



间接自适应模糊控制器的设计与分析¹⁾

张天平

(扬州大学信息工程学院计算机科学系 扬州 225009)

(E-mail: tpzhang@mail.yzu.edu.cn)

摘要 针对一类不确定非线性系统,基于王立新 1994 年提出的监督控制方案并利用 II 型模糊系统的逼近能力,提出了一种间接自适应模糊控制器设计的新方案. 该方案通过引入最优逼近误差的自适应补偿项来消除建模误差的影响,从而在稳定性分析中取消了要求逼近误差平方可积或逼近误差上确界已知的条件. 理论分析证明了闭环控制系统是全局稳定的,跟踪误差收敛到零. 仿真结果表明了该方法的有效性.

关键词 非线性系统,模糊控制,自适应控制,全局稳定性

中图分类号 TP273.4⁺

DESIGN AND ANALYSIS OF INDIRECT ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER

ZHANG Tian-Ping

(Department of Computer Science, College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009)

(E-mail: tpzhang@mail.yzu.edu.cn)

Abstract A new scheme of indirect adaptive fuzzy control for a class of nonlinear systems is proposed in this paper. The design is based on the supervisory control strategy presented by Wang Li-Xin in 1994 and the approximation capability of the second type fuzzy systems. The adaptive compensation term of the optimal approximation error is adopted. The approach does not require the optimal approximation error to be square-integrable or the supremum of the optimal approximation error to be known. By theoretical analysis, the closed-loop fuzzy control system is proven to be globally stable, with tracking error converging to zero. Simulation results demonstrate the effectiveness of the approach.

Key words Nonlinear systems, fuzzy control, adaptive control, global stability

1) 国家自然科学基金(60074013)、江苏省教育厅高校科研基金(00KJB510006)和扬州大学科研基金资助

收稿日期 2000-11-14 收修改稿日期 2001-03-12

1 引言

近年来,不确定非线性系统的模糊控制研究已成为模糊控制理论研究的热点之一,并取得了许多成果^[1~6].王立新 1994 年在文献[2]中利用模糊系统的逼近性质,提出了四种保证闭环稳定性的自适应模糊控制方案,但文献[1,2]中跟踪误差的收敛性依赖于逼近误差平方可积这一假设.针对文献[1,2]中的缺点,文献[3,4]分别提出不同的修正方案,但闭环系统的渐近稳定性分析中假设最优逼近误差的上确界已知.由于模糊系统的通用逼近性质只在给定的有界闭区域上有效,因此在未证明状态有界的条件下假定逼近误差的上确界存在且有界是不合理的.另外,实际控制中此条件无法验证.文献[5,6]基于滑模控制原理,并利用模糊系统的通用逼近能力,提出了两种自适应模糊控制器的设计方案,其设计中需要控制增益一阶导数的上界已知,通常这个界与被控系统存在的不确定性、状态和控制信号有关,实际设计中一般很难确定.

本文在文献[2]的基础上,利用 II 型模糊逻辑系统的逼近能力,提出了一种稳定间接自适应模糊控制器设计的新方案.此方案保留了文献[2]中的监督控制项,增加了最优逼近误差的自适应补偿项.因此在闭环系统的渐近稳定性分析中取消了要求逼近误差平方可积的条件^[1,2],同时也避免了逼近误差上确界已知的假设^[3,4].此外,设计中无需控制增益 1 阶导数的上界已知^[5,6].利用李亚普诺夫方法,先证明闭环系统的估计参数,跟踪误差及状态有界,再证明跟踪误差渐近收敛到零.

2 问题的描述及基本假设

考虑下面一类非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}, & i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})u(t) + d(\mathbf{x}, t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ 是状态向量, u 是控制输入, y 是输出, f 是未知连续函数, g 是未知控制增益, d 代表外来干扰或未建模动态.

