

文章编号: 1001-0920(2004)08-0920-03

一类非线性激励器系统的鲁棒自适应跟踪

刘粉林, 罗军勇, 蔡延荣

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 考虑一类具有非线性激励器不确定系统的鲁棒跟踪问题, 其不确定性是部分已知的, 所构造的鲁棒自适应控制方案能确保系统的跟踪误差终极一致有界. 与已有文献结果相比, 未知参数估计的自适应律和控制器是连续的, 从而使得所提出的设计方案在实际控制问题中易实现, 且与具有线性激励器的系统一样具有较强的鲁棒性. 最后通过数值算例进一步说明了该设计方案是有效的.

关键词: 不确定系统; 鲁棒跟踪; 自适应控制; 非线性激励器; 终极一致有界

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Model-following adaptive robust control for a class of uncertain systems with nonlinear actuators

L IU Fen-lin, LUO Jun-yong, CA I Yan-rong

(Information Engineering Institute, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China
Correspondent: L IU Fen-lin, E-mail: liufenlin@vip.sina.com)

Abstract: The robust adaptive tracking problem for a class of uncertain systems with partially known nonlinear uncertainties and nonlinear actuators is discussed. The proposed adaptive robust controller guarantees the tracking error of the systems uniformly ultimately bounded, and makes systems with nonlinear actuators the same robust as those with linear actuators. In contrast to some results in the control literature, the adaptive laws for updating the estimate values of the unknown parameters and the proposed controller are continuous. Moreover, the proposed adaptive control scheme can be easily implemented in practical control due to the continuity of the adaptive laws and the proposed controller. Finally, an illustrative example shows the utilization of the results.

Key words: uncertain systems; robust tracking; adaptive control; nonlinear actuators; uniformly ultimately bounded

1 引言

随着跟踪控制问题研究的深入, 已涌现出许多关于鲁棒跟踪和输出调节的研究结果^[1-5]. 文献[1]研究了时不变不确定线性系统的鲁棒渐近跟踪控制; 文献[2, 3]等运用 Lyapunov 函数方法和变结构原理, 分别讨论了具有结构不确定性的单输入单输出(SISO)和多输入多输出(MIMO)非线性系统的

鲁棒输出跟踪问题; 文献[4]等利用自适应控制方法研究了具有参数不确定性的非线性系统的鲁棒输出跟踪问题; 文献[5]给出了一类非线性系统输出调节可解的充要条件. 但他们的工作大都基于系统的激励器是线性的. 然而, 在实际系统中, 由于系统物理特性的限制, 激励器的非线性特性(如饱和函数和死区函数)及其影响是不能被忽视的(如液压伺服

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60374004); 河南省杰出青年基金资助项目(0412000200); 河南省高校杰出科研人才创新工程(2001CXKY008).

作者简介: 刘粉林(1964—), 男, 江苏溧阳人, 教授, 博士, 从事网络安全、系统结构和鲁棒控制等研究; 罗军勇(1964—), 男, 江西南昌人, 副教授, 从事网络安全、系统仿真等研究

阀、电动机等^[6]). 在设计控制器时, 若将实际系统当作线性激励器模型, 而忽视对激励器非线性特性的讨论, 则所设计的控制器将严重降低预期闭环系统的性能, 甚至可能导致实际系统完全不稳定. 为此, 必须寻求一种有效的控制方法. 目前, 这类系统控制问题已引起了一些控制理论工作者的关注^[5,7-9].

本文考虑了一类具有非线性激励器不确定系统的鲁棒跟踪问题, 通过设计自适应控制器确保受控系统跟踪参考模型, 并使这类系统与具有线性激励器系统一样具有较强的鲁棒性. 最后用数例仿真验证了本文结论的正确性.

2 系统描述

考虑如下非线性激励器不确定系统:

$$\dot{x}(t) = Ax + B(\Phi u) + \xi(x, t), \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 和 $u \in R^m$ 分别为系统的状态变量和控制输入; $\xi(x, t)$ 为系统的不确定性, 它是结构确定, 但参数不确定的; A 和 B 为具有相应维数的常值矩阵, 且有 $\Phi(0) = 0$. 这里假定对任意初始条件 $x(t_0) = x_0$ 和控制输入 $u(t)$, 方程(1) 存在唯一解.

本文要考虑的问题是, 对系统(1) 设计鲁棒自适应控制器, 确保受控系统的状态鲁棒跟踪参考模型的状态. 参考模型为

$$\dot{x}_m = A_m x_m, \quad (2)$$

其中 $x_m \in R^n$ 为系统(2) 的状态. 假定系统(2) 的状态有界. 这个假设是合理的, 因为系统要实现稳定跟踪, 并保持能量有界, 参考模型的状态必须有界, 即 A_m 是稳定矩阵.

