第 26 卷 第 6 期
2006 年 11 月

长安大学学报(自然科学版)
Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)

Vol. 26 No. 6
Nov. 2006

文章编号:1671-8879(2006)06-0102-04

一类非线性系统具有 L_2-增益的鲁棒自适应控制

闫茂德，贺昱曜，吴青云
(长安大学 信息工程学院，陕西 西安 710064)

摘　要：针对一类含有未知参数和干扰的不确定非线性系统，提出了一种具有 L_2-增益的鲁棒自适应控制方法。该方法结合 L_2-增益鲁棒控制和非线性阻尼技术，基于 Lyapunov 函数反演设计方法设计了状态反馈自适应控制器，实现了不确定非线性系统的鲁棒输出调节。该控制器不仅把常规自适应控制设计的参数重复估计问题简化为对未知干扰的抑制，而且使得系统从干扰输入到可控输出的 L_2-增益小于等于给定的值 γ。仿真结果表明了所设计控制器的正确性和有效性。

关键词：控制工程；鲁棒自适应控制；L_2-增益；不确定非线性系统；反演设计

中图分类号：TP273.2　　　**文献标识码**：A

Adaptive robust control with L_2-gain for a class of uncertain nonlinear systems

YAN Mao-de, HE Yu-yao, WU Qing-yun
(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to deal with the mismatched unknown parameters and disturbance, this paper proposes an adaptive robust controller with L_2-gain for a class of uncertain nonlinear systems. By combining robust L_2-gain control stragtegy with nonlinear damp technology, a backstepping design Lyapunov-based approach is developed to construct the adaptive state feedback controller explicitly, and realizes the robust output adjustment even in the presence of mismatched unknown parameters and bounded disturbances. The new controller not only employs nonlinear damp term to eliminate the unknown disturbance and avoids the overparametrization in traditional adaptive controller, but also makes the L_2-gain from the disturbance input to the controlled output have less than or equal to a prescribed index γ. Simulation results are provided to demonstrate the correctness and flexibility of the controller. 1 fig, 8 refs.

Key words: control engineering; adaptive robust control; L_2-gain; uncertain nonlinear systems; backstepping design

0　引　言

近年来，不确定非线性系统的自适应控制得到了广泛的研究。Kanellakopoulos 等人[1]首次提出了自适应反演(Backstepping)设计方法，它为很好地处理非匹配条件的不确定性问题提供了系统的设计理论。反演设计方法已经发展成为非线性控制中一种重要的设计方法，它适用于可状态反馈线性化

收稿日期：2005-03-16
基金项目：国家自然科学基金项目(60472022)；陕西省自然科学基金项目(2006F03)
作者简介：闫茂德(1974-)，男，陕西澄城人，副教授，博士后.

的一大类系统。稍后，LI Ya-hui 等人[2-3]融合神经网络、变结构等控制算法，把自适应反演设计方法推广到更复杂的非线性系统，并设计了高性能的自适应控制器，允许系统存在非匹配未知参数的同时，也处理非参数化的匹配不确定性和未知扰动，使系统阶次大大降低，增强了控制系统鲁棒性。但该控制器存在设计复杂、计算膨胀等缺陷。随后，文献[4-5]利用反演设计和 L_2-增益控制相结合，设计的控制器对非匹配未知干扰具有鲁棒稳定性，避免了求解 Hamilton-Jacobi-Issacs 不等式。但该控制器没有考虑系统中存在的非匹配非参数不确定性。本文针对同时存在非匹配未知干扰和不确定性的非线性系统，结合了状态参考自适应控制和 L_2-增益鲁棒控制的优点，提出了一种新的具有 L_2-增益的鲁棒自适应控制器。其主要特点是在状态参考反演设计的每一步引入 L_2-增益鲁棒控制和非线性阻尼技术抵消非匹配未知干扰和非参数不确定性的影响，增强了控制系统鲁棒性。最后给出仿真算例，仿真结果验证了控制器设计方法的有效性和正确性[6]。

