

文章编号: 1001-0920(2002)02-0199-04

一类非线性系统的间接自适应模糊控制器的研究

张天平

(扬州大学 工学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 研究一类不确定非线性系统的间接自适应模糊控制问题。基于 Wang 提出的监督控制方案, 利用 I 型模糊系统的逼近能力, 提出一种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的上确界已知的条件。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: TP 273.4

文献标识码: A

On indirect adaptive fuzzy controller for a class of nonlinear systems

ZHANG Tian-ping

(Engineering College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The problem of indirect adaptive fuzzy control for a class of uncertain nonlinear systems is studied. Based on the supervisory control strategy and the approximation capability of the first type fuzzy systems, a new design scheme of adaptive fuzzy controller is proposed. The adaptive compensation term of the optimal approximation error is adopted. The approach does not require the optimal approximation error being square-integrable or the supremum of the optimal approximation error being 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 引言

近年来, 非线性系统的模糊控制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]。文献[1]利用模糊系统的逼近性质, 提出 4 种保证闭环稳定性的自适应模糊控制方案, 但其跟踪误差的收敛性依赖于逼近误差平方可积这一假设。文献[2, 3]分别提出了不同的修正方案, 但分析中假设最优

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, 在实际控制中此条件也无法验证。文献[4, 5]基于滑模控制原理, 并利用模糊系统的通用逼近能力, 提出两种自适应模糊控制器设计方案, 并要求控制增益一阶导数的上界已知。通

收稿日期: 2000-11-20; 修回日期: 2001-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074013); 江苏省高校科研基金项目(00KJB510006)

作者简介: 张天平(1964-), 男, 江苏泰兴人, 教授, 博士, 从事自适应控制、模糊控制理论等研究。 <http://www.cnki.net>

常, 这个界与被控系统存在的不确定性、状态以及控制信号有关, 实际上一概很难确定。

本文在文献[1]的基础上, 利用 型模糊逻辑系统的逼近能力, 提出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[1]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^[1,6], 也避免了逼近误差上确界已知的假设^[2,3]。此外, 设计中并不要求控制增益一阶导数的上界已知^[4,5]。通过构造不同的李亚普诺夫函数, 证明了闭环系统的状态有界, 跟踪误差收敛到零。

2 问题描述及基本假设

考虑如下—类非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}, & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u(t) + d(x, t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 是状态向量, u 是控制输入, y 是系统输出, 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 跟踪—指定的期望轨迹 y_d 。为此, 设计—个控制律 $u(t)$, 使得 $y_d - y$ 收敛到零。定义跟踪误差向量

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

为了设计稳定的自适应模糊控制, 参照文献

[1, 4], 对未知连续函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 作如下假设:

- 1) $|f(x)| \leq F(x), x \in R^n$;
- 2) $0 < K_1(x) \leq g(x) \leq K_2(x), x \in R^n$;
- 3) $(y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(n)})^T \in M_d$;
- 4) $|d(x, t)| \leq D(x), \forall t \geq 0$ 。

其中, $F(x), K_1(x), K_2(x)$ 和 $D(x)$ 是已知正连续函数, M_d 是已知的正常数。定义 $\Omega = \{x: x \in M_x\}$, 其中 $M_x > M_d$ 是设计常数(确定方法将在后面的定理中给出)。

设 $f(x, \theta)$ 和 $g(x, \theta_g)$ 是两个 型模糊逻辑系统在区域 Ω 上分别对 $f(x)$ 和 $g(x)$ 的逼近, 即

$$f(x, \theta_f) = \theta_f^T \xi_f \quad (2)$$

$$g(x, \theta_g) = \theta_g^T \xi_g \quad (3)$$

而 $\xi_f = (p_{f1}(x), \dots, p_{fM}(x))^T, \xi_g = (p_{g1}(x), \dots, p_{gN}(x))^T, M$ 和 N 是两个模糊系统中的规则数目。

基函数

$$p_{fi}(x) = \frac{\exp\left[-\frac{(x_i - a_{if}^l)^2}{(b_{if}^l)^2}\right]}{\sum_{l=1}^n \exp\left[-\frac{(x_i - a_{if}^l)^2}{(b_{if}^l)^2}\right]} \quad (4)$$

$$p_{gi}(x) = \frac{\exp\left[-\frac{(x_i - a_{ig}^l)^2}{(b_{ig}^l)^2}\right]}{\sum_{l=1}^n \exp\left[-\frac{(x_i - a_{ig}^l)^2}{(b_{ig}^l)^2}\right]} \quad (5)$$

