第19卷 第2期　　控 制 与 决 策　　2004年2月
Vol 19 No. 2　　Control and Decision　　Feb. 2004

文章编号: 1001-0920(2004)02-0171-04

一类不确定延迟系统的鲁棒自适应控制

孟红霞, 贾英民
(北京航空航天大学 第七研究室, 北京 100083)

摘　要: 针对一类不确定的延迟系统, 提出一种鲁棒的模型参考自适应控制设计方案. 它不同于以往将所有延迟部分转化为系统的未建模动态的方案, 该方案只是把延迟偏离标称值的扰动转化为系统的未建模动态, 而将能够获得的延迟标称值信息加入系统的建模部分, 从而使系统的建模更为精确. 同时, 研究了这种其建模部分含有延迟的系统的稳定性和鲁棒性. 仿真结果验证了该方案的有效性.

关键词: 稳定性; 延迟扰动; 有限谱配置; 鲁棒自适应控制
中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Robust adaptive control for linear systems with delay uncertainty

MENG Hong-xia, JIA Ying-min
(The Seventh Research Division, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China. Correspondent: MENG Hong-xia, E-mail: mhxx@163.net)

Abstract: For a class of uncertain linear systems with delay perturbation, a robust model reference adaptive control design scheme is proposed. Unlike the conventional ones, which transform all the delay into unmodelled dynamics, the scheme only transforms the delay perturbation into unmodelled dynamics. Meanwhile the desired delay acquired by some way is considered as the modelled part, so that the modelling of the systems is more accurate. The stability and robustness of the systems with delayed modelled part are investigated. Simulation results illustrate the effectiveness of the scheme.

Key words: stability; delayed perturbation; finite spectrum assignment; robust adaptive control

1　引　　言

在实际的过程控制中, 系统的延迟通常是不能精确获得或时变的. 对于这种延迟具有不确定性的系统, 已经有了一些解决的方法[1~6]. 这些方法的核心是对延迟进行直接估计, 增加了一些待估计的参数, 且受控对象的建模部分是非延迟的.

本文所研究的对象延迟是已知的, 但具有不确定的扰动. 控制这类系统, 以往的方法是将整个延迟参数(包括已知部分和扰动部分)转化为系统的未建模动态来处理. 而本文则把延迟已知的部分作为系统的标称部分, 仅把延迟的扰动转化为系统的未建模动态, 这就充分利用了已知的标称延迟信息, 使系统的建模更为精确, 但同时也带来了获得自适应规律和证明其稳定性的困难. 处理这类含有延迟的不确定系统, 方法之一是Manitius 和Olbrot 开创[7]的有限谱配置方法, 通过引入一个控制输入的有限积分算子来补偿延迟的影响; 该方法被 Ichikawa[8]和Ortega 等[9]扩展到频域系统, 设计了一个全局稳定的自适应控制器. 本文将Ortega 的结果推广到延迟具有不确定的情况.

收稿日期: 2002-12-18; **修回日期**: 2003-04-02
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60374001); 国家教育部高校博士点基金资助项目(20030006003).
作者简介: 孟红霞(1976—), 女, 河南焦作人, 博士生, 从事自适应控制等研究; 贾英民(1958—), 男, 山东金乡人, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制、自适应控制等研究.

2 问题的描述

考虑对象

$$P(s) = K_P \frac{B(s)}{A(s)} e^{-(L+\Delta L)s}. \quad (1)$$

其中：$K_P > 0$；$A(s)$ 和 $B(s)$ 是阶次分别为 n 和 m，系数未知的首一互质多项式；$B(s)$ 是 Hurwitz 稳定的；L 是已知的系统延迟；ΔL 为相应的扰动。

参考模型选为

$$M(s) = K_m \frac{1}{A_m(s)} e^{-Ls}. \quad (2)$$

其中 $A_m(s)$ 是阶次为 $n^* = n - m (\geq 0)$ 的已知首一 Hurwitz 多项式，且在 $\mathrm{Re}[s] \geq -\delta_0/2$ 内解析。

与传统的方法不同[1,2,10]，本文将可利用的延迟信息 L 加到标称模型中，即

$$P(s) = K_P \frac{B(s)}{A(s)} e^{-Ls} \cdot e^{-\Delta L s} =$$
$$P_0(s) e^{-\Delta L s} = P_0(s)[1 + \Delta(s) W_2(s)]. \quad (3)$$