1　问题描述

考虑如下不确定性非线性系统

$$\begin{cases}\dot{x}_i = f_i(x_1,\cdots,x_{i+1}) + \boldsymbol{\varphi}_i^{\mathrm{T}}(x_1,\cdots,x_i)\boldsymbol{\theta} + \eta_i(x,t) \\ \qquad 1 \leqslant i \leqslant n-1 \\ \dot{x}_n = f_n(x) + \boldsymbol{\varphi}_n^{\mathrm{T}}(x)\boldsymbol{\theta} + [\boldsymbol{g}_0(x) + \boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)\boldsymbol{b}]u + \\ \qquad \eta_n(x,t) \\ y = x_1\end{cases} \tag{1}$$

式中：$x\in \boldsymbol{R}^n$ 为可测状态向量；u、$y\in \boldsymbol{R}$ 分别为系统的输入和输出；$\boldsymbol{\varphi}_i(x_1,\cdots,x_{i+1})(1\leqslant i\leqslant n)$ 和 $\boldsymbol{g}(x)$ 为已知光滑非线性函数向量；$\boldsymbol{\theta}=(\theta_1,\cdots,\theta_p)\in \boldsymbol{L}_2(0,\infty)$ 和 $\boldsymbol{b}=[b_1,\cdots,b_q]^{\mathrm{T}}\in \boldsymbol{R}^q$ 分别为未知干扰和参数向量；f_n 和 $\boldsymbol{g}_0(x)$ 为已知非线性函数；$\eta_i(x_1,\cdots,x_{i+1})(1\leqslant i\leqslant n)$ 是非参数不确定性项。对上述非线性系统作如下假设：

假设 1　存在已知平滑函数集 $h_i(x_1,\cdots,x_i)$，$i=1,2,\cdots,n-1$，使得

$$|\eta_i(x_1,\cdots,x_i)|\leqslant h_i(x_1,\cdots,x_i),i=1,2,\cdots,n-1$$

假设 2　$|\boldsymbol{g}_0(x)+\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)\hat{\boldsymbol{b}}|>0$，其中 $\hat{b}$ 是未知参数 b 的估计值，$\tilde{b}=b-\hat{b}$ 是参数估计误差。

定义 1[7]　令 $\gamma\geqslant 0$，如果系统式(1)对所有的 $T\geqslant 0$ 和所有的 $\boldsymbol{\theta}\in \boldsymbol{L}_2(0,T)$，满足

$$\int_0^T \| y(t) \|^2 \mathrm{d}t \leqslant \gamma^2 \int_0^T \| \boldsymbol{\theta} \|^2 \mathrm{d}t + \overline{N} \tag{2}$$

式中：$\overline{N}$ 为任一大于等于 0 的有限常数，那么就称系统式(1)具有 L_2-增益 $\leqslant\gamma$。

本文的目的是设计合适的控制器，实现系统式(1)的输出 $y=x_1$ 对任意给定值 y_d 的自适应调节。

2　L_2-增益的鲁棒自适应控制器设计

在控制器设计过程中对每个状态引入参考状态的概念，$x_i(1\leqslant i\leqslant n)$ 的参考状态取为 $x_{ir}(1\leqslant i\leqslant n)$，其中 $x_{1r}=y_d$，$x_{ir}(i=2,\cdots,n)$ 将在后面进行设计。具有 L_2-增益的鲁棒自适应控制器设计步骤为：

步骤 1　令 $z_1=x_1-y_d$，对 z_1 求时间导数得

$$\dot{z}_1 = f_1 + \boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta} + \eta_1(x,t) \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{\omega}_1=\boldsymbol{\varphi}_1(x_1)$。选择 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 \tag{4}$$

对 Lyapunov 函数求时间导数得

$$\dot{V}_1 = z_1(f_1(x_1,x_2) + \boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta} + \eta_1(x,t)) \tag{5}$$

