第 22 卷 第 1 期
1996 年 1 月

自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA

Vol. 22, No.1
Jan., 1996

研究简报

连续系统的模型参考自适应辨识新方法

孙先仿
(北京航空航天大学自控系 北京 100083)

张志方
(中国科技大学管理学院 北京 101408)

关键词: 系统辨识, 模型参考自适应系统, 连续系统, 不稳定系统, 非最小相位系统.

1 引言

文 [1] 提出了将待辨系统以被控对象的形式嵌入到 Narendra 等[2] 的自适应控制结构中去的连续系统辨识方案, 解决了传统的模型参考自适应辨识方法不能处理待辨系统不稳定或不具备良好暂态品质的问题. 但它不能处理非最小相位系统, 而且对于相对阶大于 1 并且传递函数分子阶次大于 0 的系统, 因需要进行矩阵求逆而使运算复杂, 精度降低. 本文在文 [1] 的基础上, 提出了将待辨系统与一个适当选择的相对阶为 1 的系统并联后作为被控对象嵌入到模型参考自适应控制系统 (MRACS) 中去的辨识方案, 解决了上述问题.

2 辨识方案

考虑一个待辨识的实际系统, 其传递函数为

$$W_p(s)=\frac{B_p(s)}{A_p(s)}=\frac{b_m s^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots+b_0}{s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0} \tag{1}$$

其中 m, n 已知, $m<n$, $b_m>0$, $A_p(s)$ 与 $B_p(s)$ 互质. 记 $\boldsymbol{a}=[a_0, \cdots, a_{n-1}]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{b}=[b_0, \cdots, b_m]^{\mathrm{T}}$. 系统辨识的目的就是要确定一组输入信号 $u(t)$, $(t\geqslant t_0)$, 并利用该输入信号及其作用于系统时的输出信号, 来确定实际系统的参数 $\boldsymbol{a},\boldsymbol{b}$.

根据 $W_p(s)$ 的某些先验知识, 采用根轨迹综合的方法, 可确定一个相对阶为 1 的 n_a 阶系统 $W_a(s)=B_a(s)/A_a(s)$, 其中 $A_a(s)$ 与 $A_p(s)$ 无相同零点, 且将 $W_a(s)$ 与 $W_p(s)$ 并联后所得的系统 $W(s)=W_p(s)+W_a(s)$ 为最小相位系统. 将 $W(s)$ 作为被控对象嵌入到 Narendra[2] 方案的 MRACS 中, 则可由这一 MRACS 的可调参数确定 $\boldsymbol{a},\boldsymbol{b}$ 的估值.

选择一个暂态品质良好的严格正实模型 $W_m(s)$ 作为 MRACS 的参考模型. 状态变量滤波器 (控制器) 由下述方程描述:

$$\dot{\omega}_1=\Lambda\omega_1+gu,$$

本文于 1993 年 4 月 23 日收到

$$\dot{\omega_2} = \Lambda\omega_2 + gy, \tag{2}$$
$$u(t) = \theta^{\mathrm{T}}(t)\omega(t).$$

其中 $\theta(t)$ 为可调参数，$\theta^{\mathrm{T}}(t) = [c_{n+n_a-1}(t), \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}(t), d_{n+n_a-1}(t), \boldsymbol{d}^{\mathrm{T}}(t)]$ $\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}(t) = [c_{n+n_a-2}(t), \cdots, c_0(t)]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{d}^{\mathrm{T}}(t) = [d_{n+n_a-2}(t), \cdots, d_0(t)]$，$\omega^{\mathrm{T}}(t) = [r(t), \omega_1^{\mathrm{T}}(t), y(t), \omega_2^{\mathrm{T}}(t)]$，$r(t)$ 是参考模型输入，$y(t)$ 是 $W(s)$ 的输出，$\Lambda \in R^{(n+n_a-1)\times(n+n_a-1)}$ 是稳定矩阵，(Λ, g) 是能控对. 文[2]中已经证明，存在一个常矢量 θ^*，使得当 $\theta = \theta^*$ 时，系统 $W(s)$ 与控制器(2)一起构成的受控可调子系统与参考模型 $W_m(s)$ 相匹配.

若自适应律选为

$$\dot{\theta} = -e_1\omega. \tag{3}$$

其中 $e_1 = y - y_m$，y_m 为参考模型输出，文[2]证明，当 ω 为充分持续激励或 r 具有足够丰富的频率谱线时，θ 渐近收敛于 θ^*.

如果可以确定 $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}$ 与 θ^* 之间的映射关系，则当将对应关系中的 $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \theta^*$ 分别用参数估计值 $\hat{\boldsymbol{a}}(t)$，$\hat{\boldsymbol{b}}(t)$ 及 $\theta(t)$ 代替时，$\hat{\boldsymbol{a}}(t)$，$\hat{\boldsymbol{b}}(t)$ 将渐近收敛于真实参数值 $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}$.