其中：$\Delta(s)$ 为一可变的稳定传函且满足 $\|\Delta(s)\|_\infty = \mu \leq 1$，$W_2(s)$ 为一固定的稳定传函。

由于式(3)中的标称部分含有延迟项，相应的自适应规律选择，系统的稳定性和鲁棒性，以及参数的收敛性还没有得到讨论，这正是本文所要研究的内容。

3 控制器设计

3.1 控制器结构

控制器结构采用 Ortega 和 Lozano 所设计的有限谱配置形式[9]

$$u(t) = \hat{C}_0 r(t) + \hat{C}^{\mathrm{T}} v_1(t) + \hat{D}_0 y(t) + \hat{D}^{\mathrm{T}} v_2(t) + \int_L \hat{\lambda}(t,\rho) u(t+\rho) \mathrm{d}\rho = \hat{\theta}^{\mathrm{T}}(t)\phi(t) + \int_L \hat{\lambda}(t,\rho) u(t+\rho)\mathrm{d}\rho. \quad (4)$$

其中

$$C_0 = \frac{K_m}{K_P}, C^{\mathrm{T}} = [C_1 \quad C_2 \quad \cdots \quad C_{n-1}],$$

$$\phi(t) = [r(t) \quad v_1(t) \quad y(t) \quad v_2(t)]^{\mathrm{T}},$$

$$v_1(t) = \frac{1}{\Lambda(s)}[1 \quad s \quad \cdots \quad s^{n-2}]^{\mathrm{T}} u(t-L),$$

$$D^{\mathrm{T}} = [D_1 \quad D_2 \quad \cdots \quad D_{n-1}],$$

$$v_2(t) = \frac{1}{\Lambda(s)}[1 \quad s \quad \cdots \quad s^{n-2}]^{\mathrm{T}} y(t),$$

$$\lambda(\rho) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \exp(-\lambda_i \rho),$$

$$\frac{F(s)}{A(s)} = \frac{A(s) - A_m(s)B(s)}{A(s)} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{s-\lambda_i},$$

$\hat{\theta}^{\mathrm{T}}(t)$ 和 $\hat{\lambda}(t,\rho)$ 为控制器参数 $\theta^{*\mathrm{T}} = [C_0 \quad C^{\mathrm{T}} \quad D_0 \quad D^{\mathrm{T}}]$ 和 $\lambda(\rho)$ 的估计值，$\Lambda(s)$ 为在 $\mathrm{Re}[s] \geq -\delta_0/2$ 内解析的首一 Hurwitz 多项式。

3.2 误差模型

本文假定当系统不存在未建模动态，即 $\Delta(s) = 0$ 时，受控对象和控制器组成的系统与参考模型匹配；当 $\Delta(s) \neq 0$ 时，定义参数误差 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta^*$，$\tilde{\lambda} = \hat{\lambda} - \lambda$，由匹配条件

$$C(s)A(s) + K_P D(s)B(s) = F_d(s)\Lambda(s), \quad (5)$$

其中

$$D(s) = D_0\Lambda(s) + D_1 + D_2 s + \cdots + D_{n-1}s^{n-2},$$

$$\frac{F_d(s)}{A(s)} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i \exp(\lambda_i L)}{s-\lambda_i},$$

结合式(3)，经代数运算可得

$$e(t) = y(t) - y_m(t) = \frac{M(s)}{C_0}\left[\tilde{\theta}^{\mathrm{T}}\phi + \int_L \tilde{\lambda} u(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right] + \eta \quad (6)$$

其中

$$\eta = \frac{K_P}{K_m}\left[1 - \frac{C(s)}{\Lambda(s)}e^{-Ls} - \frac{F(s)}{A(s)} + \frac{F_d(s)}{A(s)}e^{-Ls}\right] \times M(s)\Delta(s)W_2(s)u.$$

是由系统的未建模动态产生的项。类似于文献[9]，定义增广误差

$$\epsilon(t) = e(t) + \hat{K}_\zeta(t)\zeta(t). \quad (7)$$

其中：$\hat{K}_\zeta(t)$ 是 $\frac{K_P}{K_m}$ 的估计值，

$$\bar{\phi} = M(s)\phi(t), \overline{u}(t+\rho) = M(s)u(t+\rho),$$

$$\zeta(t) = \tilde{\theta}^{\mathrm{T}}\bar{\phi} + \int_L \tilde{\lambda}\overline{u}(t+\rho)\mathrm{d}\rho - M(s)\left[\tilde{\theta}^{\mathrm{T}}\phi + \int_L \tilde{\lambda} u(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right]. \quad (8)$$

