# 一种鲁棒间接自适应调节器*

赵晓晖　冯纯伯
（东南大学自动化研究所·南京，210096）

**摘要**：本文讨论了确定性连续时间系统的鲁棒自适应调节问题．提出了一种新型间接自适应极点配置控制器．该控制器利用辨识参数在线修正方法，保证系统辨识模型在自适应调节过程中不失其能控性．本文还证明了闭环系统的全局稳定性．

**关键词**：鲁棒性；自适应控制；能控性；全局稳定性

## 1　引　言

基于辨识参数在线修正来设计任意阶未知参数系统的非奇异间接自适应控制器是由文[1]首先提出来的，因其解决了自适应控制器的奇异性问题，受到了控制理论界的高度重视．但该文仅在无噪声条件下讨论了连续时间系统的控制问题．本文在文[1]基础上，提出了一种对恒定有界噪声具有鲁棒性的控制算法，解决了连续时间系统的自适应调节问题，并证明了其全局收敛性和闭环系统的稳定性．

## 2　参数辨识算法

考虑下述LTI单输入单输出连续时间系统

$$A(D)^* y = B(D)^* u + v. \tag{1}$$

式中 $y$，$u$ 和 $v$ 分别是系统的输出、输入和有界确定性干扰．$D = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}$ 是一微分算子．$A(D)^*$ 和 $B(D)^*$ 为

$$A(D)^* = D^n + a_1^* D^{n-1} + \cdots + a_{n-1}^* D + a_n^*,$$
$$B(D)^* = b_1^* D^{n-1} + b_2^* D^{n-2} + \cdots + b_{n-1}^* D + b_n^*.$$

多项式 $B(D)^*$ 可以具有不稳定零点．本文对系统(1)做如下假设：

A1）系统阶次 $n$ 已知，$A(D)^*$ 和 $B(D)^*$ 是二互质多项式．

A2）有界干扰 $v$ 满足不等式 $|v| \leqslant v_b$，$v_b$ 已知．

因为系统(1)的 $u$ 和 $y$ 是唯一可测物理量，要确保自适应控制器是可实现的动力学系统，先引入一线性已知稳定滤波器 $F(D)$ 使得

$$F(D)u_f = u,\quad F(D)y_f = y. \tag{2}$$

其中 $F(D) = D^n + f_1 D^{n-1} + \cdots + f_{n-1}D + f_n$．(2)式可以用其状态空间形式来表达

$$\dot{x}_1 = Ax_1 + bu,\quad u_f = c^{\mathrm{T}} u, \tag{3a}$$

$$\dot{x}_2 = Ax_2 + by,\quad y_f = c^{\mathrm{T}} x_2. \tag{3b}$$

---

* 国家自然科学基金和国家教委回国人员科研经费资助项目．

本文于1994年5月3日收到．1995年1月24日收到修改稿．

定义一辅助状态变量 $x_3 = A(D)^* x_2 - B(D)^* x_1$，对其做时间微分，再综合(1)式和(3)式得 $\dot{x}_3 = Ax_3 + bv$. 利用(3)式便可求得

$$A(D)^* y_f = B(D)^* u_f + v_f + \varepsilon. \tag{4}$$

其中 $\varepsilon = c^{\mathrm{T}} e^{At} x_3(0)$ 是一指数衰减项，$v_f = \int_0^t f(t-x)v(\tau)\mathrm{d}\tau$，$f(t) = c^{\mathrm{T}} e^{At} b$ 是滤波器 $F$ 的脉冲响应. 由于矩阵 $A$，向量 $b$ 和 $c$ 均已知，则 $f(t)$ 为已知函数[2]. 于是 $v_f$ 的上界可以由下式确定

$$|v_f| \leqslant \| f \|_1 |v_b| \triangleq v_{fb}. \tag{5}$$

式中 $\| f \|_1$ 是函数 $f$ 的 $\mathscr{L}_1$ 范数. (4)式可以写成

$$y_f^{(n)} = \varphi^{\mathrm{T}} \theta^* + v_f + \varepsilon. \tag{6}$$

式中

$$\theta^* = [b_1^*, b_2^*, \cdots, b_n^*, a_1^*, a_2^*, \cdots, a_n^*]^{\mathrm{T}},$$

$$\varphi = [u_f^{(n-1)}, u_f^{(n-2)}, \cdots, u_f, -y_f^{(n-1)}, -y_f^{(n-2)}, \cdots, -y_f]^{\mathrm{T}}.$$

