

文章编号: 1000-8152(2000)02-0244-05

244-248

一类不确定非线性系统的鲁棒自适应控制*

王强德 陈卫田 魏春玲 初学导
(曲阜师范大学自动化研究所·山东曲阜, 273165)

TP273.2

摘要: 针对一类不确定非线性系统, 设计出一种新的自适应控制器, 它克服了现有方案存在的过多参数辨识问题, 从而降低了控制器的动态阶次. 在较弱条件下, 该控制器不仅能保证闭环系统所有信号有界, 而且能使跟踪误差以指数速度收敛到零的有界小邻域内.

关键词: 非线性系统; 递推设计; 不确定性; 自适应控制

文献标识码: A

Robust Adaptive Control of a Class of Uncertain Nonlinear Systems

WANG Qiangde, CHEN Weitian, WEI Chunling and CHU Xuedao

(Institute of Automation, Qufu Normal University · Shandong Qufu, 273165, P.R. China)

Abstract: A new adaptive controller is designed for a class of uncertain nonlinear systems, it eliminates overparametrization existed in the existing schemes and reduces the controller's dynamic order. Under relatively weak conditions, the controller can guarantee the global boundedness of all closed-loop signals and force the tracking error to converge exponentially to a small bounded neighbourhood of zero.

Key words: nonlinear systems; recursive design; uncertainty; adaptive control

1 引言(Introduction)

不确定非线性系统的自适应控制最初是用来解决机器人系统的控制问题的, [1]研究了一类可以转化为参数化严格反馈型(parametric-strict-feedback form)的非线性系统的自适应控制问题, 首次提出了基于 Lyapunov 函数的递推设计方法, 但该文中 p 个未知参数需 np 个辨识器. [2]利用递推设计方法给出了仅需 p 个辨识器的非过参数化自适应控制方案, 从而解决了[1]中存在的过参数辨识问题. 但这些自适应控制方案都仅局限于具有参数不确定性的非线性系统, 对系统存在的其它不确定性的情形, 目前研究的很少. [3]针对具有有界扰动的参数化严格反馈非线性系统, 设计出一种自适应控制器, 可以处理比[1, 2]更广泛的非线性系统的控制问题. 但由于很多非线性系统的不确定性并不总能看成有界扰动, 所以[3]中的方案不能解决这类问题. 另外[3]中的设计方案也存在着与[1]相同的过多参数辨识问题.

本文将研究一类不确定性的参数化严格反馈非线性系统的鲁棒自适应控制问题, 并采用基于 Lyapunov 函数的递推设计方法, 设计出一种新的鲁棒

自适应控制器, 它既能克服[3]中存在的过多参数辨识问题, 又能处理比有界扰动更为广泛的系统的不确定性.

2 问题描述及自适应控制器设计(Problem statement and adaptive controller design)

考虑不确定非线性系统如下

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{i+1} + \theta^T \phi_i(x_1 \cdots x_i) + \psi_i(x, t), \\ 1 &\leq i \leq n-1, \\ \dot{x}_n &= \phi_0(x) + \theta^T \phi_n(x_1 \cdots x_n) + \beta_0(x)u + \psi_n(x, t), \\ y &= x_1. \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中 $\theta \in \mathbb{R}^p$ 是 p 维未知常参数向量, $\phi_0, \beta_0, \phi_i (1 \leq i \leq n)$ 是 $\mathbb{R}^n$ 中的非线性函数.

现对系统(2.1)作如下假设:

A2.1) ϕ_i 已知且关于其变量存在 $n-i$ 阶连续偏导数, ϕ_0, β_0 是连续函数且 $\forall x \in \mathbb{R}^n, \beta_0(x) \neq 0$.

A2.2) $\psi_i(x, t) (1 \leq i \leq n)$ 关于其变量具有 $n-i$ 阶连续偏导数且存在 $\rho_i(x_1 \cdots x_i)$ 使 $|\psi_i(x, t)| \leq \rho_i(x_1 \cdots x_i)$, 其中 $\rho_i(x_1 \cdots x_i)$ 不需要已知, 只需知其增长速度.

