第24卷 第6期 自 动 化 学 报 Vol. 24, No. 6
1998年11月 ACTA AUTOMATICA SINICA Nov., 1998

短文

一类不确定非线性系统鲁棒自适应观测器设计的新方法[1)]

朱瑞军 柴天佑
(东北大学自动化中心 沈阳 110006)

摘 要 针对一类非匹配时变不确定非线性系统设计了一种新的鲁棒自适应观测器. 首先利用几何方法将系统转化为观测器类似的标准型,然后在观测器中引入待定补偿项,使得补偿误差同状态估计误差间传递函数是严格正实的,从而取消了已有结果对未知非线性动态的Lipschitz 和匹配条件等的不合理限制.

关键词 非线性系统,非匹配时变不确定,鲁棒自适应观测器,严格正实性.

1 引言

鲁棒非线性观测器设计引起许多学者的极大兴趣,文献[1]在系统满足严格参数和几何线性化条件下,利用滤波变换方法对可线性化的不确定非线性系统设计了渐近稳定的自适应观测器;文献[2]在未知动态满足 Lipschitz 条件的假设下,获得鲁棒观测器;文献[3]对带匹配未知动态的非线性系统利用变结构方法提出了鲁棒观测器.

本文利用几何线性化和严格正实性理论,对一类不确定非线性系统设计了一种新的鲁棒自适应观测器,去掉了已有结果对未知非线性动态的不必要限制.

2 系统线性化结构与基本假设和问题的描述

考虑不确定非线性系统

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{p}(t,\boldsymbol{x},u) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x},u), \tag{1}$$

$$y = h(\boldsymbol{x}), \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}),\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x},u)$ 为已知 n 维行向量函数,$\boldsymbol{x}\in R^n$ 为状态变量,$y\in R$ 为可测输出,$\boldsymbol{p}(t,\boldsymbol{x},u)$ 为时变不确定行向量函数,$u\in R$ 为系统的输入. 其标称系统

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x},u), \tag{3a}$$

$$y = h(\boldsymbol{x}), \tag{3b}$$

1)国家自然科学基金资助课题.
收稿日期 1996-05-09

在适当条件下[1],可以通过微分同胚 $\boldsymbol{z}=\varphi(\boldsymbol{x})$ 变换为

$$\dot{\boldsymbol{z}} = A\boldsymbol{z} + \Psi(y) + \phi(y,\boldsymbol{u}), \tag{4a}$$

$$y = C\boldsymbol{z}, \tag{4b}$$

其中 $A=\begin{bmatrix}0 & I_{n-1}\\ 0 & 0\end{bmatrix}$,$C=[1\quad 0 \cdots 0]$. 于是系统(1)和(2)可化为如下标准型结构

$$\dot{\boldsymbol{z}} = A\boldsymbol{z} + \Psi(y) + \phi(y,\boldsymbol{u}) + \xi(t,\boldsymbol{z},\boldsymbol{u}), \tag{5a}$$

$$y = C\boldsymbol{z}. \tag{5b}$$

对于系统(5)有如下假设:

A1) 未建模动态 $\xi(t,\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})$ 满足条件

$$\|\xi(t,\boldsymbol{z},\boldsymbol{u})\| \leqslant \sum_{i=1}^{N}\rho_i(t,y,\boldsymbol{u}), \tag{6}$$

其中 $\rho_i(t,y,\boldsymbol{u})(l\leqslant i\leqslant N)$ 是已知函数. 条件(6)称为不确定满足输出匹配条件.

A2) $\boldsymbol{f},\boldsymbol{g},\boldsymbol{p}$ 均为 Caratheodory 向量函数.

本文要解决的问题是,对于系统(5)寻找如下形式的观测器

$$\dot{\hat{\boldsymbol{z}}}= A\hat{\boldsymbol{z}} + \Psi(y) + \phi(y,\boldsymbol{u}) + GC(\boldsymbol{z} - \hat{\boldsymbol{z}}) + \boldsymbol{b}_m\alpha(t,y,\hat{y},\boldsymbol{u},\hat{\gamma}), \tag{7a}$$

$$\hat{y} = C\hat{\boldsymbol{z}} \tag{7b}$$

及鲁棒参数调节律

$$\dot{\hat{\gamma}} = -\alpha_1\hat{\gamma} + \Gamma_2\alpha_1(t,y,\hat{y},\boldsymbol{u}), \tag{8}$$

即确定行向量 $\boldsymbol{b}_m$,函数 $\alpha(t,y,\hat{y},\boldsymbol{u},\hat{\gamma})$ 和向量函数 $\alpha_1(t,y,\hat{y},\boldsymbol{u})$,使得

$$\hat{\gamma}\text{ 有界,且}\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{e} = 0. \tag{9}$$

3 鲁棒自适应观测器的设计

下面引理是本文观测器设计的依据.

