t), \tag{3.12}$$

如果 $\bar{B}_p(q^{-1}) = 0$ 的根全部落在单位圆内,则

$$|\boldsymbol{u}^p(t)| \leqslant c_1 + c_2 \max_{0\leqslant\tau\leqslant t+d} \{|y(\tau)|\},\ 0 \leqslant \boldsymbol{c}_i < \infty,\ i = 1,2. \tag{3.13}$$

证明. 利用引理 3.1,由(3.12)式,立即得到

$$|\boldsymbol{u}^p(t)| \leqslant \bar{\boldsymbol{c}}_y \max_{0\leqslant\tau\leqslant t+d} \{|y(\tau)|\} + \sum_{i=1}^{p-1} \bar{\boldsymbol{c}}_i \max_{0\leqslant\tau\leqslant t} \{|\boldsymbol{u}^i(\tau)|\} + \boldsymbol{c}. \tag{3.14}$$

因此,如果 $|\boldsymbol{u}(t)|$ 有界,则引理 3.2 已得证. 现假定 $|\boldsymbol{u}(t)|$ 无界,考虑满足下面条件的点列 t_k.

$$\lim_{t_k\to\infty} |u(t_k)| = \infty \text{ 和 } |u(\tau)| \leqslant |u(t_k)|,\text{ 对 } \forall \tau \leqslant t_k \tag{3.15}$$

不妨设 $|u(t_1)| \geqslant 1$,则对所有满足(3.15)式的 t_k,有 $|u(t_k)| \geqslant 1$.

记

$$\varepsilon(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^{p-1} \bar{\boldsymbol{c}}_i}{|\boldsymbol{u}(t_k)|}. \tag{3.16}$$

注意到 $|u^{p-1}(t_k)| \geqslant |u^j(t_k)|, j = 1,2,\cdots,p-2$,则(3.14)式可化为

$$[1 - \varepsilon(t_k)]|u^p(t_k)| \leqslant \bar{\boldsymbol{c}}_y \max_{0\leqslant\tau\leqslant t_k+d} \{|y(\tau)|\} + \boldsymbol{c}. \tag{3.17}$$

选择充分大的 i_1, 使 $\varepsilon(t_1) < 1/2$, 则对一切 k, 均有 $0 < \varepsilon(t_k) < \varepsilon(t_1) < 1/2$, 由式(3.17),有

$$|\boldsymbol{u}^p(t)| \leqslant 2\bar{\boldsymbol{c}}_y \max_{0\leqslant\tau\leqslant t+d} \{|y(\tau)|\} + 2\boldsymbol{c},\ t = t_k. \tag{3.18}$$

因为 $|\boldsymbol{u}(t)|$ 在 $t < t_1$ 时有界,取上界为 $\bar{\boldsymbol{c}}_1$,则

$$|\boldsymbol{u}^p(t)| \leqslant 2\bar{\boldsymbol{c}}_y \max_{0\leqslant\tau\leqslant t+d} \{|y(\tau)|\} + 2\boldsymbol{c} + \bar{\boldsymbol{c}}_1,\ t < t_1 \text{ 或 } t = t_k, \tag{3.19}$$

现在对任一点 $t > t$,若不满足(3.15)式,则必存在 $t_i, t_i < t$. 而 $u(t_i)$ 满足式(3.15),使得

$$|\boldsymbol{u}^p(t)| < |\boldsymbol{u}^p(t_i)| \leqslant \boldsymbol{c}_1 + \boldsymbol{c}_2 \max_{0\leqslant\tau\leqslant t+d} \{|y(\tau)|\},$$

即式(3.13)成立. 综上所述,对所有 t,引理 3.2 均成立.

利用引理 3.1,3.2,可以建立如下全局收敛性定理.

定理 3.1. 对于(2.1)的离散时间确定性广义 Hammerstein 模型,采用式(3.6)—(3.9)的自适应控制算法,其中动态补偿器 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1}),\boldsymbol{k}_w(q^{-1})$ 由式(2.7)预先离线设定,则有

1) 闭环系统的输入、输出序列 $\{\boldsymbol{u}^i(t),i=1,2,\cdots,p\},\{\boldsymbol{y}(t)\}$ 有界;

2) $\lim\limits_{t\to\infty} e(t)=0$.