控制目标要求系统输出 y 去跟踪一个指定的期望轨迹 y_d . 因此,问题是设计一个控制律 $u(t)$, 使得 $y_d - y$ 收敛到零. 定义跟踪误差向量

$$\mathbf{e} = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T = (y_d - y, \dot{y}_d - \dot{y}, \dots, y_d^{(n-1)} - y^{(n-1)})^T$$

为了设计稳定的自适应模糊控制,参照文献[2,5]中的讨论,对未知连续函数 $f(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$ 作出如下假设

- 1) $|f(\mathbf{x})| \leq F(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in R^n$
- 2) $0 < K_1(\mathbf{x}) \leq g(\mathbf{x}) \leq K_2(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in R^n$
- 3) $\| (y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(n)})^T \| \leq M_d$

其中 $F(\mathbf{x}), K_1(\mathbf{x}), K_2(\mathbf{x})$ 是已知正的连续函数, M_d 是一已知的正常数. 定义 $\Omega_x = \{ \mathbf{x} \mid \| \mathbf{x} \| \leq M_x \}$, 这里 $M_x > M_d$ 是设计常数, 确定方法在后面给出.

设 $f(\mathbf{x}, \theta_f), g(\mathbf{x}, \theta_g)$ 是两个二型模糊逻辑系统在区域 Ω_x 上分别对 $f(\mathbf{x}), g(\mathbf{x})$ 的一个逼

近,即

$$f(x, \theta_f) = \frac{\sum_{l=1}^M y_f^l \left[\prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i - a_{if}^l)^2}{(b_{if}^l)^2 + b_{0f}}\right) \right]}{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i - a_{if}^l)^2}{(b_{if}^l)^2 + b_{0f}}\right)} \quad (2)$$

$$g(x, \theta_g) = \frac{\sum_{l=1}^N y_g^l \left[\prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i - a_{ig}^l)^2}{(b_{ig}^l)^2 + b_{0g}}\right) \right]}{\sum_{l=1}^N \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i - a_{ig}^l)^2}{(b_{ig}^l)^2 + b_{0g}}\right)} \quad (3)$$

而 M, N 是两个模糊系统中的规则数目,

$$\theta_f = (y_f^1, \dots, y_f^M, b_{1f}^1, \dots, b_{nf}^1, \dots, b_{1f}^M, \dots, b_{nf}^M, a_{1f}^1, \dots, a_{nf}^1, \dots, a_{1f}^M, \dots, a_{nf}^M)^T,$$

$$\theta_g = (y_g^1, \dots, y_g^N, b_{1g}^1, \dots, b_{ng}^1, \dots, b_{1g}^N, \dots, b_{ng}^N, a_{1g}^1, \dots, a_{ng}^1, \dots, a_{1g}^N, \dots, a_{ng}^N)^T,$$

是可调参数,正数 b_{0f}, b_{0g} 是设计参数.

令

$$\Omega_f = \{\theta_f: \|\theta_f\| \leq M_f\}$$

$$\Omega_g = \{\theta_g: \|\theta_g\| \leq M_g, y_g^l \geq \varepsilon, l = 1, \dots, N\}$$

$$\theta_f^* = \arg \min_{\theta_f \in \Omega_f} [\sup_{x \in \Omega_x} |f(x, \theta_f) - f(x)|]$$

$$\theta_g^* = \arg \min_{\theta_g \in \Omega_g} [\sup_{x \in \Omega_x} |g(x, \theta_g) - g(x)|]$$

其中正常数 M_f, M_g, ε 是设计参数.

设 $\hat{\theta}_f(t) \in \Omega_f, \hat{\theta}_g(t) \in \Omega_g$ 分别是 θ_f^*, θ_g^* 在 t 时刻的估计值,将 $f(x, \theta_f^*), g(x, \theta_g^*)$ 在 $\hat{\theta}_f(t), \hat{\theta}_g(t)$ 的邻域内展开成泰勒展式,得

$$f(x, \theta_f^*) - f(x, \hat{\theta}_f(t)) = -\phi_f^T(t) \frac{\partial f(x, \hat{\theta}_f)}{\partial \hat{\theta}_f} + O(\|\phi_f(t)\|^2) \quad (4)$$

$$g(x, \theta_g^*) - g(x, \hat{\theta}_g(t)) = -\phi_g^T(t) \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_g} + O(\|\phi_g(t)\|^2) \quad (5)$$

其中 $\phi_f(t) = \hat{\theta}_f(t) - \theta_f^*, \phi_g(t) = \hat{\theta}_g(t) - \theta_g^*$.