引入非线性阻尼项“$-\dfrac{z_1h_1^2}{2\varepsilon}$”抵消不确定项 $\eta_1(x_1,t)$ 的影响，ε 为任意小的正数。取 x_2 的参考状态 x_{2r} 为

$$x_{2r} = -W_1 + x_2 - c_1z_1 - \frac{1}{4}kz_1 \cdot (1+\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_1) - \frac{z_1h_1^2}{2\varepsilon} \tag{6}$$

式中：$W_1=f_1$；c_1 为设计的正常数；$k>0$。定义新变量 $z_2=x_2-x_{2r}$，则

$$\dot{z}_1 = -c_1z_1 + z_2 + \boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta} + \eta_1(x,t) - \frac{1}{4}kz_1(1+\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_1) - \frac{z_1h_1^2}{2\varepsilon} \tag{7}$$

根据不等式 $a^2+b^2\geqslant 2ab$，有

$$\frac{z_1h_1^2}{2\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{2} \geqslant |z_1| h_1 \geqslant z_1\eta_1(x,t) \tag{8}$$

对 Lyapunov 函数求时间导数得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= z_1[-c_1z_1+z_2+\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}-\frac{1}{4}kz_1 \cdot (1+\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_1)+\eta_1(x,t)-\frac{z_1h_1^2}{2\varepsilon}] = \\ &-c_1z_1-k(\frac{1}{2}z_1\sqrt{1+\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_1} - \frac{\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}}{k\sqrt{1+\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_1}})^2 + \frac{(\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}_1)^2}{k(1+\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_1)} + z_1z_2 + \\ &\frac{\varepsilon}{2} \leqslant -c_1z_1^2 + z_1z_2 + \frac{1}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2 + \frac{\varepsilon}{2}\end{aligned} \tag{9}$$

步骤 2　对 z_2 求时间导数并整理得

$$\dot{z}_2 = W_2 + \boldsymbol{\theta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_2 + \bar{\eta}_2 \tag{10}$$

式中：$W_2 = \sum_{j=1}^{2}\frac{\partial z_2}{\partial x_j}f_j$，$\boldsymbol{\omega}_2 = \sum_{j=1}^{2}\frac{\partial z_2}{\partial x_j}\boldsymbol{\varphi}_j$，

$\bar{\eta}_2=\sum_{j=1}^{2}\frac{\partial z_2}{\partial x_j}\eta_j$。根据有界性假设 1,能找到光滑函数 $\bar{h}_2(x_1,x_2)$,使得 $|\bar{\eta}_2|\leqslant\bar{h}_2(x_1,x_2)$。取 x_3 的参考状态 x_{3r} 为

$$x_{3r}=-c_2z_2-z_1+x_3-\frac{1}{4}kz_2\cdot(1+\boldsymbol{\omega}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_2)-\frac{z_2\bar{h}_2^2}{2\varepsilon}\tag{11}$$

式中:c_2 是设计的正常数。引入新变量 $z_3=x_3-x_{3r}$,则

$$\dot{z}_2=-z_1-c_2z_2+z_3+\bar{\eta}_2-\frac{1}{4}kz_2\cdot(1+\boldsymbol{\omega}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_2)-\frac{z_2\bar{h}_2^2}{2\varepsilon}\tag{12}$$

选择 Lyapunov 函数为

$$V_2=V_1+\frac{1}{2}z_2^2\tag{13}$$

对 Lyapunov 函数 V_2 求时间导数得

$$\begin{aligned}\dot{V}_2\leqslant&-c_1z_1^2+z_1z_2+\frac{1}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2+\frac{\varepsilon}{2}+z_2\cdot\\&[-c_2z_2-z_1+z_3+\boldsymbol{\omega}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}-\frac{1}{4}kz_2\cdot\\&(1+\boldsymbol{\omega}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_2)+\bar{\eta}_2(x,t)-\frac{z_2\bar{h}_2^2}{2\varepsilon}]\leqslant\\&-c_1z_1^2-c_2z_2^2+z_2z_3+\frac{2}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2+\varepsilon\end{aligned}\tag{14}$$