为使系统(1) 跟踪模型(2), 需作如下假设:

假设 1 系统(1) 的状态矩阵 A 是 Hurwitz 稳定的.

假设 2 对于系统(1) 和欲跟踪模型(2), 存在矩阵 $H \in R^{m \times n}$, 使得

$$A_m - A = BH. \quad (3)$$

假设 3 假定系统(1) 的非线性激励 Φu 满足 $u^T \Phi u = hu^T u, h > 0$ (4)

假设 4 关于系统(1) 的不确定性 $\xi(x, t)$, 有 $\xi(x, t) = \rho^T(x, t) \theta^*$. (5)

其中: $\rho^T(\bullet) = (\rho_1(\bullet), \rho_2(\bullet), \dots, \rho_p(\bullet))^T$; $\theta^* = (\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_p^*)^T$; 对任意的 $\rho_i(x, t) > 0 (x \neq 0)$ 和 $\rho_i(x, t) = 0 (x = 0), i = 1, 2, \dots, p, \rho(x, t)$ 是已知函数向量, 关于 x 和 t 连续, 且局部一致有界; θ^* 是有界的未知参量, 其界的大小是未知的.

由假设 1 知, 存在正定矩阵 Q 使得

$$A^T P + PA = -Q \quad (6)$$

有正定解 P . 为论述方便, 引入误差变量 $e = x_m - x$, 则由式(1) 和(2) 以及假设 2 可得

$$\dot{e} = Ae + BHx_m - B(\Phi u) + \xi(x, t). \quad (7)$$

尽管模型(2) 的状态是有界的, 但此界对设计者而言可能是未知的, 为此令

$$\max |Hx_m| = w^*, \quad (8)$$

其中 w^* 是有界的.

3 鲁棒跟踪控制器设计

基于以上假设, 关于误差系统(7) 构造如下自适应鲁棒跟踪控制器:

$$u = \mathcal{Q}(t)B^T P e \quad (9)$$

其中

$$\mathcal{Q}(t) = \frac{1}{h} \left(\frac{\hat{w}^2(t)}{B^T P e w(t) + \epsilon_1} + \frac{(\rho^T(x, t) \hat{\theta}(t))^2}{B^T P e \rho^T(x, t) \hat{\theta}(t) + \epsilon_2} \right). \quad (10)$$

式中: 标量 ϵ_1, ϵ_2 大于零; $\mathcal{Q}(t)$ 中的参数 $\hat{w}(t), \hat{\theta}(t)$ 是不确定性 w^*, θ^* 的估计值; $\hat{w}(t), \hat{\theta}(t)$ 分别满足如下自适应律:

$$\dot{\hat{w}}(t) = -\delta_1 \hat{w}(t) + \gamma B^T P e, \quad (11)$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = -\delta_2 \Gamma \hat{\theta}(t) + B^T P e \Gamma \rho(x, t). \quad (12)$$

其中: 标量 δ_1, δ_2 和 γ 大于零; Γ 是正定矩阵; $w(t_0) = \hat{w}(t_0), \theta(t_0) = \hat{\theta}(t_0)$ 表示自适应变量 $\hat{w}(t), \hat{\theta}(t)$ 的初值, 它们是有限的; $\delta_1, \delta_2, \gamma, \Gamma, w(t_0)$ 和 $\theta(t_0)$ 均可看作设计参数.

另一方面, 令

$$\tilde{w}(t) = \hat{w}(t) - w^*, \quad (13)$$

$$\tilde{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta^*, \quad (14)$$

则自适应律(11) 和(12) 可改写为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{w}}(t) = & -\delta_1 \tilde{w}(t) + \gamma B^T P e - \delta_1 w^*, \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\theta}}(t) = & -\delta_2 \Gamma \tilde{\theta}(t) + B^T P e \Gamma \rho(x, t) - \delta_2 \Gamma \theta^*. \quad (16) \end{aligned}$$

综上所述, 可得如下结论:

定理 1 考虑误差系统(7) 及误差方程(15) 和(16) 满足假设 1~ 假设 4, 则误差系统(7) 及误差方程(15) 和(16) 的解 $(e, \tilde{w}, \tilde{\theta})(t, t_0, e(t_0), \tilde{w}(t_0), \tilde{\theta}(t_0))$ 是终极一致有界的.