$\theta = (y_f^1, \dots, y_f^M)^T$ 和 $\theta_g = (y_g^1, \dots, y_g^N)^T$ 是可调参数。

$$\begin{aligned} \Omega_f &= \{\theta_f: \theta_f \in M_f\} \\ \Omega_g &= \{\theta_g: \theta_g \in M_g, y_g^l \in \epsilon, l = 1, 2, \dots, N\} \\ \theta^* &= \arg \min_{\theta} \sup_x |f(x, \theta) - f(x)| \\ \theta_g^* &= \arg \min_{\theta_g} \sup_x |g(x, \theta_g) - g(x)| \end{aligned}$$

其中正常数 M_f, M_g 和 ϵ 是设计参数。定义最优逼近误差

$$w = [f(x, \theta^*) - f(x)] + [g(x, \theta_g^*) - g(x)]u_c \quad (6)$$

其中

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

而由常数 c_1, c_2, \dots, c_n 确定的多项式 $h(s) = s^n + c_1 s^{n-1} + \dots + c_n$ 是 Hurwitz 多项式, $\hat{\theta}_f(t)$ 和 $\hat{\theta}_g(t)$ 分别是 θ_f^* 和 θ_g^* 在 t 时刻的估计值。令

$$\epsilon_w = \max_{x \in \Omega, \theta_f \in \hat{\Omega}_f, \theta_g \in \hat{\Omega}_g} |f(x, \theta_f^*) - f(x) + (g(x, \theta_g^*) - g(x))u_c| \quad (8)$$

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[1]的启发, 采用如下控制律

$$u = u_c + u_s + \frac{\epsilon_w + D(x)}{K_1(x)} \text{sgn}(e^T P b_c) \quad (9)$$

则误差方程为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A e - b_c g(x) u_s - b_c g(x) \frac{\epsilon_w + D(x)}{K_1(x)} \text{sgn}(e^T P b_c) + \\ & b_c [\Phi_f(t) \xi_f + \Phi_g(t) \xi_g u_c] + b_c w - b_c d(x, t) \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_f(t) &= \hat{\theta}_f(t) - \theta_f^* \\ \Phi_g(t) &= \hat{\theta}_g(t) - \theta_g^* \end{aligned}$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -c_n & -c_{n-1} & -c_{n-2} & \dots & -c_1 \end{bmatrix}$$

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

$\hat{\epsilon}_v(t)$ 是 ϵ_v 在 t 时刻的估计值。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

$$A_c^T P + P A_c = -Q \quad (11)$$

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

$$u_s =$$

$$I(\nabla) \operatorname{sgn}(e^T P b_c) \frac{1}{K_1(x)} [|f(x, \hat{\theta})| + F(x) + |g(x, \hat{\theta}_g) u_c| + |K_2(x) u_c|] \quad (12)$$

$$I(\nabla) = \begin{cases} 1, & V_e = e^T P e / 2 > \nabla \\ 0, & V_e \leq \nabla \end{cases} \quad (13)$$

其中正常数 ∇ 是设计参数。

采用如下自适应律

$$\dot{\hat{\theta}} = \begin{cases} -\eta_e^T P b_c \xi_f \\ \hat{\theta}_f < M_f, \text{ 或 } \hat{\theta}_f = M_f \text{ 且} \\ e^T P b_c \hat{\theta}_f^T \xi_f < 0 \\ -\eta_e^T P b_c \xi_f + \eta_e^T P b_c \frac{\hat{\theta}_f \hat{\theta}_f^T}{\theta} \xi_f \\ \hat{\theta}_f = M_f \text{ 且 } e^T P b_c \hat{\theta}_f^T \xi_f < 0 \end{cases} \quad (14)$$

当 $\hat{y}_g^l(t) = \epsilon$ 时, 有

$$\dot{y}_g^l = \begin{cases} -\eta_e^T P b_c u_c p_{gl}(x), & e^T P b_c u_c p_{gl}(x) < 0 \\ 0, & e^T P b_c u_c p_{gl}(x) \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