定义参数误差 $\tilde{K}_\zeta = \frac{K_m}{K_P}\hat{K}_\zeta - 1$，将式(8)代入式(7)，可得

$$\epsilon(t) = \frac{K_P}{K_m}\left[\tilde{\theta}_e^{\mathrm{T}}\phi_e + \int_L \tilde{\lambda}\overline{u}(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right] + \eta \quad (9)$$

其中：$\tilde{\theta}_e = [\tilde{\theta}^{\mathrm{T}} \quad \tilde{K}_\zeta]^{\mathrm{T}}$，$\phi_e = [\bar{\phi} \quad \zeta]^{\mathrm{T}}$。

3.3 鲁棒自适应律

定义

$$\mathring{m}(t) = -\delta_0 m(t) + \delta_1\left(|u(t)| + \sup_{-L\leq\rho\leq 0}|u(t+\rho)|\right),$$
$$m(0) \geq \delta_1/\delta_0. \quad (10)$$

当 $\phi_a(t) = [\phi_e(t)^{\mathrm{T}} \quad \sup_{-L\leq\rho\leq 0}\overline{u}(t+\rho) \quad m(t)]^{\mathrm{T}}$ 时，信号 $m(t)$ 使 $\frac{|\eta|}{1+\phi_a^{\mathrm{T}}(t)\phi_a(t)} \leq \mu c$，其中 c 是与 μ 无关的

常数

引入信号 $m(t)$ 后, 有许多方法选择自适应规律以保证参数的收敛性. 本文采用下面鲁棒的固定 σ 的改进方法:

$$\dot{\hat{\theta}}_e = \dot{\tilde{\theta}}_e = -\Gamma\frac{\phi_e\epsilon}{1+\phi_a\phi_a} - \Gamma\sigma\hat{\theta}_e, \tag{11}$$

$$\frac{\partial\hat{\lambda}}{\partial t} = \frac{\partial\tilde{\lambda}}{\partial t} = -\gamma\frac{\bar{u}(t+\rho)\epsilon}{1+\phi_a\phi_a} - \gamma\sigma\hat{\lambda} \tag{12}$$

4　鲁棒稳定性分析

在进行鲁棒稳定性分析之前, 先给出相关引理如下:

引理 1　自适应律(11) 和(12) 有以下属性:

1) 收敛性: $\frac{\epsilon}{\sqrt{1+\phi_a\phi_a}}, \tilde{\theta}_e, \dot{\tilde{\theta}}_e, \tilde{\lambda}, \frac{\partial\tilde{\lambda}}{\partial t} \in L_\infty$;

2) 鲁棒性: $\frac{\epsilon}{\sqrt{1+\phi_a\phi_a}}, \dot{\tilde{\theta}}_e, \frac{\partial\tilde{\lambda}}{\partial t} \in S\left(\frac{\eta^2}{1+\phi_a\phi_a} + \sigma\right)$.

引理 2(交换引理)[11]　如果 $\tilde{\theta}, \phi: R^+ \mapsto R^n$, $\tilde{\lambda}, u(t+\rho): R^+ \mapsto R$ 是可微的, 则

$$\tilde{\theta}^{\mathrm T}\phi + \int_L \tilde{\lambda}u(t+\rho)\mathrm{d}\rho =$$
$$F_1(s,\alpha_0)\left[\dot{\tilde{\theta}}^{\mathrm T}\phi + \tilde{\theta}^{\mathrm T}\dot{\phi} + \int_L \frac{\partial\tilde{\lambda}}{\partial t}u(t+\rho)\mathrm{d}\rho + \int_L \tilde{\lambda}\mathring{u}(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right] + F(s,\alpha_0)\left[\tilde{\theta}^{\mathrm T}\phi + \int_L \tilde{\lambda}u(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right]. \tag{13}$$

其中
$$F(s,\alpha_0) = \frac{\alpha_0^k}{(s+\alpha_0)^k}, k \geq 0,$$
$$F_1(s,\alpha_0) = \frac{1-F(s,\alpha_0)}{s},$$

α_0 为大于零的任意常数. 对于任一常数 $\delta \geq 0$, 存在 $\alpha_0 > \delta$, 使 $F_1(s,\alpha_0)$ 满足 $\|F_1(s,\alpha_0)\|_{\infty\delta} \leq c/\alpha_0$, $c \in R^+$ 且与 α_0 无关.