可以通过带有死区的下述最小二乘估计算法来辨识未知参数 $\theta^*$.

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\theta} = \lambda P \varphi e, \quad \tilde{\theta} = \theta - \theta^*, \tag{7}$$

$$\dot{P} = -\lambda P \varphi \varphi^{\mathrm{T}} P, \quad P(0) > 0, \tag{8}$$

$$e = y_f^{(n)} - \varphi^{\mathrm{T}} \theta. \tag{9}$$

式中 $\theta$ 是参数真值 $\theta^*$ 的估计值，且 $\theta = [b_1, \cdots, b_n, a_1, \cdots, a_n]^{\mathrm{T}}$. 死区函数 $\lambda$ 定义为

$$\lambda = \begin{cases} 0, & \text{如果 } e_s^2 < \dfrac{2v_{fb}^2}{1-\alpha}, \\ 1, & \text{如果 } e_s^2 \geqslant \dfrac{2v_{fb}^2}{1-\alpha}. \end{cases} \tag{10}$$

其中 $0 < \alpha \ll 1$ 是一任选常数. 切换变量定义为

$$e_s^2 = e^2 + \varphi^{\mathrm{T}} P \varphi. \tag{11}$$

**定理 1**　假设 A1)和 A2)成立，则辨识算法(7)～(9)具有如下收敛性质：

P1) $\theta$ 和 $P$ 有界，$0 < P \leqslant P(0)$，$P$ 阵收敛.

P2) 当 $\lambda$ 为 1 时，$e_s \in \mathscr{L}_2$；当 $\lambda$ 为 0 时，$e_s \in \mathscr{L}_\infty$.

P3) $\theta$ 收敛且 $\lambda$ 的切换次数有限.

证　定义一正实函数 $V = \tilde{\theta}^{\mathrm{T}} P^{-1} \tilde{\theta} + \mathrm{tr}(P) + \eta \int_0^t \varepsilon^2 \mathrm{d}\tau$，$\eta > 0$. 对其求时间导数可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\tilde{\theta}}^{\mathrm{T}} P^{-1} \tilde{\theta} + \tilde{\theta}^{\mathrm{T}} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(P^{-1}\tilde{\theta}) - \lambda \varphi^{\mathrm{T}} P^2 \varphi - \eta \varepsilon^2 \\ &= -\lambda e_s^2 + \lambda (v_f + \varepsilon)^2 - \eta \varepsilon^2 \\ &\leqslant -\lambda (e_s^2 - 2v_{fb}^2 - 2\varepsilon)^2 - \eta \varepsilon^2. \end{aligned}$$

当 $\lambda = 0$ 时，$\dot{V}$ 的上界为 $\dot{V} \leqslant -\eta \varepsilon^2$. 当 $\lambda = 1$，因 $\eta$ 为任意正常数，不妨取 $\eta = 2$，则 $\dot{V}$ 的上界为 $\dot{V} \leqslant -\lambda \alpha e_s^2$. 因此可得出 $V \leqslant V(0)$，即 $\theta$ 和 $P$ 有界这一性质. 对 $P^{-1}$ 做积分有 $P^{-1} = P^{-1}(0) + \int_{\Sigma_1} \lambda \varphi \varphi^{\mathrm{T}} \mathrm{d}\tau$. 其中 $\Sigma_1$ 是 $\lambda = 1$ 时的时间集合. 因为 $\int_{\Sigma_1} \varphi \varphi^{\mathrm{T}} \mathrm{d}\tau$ 是一半正定矩阵，所以 $P^{-1}$

$>0, P>0$. 再对(8)式做积分有 $P(0)=P+\int_{\Sigma_1} P\varphi\varphi^{\mathrm{T}}P\mathrm{d}\tau$,同理$\int_{\Sigma_1} P\varphi\varphi^{\mathrm{T}}\mathrm{d}\tau$ 亦是一半正定矩阵,故 $P(0)\geqslant P$,$P$ 收敛.