定义最优逼近误差

$$w = [f(x, \theta_f^*) - f(x)] + [g(x, \theta_g^*) - g(x)]u_c - O(\|\phi_f(t)\|^2) - O(\|\phi_g(t)\|^2)u_c \quad (6)$$

其中

$$u_c = \frac{1}{g(x, \hat{\theta}_g)} \left[-f(x, \hat{\theta}_f) + y_d^{(n)} + \sum_{i=1}^n c_{n-i+1} e_i \right] \quad (7)$$

而常数 c_1, \dots, c_n 确定的多项式 $h(s) = s^n + c_1 s^{(n-1)} + \dots + c_n$ 是霍尔维茨多项式, $\hat{\theta}_f(t), \hat{\theta}_g(t)$ 分别是 θ_f^*, θ_g^* 在 t 时刻的估计值.

令

$$\varepsilon_w = \max_{x \in \Omega_x, \hat{\theta}_f(t) \in \Omega_f, \hat{\theta}_g(t) \in \Omega_g} |(f(x, \theta_f^*) - f(x)) + (g(x, \theta_g^*) - g(x))u_c - O(\|\phi_f(t)\|^2) - O(\|\phi_g(t)\|^2)u_c| \quad (8)$$

则 ε_w 是未知有界常数.

3 自适应模糊控制器的设计

受文献[2]的启发,采用如下控制律

$$u = u_c + u_s + \frac{\hat{\epsilon}_w + D(x)}{K_1(x)} \text{sgn}(e^T P b_c) \tag{9}$$

于是误差方程为

$$\begin{aligned} \dot{e} = & A_c e - b_c g(x) u_s - b_c g(x) \left[\frac{\hat{\epsilon}_w + D(x)}{K_1(x)} \right] \text{sgn}(e^T P b_c) + \\ & b_c \left[\phi_f^T(t) \frac{\partial f(x, \hat{\theta}_f)}{\partial \hat{\theta}_f} + \phi_g^T(t) \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_g} u_c \right] + b_c w - b_c d(x, t) \end{aligned} \tag{10}$$

其中 $\hat{\epsilon}_w(t)$ 是 ϵ_w 在 t 时刻的估计值,

$$A_c = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -c_n & -c_{n-1} & -c_{n-2} & \cdots & -c_1 \end{pmatrix},$$

$$b_c = [0, \dots, 0, 1]^T \in R^n.$$

由于 $|sI - A_c| = h(s)$ 是 Hurwitz 多项式,因此 A_c 是稳定矩阵. 于是,对任意给定的 n 阶正定矩阵 Q ,李亚普诺夫方程

$$A_c^T P + P A_c = -Q \tag{11}$$

一定存在唯一的正定解 $P \in R^{n \times n}$. 而 u_c 由式(7)确定,

$$u_s = I(\bar{V}) \text{sgn}(e^T P b_c) \frac{1}{K_1(x)} [|f(x, \hat{\theta}_f)| + F(x) + |g(x, \hat{\theta}_g) u_c| + |K_2(x) u_c|] \tag{12}$$

$$I(\bar{V}) = \begin{cases} 1, & \text{当 } V_e = e^T P e / 2 > \bar{V} \\ 0, & \text{当 } V_e \leq \bar{V} \end{cases} \tag{13}$$

这里正常数 \bar{V} 是设计参数.