此外, 若有严格正则稳定有理传函 $M(s)$ 的最小实现为 $M(s) = C_1^{\mathrm T}(sI - A_1)^{-1}B_1$, 则

$$M(s)\left(\tilde{\theta}^{\mathrm T}\phi + \int_L \tilde{\lambda}u(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right) =$$
$$\tilde{\theta}^{\mathrm T}\phi + \int_L \tilde{\lambda}\bar{u}(t+\rho)\mathrm{d}\rho + W_c\left((W_b\phi)\dot{\tilde{\theta}} + \int_L W_b u(t+\rho)\frac{\partial\tilde{\lambda}}{\partial t}\mathrm{d}\rho\right). \tag{14}$$

其中: $W_c(s) = -C_1^{\mathrm T}(sI - A_1)^{-1}$, $W_b(s) = (sI - A_1)^{-1}B_1$.

引理 3　定义虚拟信号

$$m_f^2 = 1 + \|u\|^2 + \|y\|^2 + \left\|\sup_{-L\leq\rho\leq 0}u(t+\rho)\right\|^2. \tag{15}$$

为简化起见, 用 $\|(\cdot)\|$ 表示 $\|(\cdot)_t\|_{2\delta}$.

对于任意 $\delta \in (0, \delta_0]$, 信号 m_f 保证:

1) $\frac{u}{m_f}, \frac{y}{m_f}, \frac{\phi}{m_f}, \frac{M(s)\phi}{m_f}, \frac{u(t+\rho)}{m_f} \in L_\infty$;

2) 若 $\mathring{r} \in L_\infty$, 则 $\frac{\dot{\phi}}{m_f}, \frac{\mathring{u}(t+\rho)}{m_f} \in L_\infty$.

定理 1　记 $\Delta_\infty = \|M(s)\Delta(s)W_2(s)\|_{\infty\delta}$, $\alpha_0 > \max\left\{1, \frac{\delta}{2}\right\}$ 为任意常数, $k = n^*$. 当 $c\left(\frac{1}{\alpha_0^2} + \alpha_0^{2k}\Delta_\infty^2\right) < 1$ 时, 存在 μ^* 使得对于任意的 $\mu \in [0, \mu^*)$, 由对象(1), 参考模型(2), 控制器(4) 及鲁棒自适应律(11) 和(12) 组成的闭环系统的所有信号有界, 且误差信号 $e = y(t) - y_m(t) \in S\left(\frac{\eta^2}{1+\phi_a\phi_a} + \sigma\right)$.

证明　由式(6), M 和 P_0^{-1} 的稳定性, 可得

$$\|y\| \leq c + c\|\tilde{\theta}^{\mathrm T}\phi\| + c\left\|\int_L \tilde{\lambda}u(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right\| + \|\eta\|,$$
$$\|u\| \leq c + c\|\tilde{\theta}^{\mathrm T}\phi\| + c\left\|\int_L \tilde{\lambda}u(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right\| + \|P_0^{-1}\eta\|,$$
$$\|\eta\| \leq c\Delta_\infty m_f.$$

因而虚拟信号 m_f(表达式(15)) 满足

$$m_f^2 \leq c + c\|\tilde{\theta}^{\mathrm T}\phi\|^2 + c\left\|\int_L \tilde{\lambda}(t,\rho)u(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right\|^2 + c\Delta_\infty^2 m_f^2. \tag{16}$$

由 F, F_1 及 M 的属性可知, 对于任意的 $\delta \in (0, \delta_0]$, 有 $\|FM^{-1}\|_{\infty\delta} \leq c\alpha_0^k$.

结合式(9), (13), (14) 和引理 3, 可得

$$\|\tilde{\theta}^{\mathrm T}\phi\| + \left\|\int_L \tilde{\lambda}u(t+\rho)\mathrm{d}\rho\right\| \leq c\|\tilde{g}m_f\| + c\left(\frac{1}{\alpha_0} + \alpha_0^k\Delta_\infty\right)m_f, \tag{17}$$

其中

$$\tilde{g}^2 = \frac{|\dot{\tilde{\theta}}|^2}{\alpha_0^2} + \left|\frac{\partial\tilde{\lambda}(t,\rho)}{\partial t}\right|/\alpha_0^2 + \alpha_0^{2k}\left(|\dot{\tilde{\theta}}|^2 + \left|\frac{\partial\tilde{\lambda}(t,\rho)}{\partial t}\right|^2 + \left|\frac{\epsilon}{1+\phi_a\phi_a}\right|^2\right).$$