对 $\dot{V}$ 做积分,考虑到 $\lambda$ 的的不同情况可得

$$V-V(0)=\int_0^t \dot{V}\mathrm{d}\tau \leqslant -\int_{\Sigma_0}\eta\varepsilon^2\mathrm{d}\tau-\int_{\Sigma_1}\alpha e_s^2\mathrm{d}\tau.$$

其中 $\Sigma_0$ 是 $\lambda=0$ 时的时间集合. 考虑到上式及 $V(0)\geqslant V$,有

$$\int_0^t(\lambda e_s)^2\mathrm{d}\tau=\int_{\Sigma_1}e_s^2\mathrm{d}\tau\leqslant\frac{V(0)}{\alpha}.$$

即当 $\lambda=1$ 时,$e_s\in\mathscr{L}_2$. 再由(10)式可得 $e_s^2\leqslant\dfrac{2v_{fb}^2}{1-\alpha}$,即 $e_s\in\mathscr{L}_\infty(\lambda=0)$.

由(7)式可得

$$\int_0^t\|\dot{\tilde{\theta}}\|_1\mathrm{d}\tau\leqslant\int_0^t\lambda\|P\varphi\|_1|e|\mathrm{d}\tau\leqslant\frac{\lambda}{2}\int_0^t(\|P\varphi\|_1^2+e^2)\mathrm{d}\tau$$
$$\leqslant\frac{\lambda}{2}\int_0^t e_s^2\mathrm{d}\tau\leqslant\frac{V(0)}{2\alpha}.$$

所以 $\dot{\tilde{\theta}}\in\mathscr{L}_1^n$,即 $\theta$ 的极限存在且有界. 因为辨识算法收敛,因此存在某一时刻 $t_N$,当 $t>t_N$ 时,$\lambda$ 的切换停止. 故 $\lambda$ 的切换次数是有限的. 于是定理证毕.

## 3 非奇异自适应调节器

由定理 1 可以得出如下结果: $\tilde{\theta}^{\mathrm{T}}P^{-1}\tilde{\theta}\leqslant V(0)$. 如果将正定矩阵 $P$ 分解成 $P=LL^{\mathrm{T}}$,可得 $\beta^{*\mathrm{T}}\beta^*\leqslant V(0)$. 其中 $\beta^*=-L^{-1}\tilde{\theta}$ 是一有界向量. 将其展开后可以得到 $\theta^*=\theta+L\beta^*$. 其物理意义表明系统参数的真值是当前估计值加上与矩阵 $P$ 和某一有界向量 $\beta^*$ 有关的项 $L\beta^*$. 受到该式的启发,可以定义辨识参数修正值

$$\bar{\theta}=\theta+P\beta. \tag{12}$$

用 $\bar{\theta}$ 代换参数估计值 $\theta$ 来设计间接自适应调节器,这样通过适当地选择修正向量 $\beta$ 来防止系统估计模型出现不可控性 —— 奇异性. 在(12)式中 $\theta=[\bar{b}_1,\bar{b}_2,\cdots,\bar{b}_n,\bar{a}_1,\bar{a}_2,\cdots,\bar{a}_n]^{\mathrm{T}}$. 将(12)式代入(9)式得

$$A(D)y_f=B(D)u_f+e-\beta^{\mathrm{T}}P\varphi.$$

其中

$$A(D)=D^n+\bar{a}_1D^{n-1}+\cdots+\bar{a}_{n-1}D+\bar{a}_n,$$
$$B(D)=\bar{b}_1D^{n-1}+\bar{b}_2D^{n-2}+\cdots+\bar{b}_{n-1}D+\bar{b}_n.$$