采用如下自适应律

$$\dot{\hat{\theta}}_f = \begin{cases} -\eta_1 e^T P b_c \frac{\partial f(x, \hat{\theta}_f)}{\partial \hat{\theta}_f}, & \text{当 } \|\hat{\theta}_f\| < M_f \text{ 或 } \|\hat{\theta}_f\| = M_f \text{ 且 } e^T P b_c \hat{\theta}_f^T \frac{\partial f(x, \hat{\theta}_f)}{\partial \hat{\theta}_f} \geq 0 \\ -\eta_1 e^T P b_c \frac{\partial f(x, \hat{\theta}_f)}{\partial \hat{\theta}_f} + \eta_1 e^T P b_c \frac{\hat{\theta}_f \hat{\theta}_f^T}{\|\hat{\theta}_f\|^2} \frac{\partial f(x, \hat{\theta}_f)}{\partial \hat{\theta}_f}, & \text{当 } \|\hat{\theta}_f\| = M_f \text{ 且 } e^T P b_c \hat{\theta}_f^T \frac{\partial f(x, \hat{\theta}_f)}{\partial \hat{\theta}_f} < 0 \end{cases} \tag{14}$$

当 $\hat{y}'_g(t) = \epsilon$ 时

$$\dot{y}'_g = \begin{cases} -\eta_2 e^T P b_c u_c \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial y'_g}, & \text{当 } e^T P b_c u_c \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial y'_g} < 0 \\ 0, & \text{当 } e^T P b_c u_c \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial y'_g} \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

否则

$$\dot{\hat{\theta}}_{g+} = \begin{cases} -\eta_2 e^T P b_c u_c \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g+}}, & \\ \text{当 } \|\hat{\theta}_g\| < M_g \text{ 或 } \|\hat{\theta}_g\| = M_g \text{ 且 } e^T P b_c u_c \left[\hat{\theta}_{g+}^T \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g+}} \right. \\ \left. + \hat{\theta}_{g\epsilon 1}^T \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g\epsilon 1}} \right] \geq 0 \\ -\eta_2 e^T P b_c u_c \frac{\partial \hat{g}(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g+}} + \eta_2 e^T P b_c u_c \hat{\theta}_{g+} \left[\hat{\theta}_{g+}^T \frac{\partial \hat{g}(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g+}} + \hat{\theta}_{g\epsilon 1}^T \frac{\partial \hat{g}(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g\epsilon 1}} \right] / \|\hat{\theta}_{g+}\|^2, \\ \text{当 } \|\hat{\theta}_g\| = M_g \text{ 且 } e^T P b_c u_c \left[\hat{\theta}_{g+}^T \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g+}} + \hat{\theta}_{g\epsilon 1}^T \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g\epsilon 1}} \right] < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\dot{\hat{e}}_w = \eta_3 |e^T P b_c| \quad (17)$$

这里, $\epsilon > 0$ 是一常数; $\eta_1 > 0, \eta_2 > 0, \eta_3 > 0$, 均为自适应率; $\hat{\theta}_{g+}(t)$ 是将 $\hat{\theta}_g(t)$ 中删除满足式(15)的所有分量后所得的参数估计向量; $\hat{\theta}_{g\epsilon 1}(t)$ 是 $\hat{\theta}_g(t)$ 中满足式(15)第一行条件的所有分量所构成的列向量; $\hat{\theta}_{g\epsilon 2}(t)$ 是 $\hat{\theta}_g(t)$ 中满足式(15)第二行条件的所有分量所构成的列向量。

4 稳定性分析

令 $V_f(t) = \frac{1}{2} \hat{\theta}_f^T \hat{\theta}_f, V_g(t) = \frac{1}{2} \hat{\theta}_g^T \hat{\theta}_g$, 则类似于文献[6]中的讨论可知, 只要参数 $\hat{\theta}_f(0) \in \Omega_f, \hat{\theta}_g(0) \in \Omega_g$, 则 $\hat{\theta}_f(t) \in \Omega_f, \hat{\theta}_g(t) \in \Omega_g, \forall t \geq 0$. 于是可提出如下稳定性定理。

定理 1. 考虑过程(1), 其控制律由式(9)确定, 自适应律由式(14)~(17)确定, 并满足假设 1)~3). 若取 $M_x = M_d + \left(\frac{4\bar{V}}{\lambda_{\min}(P)} \right)^{1/2}, \hat{\theta}_f(0) \in \Omega_f, \hat{\theta}_g(0) \in \Omega_g$, 则

- 1) $\|\hat{\theta}_f\| \leq M_f, \|\hat{\theta}_g\| \leq M_g, y'_g \geq \epsilon, \|x\| \leq M_d + \left(\frac{4\bar{V}}{\lambda_{\min}(P)} \right)^{1/2};$
- 2) $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$.