A2.3) $y_r(t)$ 为参考信号且具有 n 阶导数, $y_r^{(n)}$ 分段连续.

* 基金项目: 山东省自然科学基金(Q97G02159)项目资助

收稿日期: 1997-06-09; 收修改稿日期: 1999-03-16.

控制目标:使系统输出跟踪给定的参考信号 $y_r(t)$, 且使跟踪误差尽可能地小, 并保证闭环系统所有信号全局有界。

控制器设计思路: 在第 i 步 ($1 \leq i \leq n$) 设计一个镇定函数 α_i 和一个调节函数 τ_i , 使第 i 阶子系统关于 Lyapunov 函数 V_i 稳定, 设 $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计, $\dot{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, $\hat{\theta}$ 的调节律和反馈控制 u 在第 n 步设计出。

调节律取为 $\dot{\hat{\theta}} = \tau_n$, 其中

$$\tau_n = \tau_{n-1} + (\phi_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j) z_n. \quad (2.2)$$

控制律取为

$$u = \frac{1}{\beta_0} [-c_n z_n - z_{n-1} - \phi_0 - \hat{\theta}^T (\phi_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j) + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j} x_{j+1} + \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial y_r^{(j)}} y_r^{(j+1)} - \beta_n z_n [1 + \sum_{j=1}^{n-1} (\frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j})^2] + \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial \hat{\theta}} \tau_n + z_n (\phi_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \alpha_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j) \sum_{j=2}^{n-1} (\frac{\partial \alpha_{j-1}}{\partial \hat{\theta}} z_j)], \quad (2.3)$$

以下给出具体设计步骤:

第一步: 令 $z_1 = x_1 - y_r = y - y_r$ (即跟踪误差), 引入新变量 $z_2 = x_2 - \alpha_1$, 并取 $V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} (\theta - \hat{\theta})^T (\theta - \hat{\theta})$, 对 V_1 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & z_1 (z_2 + \alpha_1 + \theta^T \phi_1 + \psi_1 - \dot{y}_r) - \dot{\hat{\theta}}^T \hat{\theta} = \\ & z_1 (z_2 + \alpha_1 + \hat{\theta}^T \phi_1 + \psi_1 - \dot{y}_r) + \dot{\hat{\theta}}^T (z_1 \phi_1 - \hat{\theta}). \end{aligned} \quad (2.4)$$

取

$$\begin{aligned} \tau_1 = & z_1 \phi_1 - l_1 \hat{\theta}, \\ \alpha_1 = & -c_1 z_1 - \hat{\theta}^T \phi_1 + \dot{y}_r - z_1 \beta_1(x_1). \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中 c_1, l_1 为事先选定的正常数, 后面的 c_i 都是这样的正常数, $\beta_1(x_1)$ 为正的平滑函数, 其增长速度大于或等于 ρ_1 的增长速度的平方。

再取

$$\lambda_1 = \min \{c_1, \frac{l_1}{2}\},$$

则

$$\dot{V}_1 \leq -2\lambda_1 V_1 + \frac{l_1}{2} \|\theta\|^2 + \frac{|\psi_1|^2}{4\beta_1} +$$

$$\hat{\theta}^T (\tau_1 - \dot{\hat{\theta}}) + z_1 z_2. \quad (2.6)$$

第二步: 引入变量 $z_3 = x_3 - \alpha_2$, 并取 $V_2 = V_1 +$

$\frac{1}{2} z_2^2$, 对 V_2 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -2\lambda_1 V_1 + \frac{l_1}{2} \|\theta\|^2 + \frac{|\psi_1|^2}{4\beta_1} + \hat{\theta}^T (\tau_1 - \dot{\hat{\theta}}) + \\ & \hat{\theta}^T z_2 (\phi_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \phi_1) + z_2 [z_1 + z_3 + \alpha_2 + \\ & \hat{\theta}^T (\phi_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \phi_1) - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} x_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} - \\ & \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} y_r + \psi_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \psi_1], \end{aligned} \quad (2.7)$$