定义极点配置调节器

$$\mu=[F(D)-S(D)]u_f-R(D)y_f. \tag{14}$$

其中

$$S(D)=D^n+s_1D^{n-1}+\cdots+s_{n-1}D+s_n,$$
$$R(D)=r_1D^{n-1}+r_2D^{n-2}+\cdots+r_{n-1}D+r_n$$

是 Diophantine 方程

$$A(\mu)S(\mu)+B(\mu)R(\mu)=C(\mu)F(\mu) \tag{15}$$

的唯一解. 其中 $\mu$ 无任何数学意义，只表示(15)式中各多项式系数间的代数关系. $C(\mu)=\mu^n+c_1\mu^{n-1}+\cdots+c_{n-1}\mu+c_n$ 是一选定的 Hurwitz 多项式，它的零点是闭环系统的极点.

定义调节器系数向量 $q=[s_1,s_2,\cdots,s_n,r_1,r_2,\cdots,r_n]^{\mathrm{T}}$ 和多项式 $C(\mu)F(\mu)$ 的系数向量 $p=[p_1,p_2,\cdots,p_{2n}]^{\mathrm{T}}$. 比较(15)式两端多项式的系数可得

$$q=\frac{\mathrm{adj}M(\bar{\theta})}{\det M(\bar{\theta})}p. \tag{16}$$

其中

$$M(\bar{\theta})=\begin{bmatrix}1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0\\ \bar{a}_1 & \ddots & \vdots & \bar{b}_1 & \ddots & \vdots\\ \vdots & \ddots & 1 & \vdots & \ddots & 0\\ \bar{a}_n & \cdots & \bar{a}_1 & \bar{b}_n & \cdots & \bar{b}_1\\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \bar{a}_n & 0 & \cdots & \bar{b}_n\end{bmatrix}$$

是与辨识参数修正值 $\bar{\theta}$ 相对应的 Sylvester 矩阵. 由(16)式可知：矩阵 $M(\bar{\theta})$ 的奇异与否将决定 $q$ 的存在和有界问题. 利用收敛有界的修正向量 $\beta$ 可以保证该矩阵的非奇异.

定义修正向量 $\beta$ 如下：

$$\beta=[\sigma(t),\sigma(t)^{2n},\cdots,\sigma(t)^{(2n)^{2n-1}}]^{\mathrm{T}}. \tag{17}$$

其中 $\sigma(t)$ 在实数集 $\mathrm{R}:\{\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_{(2n)^{2n}}\}$, $\sigma_i\in\mathrm{R}$, $\sigma_i\geqslant\sigma_{i-1}+1$, $i=1,2,\cdots,(2n)^{2n}$ 中取值. 设在时刻 $\tau$, $t-\Delta\leqslant\tau<t$, $\Delta>0$, 取 $\sigma(\tau)=\sigma_k$. 于是 $\sigma(t)$ 的取值方法定义为

$$\sigma(t)=\begin{cases}\sigma_k, & \text{如果 } z(\sigma_j)<(1+\gamma)z(\sigma_k) \text{ 对所有 } \sigma_i\in\mathrm{R},\\ \sigma_j, & \text{如果 } j \text{ 是最小，整数使得 } z(\sigma_j)\geqslant(1+\gamma)z(\sigma_i)\\ & \text{且 } z(\sigma_j)\geqslant z(\sigma_i),\quad\forall\,\sigma_i\in\mathrm{R}.\end{cases} \tag{18}$$

其中 $0<\gamma\ll1$ 是一小滞环宽度常数，$z(\sigma_i)=|\det M(\bar{\theta}(\sigma_i))|$ 是 $\beta$ 取值为 $\sigma_i$ 时 $M(\bar{\theta})$ 阵对应行列式的绝对值. 因此具有参数修正的非奇异自适应极点配置调节器可由下述引理保证.