证明. 1) 采用文献[2]中的类似方法得

$$\begin{aligned} \dot{V}_e(t) \leq & -\frac{1}{2} e^T Q e + |e^T P b_c| [|f(x, \hat{\theta}_f)| + |f(x)| \\ & + (|g(x, \hat{\theta}_g)| + g(x)) |u_c|] - e^T P b_c g(x) u_s \end{aligned} \quad (18)$$

由式(13)可知, 当 $V_e > \bar{V}$ 时, $I(\bar{V}) = 1$, 所以

$$\dot{V}_e \leq -\frac{1}{2} e^T Q e \leq 0 \quad (19)$$

由于 V_e 是时间 t 的连续函数, 故在采样间隔充分小的条件下, 有 $V_e \leq 2\bar{V}, \forall t \geq 0$. 从而有

$\lambda_{\min}(P) \|e\|^2/2 \leq 2\bar{V}, \forall t \geq 0$. 所以 $\|e\| \leq \left(\frac{4\bar{V}}{\lambda_{\min}(P)}\right)^{1/2}, \forall t \geq 0$. 根据假设 3) 及 $x = e + (y_d, \dots, y_d^{(n-1)})^T$, 得

$$\|x\| \leq M_d + \left(\frac{4\bar{V}}{\lambda_{\min}(P)}\right)^{1/2}, \forall t \geq 0 \quad (20)$$

2) 令

$$V(t) = V_e + \frac{1}{2\eta_1} \phi_f^T \phi_f + \frac{1}{2\eta_2} \phi_g^T \phi_g + \frac{1}{2\eta_3} (\hat{\epsilon}_w - \epsilon_w)^2 \quad (21)$$

将 $V(t)$ 对时间 t 求导得

$$\dot{V} = \dot{V}_e + \phi_f^T \dot{\theta}_f / \eta_1 + \phi_g^T \dot{\theta}_g / \eta_2 + (\hat{\epsilon}_w - \epsilon_w) \dot{\hat{\epsilon}}_w / \eta_3 \quad (22)$$

将式(10), (14)~(17)代入式(22), 整理得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -\frac{1}{2} e^T Q e + I_1 e^T P b_c \phi_f^T \frac{\hat{\theta}_f \hat{\theta}_f^T}{\|\hat{\theta}_f\|^2} \frac{\partial f(x, \hat{\theta}_f)}{\partial \hat{\theta}_f} + \\ & I_2 e^T P b_c u_c \frac{\phi_{g+}^T \hat{\theta}_{g+}}{\|\hat{\theta}_{g+}\|^2} \left[\hat{\theta}_{g+}^T \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g+}} + \hat{\theta}_{g\epsilon 1}^T \frac{\partial g(x, \hat{\theta}_g)}{\partial \hat{\theta}_{g\epsilon 1}} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

其中 ϕ_{g+} 是向量 ϕ_g 对应于 $\hat{\theta}_{g+}$ 的分量所构成的向量; $\phi_{g\epsilon 1}$ 是向量 ϕ_g 对应于 $\hat{\theta}_{g\epsilon 1}$ 的分量所构成的向量; $I_1=0$ (或 1), 当式(14)第一(二)个条件成立; $I_2=0$ (或 1), 当式(16)第一(二)个条件成立. 由于当式(14)的第二个条件成立时, $\|\hat{\theta}_f\| = M_f$, 所以 $\phi_f^T \hat{\theta}_f = \frac{1}{2} [\|\hat{\theta}_f\|^2 - \|\theta_f^*\|^2 + \|\hat{\theta}_f - \theta_f^*\|^2] \geq 0$. 同理, 当式(16)的第二个条件成立时, $\|\hat{\theta}_g\| = M_g$, 所以 $\phi_{g+}^T \hat{\theta}_{g+} = \frac{1}{2} [\|\hat{\theta}_{g+}\|^2 - \|\theta_{g+}^*\|^2 + \|\hat{\theta}_{g+} - \theta_{g+}^*\|^2] \geq 0$, 这里 θ_{g+}^* 是向量 θ_g^* 对应于 $\hat{\theta}_{g+}$ 的分量所构成的向量. 因此

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \|e\|^2 \leq 0 \quad (24)$$

采用文献[5]中定理 1 类似的证明方法, 不难得出结论 2) 成立.