引理. 若相对阶为1的 n 阶传递函数 $M(s)=a(s)/b(s)$ 是严格正实的,则存在向量 $\boldsymbol{b}_m=[b_n\quad b_{n-1}\quad\cdots\quad b_1]^{\mathrm{T}}$ 以及适当维数的矩阵 G,使得传递函数 $C(sI-A-GC)^{-1}\boldsymbol{b}_m=b(s)/a(s)$,其中矩阵 A,C 在式(4)中给出.

定义观测误差 $\boldsymbol{e}=\boldsymbol{z}-\hat{\boldsymbol{z}}$,由式(5)和(7)得误差系统如下:

$$\dot{\boldsymbol{e}} = (A - GC)\boldsymbol{e} + \xi(t,\boldsymbol{x},\boldsymbol{u}) - \boldsymbol{b}_m\alpha(t,y,\hat{y},\boldsymbol{u},\hat{\gamma}), \tag{10a}$$

$$e_0 = C\boldsymbol{e}. \tag{10b}$$

取 $M(s)=b(s)/a(s)$ 满足引理,对于式(10)中的 A 和 C,由引理知存在行向量 $\boldsymbol{b}_m$,使得 $C(sI-A-GC)^{-1}\boldsymbol{b}_m=M(s)$. 由假设 A1)易知不等式

$$\left\|\sum_{i=1}^{n}s^{n-i}/b(s)\xi_i(t,\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})\right\| \leqslant \sum_{i=1}^{N}\gamma_i\sup_{t\geqslant\tau}\|\rho_i(\tau,y(\tau),\boldsymbol{u}(\tau))\| + \gamma_{N+1},(l\leqslant i\leqslant n) \tag{11}$$

成立,这里 $s^i/b(s)\boldsymbol{f}(t)$ 表示传递函数 $s^i/b(s)$ 与可测函数 $\boldsymbol{f}(t)$ 的卷积,若记 $\tilde{\gamma}=\gamma-\hat{\gamma}$,则对正定对角阵 Γ,可选 Lyapunov 函数为 $V=\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}P\boldsymbol{e}+0.5\tilde{\gamma}^{\mathrm{T}}\Gamma^{-1}\tilde{\gamma}$,其中 P 满足

$$(A - GC)^{\mathrm{T}}P + P(A - GC) = -Q, \tag{12a}$$

$$P\boldsymbol{b}_m = C. \tag{12b}$$

沿着式(10)对 V 微分,得

$$\dot{V} = -\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}Q\boldsymbol{e} + e_0\{\sum_{i=1}^{n} s^{n-i}/b(s)\xi_i(t,\boldsymbol{x},\boldsymbol{u}) - \alpha(t,y,\hat{y},\boldsymbol{u},\hat{\boldsymbol{\gamma}})\} + \tilde{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}}\Gamma^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{\gamma}}}. \tag{13}$$

令

$$\alpha(t,y,y,\hat{\boldsymbol{\gamma}}) = \bar{\rho}(t,y,\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{\gamma}}\mathrm{sign}(e_0), \tag{14}$$

其中 $\bar{\rho}(t,y,\boldsymbol{u})=[\sup_{t\leqslant\tau}\rho_1(\tau,y(\tau),\boldsymbol{u}(\tau)),\cdots,\sup_{t\leqslant\tau}\rho_N(\tau,y(\tau),\boldsymbol{u}(\tau)),1]$, $\hat{\boldsymbol{\gamma}}=[\hat{\gamma}_1,\cdots,\hat{\gamma}_{N+1}]^{\mathrm{T}}$, $e_0=C(\boldsymbol{x}-\hat{\boldsymbol{x}})$, sign 为符号函数. 将式(14)代入式(13), 则有

$$\dot{V} = -\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}Q\boldsymbol{e} + \{\sum_{i=1}^{n} s^{n-i}/b(s)\xi_i(t,\boldsymbol{x},\boldsymbol{u})e_0 - \alpha(t,y,\hat{y},\boldsymbol{u},\gamma)\|e_0\|\} +$$

$$\tilde{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}}(-\Gamma^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{\gamma}}} + \bar{\rho}(t,y,\boldsymbol{u})\|e_0\|). \tag{15}$$

