

一类基于模糊逻辑系统的非线性不确定系统自适应观测器设计

王银河¹, 戴冠中²

(1. 汕头大学 理学院, 广东 汕头 515063; 2. 西北工业大学 自动控制系统, 陕西 西安 710072)

摘要: 利用模糊逻辑系统具有充分利用专家语言信息和逼近连续函数的性质, 分析和研究了一类具有未知不确定界的非线性系统的自适应状态观测器设计问题. 观测器和自适应律的构成直接利用了系统的数学结构信息和模糊逻辑系统对不确定性的输出信息, 在较弱的假设条件下, 这种观测器与被控系统状态间的误差及各参数估计误差一致终极有界. 最后的仿真实例说明了所采用的方法的有效性.

关键词: 状态观测器; 模糊逻辑系统; 自适应律; 一致终极有界

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Adaptive observer design for a class of nonlinear uncertain systems based on fuzzy logic systems

WANG Yin-he¹, DAI Guan-zhong²

(1. Science College, Shantou University, Guangdong Shantou 515063, China;

2. Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnic University, Shanxi Xi'an 710072, China)

Abstract: By employing fuzzy logic system with the properties of fully utilizing linguistic information from experts and approximating any continuous function with arbitrariness, the adaptive laws and state observers were synthesized for a class of nonlinear systems with uncertainties, the bounded functions of which were unknown. The architecture of laws and observers depended directly on the information from the construction of the systems controlled and the fuzzy logic system. Under some simple conditions, the laws and state observers made the state error of systems controlled and parameter estimate errors uniformly ultimately bounded (UUB). Finally, the simulation shows the validity of the method.

Key words: state observer; fuzzy logic system; adaptive law; UUB

1 引言(Introduction)

在一般情况下, 要获得系统的全部状态是很困难的. 因此, 研究系统的状态观测器设计是一个具有实际意义的问题. 对复杂系统的状态观测器设计的研究, 从 70 年代开始至今, 已经取得了一些成果^[1-3]. 但是, 由于复杂系统内部一般具有很强的非线性性和不确定性, 其状态观测器的设计一般是比较困难的, 观测器设计理论远没有达到完善的境界^[4-6]. 特别值得注意的是已有的成果过分依赖精确的数学模型, 要求不确定性具有已知的上界, 显然, 这些要求有违工程实际情况. 近十几年来, 模糊逻辑控制作为充分利用专家知识和经验的有效方法之一, 在许多实际控制问题中已经取得成功^[7-11]. 利用模糊逻辑系统的优越性, 研究如何发展一套设

计非线性不确定系统的状态观测器的一般性方法, 它既能有效地利用专家的语言信息, 避免过分依赖精确的数学模型, 同时又能对所构造状态观测器的误差进行理论分析是完全必要的. 目前, 在应用模糊逻辑系统解决理论问题的已有成果中, 大多数结果是讨论设计被控制系统的稳定和跟踪控制器^[7-11], 涉及状态观测器的讨论还鲜为报道.

本文考虑一类带有不确定性的非线性系统, 对这种系统, 其状态观测器和自适应律的构成直接利用系统的结构信息和模糊逻辑系统的输出信息, 对不确定性只做了范数形式假设, 不需要知道其精确的上界. 在这种自适应律及模糊逻辑系统的共同作用下, 所考虑的被控制系统与观测器间的状态误差一般终极有界, 其它参数估计误差也被控制在有界的范围内.

收稿日期: 2001-09-13; 收修改稿日期: 2002-11-11.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1998030471); 汕头大学科学研究启动经费(130-511010)资助项目.

2 系统描述(System description)

考虑如下不确定性非线性系统

$$\dot{x} = Ax + B\Delta g(x, u, t), \quad y = Cx, \quad (1)$$

其中,状态向量 $x \in U \subseteq \mathbb{R}^n$, U 是 $\mathbb{R}^n$ 中的有界闭集;输入 $u \in \mathbb{R}^r$;输出 $y \in \mathbb{R}^m$; A, B, C 是合适维数的实矩阵; $\Delta g(x, u, t)$ 是系统的不确定性.