取

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \tau_1 + z_2 (\phi_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \phi_1), \\ \alpha_2 = & -c_2 z_2 - z_1 - \hat{\theta}^T (\phi_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} \phi_1) + \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} x_2 + \\ & \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} y_r - \beta_2 z_2 - \beta_2 z_2 (\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1})^2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \tau_2, \end{aligned} \quad (2.8)$$

其中 $\beta_2(x_1, x_2)$ 是正的光滑函数, 其增长速度大于或等于 ρ_1, ρ_2 的增长速度的平方。

取

$$\lambda_2 = \min \{\lambda_1, c_2\},$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -2\lambda_2 V_2 + \frac{l_2}{2} \|\theta\|^2 + \frac{|\psi_1|^2}{4\beta_1} + \\ & \frac{|\psi_2|^2}{4\beta_2} + \frac{|\psi_2|^2}{4\beta_2} + \hat{\theta}^T (\tau_2 - \dot{\hat{\theta}}) + \\ & z_2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} (\tau_2 - \dot{\hat{\theta}}) + z_2 z_3. \end{aligned} \quad (2.9)$$

第 i 步 ($3 \leq i \leq n-1$):

此时有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i-1} \leq & -2\lambda_{i-1} V_{i-1} + \frac{l_i}{2} \|\theta\|^2 + \\ & \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=1}^k \frac{|\psi_j|^2}{4\beta_k} + \hat{\theta}^T (\tau_{i-1} - \dot{\hat{\theta}}) + \\ & \sum_{j=2}^{i-1} z_j \frac{\partial \alpha_{j-1}}{\partial \hat{\theta}} (\tau_{i-1} - \dot{\hat{\theta}}) + z_{i-1} z_i. \end{aligned} \quad (2.10)$$

引入变量 $z_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i$, 并取 $V_i = V_{i-1} +$

$\frac{1}{2} z_i^2$, 对 V_i 求导得:

$$\dot{V}_i \leq -2\lambda_{i-1} V_{i-1} + \frac{l_i}{2} \|\theta\|^2 + \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{j=1}^k \frac{|\psi_j|^2}{4\beta_k} +$$

$$\begin{aligned}
& \hat{\theta}^T(\tau_{i-1} - \hat{\theta}) + \hat{\theta}^T(\phi_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j} \phi_j) z_i + \\
& \sum_{j=2}^{i-1} z_j \frac{\partial a_{i-1}}{\partial \theta} (\tau_{i-1} - \hat{\theta}) + \\
& z_j(z_{i-1} + z_{i+1} + \alpha_i + \hat{\theta}^T(\phi_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j} \phi_j) - \\
& \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j} x_{j+1} - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial y_r^{(j)}} y_r^{(j+1)} + \\
& \phi_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j} \phi_j - \frac{\partial a_{i-1}}{\partial \theta} \hat{\theta}) \}. \quad (2.11)
\end{aligned}$$

取

$$\tau_i = \tau_{i-1} + (\phi_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j} \phi_j) z_i, \quad (2.12)$$

并取

$$\begin{aligned}
\alpha_i = & -c_i z_i - z_{i-1} - \hat{\theta}^T(\phi_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j} \phi_j) + \\
& \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j} x_{j+1} + \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial y_r^{(j)}} y_r^{(j+1)} - \\
& \beta_i z_i - \beta_i \sum_{j=1}^{i-1} (\frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j})^2 + z_i(\phi_i - \\
& \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial a_{i-1}}{\partial x_j} \phi_j) \sum_{j=2}^{i-1} z_j \frac{\partial a_{i-1}}{\partial \theta} + \frac{\partial a_{i-1}}{\partial \theta} \tau_i. \quad (2.13)
\end{aligned}$$

其中 $\beta_i(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 是正的光滑函数, 其增长速度大于或等于 $\rho_j (1 \leq j \leq i)$ 的增长速度的平方.