5 仿真结果

考虑如下倒立摆控制问题, 其动态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{g \sin x_1 - \frac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} + \frac{\frac{\cos x_1}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 x_1}{m_c + m} \right)} u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (25)$$

其中 $g=9.8\text{m/s}^2, m_c=1\text{kg}, m=0.1\text{kg}, l=0.5\text{m}$. 参考信号为 $y_d = \frac{\pi}{30} \sin t$. 根据文献[2]的分析可知, $F(x) = 15.78 + 0.0366x_2^2, K_1(x) = 1.12, K_2(x) = 1.46$, 跟踪误差 $e_1 = y_d - y$. 若要求 $\|x\| \leq \pi/6$, 取 $c_1 = 2, c_2 = 1, Q = \text{diag}(10, 10), P = \begin{bmatrix} 15 & 5 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}, \bar{V} = 0.206$,

$\mathbf{x}(0) = (0.2, -0.2)^T$, $\eta_1 = 0.1$, $\eta_2 = 0.5$, $\eta_3 = 1.5$, $\hat{\epsilon}_w(0) = 0.5$, $\hat{y}_f^1(0) = \hat{y}_f^2(0) = -0.2$, $\hat{y}_f^3(0) = \hat{y}_f^4(0) = \hat{y}_f^5(0) = 0.3$, $\hat{b}_{if}^l(0) = 0.1$, $\hat{a}_{1f}^1 = \hat{a}_{2f}^1 = -0.2$, $\hat{a}_{1f}^2 = \hat{a}_{2f}^2 = -0.1$, $\hat{a}_{1f}^3 = \hat{a}_{2f}^3 = 0$, $\hat{a}_{1f}^4 = \hat{a}_{2f}^4 = 0.1$, $\hat{a}_{1f}^5 = \hat{a}_{2f}^5 = 0.2$, $\hat{y}_g^l(0) = 0.1$, $\hat{b}_{ig}^l(0) = 0.2$, $\hat{a}_{1g}^1 = \hat{a}_{2g}^1 = -0.2$, $\hat{a}_{1g}^2 = \hat{a}_{2g}^2 = -0.1$, $\hat{a}_{1g}^3 = \hat{a}_{2g}^3 = 0$, $\hat{a}_{1g}^4 = \hat{a}_{2g}^4 = 0.1$, $\hat{a}_{1g}^5 = \hat{a}_{2g}^5 = 0.2$, $\epsilon = 0.1$, $b_{0f} = b_{0g} = 0.001$, $M_f = 10$, $M_g = \sqrt{10}$, $l = 1, \dots, 5$, $i = 1, 2$. 仿真结果如图 1, 图 2 所示.