假定 1 矩阵对 (A, C) 是可观测的.

假定 2 不确定性满足下列条件

$$\|\Delta g(x, u, t)\| \leq \xi(x) + \varphi(u, t), \quad x \in U,$$

其中, $\xi(x)$ 可以是未知的非负连续函数; $\varphi(u, t)$ 是已知的非负连续函数; $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数.

显然,若假定 1 成立,则知存在一个矩阵 L 使对任意给定的正定对称矩阵 Q , 下列 Lyapunov 方程存在唯一正定矩阵解 P

$$(A - LC)^T P + P(A - LC) = -Q. \quad (2)$$

假定 3 存在矩阵 D 使 $PB = C^T D$.

注 1 1) 由于不确定项 $\Delta g(x, u, t)$ 的上界中未知状态部分的存在和 $\Delta g(x, u, t)$ 中控制项结构的不确定性,使得经典控制论中的方法不能有效地应用于此; 2) 假定 3 中的 $PB = C^T D$ 是经典控制论中讨论输出反馈和观测器设计时经常使用的一个条件,它与系统的正实性和无源性密切相关^[12-15].

对于系统(1)中的不确定性,作者利用一个模糊逻辑系统来完成逼近任务.因此,作者需要如下有关模糊逻辑系统的结果.

本文采纳单点模糊化、乘积推理、中心解模糊和如下模糊规则:

$$\begin{aligned} R^j: & \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^j \text{ and } \cdots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^j, \\ & \text{THEN } y \text{ is } B^j, \quad j = 1, 2, \cdots, N, \end{aligned} \quad (3)$$

构造模糊逻辑系统.其输出为

$$F(x) = \frac{\sum_{j=1}^N \theta_j \prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)}{\sum_{j=1}^N [\prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)]}, \quad (4)$$

其中, $A_i^j(x_i)$ 是对应于模糊集 A_i^j 的隶属函数, $\theta_j = \max_{y \in \mathbb{R}} B^j(y)$ 是常数.令基函数

$$e_j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)}{\sum_{j=1}^N [\prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)]},$$

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_N)^T,$$

$$E(x) = (e_1(x), e_2(x), \cdots, e_N(x))^T,$$

那么,式(4)可以表示为 $F(x) = \theta^T E(x)$.

定理 1^[7,8] 设 $h(x)$ 是有界闭集 $U \subseteq \mathbb{R}^n$ 上的

连续函数,对任何正数 ε , 存在形如(3)和(4)的模糊逻辑系统使

$$\sup_{x \in U} \|h(x) - F(x)\| \leq \varepsilon. \quad (5)$$

由定理 1 可以看出,形如(4)的模糊逻辑系统具有充分利用语言信息逼近非线性连续函数的功能.本文利用形如(4)的模糊逻辑系统逼近不确定项 $\xi(x)$.明显地,利用定理 1,可以得到:对于任意给定的正数 ε , 存在形如(4)的模糊逻辑系统使

$$\sup_{x \in U} \|\xi(x) - F(x)\| \leq \varepsilon.$$

3 观测器和自适应律设计 (Observer and adaptive law design)

记 $e = x - \hat{x}$, $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - \hat{\varepsilon}$.其中 $\hat{x}, \hat{\theta}, \hat{\varepsilon}$ 分别为状态 x , 参数 θ, ε 的估计值.对于系统(1),作者提出如下非线性鲁棒观测器:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + BG(\hat{x}, u, t) + L(y - C\hat{x}), \quad (6)$$

其中鲁棒项

$$G(\hat{x}, u, t) = \begin{cases} -\frac{D^T(y - C\hat{x})\Delta}{\|D^T(y - C\hat{x})\|}, & D^T(y - C\hat{x}) \neq 0, \\ 0, & D^T(y - C\hat{x}) = 0, \end{cases}$$