证明,类似于文献[1]引理 6.32 的证明,对于(3.4)式的估计模型,采用(3.6)式的参数估计算法,容易证明它仍然具有下述两个性质:

$$1)\ \|\tilde{\theta}(t)\|^2-\|\tilde{\theta}(t-1)\|^2\leqslant 0,\tilde{\theta}(t)\triangleq\hat{\theta}(t)-\theta_0; \tag{3.20}$$

$$2)\ \lim_{t\to\infty}\frac{\phi^T(t-d)\tilde{\theta}(t-d)}{[1+\phi^T(t-d)\phi(t-d)]^{1/2}}=0. \tag{3.21}$$

当对象参数已知时,满足式(2.7)的控制律 $\boldsymbol{u}(t)$,使 $e(t)=0$,但是当采用式(3.6)—(3.9)的自适应控制算法时,由于参数估计误差存在,注意到(2.2),(3.4)式,导出

$$e(t)=\phi^T(t-d)\tilde{\theta}(t-d). \tag{3.22}$$

由式(3.21),可得

$$\lim_{t\to\infty}\frac{e(t)}{[1+\phi^T(t-d)\phi(t-d)]^{1/2}}=0. \tag{3.23}$$

式(2.2)两边同乘以 $q^dA(q^{-1})$,并利用(2.1),(2.7)式,可整理得

$$T_r(q^{-1})\boldsymbol{v}_p(t)=A(q^{-1})[y_r(t+d)-e(t+d)]-\sum_{i=1}^{p-1}B_i(q^{-1})\boldsymbol{u}^i(t). \tag{3.24}$$

在式(3.24)两边同乘以 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1})$,并利用(2.3)式,可得

$$\begin{aligned}T_r(q^{-1})u_1^p(t)=&A(q^{-1})\boldsymbol{k}_l(q^{-1})[y_r(t+d)-e(t+d)]\\&-\boldsymbol{k}_l(q^{-1})\sum_{i=1}^{p-1}B_i(q^{-1})\boldsymbol{u}^i(t).\end{aligned} \tag{3.25}$$

类似地,在式(2.2)两边同乘以 $q^dB_p(q^{-1})\boldsymbol{k}_l(q^{-1})$,易推出

$$\begin{aligned}T_r(q^{-1})\boldsymbol{y}(t+d)=&B_p(q^{-1})\boldsymbol{k}_l(q^{-1})[y_r(t+d)-e(t+d)]\\&+\sum_{i=1}^{p-1}\boldsymbol{k}_w(q^{-1})B_i(q^{-1})\boldsymbol{u}^i(t).\end{aligned} \tag{3.26}$$

由于 $T_r(q^{-1})$ 为稳定的多项式, $y_r(t)$ 为有界参考输入信号,因此,从式(3.25),并利用引理 3.2,立即有

$$|\boldsymbol{u}^p(t)|\leqslant \boldsymbol{c}_p'+\boldsymbol{c}_p''\max_{0\leqslant\tau\leqslant t+d}\{|e(\tau)|\}. \tag{3.27}$$

从而

$$\begin{aligned}|\boldsymbol{u}^i(t)|\leqslant 1+|\boldsymbol{u}^p(t)|\leqslant(1+\boldsymbol{c}_p')+\boldsymbol{c}_p''\max_{0\leqslant\tau\leqslant t+d}\{|e(\tau)|\},\\ i=1,\cdots,p.\end{aligned} \tag{3.28}$$

这里 $\boldsymbol{c}_p',\boldsymbol{c}_p''$ 是和 t 无关的正常数. 再从式(3.24),(3.26),并利用式(3.28)以及引理 3.1,可以推出

$$|\boldsymbol{v}_p(t)|\leqslant\boldsymbol{c}_v'+\boldsymbol{c}_v''\max_{0\leqslant\tau\leqslant t+d}\{|e(\tau)|\}, \tag{3.29}$$

$$|y(t)| \leqslant c'_y + c''_y \max_{0 \leqslant \tau \leqslant t} \{|e(\tau)|\}. \tag{3.30}$$