否则

$$\dot{\hat{\theta}}_{g^+} = \begin{cases} -\eta_e^T P b_c u_c \xi_{g^+} \\ \hat{\theta}_g < M_g, \text{ 或 } \hat{\theta}_g = M_g \text{ 且} \\ e^T P b_c u_c [\hat{\theta}_g^T \xi_{g^+} + \hat{\theta}_g^T i_{\xi_{g^+}}] < 0 \\ -\eta_e^T P b_c u_c \xi_{g^+} + \eta_e^T P b_c u_c \hat{\theta}_g^+ [\hat{\theta}_g^+ \xi_{g^+} + \hat{\theta}_g^+ i_{\xi_{g^+}}] / \hat{\theta}_g^+{}^2 \\ \hat{\theta}_g = M_g \text{ 且} \\ e^T P b_c u_c [\hat{\theta}_g^+ \xi_{g^+} + \hat{\theta}_g^+ i_{\xi_{g^+}}] < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\dot{\hat{\epsilon}}_v = \eta_b |e^T P b_c| \quad (17)$$

其中, $\eta_1 > 0, \eta_2 > 0$ 和 $\eta_b > 0$ 均为自适应率, $\epsilon > 0$ 为一常数, $\hat{\theta}_{g^+}^l(t)$ 是将 $\hat{\theta}_g(t)$ 中删除满足式(15) 的所

有分量后得到的参数估计向量, $\hat{\theta}_{g^+}^l(t)$ 是 $\hat{\theta}_g(t)$ 中满足式(15) 第 1 行条件的所有分量构成的列向量, $\hat{\theta}_{g^+}^2(t)$ 是 $\hat{\theta}_g(t)$ 中满足式(15) 第 2 行条件的所有分量构成的列向量。

4 稳定性分析

令 $V_f(t) = \frac{1}{2} \hat{\theta}_f^T \hat{\theta}_f, V_g(t) = \frac{1}{2} \hat{\theta}_g^T \hat{\theta}_g$, 则采用类似于文献[5] 的分析方法可以证明: 只要参数 $\hat{\theta}_f(0) \in \Omega_f, \hat{\theta}_g(0) \in \Omega_g$, 则 $\hat{\theta}_f(t) \in \Omega_f, \hat{\theta}_g(t) \in \Omega_g, \forall t \geq 0$ 。

本文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) ~ 4)。

若取 $M_x = M_d + \left(\frac{4\nabla}{\lambda_{\min}(P)} \right)^{1/2}, \hat{\theta}_f(0) \in \Omega_f, \hat{\theta}_g(0) \in \Omega_g$, 则有:

$$1) \quad \begin{matrix} \hat{\theta}_f & M_f, & \hat{\theta}_g & M_g, & \hat{y}_g^l & \epsilon \\ x & M_d + \left(\frac{4\nabla}{\lambda_{\min}(P)} \right)^{1/2}; \end{matrix} \in$$

$$2) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0.$$

其中 $\lambda_{\min}(P)$ 为正定矩阵 P 的最小特征值。

证明 1) 采用类似于文献[1] 的方法, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_e(t) = & -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c [|f(x, \hat{\theta}) - f(x)| + \\ & |g(x, \hat{\theta}_g) - g(x)| u_c - g(x) |u_s + \\ & \frac{\hat{\epsilon}_v + D(x)}{K_1(x)} \operatorname{sgn}(e^T P b_c) | - d(x, t) | \\ & - \frac{1}{2} e^T Q e + |e^T P b_c| [|f(x, \hat{\theta})| + \\ & |f(x)| + (|g(x, \hat{\theta}_g)| + \\ & g(x) |u_c|] - e^T P b_c g(x) u_s - \\ & |e^T P b_c| g(x) \frac{\hat{\epsilon}_v + D(x)}{K_1(x)} + |e^T P b_c| D(x) \\ & - \frac{1}{2} e^T Q e + |e^T P b_c| [|f(x, \hat{\theta})| + \\ & |f(x)| + (|g(x, \hat{\theta}_g)| + \\ & g(x) |u_c|] - e^T P b_c g(x) u_s \end{aligned} \quad (18)$$

由式(13) 知, 当 $V_e > \nabla$ 时, $I(\nabla) = 1$, 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, 故在采样间隔充分的条件下, 有 $V_e \leq 2\nabla, \forall t \geq 0$ 。从而有

所以

$$e = \left[\frac{4V}{\lambda_{\min}(P)} \right]^{1/2}, \quad \forall t \geq 0$$

根据假设 3) 和 $x = e + (y_d, \dots, y_d^{(n-1)})^T$, 得

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

2) 令

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

将 $V(t)$ 对时间 t 求导, 得

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

将式(10), (14) ~ (17) 代入(22), 经整理得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -\frac{1}{2} e^T Q e + I_1 e^T P b_c \phi \frac{\hat{\theta}_c \hat{\theta}_c^T}{\theta_f} \xi_{f+} + \\ & I_2 e^T P b_c u_c \frac{\hat{\theta}_{g+} \hat{\theta}_{g+}^T}{\theta_g} [\hat{\theta}_{g+}^T \xi_{g+} + \hat{\theta}_{g+}^T \xi_{g-}] \end{aligned} \quad (23)$$