其中 $\Delta = [\hat{\theta}^T E(\hat{x}) - \varphi(u, t)]$. $\hat{\theta}$ 由下列自适应律确定.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}} &= -\alpha \hat{\theta} + 2\gamma \|D^T(y - C\hat{x})\| E(\hat{x}), \\ \dot{\hat{\varepsilon}} &= -\beta \hat{\varepsilon} + 2\|D^T(y - C\hat{x})\|, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, α, β, γ 为可调常数,满足:

$$\begin{aligned} \alpha &> 0, \quad \beta > 0, \quad -\infty < \gamma < +\infty, \\ \frac{(1+|\gamma|)^2}{\delta} + 2\left[\frac{1}{\beta} + \frac{(1+\gamma)^2}{\alpha}\right] &< \\ \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\|D^T C\|^2}, \quad \delta &> 0. \end{aligned} \quad (8)$$

定理 2 考虑系统(1)和模糊逻辑系统(4),如果假定 1~3 成立,则在自适应律(7)作用下,系统(1)与状态观测器(6)的状态误差一致终极有界,估计误差 $\tilde{\theta}, \tilde{\varepsilon}$ 有界.

证 考虑系统(1)与观测器(6)的状态误差系统和正定函数

$$V = e^T P e + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2} \tilde{\varepsilon}^2,$$

即可完成定理 2 的证明(略).

注 2 如果可以得到系统(1)的不确定性有关状态界的数字采样信息,那么就可以利用最小二乘法筛选出模糊逻辑系统(4)的基函数^[9,10].

4 仿真算例 (Simulation example)

考虑如下的非线性不确定系统

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0.5 \\ -13 & -12 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \Delta g, \quad (9)$$

$$y = (2 \quad 1) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix},$$

其中

$$\Delta g = \frac{25x_1 + 3x_2 \sin x_1 + 125x_1 e^{-x_2}}{2 + e^{-x_2}} + \frac{5u \sin x_2}{3 - \sin x_1}.$$

易见 $\|\Delta g\| \leq \xi(x) + 2.5|u|$. 选取形如(4)的模糊逻辑系统,其相应的隶属函数为

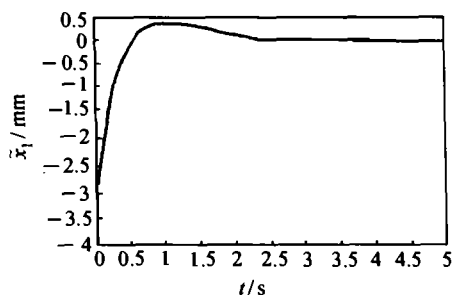


图1 状态误差 $\tilde{x}_1$ 的响应曲线

Fig. 1 The error corresponding curve of $\tilde{x}_1$

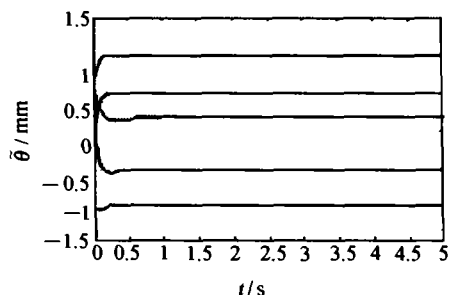


图3 估计误差 $\tilde{\theta}$ 的响应曲线

Fig. 3 The estimate error curve of $\tilde{\theta}$

$A_i^j(x_i) = e^{-\frac{(x_i-j)^2}{2}}, j = -2, -1, 0, 1, 2; i = 1, 2.$
取控制 $u = \sin t$. 增益

$$L = \begin{pmatrix} -0.5 \\ -3 \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} 28 & 0 \\ 0 & 14 \end{pmatrix}, D = 1.$$

可调参数 $\gamma = 0.9, \alpha = \beta = \delta = 53.7142$; 初值

$$x(0) = (-2 \quad 2)^T, \hat{x}(0) = (2 \quad -2)^T,$$

$$\tilde{\theta}(0) = (-1 \quad 1 \quad 1.5 \quad -1 \quad 0.5)^T,$$

$$\tilde{\varepsilon}(0) = -1.$$

作仿真如图1~4.