根据(3.2)式数据向量的定义，则

$$\|\boldsymbol{\phi}(t-d)\|^2 \leqslant D_\phi \max \{u^2(t-d-i), 0 \leqslant i \leqslant n_{b1}+d-1; \cdots; u^{2p}(t+d-i),$$
$$0 \leqslant i \leqslant n_{bp}+d-1; y^2(t-d-i), 0 \leqslant i \leqslant n_a-1\}. \tag{3.31}$$

其中 D_ϕ 为数据向量 $\boldsymbol{\phi}(t)$ 的维数．利用(3.28)，(3.30)，(3.31)式，有

$$\|\boldsymbol{\phi}(t-d)\| \leqslant \sqrt{D_\phi}\,[c'_\phi + c''_\phi \max_{0 \leqslant \tau \leqslant t+d} \{|e(\tau)|\}]. \tag{3.32}$$

根据 (3.23)，(3.32) 两式，直接利用文献 [1] 引理 6.3.2 就可以分别得到定理 3.1 的结论 1)，2)．

这个全局收敛性定理表明，对于(2.1)的非线性系统，采用本文提出的动态补偿加最优化的复合自适应控制算法，所构成的闭环系统是输入输出有界稳定，且自适应控制算法最终将收敛到参数已知时的控制律．更为重要的是容易证明使 $e(t)=0$ 的控制律 $\boldsymbol{u}(t)$，也就是使如下性能指标为极少的最优控制 $\boldsymbol{u}^*(t)$，即使

$$J = \frac{1}{2}[y_r(t+d) - y(t+d)]^2 + \frac{1}{2}[k'_w(q^{-1})v_p(t)]^2 \tag{3.33}$$

为极小．这里 $v_p(t)$ 为辅助控制并满足(2.4)式动态方程，$k'_w(q^{-1}) = k'_{w0} \cdot k'_w(q^{-1})/b_{p0}$（可通过令 $\dfrac{\partial J}{\partial \boldsymbol{u}^p(t)} = 0$，把 $\boldsymbol{u}^p(t)$ 当作一个自变量得证）．这也意味着本文给定的复合自适应控制算法最终将收敛到使(3.33)一步二次跟踪性能指标为极小的最优控制，并使

$$\lim_{t\to\infty} \left\{\frac{1}{2}[y_r(t+d) - y(t+d)]^2 + \frac{1}{2}\left[\frac{k'_w(q^{-1})}{k_2(q^{-1})} u^p(t)\right]^2\right\} = \min. \tag{3.34}$$

注释 1. 如果将上述自适应控制算法中的参数估计算法改成最小二乘算法，定理 3.1 仍成立，证明方法一样．

注释 2. 为了在线地从式(3.7)求解 $\boldsymbol{u}(t)$，则关于 $\boldsymbol{u}(t)$ 的 p 次代数方程若要有实数解，必须假设 p 为奇数，$T_r(0) = t_{r_0} \neq 0$，可以保证 $\boldsymbol{u}^p(t)$ 的系数不为零（t_{r_0} 可以预先给定）．

注释 3. 上述自适应控制算法是通过预先选定动态补偿器 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1}), \boldsymbol{k}_w(q^{-1})$，保证定理 3.1 中闭环稳定性和算法的全局收敛性，这要求对 $A(q^{-1})$，$B_p(q^{-1})$ 的信息有确切的了解．但在实际系统中往往难以做到．通常通过试凑法来寻找 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1})$，$\boldsymbol{k}_w(q^{-1})$，以使 $Ak_w + Bk_l$ 为稳定多项式．这种试凑法有很大盲目性．下面给出一种在线自动调节 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1}), \boldsymbol{k}_w(q^{-1})$ 的自适应控制算法．