其中, ϕ_{g+} 是向量 ϕ_g 对应于 $\hat{\theta}_{g+}$ 的分量所构成的向量, ξ_{g-} 是向量 ξ_g 对应于 $\hat{\theta}_{g-}$ 的分量所构成的向量。

$I_1 = 0$ (或 1), 当式(14) 第 1 (或第 2) 个条件成立时; $I_2 = 0$ (或 1), 当式(16) 第 1 (或第 2) 个条件成立时。由于当式(14) 的第 2 个条件成立时 $\hat{\theta}_f = M_f$, 所以 $\phi \hat{\theta}_f = \frac{1}{2} [\hat{\theta}_f^T - \theta_f^{*T} + \hat{\theta}_f - \theta_f^*] = 0$ 。同理, 当式(16) 的第 2 个条件成立时 $\hat{\theta}_g = M_g$, 所以 $\phi_{g+} \hat{\theta}_{g+} = \frac{1}{2} [\hat{\theta}_{g+}^T - \theta_{g+}^{*T} + \hat{\theta}_{g+} - \theta_{g+}^*] = 0$ 。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

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

所以 $V(t)$ 是单调不增的非负函数, 故 $\lim_t V(t)$ 存在,

即 $V(\infty)$ 存在。进一步得 $\int_0^\infty \dot{V}(t) dt$ 存在, 所以

$$\int_0^\infty \|e\|^2 dt < +\infty$$

又由于 $\{V(t)\}$ 收敛, 故从式(21) 可知 $\hat{\epsilon}_w$ 有界。由证明 1) 知 $x, \dot{x} \in L$, 从而知

$$\frac{d}{dt} e^T e = 2e^T \dot{e} \in L$$

故 $\|e\|^2$ 在 $[0, \infty)$ 上一致连续。根据 Barbalat 引理

知, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e\|^2 = 0$ 。China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

5 仿真结果

为了与文献[1] 的仿真结果进行比较, 考虑如下倒立摆控制问题, 其动态方程为

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

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[1] 的分析可知, $F(x) = 15.78 + 0.0366x^2, K_1(x) = 1.12, K_2(x) = 1.46$, 跟踪误差 $e_1 = y_d - y$ 。若要求 $x \in \pi/6$, 则取 $c_1 = 2, c_2 = 1, Q = \text{diag}(10, 10), P =$

$$\begin{bmatrix} 15 & 5 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}, V = 0.206, x(0) = [0.2, 0]^T$$

逼近未知函数 $f(x), g(x)$ 的模糊系统为

$$R_f^j: \text{ If } x_1 \text{ is } F_1^i, x_2 \text{ is } F_2^j, \text{ Then } f(x, \theta_f) \text{ is } G^{ij}$$

$$R_g^j: \text{ If } x_1 \text{ is } F_1^i, x_2 \text{ is } F_2^j, \text{ Then } g(x, \theta_g) \text{ is } H^{ij}$$

其中, F_1^i, F_2^j, G^{ij} 和 H^{ij} 都是规则中的模糊集, $i, j = 1, 2, \dots, 5$, 而

$$\begin{aligned} F_1^1(x_1) &= \exp\{- [x_1 - 0.3(3 - i)]^2\} \\ F_2^1(x_2) &= \exp\{- [x_2 - 0.3(3 - j)]^2\} \\ \hat{\theta}(0) &= \underbrace{(0.5, \dots, 0.5)}_{10}, \underbrace{(-0.3, \dots, -0.3)}_{15} \end{aligned} \quad R^{25}$$

$$\hat{\theta}_g(0) = \underbrace{(0.1, \dots, 0.1)}_{15}, \underbrace{(0.2, \dots, 0.2)}_{10} \quad R^{25}$$

$$\eta_1 = \eta_2 = 0.8, \eta_3 = 1.5, \epsilon_w(0) = 0.1, \epsilon = 0.01, M_f = 20, M_g = 5$$