证明略

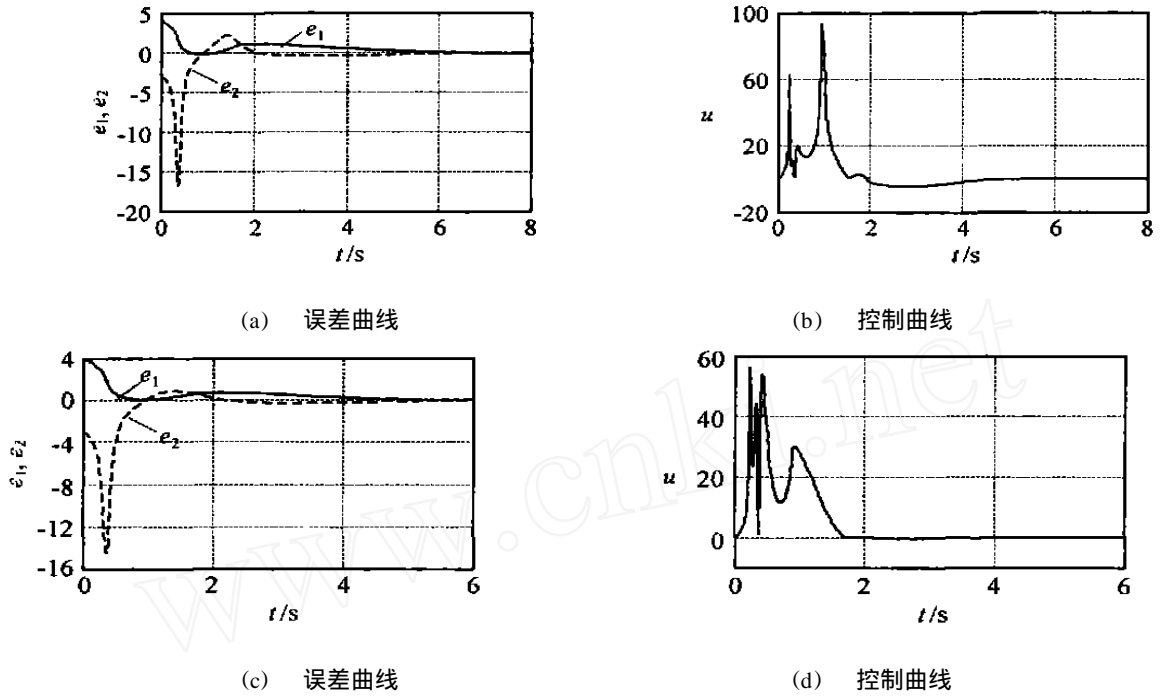


图1 仿真结果

4 仿真算例

考虑如下非线性激励器不确定系统:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\phi(u) + \theta(x_1 + x_2^2) \sin x_1). \quad (17)$$

其中

$$\phi(u) = \begin{cases} 0.5(e^{|u|} - 1) \operatorname{sign}(u), & |u| \leq 1.5, \\ (0.8|u| + 0.54) \operatorname{sign}(u) - 0.9 \sin((5|u| - 7.5) \operatorname{sign}(u)) e^{-0.125(|u| - 1.5)}, & |u| > 1.5 \end{cases}$$

参考模型为

$$\dot{x}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} x_m. \quad (18)$$

经验证, 系统(17)和(18)满足假设1~假设4. 由假设2, 取 $H = (1 \ 0)$; 由式(6), 取 $Q = I$, 则

$$P = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.25 \\ 0.25 & 0.125 \end{bmatrix}.$$

根据式(9)~(12)设计自适应鲁棒跟踪控制器, 取不确定参数 $\rho(x, t) = |(x_1 + x_2^2) \sin x_1|$, $\theta = -2$; 系统初值 $x(0) = (-2, 2)^T$, $x_m(0) = (2, -1)^T$. 仿真结果如图1所示. 图1(a)和图1(b)显示了自适应设计参数取 $\delta_1 = 0.05$, $\delta_2 = 0.01$, $\gamma = 0.01$, $\Gamma = 0.02$ 和控制设计参数取 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.01$ 时的跟踪误差曲线和控制曲线. 图1(c)和图1(d)显示了自适应设计参数取 $\delta_1 = 0.2$, $\delta_2 = 0.1$, $\gamma = \Gamma =$

0.1 和控制设计参数取 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.1$ 时的跟踪误差曲线和控制曲线. 其中: 实线表示 $e_1 = x_{m1} - x_1$, 虚线表示 $e_2 = x_{m2} - x_2$.

5 结论

本文考虑了一类具有非线性激励器不确定系统的鲁棒跟踪问题. 通过设计自适应控制器确保受控系统跟踪参考模型, 跟踪误差可通过调节控制器的设计参数来满足设计要求. 从本文的控制设计特点和结论可知, 这类系统与具有线性激励器系统一样具有较强的鲁棒性, 线性激励器系统的类似结果可作为本文的特例.

参考文献(References):

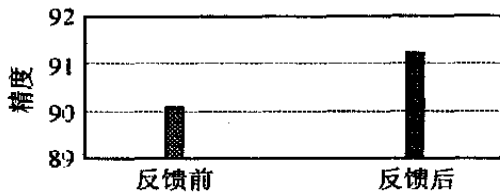
[1] Hopp T H, Schmitendorf W E. Design of a linear controller for robust tracking and model following[J]. *A S M E J on Dynamic Systems Measurement and Control*, 1990, 112(4): 552-558.