由引理 1 的鲁棒性属性, 可知 $\tilde{g} \in S\left(\frac{\eta^2}{1+\phi_a\phi_a} + \sigma\right)$. 将式(17) 代入式(16), 得

$$m_f^2 \leq c + c\|\tilde{g}m_f\|^2 + c\left(\frac{1}{\alpha_0^2} + \alpha_0^{2k}\Delta_\infty^2\right)m_f^2. \tag{18}$$

当 $c\left(\frac{1}{\alpha_0^2}+\alpha_0^{2k}\Delta_\infty^2\right)<1$ 时, 有

$$m_f^2 \le c + c\|\tilde{g} m_f\|^2 =$$
$$c + c\int e^{-\delta(t-\tau)}\tilde{g}^2(\tau) m_f^2(\tau)\,d\tau \le$$
$$c e^{-\delta t} e^{c\int \tilde{g}^2(\tau)d\tau} + c\delta \int e^{-\delta(t-s)} e^{c\int \tilde{g}^2(\tau)d\tau} ds. \quad (19)$$

因为 $\tilde{g} \in S\left(\frac{\eta^2}{1+\phi_a^T\phi_a}+\sigma\right)$, $\frac{|\eta|}{1+\phi_a^T\phi_a} \le \mu c$, 所以 $\exists\, \mu^*$ 使得对于 $\forall \mu \in [0, \mu^*)$, $m_f \in L_\infty$.

由引理3, 可得 $u, y \in L_\infty$. 从而闭环所有信号有界, 且 $e(t) \in S\left(\frac{\eta^2}{1+\phi_a^T\phi_a}+\sigma\right)$. □

5 仿真举例

为验证本文的设计方法, 讨论下面的例子, 并把仿真结果同传统的对象建模部分不含延迟的方法相比较.

例 1 考虑对象

$$P(s) = \frac{s+1}{s^3+12s^2+44s+48}e^{-(30+\Delta L)s},$$

取参考模型

$$M(s) = \frac{1}{(s+3)(s+5)}e^{-30s}.$$

系统的参数变化范围为 $(0, 5] \times [8, 20] \times [35, 50] \times [40, 55]$, 滤波器选为 $\Lambda(s) = s^2 + 2s + 2$, 控制器参数的初始值选作模型匹配值, $m(0) = 1.5$, 其他参数初值为零. $\delta_0 = 0.8$, $\delta_1 = 1$, $\Gamma = 5I_5$, $\gamma = 5$, $\sigma = 0.1$. 输入信号分别是幅值为 10 的阶跃信号和幅值为 10、周期为 0.05 rad/s 的方波信号.

图1和图2表示系统参数和延迟参数变化时分别对阶跃信号和方波信号的响应. 在图 1 和图 2 中, ①表示参考模型的输出; ②和③表示当对象为 $P(s) = \frac{s+4}{s^3+17s^2+47s+52}e^{-18s}$ 时, 分别采用本文控制器和传统控制器时系统的输出; ④和⑤表示当对象为 $P(s) = \frac{s+4}{s^3+17s^2+47s+52}e^{-42s}$ 时, 分别采用本文控制器和传统控制器时系统的输出.

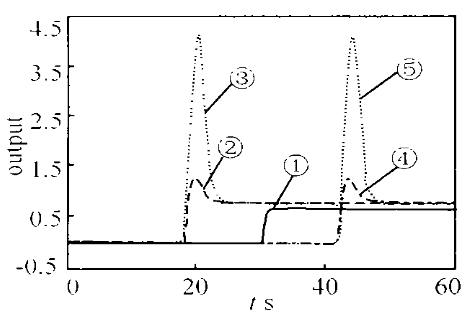

图 1 参数和延迟变化时系统对阶跃信号的响应

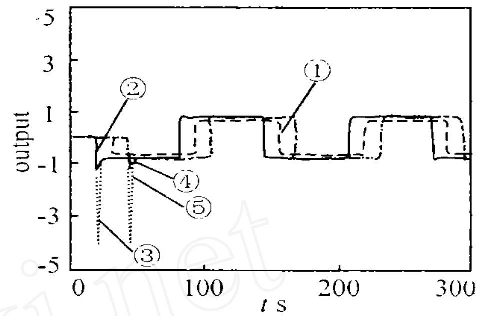

图 2 参数和延迟变化时系统对方波信号的响应

由图 1 和图 2 可以看出, 由于延迟扰动对系统的影响等同于系统的未建模动态, 因而当系统的延迟具有不确定扰动时, 系统的跟踪误差不可能为零, 而是在一个与扰动和 σ 大小有关的邻域内. 采用本文的方法, 使得系统在保证稳定性的同时, 跟踪精度得到了一定的提高.