仿真结果如图 1 和图 2 所示。

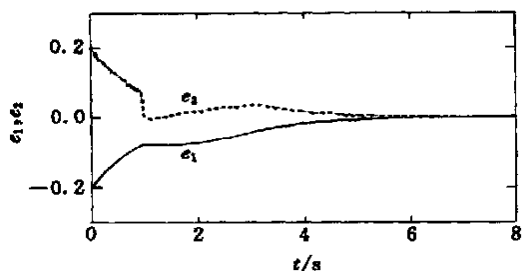


图 1 跟踪误差

(下转第 214 页)

对应的次优度 $\mu = 0.8891$ 。对于车组偏差系统 S , 当 $N = 4$ 时, 次优分散 LQG 控制的仿真曲线如图 1 所示。

图 1(a) 和图 1(b) 分别表示次优控制时, 每辆汽车速度和汽车间距的变化量随首车驱动力矩短时变化的响应曲线。由于第 1 辆汽车驱动力矩短时变化是加减速变化, 因此第 1 辆汽车 v_1 和第 1, 2 辆汽车间距 $d_{1,2}$ 响应曲线的波动较大, 随后的车速和汽车间距的响应曲线波动递减。这说明次优分散 LQG 控制的车组偏差系统是稳定的, 因为扩展系统的稳定性包含了原系统的稳定性^[4]。如果考虑状态加权阵 $W_x = 40 \times I_7$, 即速度和距离偏差同等重要时, 次优度可提高到 $\mu = 0.9164$; 当 $\beta = 0.5$ 时, 次优度均有所降低。

5 结 论

具有重叠结构分解的分散 LQG 控制算法, 可实现对车组偏差系统的分散次优控制。本文的研究和仿真结果表明, 车组偏差系统的重叠结构可通过包含原理的约束和聚集条件来扩展和收缩, 得到解

耦的子系统 and 重叠结构分解意义下的分散观测和控制。完全的分散 LQG 控制取决于系统中汽车的性能和结构, 例如汽车自动驾驶、汽车之间通讯和先进的传感装置等。另外, 对车组偏差系统的进一步研究, 还应考虑加速度的变化对系统的影响。

参考文献 (References):

- [1] Levine W S, Athans M. On the optimal error regulation of a string of moving vehicles[J]. IEEE Trans on AC, 1966, 11(3): 355-361.
- [2] Varaiya P. Smart cars on smart roads: Problems of control[J]. IEEE Trans on AC, 1993, 38(2): 195-207.
- [3] Ikeda M, Siljak D D. Overlapping decentralized control with input, state and output inclusion[J]. Control Theory and Advanced Technology, 1986, 2(2): 155-172.
- [4] Siljak D D. Decentralized control of complex systems [M]. New York: Academic Press, 1991.
- [5] Chen X B, Stankovic S S. Overlapping decomposition and decentralized LQG control for interconnected power systems[A]. Tsinghua University Proc of IEEE SMC[C]. Beijing: Int Academic Press, 1996. 1904-1909.

(上接第 202 页)

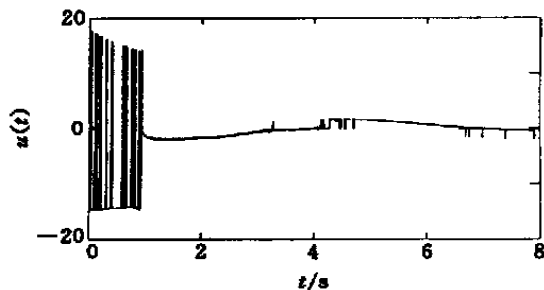


图 2 控制信号

6 结 论

本文提出一种间接自适应模糊控制器的设计方案, 根据李亚普诺夫方法, 确定了型模糊系统中可调参数和逼近误差的自适应律。通过理论分析和系统仿真, 证明了闭环模糊控制系统的全局渐近稳定性。

参考文献 (References):

- [1] Wang L X. Adaptive fuzzy systems and control-design and stability analysis[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- [2] 张乃尧, 金晖. 对稳定的模糊自适应控制方案的研究与改进[J]. 自动化学报(Acta Automatica Sinica), 1997, 23(2): 160-166.
- [3] 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[J]. 控制与决策(Control and Decision), 2000, 15(3): 293-296.
- [4] 张天平, 冯纯伯. 一类非线性系统的自适应模糊滑模控制[J]. 自动化学报(Acta Automatica Sinica), 1997, 23(3): 361-369.
- [5] 张天平. 自适应模糊滑模控制器的设计与分析[J]. 自动化学报(Acta Automatica Sinica), 1999, 25(3): 370-374.
- [6] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146-155.