**引理** 对于系统(1)，在假设条件 A1)和 A2)下，采用(7)～(9)式给出的参数辨识算法和(12)，(17)，(18)式定义的辨识参数修正方法. 则有 $\beta$ 收敛有界，且

$$|\det M(\bar{\theta})|\geqslant\frac{\varepsilon_0}{h^{(2n)^2}(2n)^{2n}\sigma_{2n}^{(2n)^2}(1+\gamma)}. \tag{19}$$

其中 $0<\varepsilon_0\leqslant|\det M(\theta^*)|$. $|\det M(\theta^*)|$ 是原系统的能控性指数. $h=\max\{1,V(0)\}$. $V(0)$ 的定义见定理 1.

证明见[1].

辨识参数修正方法引入了有限次的非连续性. 因此有必要讨论自适应系统中所有微分方程解的存在性和唯一性问题. 鉴于文献[3]～[5]对这一问题已经做了详细的讨论，这里不再赘述. 只将其结论引用于此：如果自适应系统中没有任何奇异性，则系统中的任何信号不会出现有限时间无穷间断点，所有微分方程有解且唯一. 由此，可以对闭环系统进行全局渐近稳定性和收敛性分析.

## 4 收敛性和稳定性分析

综合(13)和(14)式可得闭环系统的状态空间表达式

$$\dot{x} = A_t x + B(e - \beta^{\mathrm{T}} P\varphi). \tag{20}$$

其中 $A_t$ 是一时变参数矩阵.

$$A_t = \begin{bmatrix} -\bar{a}_1 & \cdots & -\bar{a}_{n-1} & -\bar{a}_n & \bar{b}_1 & \cdots & \bar{b}_{n-1} & \bar{b}_n \\ 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -r_1 & \cdots & -r_{n-1} & -r_n & -s_1 & \cdots & -s_{n-1} & -s_n \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

状态向量 $x = [y_f^{(n-1)}, \cdots, \dot{y}_f, y_f, u_f^{(n-1)}, \cdots, \dot{u}_f, u_f]^{\mathrm{T}}$. $B = [1, 0, \cdots, 0]^{\mathrm{T}}$.

因 $\theta, P$ 和 $\beta$ 均收敛,故 $\bar{\theta}$ 收敛. 因此可以得出 $A_t = A_c + A_v, A_v \to 0$. $A_c$ 是一与 $A_v$ 结构相同的定常矩阵. 显而易见,在任意时刻 $t$ 矩阵 $A_t$ 的 $2n$ 个特征值对应于 Hurwitz 多项式 $C(\mu)F(\mu)$ 的零点. 但这并不能使我们可以立即得出整个闭环系统的收敛性和稳定性,只表明矩阵 $A_c$ 是一指数稳定的定常矩阵. 故存在二正定矩阵 $P_c$ 和 $Q$ 使得

$$A_c^{\mathrm{T}} P_c + P_c A_c = -Q. \tag{21}$$

定义一 Lyapunov 函数 $V_\lambda = x^{\mathrm{T}} P_c x, \lambda = 0, 1$. 对其求时间导数,将(20)和(21)式代入之可得

$$\dot{V}_\lambda \leqslant -x^{\mathrm{T}} Q x + 2\|x\|^2 \|P_c A_v\| + 2\|P_c\| \, |e - \beta^{\mathrm{T}} P\varphi|. \tag{22}$$

因为 $P_c$ 和 $Q$ 是正定矩阵,所以有 $x^{\mathrm{T}} Q x \geqslant \lambda_1 \|x\|^2$. 其中 $\lambda_1$ 是 $Q$ 阵的最小特征值. 而且

$$\lambda_2 \|x\|^2 \leqslant x^{\mathrm{T}} P_c x = V_\lambda \leqslant \lambda_3 \|x\|^2 \leqslant \frac{\lambda_3}{\lambda_1} x^{\mathrm{T}} Q x. \tag{23}$$