下面我们考虑 $W_a(s)$ 和 $W_m(s)$ 均为一阶系统的情况，其中 $W_a(s) = 1/A_a(s) = 1/\rho_1 s + \rho_0$，$W_m(s) = 1/A_m(s) = 1/\alpha_1 s + \alpha_0$. (Λ, g) 选为控制器规范型

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -\lambda_{n-1} & \cdots & -\lambda_1 & \vdots & -\lambda_0 \\ & I_{n-1} & & \vdots & 0 \end{bmatrix},$$

$$g^{\mathrm{T}} = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0].$$

记 $\lambda(s) = s^n + \lambda_{n-1}s^{n-1} + \cdots + \lambda_0$，$H(s) = \lambda(s)A_m(s) = h_{n+1}s^{n+1} + \cdots + h_0$，则有下述定理.

定理. 如果 θ 按式(3)调节，$\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}$ 的估计值按下述公式确定:

$$\begin{aligned} \hat{a}_i(t) &= -\frac{\rho_1}{\rho_0}\hat{a}_{i-1}(t) + \frac{\gamma}{\rho_0}[c_n(t)h_i + d_n(t)\lambda_i + d_i(t)], (i = 0, 1, \cdots, n-1), \\ \hat{b}_i(t) &= -\frac{\rho_1}{\rho_0}\hat{b}_{i-1}(t) - \frac{1}{\rho_0}a_i(t) + \frac{\gamma}{\rho_0}[\lambda_i - c_i(t)], \quad (i = 0, 1, \cdots, m). \end{aligned} \tag{4}$$

其中

$$\hat{a}_{-1}(t) = 0,$$
$$\hat{b}_{-1}(t) = 0,$$
$$\gamma = \begin{cases} 1 & ; m < n-1. \\ \dfrac{\rho_1}{c_n(t)h_{n+1}} & ; m = n-1. \end{cases} \tag{5}$$

则 $\hat{\boldsymbol{a}}(t)$、$\hat{\boldsymbol{b}}(t)$ 渐近收敛于 $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}$.

证明 参考文献[1]的证明过程，在此略.

3 举例

例 1. 已知受辨系统传递函数结构为 $W_p(s) = \dfrac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}$，有关 $\boldsymbol{a}$，$\boldsymbol{b}$ 的先验知识为 $b_0 \geqslant 1$，$a_0 > 0$，$-3 < a_1 < 0$，则由根轨迹的知识可选 $W_a(s) = \dfrac{1}{4s+2}$. 选定

$W_m(s)=\dfrac{1}{s+1}$，$\lambda(s)=s^2+2s+1$ 后，当 $r(t)$含足够丰富的频率谱线时，可调参数收敛到 $c_0^*=-2$，$c_1^*=0$，$c_2^*=4$，$d_0^*=16$，$d_1^*=24$，$d_2^*=18$. 将 $\gamma=1$，$\rho_0=2$，$\rho_1=4$，$\lambda_0=1$，$\lambda_1=2$，$h_0=1$，$h_1=3$，$h_2=3$，$h_3=1$，以及上列 $\boldsymbol{c}^*$，$\boldsymbol{d}^*$ 的值代入式(4)可计算出辨识参数收敛到 $a_0=1$，$a_1=-2$，$b_0=1$. 本例属于相对阶大于 1 的不稳定系统辨识问题.

例 2. 已知受辨系统传递函数结构为 $W_p(s)=\dfrac{b_1s+b_0}{s^2+a_1s+a_0}$，由有关 $\boldsymbol{a}$,$\boldsymbol{b}$ 的先验知识及根轨迹的知识选定 $W_a(s)=\dfrac{1}{s-1}$. 选定 $W_m(s)=\dfrac{1}{s+1}$，$\lambda(s)=s^2+2s+1$ 后，当$r(t)$有足够丰富的频率谱线时，可调参数收敛到 $c_0^*=0.5$，$c_1^*=1.5$,，$c_2^*=0.5$，$d_0^*=1.5$，$d_1^*=-7$，$d_2^*=-1.5$. 将 $c_2^*=0.5$ 代入式(5)中的 $c_n(t)$计算得 $\gamma=2$，将 $\gamma=2$，$\rho_0=-1$，$\rho_1=1$，$\lambda_0=1$，$\lambda_1=2$，$h_0=1$，$h_1=3$，$h_2=3$，$h_3=1$，以及上列 $\boldsymbol{c}^*$，$\boldsymbol{d}^*$ 值代入式(4)可计算出 $\hat{\boldsymbol{a}}(t)\hat{\boldsymbol{b}}(t)$的收敛值 $a_0=-1$，$a_1=4$，$b_0=-2$，$b_1=1$. 本例属不稳定非最小相位系统的辨识问题. 注意例中 $W_a(s)$选 为不稳定系统. 因为本文并未对 $W_a(s)$的稳定性作任何限制，而只要求它与 $W_p(s)$相并联后的系统为最小相位系统，本例所选 $W_a(s)$是可行的.

参　考　文　献

[1] 孙先仿，张志方. 不稳定连续系统的模型参考自适应辨识. 1993 控制与决策年会论文集. 东北大学出版社，1993. 301 — 306.

[2] Narendra K S, Annaswamy A M. Stable Adaptive System. Prentice-Hall, Inc. 1989.

A NEW SCHEME FOR MODEL REFERENCE ADAPTIVE IDENTIFICATION OF CONTINUOUS SYSTEMS

SUN XIANFANG

(*Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100083)

ZHANG ZHIFANG

(*Institute of Management, Chinese University of Science and Technology,, Beijing* 101408)

Key words: System Identification, Model Reference Adaptive System, Continuous System, Unstable System, Nonminimum-Phase System.