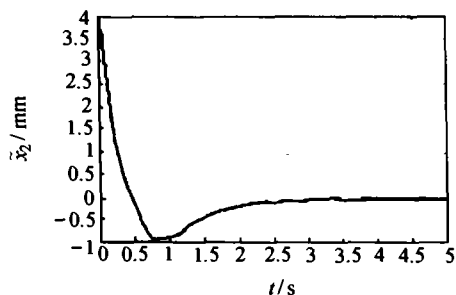


图2 状态误差 $\tilde{x}_2$ 的响应曲线

Fig. 2 The error corresponding curve of $\tilde{x}_2$

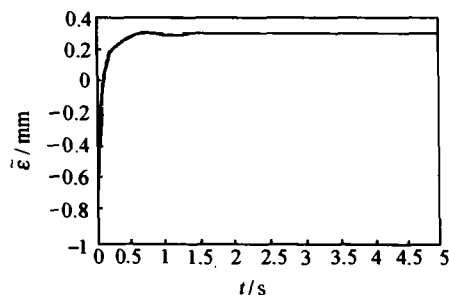


图4 估计误差 $\tilde{\varepsilon}$ 的响应曲线

Fig. 4 The estimate error curve of $\tilde{\varepsilon}$

参考文献(References):

- [1] TAU F E. Observing the state of nonlinear dynamic systems [J]. *Int J Control*, 1973, 17(3): 471-479.
- [2] KOU S R, ELLIOTT D, TARN T J. Exponential observers for nonlinear dynamic systems [J]. *Information and Control*, 1975, 29(3): 204-216.
- [3] MARINO R. Adaptive observers for single output nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(4): 1054-1058.
- [4] 刘粉林, 陈兵, 王银河, 等. 一类非线性系统的变结构鲁棒观测器[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(2): 303-305.
(Liu Fenlin, CHEN Bing, WANG Yinhe, et al. Variable structure robust observers for a class of nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(2): 303-305.)
- [5] WALCOTT B L, ZAK S H. State observation of nonlinear uncertain dynamical systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1987, 32(2): 166-170.
- [6] BERNARD F. Nonlinear observers for estimating parameters in dynamic systems [J]. *Automatica*, 1997, 33(8): 1525-1530.
- [7] WANG Li-xin. Fuzzy systems are universal approximations [J]. *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems* [C]. San Diego: Royalty Publishing House, 1992: 1163-1170.
- [8] WANG Li-xin. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1993, 1(2): 146-155.
- [9] TONG Shaocheng, LI Qingguo. Fuzzy adaptive control for a class of nonlinear systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 101(1): 31-39.
- [10] CHAI Tianyou, TONG Shaocheng. Fuzzy direct adaptive control for a class of nonlinear systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 103(3): 379-387.
- [11] 佟绍成, 徐为民, 柴天佑. 关于多变量非线性系统的自适应模糊控制[J]. 自动化学报, 1998, 24(6): 793-797.
(TONG Shaocheng, XU Weimin, CHAI Tianyou. Adaptive fuzzy control for mimo nonlinear systems [J]. *Acta Automatic Sinica*, 1998, 24(6): 793-797.)

(下转第 618 页)

5 结论(Conclusion)

应用减法聚类 and SVD 算法对模糊逻辑系统的结构进行分析和优化,能够删除冗余模糊规则获得简洁合理的模糊结构,而且该算法概念清晰,方法简便.通过仿真验证,可以看出基于山峰函数的减法聚类在确定模糊模型初始结构和提高训练速度方面效果明显;SVD 算法在模糊规则累积贡献率和性能指标的指导下,模糊逻辑系统能够获得十分简洁有效的模糊结构.此混合结构优化策略为模糊逻辑系统的结构辨识提供了一种有效的途径.