式(2.7)两边同乘以 $F(q^{-1})$，并利用(2.4)和(3.1)式化简得

$$\alpha_p(q^{-1})\boldsymbol{k}_l(q^{-1}) + [1 - q^{-d}\beta(q^{-1})]\boldsymbol{k}_w(q^{-1}) = F(q^{-1})T_r(q^{-1}). \tag{3.35}$$

这样，可以直接采用每一次估计的 $\hat{\alpha}_p(q^{-1})$，$\hat{\beta}(q^{-1})$ 的参数值，由(3.35)式在线地求解 $\boldsymbol{k}_l(q^{-1})t$，$\boldsymbol{k}_w(q^{-1})t$，以使(2.7)式条件最终得到自动满足，而又不需要 $A(q^{-1})$，$B_p(q^{-1})$ 的先验信息．关于这两种算法的仿真可参见文献[7]．本文算法在随机情形以及改进的在线调节算法，其在确定性和随机两种情形下全局收敛性的证明可见文献[8]．

结 束 语

本文提出的复合自适应控制算法的基本思想实际上是作者在研究线性定常系统[9,10]

基础上的自然推广．而从文献[9,10]提出的新的二次型指标角度来理解本文给出的动态补偿加最优化控制方案，其确切的物理意义是很直观和明显的．

对于李训经教授的指点，王银平同志对本文提出的有益意见，作者在此表示感谢．

参　考　文　献

[1] Goodwin, G. C. and K. S. Sin, Adaptive Filtering, Prediction and Control, New Jersey, 1984.

[2] Anbumani, K, L. M. Patnaik and I. G Sarma, Self-Tuning Minimum Variance Control of Nonlinear Systems of the Hammerstein Model, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-20(1981), 959—961.

[3] Lachmann, K. H., Parameter Adaptive Control of A Class of Nonlinear Process, 6th IFAC Symp. Identification and System Parameter Estimation, (1982), 372—378.

[4] Agarwal, M and P. E. Seborg, Self-Tuning Controllers for Nonlinear Systems, 2nd IFAC on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, (1986), 393—398.

[5] Kung, M. C and B. F Womack, Stability Analysis of A Discrete-Time Adaptive Control Algorithm Having A polynomial Input, *IEEE Trans*, AC-28(1982), 1110—1112.

[6] 陈树中，奇次 Hammerstein 模型自适应算法的自校正性和稳定性，自动化学报，**10**(1984)，162—168。

[7] Lin Wei, Liu MeiHua and Sun Lai Xiang, Adaptive Control Algorithms and CAD Software Package For The Generaliced Hammerstein Model, Accepted by 4th IFAC Symp. On Computer Aided Design in Control System, 1988, 295—300.

[8] Lin Wei, Wang Yingping, Liu Meihua, Nonlinear Stochastic Adaptive Control Based on Dynamic Compensation and Optimication, Accepted by 8th IFAC Symp. Identification and System Parameter Estimation, 1988, 617—622.

[9] Lin Wei, Wang Yingping, Yong Jiongmin, Unified Adaptive Control of Non-Minimum-Phase Systems Part1. Weighted Control Effort and Pole Placement for Stochastic Systems, *INT. J. Control*, **50**, (1989), 917—935.

[10] Lin Wei, Wang Yingping, Yong Jiongmin, Unified Adaptive Control of Non-Minimun-Phase Systems Part 2. Target Tracking and Dynamic Compensation for Determinstic Systems. Accepted for Publication in Int. J. Control. to Appear (1990).

GLOBAL CONVERGENCE OF ADAPTIVE CONTROL ALGORITHM FOR DETERMINISTIC HAMMERSTEIN MODEL

LIN WEI

(*Fudan University*)

LIU MEIHUA

(*Changsha Institute*)

ABSTRACT

A composite adaptive control algorithm is presented for a class of such nonlinear systems that are described by generalized Hammerstein model. This algorithm is suited to systems that is open loop unstable and has 'non-minimum-phase' property. Under some conditions, the global convergence of the algorithm and system stability can be shown.

Key words ——Adaptive control; nonlinear systems; convergence; dynamic compensation; optimization.