步骤 i $(3\leqslant i\leqslant n-1)$ **此时有**

$$\dot{V}_{i-1}\leqslant-\sum_{j=1}^{i-1}c_jz_j^2+\frac{i-1}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2+z_{i-1}z_i+\frac{(i-1)\varepsilon}{2}\tag{15}$$

对 z_i 求时间导数并整理得

$$\dot{z}_i=W_i+\boldsymbol{\omega}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}+\bar{\eta}_i\tag{16}$$

式中:$W_i=\sum_{j=1}^{i}\frac{\partial z_i}{\partial x_j}f_j$;$\boldsymbol{\omega}_i=\sum_{j=1}^{i}\frac{\partial z_i}{\partial x_j}\boldsymbol{\varphi}_j$;

$\bar{\eta}_i=\sum_{j=1}^{i}\frac{\partial z_i}{\partial x_j}\eta_j$。根据有界性假设 1,能找到光滑函数 $\bar{h}_i(x_1,\cdots,x_i)$,使得 $|\bar{\eta}_i|\leqslant\bar{h}_i(x_1,\cdots,x_i)$。取 x_{i+1} 的参考状态 $x_{(i+1)r}$ 为

$$x_{(i+1)r}=-c_iz_i-z_{i-1}+x_{i+1}-\frac{1}{4}kz_i(1+\boldsymbol{\omega}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_i)-\frac{z_i\bar{h}_i^2}{2\varepsilon}\tag{17}$$

式中:c_i 为设计的正常数。

引入新变量 $z_{i+1}=x_{i+1}-x_{(i+1)r}$,则

$$\dot{z}_i=-z_{i-1}-c_iz_i+z_{i+1}+\bar{\eta}_i-\frac{1}{4}kz_i(1+\boldsymbol{\omega}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_i)-\frac{z_i\bar{h}_i^2}{2\varepsilon}\tag{18}$$

选择 Lyapunov 函数为

$$V_i=V_{i+1}+\frac{1}{2}z_i^2\tag{19}$$

对 Lyapunov 函数 V_i 求时间导数得

$$\begin{aligned}\dot{V}_i\leqslant&-\sum_{j=1}^{i-1}c_jz_j^2+\frac{i-1}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2+z_{i-1}z_i+\\&\frac{(i-1)\varepsilon}{2}+z_i[-z_{i-1}-c_iz_i+z_{i+1}+\bar{\eta}_i-\\&\frac{1}{4}kz_i(1+\boldsymbol{\omega}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_i)-\frac{z_i\bar{h}_i^2}{2\varepsilon}]\leqslant\\&-\sum_{j=1}^{i}c_jz_j^2+\frac{i}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2+z_{i+1}z_i+\frac{i\varepsilon}{2}\end{aligned}\tag{20}$$

步骤 n 此时有

$$\dot{V}_{n-1}\leqslant-\sum_{j=1}^{n-1}c_jz_j^2+\frac{n-1}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2+z_{n-1}z_n+\frac{(n-1)\varepsilon}{2}\tag{21}$$

式中:c_{n-1} 是设计的正常数。

对 z_n 求时间导数并整理得

$$\dot{z}_n=W_n+\boldsymbol{\omega}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}+\bar{\eta}_n(x,t)+\frac{\partial z_n}{\partial x_n}[(\boldsymbol{g}_0(x)+\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)\boldsymbol{b})u]\tag{22}$$

式中:$W_n=\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial z_n}{\partial x_j}f_j$;$\boldsymbol{\omega}_n=\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial z_n}{\partial x_j}\boldsymbol{\varphi}_j$;

