

文章编号: 1001-0920(2012)10-1552-05

不确定随机非线性系统自适应观测器设计

张利军^{1,2}, 杨立新³, 贾鹤鸣⁴

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 西北工业大学 航海学院, 西安 710072; 3. 黑龙江科技学院 电气与信息工程学院, 哈尔滨 150027; 4. 东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 考虑带非参数不确定项的随机非线性系统自适应观测器设计问题. 不同于已有结果, 系统的不确定项无需满足 Lipschitz 连续性条件, 也不必仅仅是系统输出的函数. 通过设计一个带参数自适应律的非线性观测器来重构系统状态, 该观测器结构简单且易于实现. 应用 Lyapunov 稳定性理论和随机微分理论证明该观测器是最终有界的, 并且它的界可以通过选取适当的参数进行调节. 最后, 数值仿真结果表明了该观测器的有效性.

关键词: 随机系统; 非线性系统; 自适应观测器; 不确定性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Adaptive observer design for uncertain stochastic nonlinear systems

ZHANG Li-jun^{1,2}, YANG Li-xin³, JIA He-ming⁴

(1. Department of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. College of Electrical & Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science & Technology, Harbin 150027, China; 4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040. Correspondent: ZHANG Li-jun, E-mail: zhanglj@hrbeu.edu.cn)

Abstract: The problem of adaptive observer design is investigated for a class of stochastic nonlinear systems with nonparametric uncertainties. Different from the existing results, the uncertainties of the systems need neither satisfy Lipschitz condition nor only contain output variable. Through the design of a nonlinear observer with an adaptive law of parameters, the system states are reconstructed. The observer has a simple structure and easy to implement. Lyapunov theorem and Itô stochastic differential theory are applied to show that the observation error convergences to the neighborhood of the origin, whose size can be adjusted by observer parameters. Finally, numerical simulation results show the effectiveness of the proposed observer.

Key words: stochastic system; nonlinear system; adaptive observer; uncertainty

1 引言

观测器被广泛应用于故障检测、全状态反馈控制器设计等方面^[1-4]. 而非线性系统的观测器设计更是受到了国内外学者的广泛关注. 非线性系统由于其复杂的非线性特征, 使得观测器设计要比线性系统困难的多. 对于同时具有不确定非线性和随机特征的随机非线性系统, 其观测器设计问题更具有挑战性.

观测器设计的主要难点在于如何利用已知的输入信息和观测信息来对存在不确定参数、不确定非线性项以及随机项等的系统进行估计. 文献[5]研究了

可参数化不确定性系统的自适应观测器设计问题, 解决了带有不确定参数的或可转化为参数不确定的系统的观测器设计问题. 文献[6]研究了带有可参数化不确定非线性和未建模动态的不确定非线性系统自适应观测器设计问题, 通过引入一个动态信号来控制未建模动态对观测器的影响, 并针对不确定参数给出参数自适应律. 然而, 上述文献给出的观测器主要针对参数化系统, 不适用非参数化不确定系统, 而且所设计的方法可能在随机系统中并不可取.

针对具有非参数化不确定性的非线性系统, 现有

收稿日期: 2010-03-24; 修回日期: 2011-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174047); 教育部博士点基金项目(20102304110003); 西北工业大学校基础基金项目(GCKY1006); 中央高校基本科研业务专项基金项目(HEUCFR1214).

作者简介: 张利军(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制理论与应用的研究; 杨立新(1981-), 女, 博士生, 从事随机非线性系统控制的研究.