取 $\lambda_i = \min\{\lambda_{i-1}, c_i\}$, 则

$$\begin{aligned}
\dot{V}_i \leq & -2\lambda_i V_i + \frac{l_1}{2} \|\theta\|^2 + \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^k \frac{|\phi_j|^2}{4\beta_k} + \\
& \sum_{j=2}^i z_j \frac{\partial a_{i-1}}{\partial \theta} (\tau_i - \hat{\theta}) + z_i z_{i+1} + \hat{\theta}^T(\tau_i - \hat{\theta}). \quad (2.14)
\end{aligned}$$

第 i 步:

此时有

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{n-1} \leq & -2\lambda_{n-1} V_{n-1} + \frac{l_1}{2} \|\theta\|^2 + \\
& \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=1}^k \frac{|\phi_j|^2}{4\beta_k} + \hat{\theta}^T(\tau_{n-1} - \hat{\theta}) + \\
& \sum_{j=2}^{n-1} z_j \frac{\partial a_{j-1}}{\partial \theta} (\tau_{n-1} - \hat{\theta}) + z_{n-1} z_n. \quad (2.15)
\end{aligned}$$

取

$$V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2} z_n^2,$$

对 V_n 求得:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_n \leq & -2\lambda_{n-1} V_{n-1} + \frac{l_1}{2} \|\theta\|^2 + \\
& \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=1}^k \frac{|\phi_j|^2}{4\beta_k} + \hat{\theta}^T[(\phi_n - \\
& \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j) z_n + \tau_{n-1} - \hat{\theta}] + \\
& z_n[z_{n-1} + \phi_0 + \beta_0 u + \hat{\theta}^T(\phi_n - \\
& \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j) - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j} x_{j+1} - \\
& \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial y_r^{(j)}} y_r^{(j+1)} + \\
& \phi_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j - \frac{\partial a_{n-1}}{\partial \theta} \hat{\theta}] + \\
& \sum_{j=2}^{n-1} z_j \frac{\partial a_{j-1}}{\partial \theta} (\tau_{n-1} - \hat{\theta}). \quad (2.16)
\end{aligned}$$

此时控制 u 出现在 $\dot{V}_n$ 中, 下面来设计控制 u 使 $(z_1, z_2, \dots, z_n, \hat{\theta})$ 系统稳定.

取调节律 $\dot{\hat{\theta}} = \tau_n$, 其中

$$\tau_n = \tau_{n-1} + (\phi_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j) z_n. \quad (2.17)$$

由于对 $\forall x \in \mathbb{R}^n, \beta_0(x) \neq 0$, 所以可取如下控制律

$$\begin{aligned}
u = & \frac{1}{\beta_0} [-c_n z_n - z_{n-1} - \phi_0 - \\
& \hat{\theta}^T(\phi_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j) + \\
& \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j} x_{j+1} + \sum_{j=0}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial y_r^{(j)}} y_r^{(j+1)} - \\
& \beta_n z_n [1 + \sum_{j=1}^{n-1} (\frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j})^2] + \frac{\partial a_{n-1}}{\partial \theta} \tau_n + \\
& z_n(\phi_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial a_{n-1}}{\partial x_j} \phi_j) \sum_{j=2}^{n-1} (\frac{\partial a_{j-1}}{\partial \theta} z_j)]. \quad (2.18)
\end{aligned}$$

其中 $\beta_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是正的光滑函数, 其增长速度大于或等于 $\rho_j (1 \leq j \leq n)$ 的增长速度的平方. 则

$$\dot{V}_n \leq -2\lambda_{n-1} V_{n-1} + \frac{l_1}{2} \|\theta\|^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{|\phi_j|^2}{4\beta_k} - c_n z_n^2.$$

由 θ 为常参数及 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 的选择知, 存在正常数

M , 使 $\frac{l_1}{2} \|\theta\|^2 + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{|\phi_j|^2}{4\beta_k} \leq M$. 取 $\lambda_n = \min\{\lambda_{n-1}, c_n\}$, 则

$$\dot{V}_n \leq -2\lambda_n V_n + M. \quad (2.19)$$

至此完成了自适应控制器的设计, 控制器的具体形式由(2.18)给出.