其中 $\lambda_2$ 和 $\lambda_3$ 分别是 $P_c$ 的最小特征值和最大特征值. 综合(22)和(23)式有

$$\dot{V}_\lambda \leqslant -\frac{\lambda_1}{\lambda_3} V_\lambda + \frac{2V_\lambda}{\lambda_2} \|P_c A_v\| + 2\left(\frac{V_\lambda}{\lambda_2}\right)^{1/2} \|P_c\| \, |e - \beta^{\mathrm{T}} P\varphi|. \tag{24}$$

由于闭环系统中无任何奇异性存在,所以存在某时刻 $t_f$,使得

$$\frac{2\|P_c A_v\|}{\lambda_2} \leqslant \frac{\lambda_1}{2\lambda_3}, \quad t \geqslant t_f. \tag{25}$$

利用(25)式可简化(24)式使得

$$\dot{V}_\lambda \leqslant -\frac{\lambda_1}{2\lambda_3} V_\lambda + 2\left(\frac{V_\lambda}{\lambda_2}\right)^{1/2} \|P_c\| \, |e - \beta^{\mathrm{T}} P\varphi|, \quad t \geqslant t_f. \tag{26}$$

利用不等式 $2ab \leqslant a^2 + b^2, \forall\, a, b$, 由(26)式可得出

$$\begin{aligned} \dot{V}_\lambda &\leqslant -\frac{\lambda_1}{4\lambda_3} V_\lambda + \frac{4\lambda_3 \|P_c\|^2 (e - \beta^{\mathrm{T}} P\varphi)^2}{\lambda_1 \lambda_2} \\ &= -\frac{\lambda_1}{4\lambda_3}(V_\lambda - \delta_\lambda), \quad t \geqslant t_f. \end{aligned} \tag{27}$$

其中

$$\delta_\lambda = \frac{16\lambda_3^2 \|P_c\|^2 (e - \beta^T P\varphi)^2}{\lambda_1^2 \lambda_2}. \tag{28}$$

利用不等式 $(a-b)^2 \leqslant 2(a^2+b^2), \forall\, a,b$, 可推出

$$\begin{aligned}(e - \beta^T P\varphi)^2 &\leqslant 2[e^2 + (\beta^T P\varphi)^2] \leqslant 2(e^2 + \beta_m^2 \varphi^T P^2 \varphi) \\ &\leqslant 2\max\{1, \beta_m^2\} e_s^2.\end{aligned}$$

其中 $\beta_m$ 是 $\|\beta\|$ 的上界. 由定理1可知: 当 $\lambda = 1$ 时, $e - \beta^T P\varphi \in \mathscr{L}_2$; 当 $\lambda = 0$, $e - \beta^T P\varphi \in \mathscr{L}_\infty$. 下面可以对不同 $\lambda$ 值时 $V_\lambda$ 的收敛情况进行讨论.

$\lambda = 1$ 时, 对(27)式进行积分得

$$\int_0^t \dot{V}_1 \mathrm{d}\tau \leqslant -\frac{\lambda_1}{4\lambda_3}\int_0^t V_1 \mathrm{d}\tau + \frac{\lambda_1}{4\lambda_3}\int_0^t \delta_1 \mathrm{d}\tau. \tag{29}$$

将(28)式代入上式整理后得

$$V_1 + \frac{\lambda_1}{4\lambda_3}\int_0^t V_1 \mathrm{d}\tau \leqslant V_1(0) + \frac{4\lambda_3 \|P_c\|^2}{\lambda_1 \lambda_2}\int_0^t (e - \beta^T P\varphi)^2 \mathrm{d}\tau.$$

由此可以得出 $V_1 \in \mathscr{L}_1$. 再由(29)式知 $\dot{V}_1 \in \mathscr{L}_1$. 于是根据[6]便可有结论: 当 $t \to \infty$ 时, $V_1 \to 0$ 或 $x \to 0$.