利用式(11)得

$$\dot{V} \leqslant -\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}Q\boldsymbol{e} + \tilde{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}}(-\Gamma^{-1}\dot{\hat{\boldsymbol{\gamma}}} + \bar{\rho}(t,y,\boldsymbol{u})\|e_0\|).$$

若令鲁棒参数调节律如下：

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\gamma}}} = -\Gamma\Gamma_1\hat{\boldsymbol{\gamma}} + \Gamma\bar{\rho}(t,y)\|e_0\|, \tag{16}$$

则当 $\boldsymbol{e}\neq 0$时, 得到 $\dot{V}\leqslant -\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}Q\boldsymbol{e}-\tilde{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}}\Gamma_1\tilde{\boldsymbol{\gamma}}<0$, 于是易知式(9)成立. 因此, 可得如下定理.

定理. 若假设 A1), A2)和引理中条件满足, 则由式(7), (14)和(16)构成系统(1), (2)的满足式(9)的鲁棒自适应观测器, 其中 $\hat{\boldsymbol{x}}=\varphi^{-1}(\hat{\boldsymbol{z}})$, 坐标变换 $\varphi(\boldsymbol{x})$由文献[1]给出.

注. 用如下的饱和函数 sat 代替符号函数 sign, 即

$$\mathrm{sat}|_{\varepsilon}(\eta) = \begin{cases} \eta, & |\eta| < \varepsilon, \\ \eta/|\eta|, & |\eta| \geqslant \varepsilon, \end{cases} \tag{17}$$

则式(14)中的函数 α 是连续的, 类似上面的推导, 仍然可得定理的结论.

4 结 论

上文给出渐近稳定的鲁棒观测器设计的一种新方法. 该方法对未建模动态只要求有已知函数界, 而不要求光滑性. 因此, 未建模动态中可以包括随机扰动, 而且克服了已有结果对未知非线性动态所附加的 Lipschitz 和匹配条件等不必要限制.

参 考 文 献

1 Marino R. Adaptive observers for single output nonlinear systems. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1990, **AC-35**: 1054—1058

2 倪茂林, 谌颖. 一类非线性不确定系统的鲁棒观测器设计. 自动化学报, 1995, **22**(2): 228—231

3 Zak S H, Hui S. Output feedback variable structure controllers and state estimators for uncertain/nonlinear dynamic systems. *IEE Proc.-D*, 1993, **140**(1): 41—50

A NOVEL APPROACH OF ROBUST ADAPTIVE OBSERVER FOR A CLASS OF NONLINEAR UNCERTAIN SYSTEMS

ZHU RUIJUN　　CHAI TIANYOU

(Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract A novel robust adaptive observer is designed for a class of nonlinear systems with mismatch time-varying uncertainties. First, the systems are transformed into observer-like canonical form by geometric methods. Secondly, the compensated term is introduced in the observer, which makes the transfer function between compensated errors and estimated error strictly positive real. As the design and the theoretical analysis are unified, unreasonable limitations to nonlinear dynamics, such as matching and Lipschitz conditions, are removed.

Key words Nonlinear system, mismatched time-varying uncertainty, robust adaptive obser -ver, strictly positive real property.

简讯

第七届全国 Petri 网学术会议

征 文 通 知

由中国计算机学会主办，山东矿业学院应用数学与软件工程系承办的“第七届全国 Petri 网学术会议”将于1999年6月2日—5日在山东泰安召开。会议就 Petri 网理论及其在各个领域中的应用进行广泛而深入的学术讨论，欢迎大家积极投稿。

一、征文范围

1. Petri 网的理论研究；

2. Petri 网的工具开发；

3. 并发模型，包括 CSP，CCS 和时态逻辑等；

4. Petri 网在并行化编译技术，并行程序设计与验证、网络协议、软件工程、CIMS(FMS)、系统性能分析、电子技术、离散事件动态系统等方面的应用；

5. 其它与 Petri 网相关的研究。

二、征文要求

1. 凡已在正式刊物或全国性学术会议论文集上发表过的论文不再征用；

2. 投送论文无论录用与否，概不退稿，请作者自留底稿；

3. 在论文题目下面，请写明作者姓名、单位、通讯地址、邮政编码；

4. 稿件一律用 Word 6.0或 Word 7.0或 Word 97(均用中文版)编辑打印，录用后再将软盘寄往山东矿业学院；

5. 会议论文集将以正式刊物出版。

三、重要日期

截稿日期：1998年12月31日。发出录用和修改通知：1999年2月1日。

四、论文请寄

邮编：271019，　地址：山东省泰安市山东矿业学院应用数学与软件工程系。

联系人：刘悦，　电话：(0538)8212141(H)　(0538)8223311转6258(O)。