注 1 与文献[3]不同,由于本文对参数进行非过参数估计,所以只在第一步中取调节律时加上一项 $-l_1\dot{\theta}$,并在每一步递推中,本文都在 α_i 中引入了一项 $z_i(\phi_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} \phi_j) \sum_{j=2}^{i-1} z_j \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \theta}$,而[3]中没有这一项,这一修改对全局稳定性结果的证明是至关重要的.由于系统存在不正确扰动,在每一步递推中,本文都在 α_i 中引入了可以对付由 $\phi_i(x, t)$ 带来的有界和无界项的 $-\beta \tilde{x}_i - \beta \tilde{x}_i \sum_{j=1}^{i-1} (\frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j})^2$,又由于本文中对不确定性的要求不高,仅需知道其上界函数的非线性增长速度即可,所以本文设计的控制器适用范围比[3]要广得多.

3 稳定性分析(Stability analysis)

定理 在假设 A2.1) ~ A2.3)下,将上节设计的控制器(2.18)与参数自适应律(2.17)构成的自适应控制器应用于系统(2.1),则闭环系统所有信号全局有界,且

$$|y - y_r| \leq \sqrt{2V(0)} e^{-\lambda_n t} + \sqrt{\frac{M}{\lambda_n}}. \quad (3.1)$$

证 略.

注 2 本定理的条件意味着 $\phi_i(x, t) (1 \leq i \leq n)$ 与 $x_{i+1}, \dots, x_n, t$ 无关,或者说即使有关,但其中与 $x_{i+1}, \dots, x_n, t$ 有关的那部分有界.由于 $\beta_i (1 \leq i \leq n)$ 的选择可以很多,所以适当选择 $\beta_i (1 \leq i \leq n)$ 可以较少的控制能量获得更好的控制效果.

4 例子仿真(Simulation example)

考虑如下系统的跟踪问题

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \theta x_1^2 + \eta(t)x_1 \sin(x_2) + d_1(t), \\ \dot{x}_2 = u, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (4.1)$$

其中 $\eta(t)$ 是有界时变参数, $d_1(t)$ 为有界扰动,

$$\phi_1(x, t) = \eta(t)x_1 \sin(x_2) + d_1(t)$$

为系统的不确定性.

因为 $\eta(t), d_1(t)$ 有界,所以存在 $\rho(x_1)$,使得 $|\phi_1(x, t)| \leq \rho(x_1)$.

仿真是对 $\theta = 2, d_1(t) = 0.5\sin(t), \eta(t) = 0.5\cos(t)$ 的系统做的. 仿真中参考信号为 $y_r = \sin(t)$, 正光滑函数 β_1 和 β_2 取为 $\beta_1 = \beta_2 = 10e^{x_1^2}, c_1 = c_2 = l_1 = 2$, 状态初值取为 $x_1(0) = 0.5, x_2(0) = 0.5$, 参数初值取为 $\theta(0) = 2$.

仿真结果由图 1~图 4 给出:

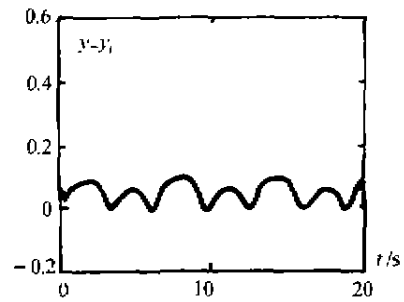


图 1 跟踪误差

Fig. 1 Tracking error

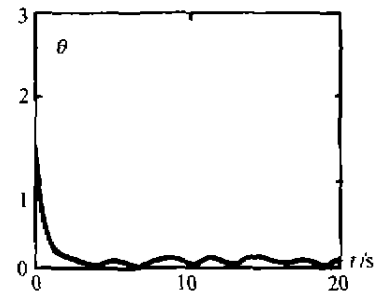


图 2 参数估计

Fig. 2 Parameter estimate

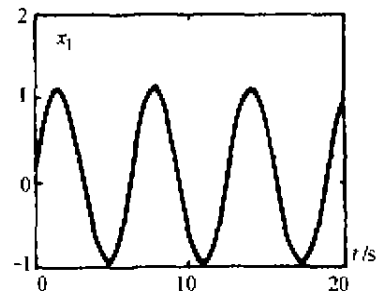


图 3 状态 x_1

Fig. 3 State variable x_1

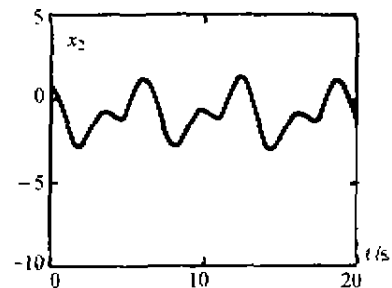


图 4 状态 x_2

Fig. 4 State variable x_2

从仿真图可以看出,采用本文的设计方法可获得良好的控制效果.

5 结束语(Conclusion)

本文针对一类不确定非线性系统设计出一种新的非过参数鲁棒自适应控制器.它只需知道不确定性部分的上界函数的增长速度,就可以保证闭环系统所有信号全局有界而且有很好的跟踪性能.仿真结果表明了本文所给方案的有效性.如何将本文结

果推广到输出反馈情形,是下一步的研究课题.

参考文献(References)

- [1] Kanellakopoulos I, Kokotovic P V and Morse A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems[J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1991, AC-36(11):1241-1252
- [2] Krstic M, Kanellakopoulos I and Kokotovic P V. Adaptive control without overparametrization[J]. Systems and Control Letters, 1992, 19(1):177-185
- [3] 陈卫田,王秀红,李继峰.一类具有有界扰动的非线性系统的自适应控制[J].上海交通大学学报,1996,30(1):46-52

本文作者简介

王翠德 1971年生,1997年于曲阜师范大学自动化研究所获硕士学位.主要研究方向为非线性系统的鲁棒自适应控制及模糊变结构控制理论与应用.

陈卫田 1967年生,于1996年获上海交通大学博士学位,现任曲阜师范大学自动化研究所教授.主要研究方向为不确定非线性系统的自适应控制与鲁棒控制.

魏雪玲 1970年生,曲阜师范大学自动化研究所硕士研究生.主要研究方向为非线性系统的鲁棒自适应控制及模糊控制理论与应用.

初学尊 1939年生,曲阜师范大学自动化研究所所长、教授.发表论文40余篇,其中12篇发表于国内外主要学术刊物,主要研究方向为智能控制与自适应控制.

(上接第243页)

参考文献(References)

- [1] 李清泉.自适应控制系统理论、设计与应用[M].北京:科学出版社,1990,389-400
- [2] 连家创,刘宏民.板形板厚控制[M].北京:兵器工业出版社,1996
- [3] 方一鸣,王洪瑞等.渐消记忆递推辨识实现的木材进锯自校正控制系统[J].控制理论与应用,1994,11(4):464-471
- [4] 古德温 G C,孙贵生著.自适应滤波、预测与控制[M].北京:科学出版社,1992,119-121

- [5] 方一鸣等.STD工控机在可逆冷轧机厚控系统中的应用[J].冶金自动化,1998,22(4):16-18

本文作者简介

方一鸣 1965年生,燕山大学自动化系副教授、系副主任.主要研究领域为自适应控制,变结构控制,计算机控制等.

焦晓红 女,1966年生,燕山大学自动化系副教授.主要从事自适应控制,变结构控制等理论研究工作.

王益群 1938年生,博士生导师,燕山大学校长.主要从事液压伺服系统的智能控制,轧机板厚控制等方面的研究.