$\lambda = 0$ 时, 由(27)可以看出, 对于 $V_0 > \delta_0, \dot{V}_0 < 0$. 所以在极限意义下 $V_0$ 有上界 $\delta_0$. 因为 $\delta_0 \in \mathscr{L}_\infty$, 所以可推得 $V_0 \in \mathscr{L}_\infty$ 或 $x \in \mathscr{L}_\infty^n$. 综合上面对不同 $\lambda$ 值时的讨论, 不难看出 $V_\lambda \in \mathscr{L}_\infty$, 亦即 $x \in \mathscr{L}_\infty^n$. 由于状态向量 $\|x\| = \|\varphi\|$, 可得 $\varphi \in \mathscr{L}_\infty^n$. 由滤波器(2)式以及(9)式知 $y_f^{(n)} \in \mathscr{L}_\infty$. 因此可以最后得出结论 $u, y \in \mathscr{L}_\infty^n$. 于是有下面的定理

**定理 2** 采用间接自适应极点配置的闭环系统(20), 当系统中无奇异性存在时, 在 $A_n \to 0$, $e - \beta^T p\varphi \in \mathscr{L}_2(\lambda = 1)$, $e - \beta^T P\varphi \in \mathscr{L}_\infty(\lambda = 0)$ 条件下, 有状态向量 $x$ 有界, 输入和输出 $u$ 及 $y$ 有界. 当外来噪声为零时, $u$ 和 $y$ 将趋于零.

## 5 结束语

针对具有已知有界噪声的连续时间系统, 文中给出了一种鲁棒自适应调节器, 它既可用于最小相位系统又可用于非最小相位系统. 该极点配置控制算法不但避免辨识模型出现奇异性, 而且保证闭环系统的全局渐近稳定性. 它对系统的未知参数不做任何先验假设, 也不引入外加持续激励信号. 如果外来噪声为零, 则系统可实现理想调节.

## 参考文献


[1] Lozano, R. and Zhao, X. H.. Adaptive Pole Placement without Excitation Probing Signals. IEEE Trans. Automat. Contr., 1994, AC-39(1): 47—58

[2] Kailath, T.. Linear Systems Theory. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1980

[3] Lozano, R. and Brogliato, B.. Adaptive Control of a Simple Nonlinear System Without a-priori Information on the Plant Parameters. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992. AC-37(1): 30—37

[4] Thomopoulos, S. C. A. and Papadakis, Y. N. M.. On the Existence of Solutions in Adaptive Control. Proc. of the 29th CDC. Honolulu. Hawaii. 1990, 2720—2721

[5] Morse, A. S., Aayne, D. Q. and Goodwin, G. C.. Application of Hysterisis Switching in Parameter Adaptive Control. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992, AC-37(12): 1343—1354

[6] Desoer, L. A. and Vidyasagar, M.. Feedback Systems: Input Output Properties. New York: Academic Press, 1975

# A Robust Indirect Adaptive Regulator

ZHAO Xiaohui　and　FENG Chunbo

(Research Institute of Automation, Southeast University · Nanjing, 210096, PRC)

**Abstract**: This paper presents a robust indirect adaptive regulator for continuous-time systems with known bounded disturbances. The proposed control scheme guarantees both controllabilities for the estimated models of the plant and globally asymptotical stability of the closed loop system.

**Key words**: robustness; adaptive control; controllability; global stability

本文作者简介

**赵晓晖**　1957年生. 分别于1982年和1989年在吉林工业大学获学士学位和硕士学位. 1993年获法国贡比涅科技大学计算机与自动控制系博士学位. 现在东南大学自动化所从事博士后研究工作. 目前主要研究兴趣是自适应控制理论.

**冯纯伯**　1928年生. 1950年毕业于浙江大学, 1958年获苏联技术科学副博士学位. 现为东南大学教授, 博士生导师, 中国自动化学会常务理事, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 中国科学院工程院院士. 目前研究兴趣包括复杂系统建模与控制、自适应控制等.

(上接第10页)