参考文献(References):

- [1] WANG Lixin, MENDEL J M. Fuzzy basis function, universal approximation and orthogonal least squares learning [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1992, 3(5): 807 - 814.
- [2] YEN J, WANG Liang. Applying statistical information criteria for optimal fuzzy model construction [J]. *IEEE Trans on Fuzzy System*, 1998, 6(6): 362 - 372.
- [3] MENDEL J M. *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems* [M]. Engell-Wood, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [4] YAGER R R, FILEV D P. Approximate clustering via the mountain method [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(8): 1274 - 1284.
- [5] GOLUB G H, VAN C F. *Matrix Computation* [M]. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1989.
- [6] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
(WANG Huiwen. *Partial Least-Squares Regression Method and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.)
- [7] 王立新. 自适应模糊逻辑系统与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
(WANG Lixin. *Adaptive Fuzzy Logic System and Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996.)

作者简介:

祖家奎 (1974 —), 男, 现在南京航空航天大学超声电机研究中心从事博士后相关课题的研究. 主要研究方向为模糊控制, 神经网络, 工业自动化控制, 超声电机的驱动与控制等. E-mail: gao@xuzhou.net;

戴冠中 (1937 —), 男, 西北工业大学教授、博士生导师. 主要研究方向为复杂控制系统, 计算机控制与智能控制系统, 计算机网络, 信息安全等;

郭淳生 (1938 —), 男, 教授、博士生导师, 现任南京航空航天大学超声电机研究中心主任, 曾获国家科技进步三等奖、国家发明四等奖以及省、部级科技进步二等奖多项, 另有国家发明专利一项和实用新型专利二项. 目前主要从事压电超声电机的研究和应用;

卢京潮 (1957 —), 男, 教授. 主要研究方向为系统辨识, 现代控制理论, 工业自动化控制等.

(上接第 614 页)

- [12] YAN X G, WANG J C, LU X Y, et al. Decentralized output feedback robust stabilization for a class of nonlinear composite large-scale systems with similarity [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(2): 294 - 299.
- [13] YAN X G, DAI G Z. Decentralized output feedback robust control for nonlinear large-scale systems [J]. *Automatica*, 1998, 34(11): 1469 - 1472.
- [14] 陈兵, 张嗣瀛. 一类具有相似结构的组合大系统的鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 1998, 15(2): 203 - 209.
(CHEN Bing, ZHANG Siying. Robust control of uncertain nonlinear interconnected systems with similar structure [J]. *Control Theory & Applications*, 1998, 15(2): 203 - 209.)
- [15] 刘粉林, 刘媛, 王银河, 等. 基于状态观测器的非理想输入不确定组合大系统的输出反馈分散镇定 [J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1): 21 - 25.
(LIU Fenlin, LIU Yuan, WANG Yinhe, et al. Based state observer decentralized output feedback stability of uncertainty composite systems with imperfect inputs [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 16(1): 21 - 25.)

作者简介:

王银河 (1962 —), 男, 教授. 1990 年毕业于四川师范大学数学系, 获理学硕士学位, 2000 年 3 月毕业于东北大学自动控制系, 获工学博士学位, 2000 年 3 月入西北工业大学控制科学与技术博士后流动站做博士后研究工作. 感兴趣的研究方向: 复杂控制系统的结构分析和鲁棒控制, 自适应控制, 智能控制等. E-mail: yhwang@stu.edu.cn;

戴冠中 (1937 —), 男, 教授, 博士生导师. 感兴趣的研究方向: 网络环境下复杂系统控制与信息安全, 非线性系统的新型神经网络和模糊控制器设计等.