$\bar{\eta}_n=\sum_{j=1}^{i}\frac{\partial z_n}{\partial x_j}\eta_j$。若在状态空间中原点的某个邻域 U 内满足 $\frac{\partial z_n}{\partial x_n}\neq0$,取鲁棒自适应控制律和参数自适应律分别为

$$u=\frac{-1}{(\partial z_n/\partial x_n)(\boldsymbol{g}_0+\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)\hat{\boldsymbol{b}})}[W_n+z_{n-1}+c_nz_n+\frac{1}{4}kz_n(1+\boldsymbol{\omega}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_n)-\frac{z_n\bar{h}_n^2}{2\varepsilon}]\tag{23}$$

$$W=\frac{-[W_n+z_{n-1}+c_nz_n+(z_n\bar{h}_n^2/2\varepsilon)+kz_n(1+\boldsymbol{\omega}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_n)]\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)/4}{(\boldsymbol{g}_0+\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)\hat{\boldsymbol{b}})}\tag{24}$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{b}}}=\boldsymbol{\Gamma}z_nW\tag{25}$$

定理 1 对非线性系统式(1),在满足假设 1、假设 2 的条件下,采用上述设计步骤得到的控制律式(23)和参数自适应律式(24)、式(25),可使系统具有 L_2-增益$\leqslant\gamma$,即

$$\int_0^T\|y(t)\|^2\mathrm{d}t\leqslant\gamma^2\int_0^T\|\boldsymbol{\theta}\|^2\mathrm{d}t+\bar{N}$$

其中,$\gamma=\sqrt{\frac{n}{k}}$ 和 $\bar{N}=V(0)+\frac{n\varepsilon T}{2}$ 是大于等于 0 的有限常数。

证：选择 Lyapunov 函数为

$$V = V_{n-1} + \frac{1}{2}z_n^2 + \frac{1}{2}(\boldsymbol{b}-\hat{\boldsymbol{b}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}^{-1}(\boldsymbol{b}-\hat{\boldsymbol{b}}) \qquad (26)$$

其中，$\boldsymbol{\Gamma}$ 为正定矩阵。对 Lyapunov 函数 V 求时间导数，并考虑假设 2 和式(21)、式(22)有

$$\dot{V}_i \leqslant -\sum_{j=1}^{n-1} c_j z_j^2 + \frac{n-1}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2 + z_n z_{n-1} + \frac{(n-1)\varepsilon}{2} + z_n\Big[W_n + \boldsymbol{\omega}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta} + \bar{\eta}_n(x,t) + \frac{\partial z_n}{\partial x_n}(\boldsymbol{g}_0(x) + \boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)\boldsymbol{b})u\Big] - (\boldsymbol{b}-\hat{\boldsymbol{b}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{b}}} \qquad (27)$$

把式(23)代入并整理得

$$\dot{V}_i \leqslant -\sum_{j=1}^{n} c_j z_j^2 + \frac{n}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2 + \frac{n\varepsilon}{2} - (\boldsymbol{b}-\hat{\boldsymbol{b}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{b}}} + z_n \cdot \frac{-[W_n + z_{n-1} + c_n z_n + k z_n(1+\boldsymbol{\omega}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_n)/4 - z_n\bar{h}_n^2/2\varepsilon]\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)}{\boldsymbol{g}_0(x) + \boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)\hat{\boldsymbol{b}}} \cdot (\boldsymbol{b}-\hat{\boldsymbol{b}}) \leqslant -\sum_{j=1}^{n} c_j z_j^2 + \frac{n}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2 + \frac{n\varepsilon}{2} - (\boldsymbol{b}-\hat{\boldsymbol{b}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{b}}} + z_n W^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{b}-\hat{\boldsymbol{b}}) \qquad (28)$$

把式(25)代入式(28)后得

$$\dot{V}_i \leqslant -\sum_{j=1}^{n} c_j z_j^2 + \frac{n}{k}\|\boldsymbol{\theta}\|^2 + \frac{n\varepsilon}{2} \qquad (29)$$