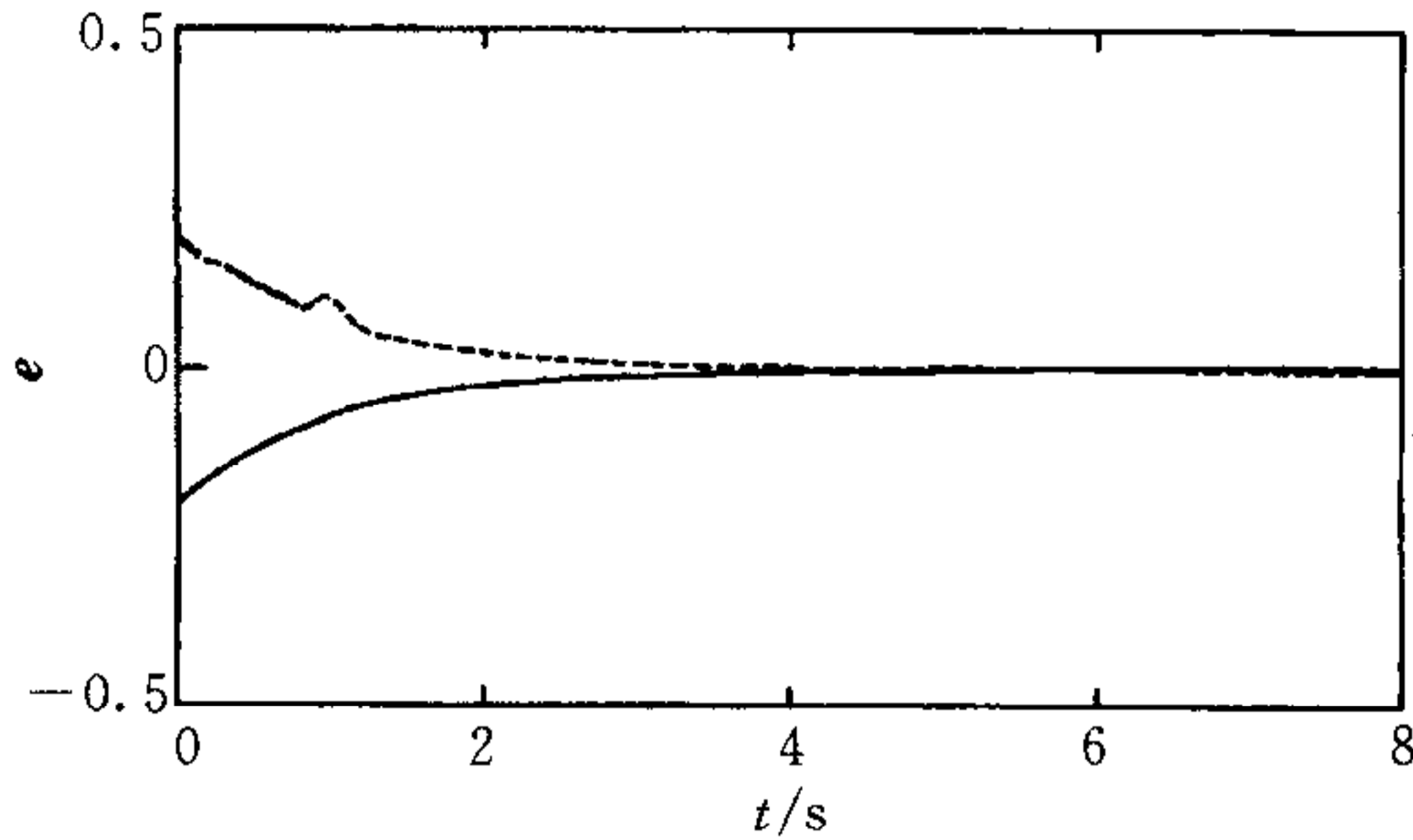


图 1 跟踪误差(实线表示 e_1 , 虚线表示 e_2)