[2] Li Z, Chai T Y, Wen C, et al. Robust output tracking control for nonlinear uncertain systems[J]. *System Control Letters*, 1995, 25(1): 53-61.

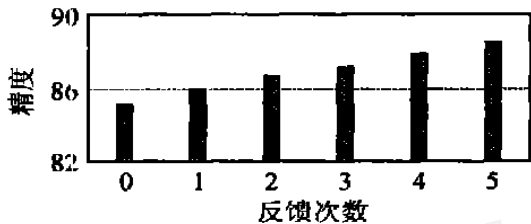
[3] Emali H, Olgac N. Robust output tracking control of nonlinear MIMO systems via sliding mode technique[J]. *Automatica*, 1992, 28(2): 145-151.

[4] Li Z, Krstic M. Optimal design of adaptive tracking controllers for nonlinear systems[J]. *Automatica*, 1997, 33(10): 1459-1473.

(下转第 930 页)



(a) 训练文档(10% 干扰数据) 反馈学习前后对比



(b) 非训练文档分类反馈数据集实验结果

图1 反馈实验结果

训练文档的反馈实验中,经5次反馈学习后,系统的分类精度从85.143%提高到88.429%,分别提高了3~4个百分点,反馈学习效果明显,而且从非训练文档的实验结果可以看出,随着反馈的进行,分类性能逐步提高

2) 反馈训练具有反馈学习数据少的优点

3) 由于反馈学习需要人工给出相应的反馈类别,在文档本身存在较强兼类特性的情况下,可能会出现人工分类标准与实际训练样本标准不一致的情况,造成反馈学习后的某个类别分类性能暂时波动,但这不影响反馈学习对整体分类性能的提高,同时也说明了学习样本质量对分类性能影响的重要性

总之,从对基于SVM的文本分类的研究可以看出,反馈学习是文本分类的一种有效的学习方法,可以通过较小的反馈文档数量,实现较大的分类性能提高,具有反馈样本少,效果提高明显的优点。因

此,该算法是进行文本分类研究与应用的有效方法

参考文献(References):

- [1] Vapnik V. *The Nature of Statistical Learning Theory* [M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [2] O Suna E, Freund R, Girosi T. Training support vector machines: An application to face detection[A]. *Proc of the IEEE Int Conf on Computer Vision and Pattern Recognition*[C]. New York, 1997. 130-137.
- [3] Joachims T. Text categorization with support vector machines: Learning with many relevant features[A]. *Proc of the European Conf on Machine Learning* [C]. Berlin: Springer, 1998. 137-142.
- [4] Yang Yiming, Liu Xin. A re-examination of text categorization methods [A]. *Proc of ACM SIGIR Conf on Research and Development in Information Retrieval*[C]. Berkeley, 1999. 42-49.
- [5] Rocchio J J. Relevance feedback in information retrieval [A]. *The SMART Retrieval System Experiments in Automatic Document Processing* [C]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1971. 313-323.
- [6] Ide E. Relevance feedback in an automatic document retrieval system [R]. Ithaca, NY: Cornell University, 1969.
- [7] Salton G. *The SMART Retrieval System* [M]. Englewood Cliffs N J: Prentice Hall, Inc, 1971.
- [8] Cox I J, Miller M L, Omohundro S M, et al. Pichunter: Bayesian relevance feedback for image retrieval system [A]. *Int'l Conf on Pattern Recognition* [C]. Vienna, Austria, 1996. 361-369.
- [9] Lee Joon Ho. Combining the evidence of different relevance feedback methods for information retrieval [J]. *Information Processing & Management*, 1998, 34(6): 681-691.

(上接第922页)

- [5] Hsu Chih-Chin, Fong I-Kong. Ultimate boundedness control of linear systems with band-bounded nonlinear actuators and additive measurement noise [J]. *Systems & Control Letters*, 2001, 43(4): 329-326.
- [6] Truxal J G. *Control Engineers Handbook* [M]. New York: McGraw-Hill, 1958.
- [7] Hsu K C. Variable structure control design for uncertain dynamic systems with sector nonlinearities [J]. *Automatica*, 1998, 34(4): 505-508.
- [8] Hsu K C. Decentralized variable-structure model-

following control design for interconnected systems with series nonlinearities [J]. *Int J of Systems Science*, 1998, 29(4): 365-372.

- [9] Liu F L, Wu H, Ma C G, et al. Decentralized dynamic output feedback control for a class of similar interconnected large-scale systems with nonlinear input [A]. *Proc of World Multi Conf on Systems, Cybernetics and Informatics* [C]. Orlando, 2001, IX: 142-147.