对式(29)两边在$(0,T)$时间内积分，并考虑 $y=z_1$ 和 γ 的定义可得

$$\int_0^T \|y(t)\|^2 \mathrm{d}t \leqslant \gamma^2\int_0^T \|\boldsymbol{\theta}\|^2 \mathrm{d}t + \bar{N} \qquad (30)$$

其中，$\gamma=\sqrt{\dfrac{n}{k}}$和 $\bar{N}=V(0)+\dfrac{n\varepsilon T}{2}$是大于等于 0 的有限常数。可见系统具有 L_2-增益$\leqslant\gamma$，证毕。

3　仿真算例

考虑如下不确定非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1,x_2) + \boldsymbol{\varphi}_1^{\mathrm{T}}(x_1,x_2)\boldsymbol{\theta} + \eta_1(x,t) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1,x_2) + \boldsymbol{\varphi}_2^{\mathrm{T}}(x_1,x_2)\boldsymbol{\theta} + [\boldsymbol{g}_0(x) + \\ \qquad \boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(x)\boldsymbol{b}]u + \eta_2(x,t) \\ y = x_1 \end{cases}$$

式中：$f_1=(1+x_1^2)x_2$；$\boldsymbol{\varphi}_1=(x_1+0.3)^2x_2$；$\boldsymbol{\varphi}_2=0$；$f_2(x)=x_1\sin x_2+x_2$；$\boldsymbol{g}_0(x)=1$；$\boldsymbol{g}(x)=x_1x_2^2$；干扰 $\boldsymbol{\theta}$、参数 b、非参数不确定性 $\eta_i(x,t)$，$i=1,2$ 未知，仿真验证时假设 $\boldsymbol{\theta}=2\mathrm{e}^{-0.1t}$，$\boldsymbol{b}=5$，$\eta_1(x,t)=2\sin x_1\cdot\cos t$，$\eta_2(x,t)=x_1\sin x_2\sin t$。控制任务是调节 $y=x_1$到 $y_d=2$，按照前面给出的方法和步骤设计控制律和参数自适应律。取控制器设计参数 $c_1=2$，$c_2=2$，$\varepsilon=0.02$，$\boldsymbol{\Gamma}=5$，$k=10$，在初始状态 $x=[0,0]$和 $\hat{\boldsymbol{b}}(0)=0$ 的情况下对系统进行了仿真，所得结果如图 1 所示。

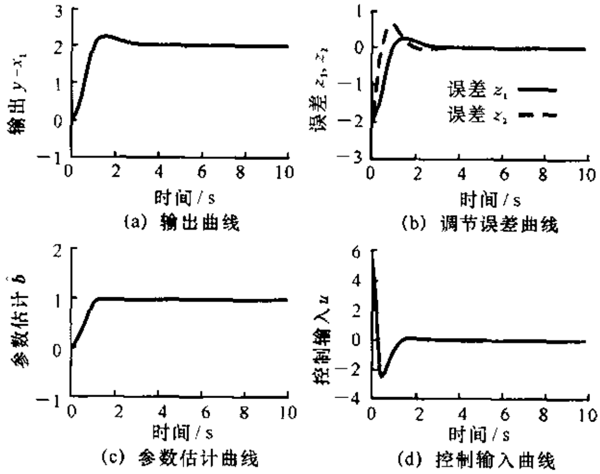

图 1　仿真结果曲线

从仿真结果可以看出，系统在不到 3 s 的时间内即进入稳态，参数估计收敛，调节误差收敛到 0，控制器对系统的非匹配未知干扰和非参数不确定性具有鲁棒性[7-8]。仿真结果证明了具有 L_2-增益的鲁棒自适应控制律的正确性和有效性。

4　结　语

本文利用所设计的参考状态和鲁棒控制技术，提出了一种具有 L_2-增益的鲁棒自适应控制器。该控制器将文献[1]中的自适应反演设计方法推广到更广泛的不确定非线性系统，克服了自适应反演(Backstepping)控制适用范围狭窄和鲁棒性差等问题。最后需要指出，如何把状态参考自适应反演控制思想和鲁棒控制思想更有机地融合起来，放宽假定条件，去解决不确定非线性系统的控制问题，将有待于进一步研究。

参考文献：

References：

[1]　Kristic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P V. Nonlinear and adaptive control design[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1995.