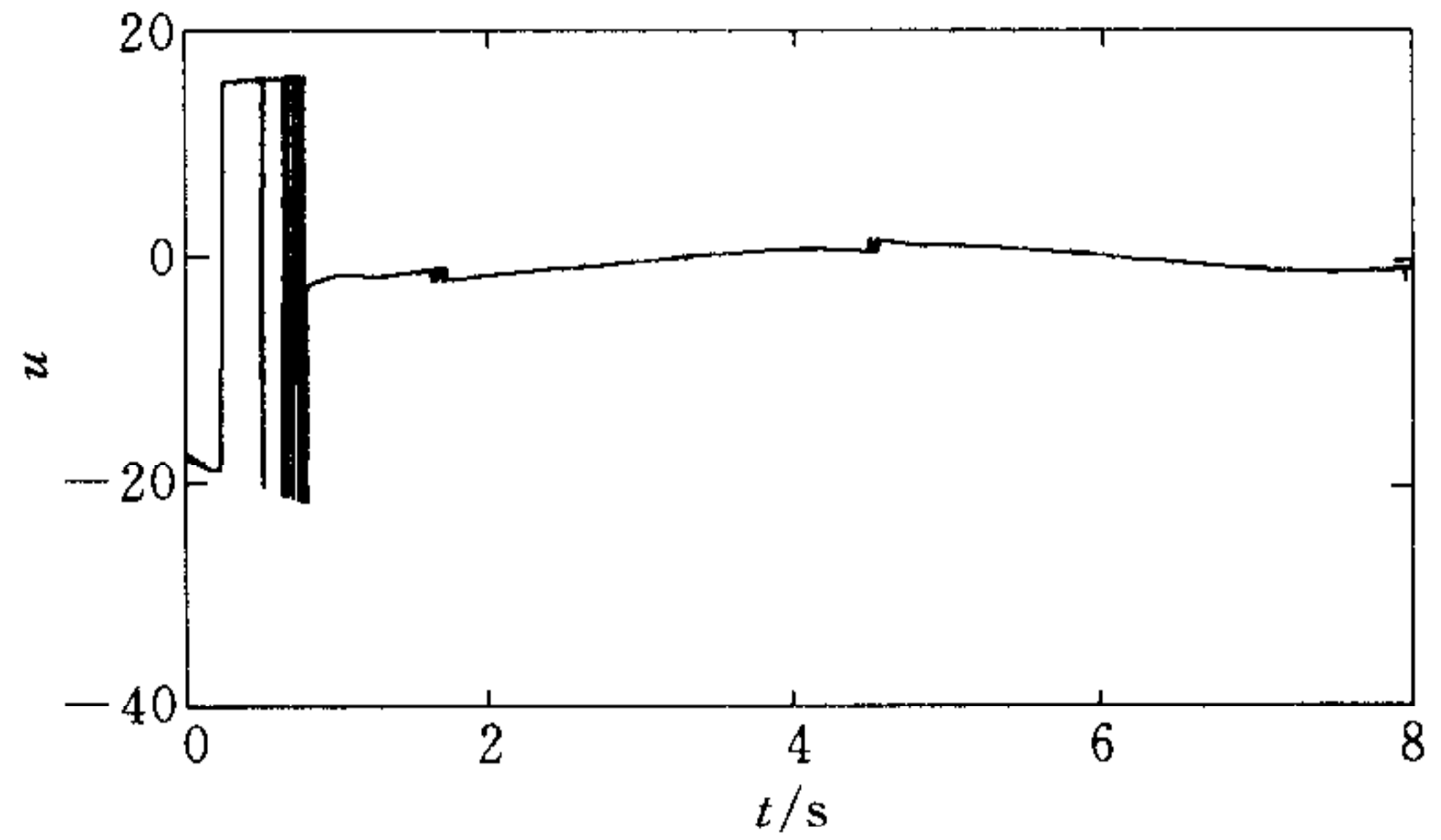


图 2 控制信号

6 结论

本文提出了一种间接自适应模糊控制器设计的新方案, 根据李亚普诺夫方法, 确定了二型模糊系统中可调参数和逼近误差的自适应律. 通过理论分析, 证明了闭环系统的全局渐近稳定性.

参 考 文 献

- 1 Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 1993, **1**(2):146~155
- 2 Wang L X. *Adaptive Fuzzy Systems and Control—Design and Stability Analysis*. New Jersey: Prentice Hall, 1994
- 3 张乃尧, 金 晖. 对稳定的模糊自适应控制方案的研究与改进. *自动化学报*, 1997, **23**(2):160~166
- 4 佟绍成, 周 军. 非线性模糊间接和直接自适应控制器的设计和稳定性分析. *控制与决策*, 2000, **15**(3):293~296
- 5 张天平, 冯纯伯. 一类非线性系统的自适应模糊滑模控制. *自动化学报*, 1997, **23**(3):361~369
- 6 张天平. 自适应模糊滑模控制器的设计与分析. *自动化学报*, 1999, **25**(3):370~374

张天平 1996年获东南大学自动化所自动控制理论及应用专业博士学位, 现为扬州大学信息工程学院计算机科学系教授. 目前主要研究领域为自适应控制、模糊控制理论、智能控制及非线性控制等.