6 结 论

本文主要研究延迟已知但具有不确定性扰动的线性系统, 基于圆形不确定性等价变换, 把系统的延迟扰动转化为系统的未建模动态, 进而研究标称系统含有延迟的不确定系统的稳定性和鲁棒性. 结合有限谱配置控制器和固定的 σ 改进自适应律, 使系统在延迟和参数扰动时仍能保持稳定性, 并把跟踪误差限制在与延迟扰动有关的邻域内.

参考文献(References):

[1] Brown L J, Meyn S P. Adaptive dead time compensation[A]. *Proc of the 34th Conf on Decision & Control*[C]. New Orleans, 1995. 3435-3437.

[2] De Souza C E, Goodwin G C, Mayne D Q, et al. An adaptive control algorithm for linear systems having unknown time delay[J]. *Automatica*, 1988, 24(3): 327-341.

[3] Dumont G A, El Naggar, El Shafei A. Adaptive predictive control of systems with time-varying time delay[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 1993, 7(1): 91-101.

(下转第 178 页)

器相结合来提高其控制性能 所提出的改进型模糊 PD 控制器, 最显著的特点是对测量噪声具有很强的鲁棒性, 并且算法简单, 易于工程实现 对位置控制的交流伺服系统进行数值仿真, 证明了其有效性和高效性

参考文献(References):

[1] Mamdani E H, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. *Int J Man-Mach Stud*, 1974, 7(1): 1-13.

[2] Chen G R, Pham T T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzz Control Systems* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.

[3] 王立新 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[4] 苏玉鑫, 段宝岩, 彭勃, 等 大射电望远镜馈源轨迹跟踪的模糊预测控制[J]. 控制与决策, 2002, 17(1): 85-88.
(Su Y X, Duan B Y, Peng B, et al Fuzzy predictive coarse tracking control of the feed for the next generation large radio telescope [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(1): 85-89.)

[5] Li W, Chang X G, Jay Farrell, et al Design of an enhanced hybrid fuzzy P+ ID controller for a mechanical manipulator[J]. *IEEE Trans on Syst, Man Cybernetics: Part B*, 2001, 31(6): 938-945.

[6] Liu Xu, Bin Yao. Output feedback adaptive robust precision motion control of linear motors[J]. *Automatica*, 2001, 37(7): 1029-1039.

[7] 韩京清, 王伟 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
(Han J Q, Wang Wei Nonlinear tracking-differentiator [J]. *J Syst Sci & Math Scis*, 1994, 14(2): 177-183.)

[8] 韩京清, 侯增广. 利用跟踪微分器构造未知函数的寻优器及求根器[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 365-367.
(Han J Q, Hou Z G. Tracking differentiator approaches for solving optimization problems and finding roots of algebraic equations[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 365-367.)

[9] Su Y X, Duan B Y, Zhang Y F. Robust precision motion control for AC servo systems[A]. *The 4th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Shanghai, 2002. 3319-3323.

(上接第 174 页)

[4] Hennigsen A. Model reference Adaptive control and adaptive stability augmentation[A]. *Proc of the Fourth IFAC Int Symposium on Adaptive System in Control and Signal Processing*[C]. Grenobe, 1992. 323-328.

[5] Makoudi M, Radouane L. A robust model reference adaptive control for non-minimum phase systems with unknown or time-varying delay[A]. *Automatica*, 2000, 36(7): 1057-1065.

[6] Nagger A, Dumont G A, El Shafei A L. Adaptive control with direct delay estimation[A]. *Control System* '92 [C]. Canada: Chateau Whistler Resort Whistler, 1992. 13-17.

[7] Manitius A Z, Olbrot A W. Finite spectrum assignment problem for systems with delays[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1979, 24: 541-553.

[8] Ichikawa K. *Control System Design Based on Exact Model Matching Techniques* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1986.

[9] Ortega R, Lozano L. Globally stable adaptive controller for system with delay[J]. *Int J of Control*, 1988, 47(1): 17-23.

[10] Doyle J C, Franas B A, Tancnbaum A R. *Feedback Control Theory* [M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1991.

[11] Ioannou P A, Sun J. *Robust Adaptive Control*[M]. New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1996.