[2]　LI Ya-hui, QIANG Sheng, ZHUANG Xian-yi, et al. Robust and adaptive backstepping control for nonlinear systems using RBF neural networks[J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 2004, 15(3): 693-702.

[3]　Koshkouei A J, Zinober A S I. Adaptive backstepping control of nonlinear systems with unmatched uncertainty[C]//Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney, 2000.

（下转 110 页）

点应掌握撰写基本原则,突出项目创新点及核心内容。查新点应少而精,不要将一般的技术特征列为查新点。

(2)项目查新中常见的有 3 类:立项查新、成果查新和专利查新。科技人员应该熟悉各类查新项目,掌握科技要点撰写方法和提炼查新点的技巧。

(3)项目查新时科技要点的撰写及查新的点的提炼对科研项目的立项、评审和鉴定影响很大,应引起科技人员的高度重视。

参考文献:

References:

[1] 国家发计字[2000]544 号. 科技查新规范[S].
NSTC of the PRC, No544[2000]. The method of managing the science and technology novelty search[S].

[2] 国家科委第 19 号令(1994). 科学技术成果鉴定办法[S],1994.
NSTC of the PRC, No19[1994]. The method of identifing of scientiflc and technological achievement[S].

[3] 成 诚. 创新三题[EB/OL]. (2004-02-25). http://www.sipo.gov.cn/sipo/xwdt/jdlt/200402/t20040225_76301.htm.
CHENG Cheng. Three innorates topics[EB/OL]. (2004-02-25). http://www.sipo.gov.cn/sipo/xwdt/jdlt/200402/t20040225_76301.htm.

[4] 谢新洲,腾 跃. 科技查新手册[M]. 北京:科学技术文献出版社,2004.
XIE Xin-zhou, TENG Yue. The manual of managing the science and technology new document search[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Press, 2004.

[5] 罗玉中. 科技法制制度[EB/OL]. (2003-07-07). http://www.jcrb.com/zyw/n158/ca86941.htm.
LUO Yu-zhong. Technical laws and regulations system[EB/OL]. (2003-07-07). http://www.jcrb.com/zyw/n158/ca86941.htm.

[6] 《科技查新教程》编写组. 科技查新教程[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
The Composing Group of the Course of Managing the Science and Technology Novelty Search. The course of managing the science and technology novelty search[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2001.

(上接 105 页)

[4] 倪云峰, 刘 丁. 智能控制器在机器人机械手位置控制中的应用[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(3):108-110.
NI Yun-feng, LIU Ding. Designing and implement of intelligent controller in manipulator position control[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3):108-110.

[5] 闫茂德, 徐德民, 贺昱曜. 不确定非线性系统的状态参考自适应与 L_2-增益混合控制[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(4): 571-574.
YAN Mao-de, XU De-min, HE Yu-yao. A hybrid and robust state reference adaptive controller for nonlinear system with uncertainties[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2001, 19(4): 571-574.

[6] 陈 谋, 姜长生, 吴庆宪, 等. 一类不确定非线性系统的鲁棒自适应 L_2-增益控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(4): 351-355.
CHEN Mou, JIANG Chang-sheng, WU Qing-xian, et al. Adaptive robust L_2-gain control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(4): 351-355.

[7] 何国军, 蒋静坪. 一类非线性系统的自适应与 L_2-增益控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(2): 169-172.
HE Guo-jun, JIANG Jing-ping. Hybrid control of L_2-gain analysis incorporated with adaptive control for a class of nonlinear systems[J]. Control Theory and Application, 1999, 16(2):169-172.

[8] Van Der Schaft A J. L_2-gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state feedback H_∞ control[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1992, 37(6): 770-783.