方法主要是采用智能系统(神经网络、模糊系统等)对不确定非线性部分进行逼近,进而设计基于智能系统的观测器^[7].对于带随机干扰的不确定非线性系统观测器设计问题,由于随机干扰的存在,无法再利用确定性系统的 Lyapunov 函数方法研究其收敛性,故文献较少.文献[8]应用线性高增益观测器对非线性不确定随机系统进行状态估计,通过选取足够大的增益来减小不确定非线性项和随机项对观测精度的影响,即当观测增益趋于无穷时,观测误差趋于零.然而,当高增益观测器的增益过大时会出现峰化现象,因此利用线性高增益观测器逼近不确定随机系统有一定的局限性.文献[9]在假设随机项系数是已知的情况下,基于滑模控制思想设计了鲁棒观测器;文献[10-11]研究了具有非线性不确定未建模动态的级联随机系统的观测器设计问题,所研究的系统是仿射非线性系统.对于带有不确定非线性函数的非仿射随机非线性系统的观测器设计问题仍然有待解决.

针对上述问题,本文研究了不确定非线性函数的随机系统的自适应观测器设计,其中不确定非线性函数包含未知状态.通过构建一个含有参数不确定自适应律的观测器来重构状态,能有效解决具有非仿射不确定的随机系统的状态估计问题.应用 Lyapunov 稳定性理论和随机微分理论给出严格的稳定性分析,证明该观测器是最终有界的,并且它的界可通过选取适当的参数进行调节.最后,一个数值仿真例子表明了所提出方法的有效性.

2 系统与问题描述

2.1 系统描述

考虑下列不确定非线性随机系统:

$$\begin{cases} dx(t) = [Ax(t) + f(x(t), u)]dt + g(x(t))d\omega, \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n$ 为系统状态向量; $u \in R^m$, $y \in R^p$ 分别为系统的输入和输出; A , C 为适当维数矩阵,并且 (A, C) 是可观测的; $f(x(t), u)$, $g(x)$ 为光滑的不确定非线性函数; ω 为定义在概率空间 $(\Omega, F, \{F_t\}_{t \geq 0}, P)$ 上的 r -维标准 Wiener 过程.这里 Ω 为样本空间, F 为 σ -域, P 为概率测度.

首先给出几个有用的假设条件:

假设 1 状态 $x \in R^n$ 和控制器 $u \in R^m$ 有界.

假设 2 存在一个正定矩阵 $Q \in R^{n \times n}$ 和一个函数 $f_0(x(t), u) : R^n \times R^m \rightarrow R^p$, 使得

$$f(x(t), u) = P^{-1}C^T f_0(x(t), u), \quad (2)$$

其中: P 是唯一的,是下列 Lyapunov 函数的正定解:

$$A_0^T P + P A_0 = -Q. \quad (3)$$

其中: $A_0 = A - KC$, K 为待设计的观测器增益,将在下一节给出.

假设 3 存在未知正常数 c_1, c_2, c_3, b_1 和已知的正定标量函数 $\rho_1(y, u), \rho_2(y, u)$, 使得

$$\|f_0(x, u)\| \leq c_1 + c_2 \|x\| \rho_1(y, u) + c_3 \rho_2(y, u), \quad (4)$$

$$\|g(x)\| \leq b_1 \|y\|. \quad (5)$$

注 1 对于不确定非线性函数,现有文献多假设其可被系统的输入和输出这些可获得的信号来限制.由假设 3 中式(4)右侧可以看出,文中不确定非线性函数的界不仅包含系统的输入和输出信息,还包含不可测的系统状态 x ,这就更加符合实际.特别地,当式(4)中 $c_2 = 0$ 时,假设 3 变成了一般的假设性条件;当 $c_1 = 0, \rho_1 = 0$, 并且 $\rho_2 = \|u\|$ 时,不确定非线性函数满足 Lipschitz 条件.

2.2 概率意义下的镇定

考虑如下随机非线性系统:

$$dx(t) = f(x(t))dt + g(x(t))d\omega. \quad (6)$$

其中: $x(t)$ 和 ω 定义同式(1), $f(0) = 0, g(0) = 0$. 定义微分算子为 L , 有

$$LV(x(t)) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x(t)) + \frac{1}{2} \text{Tr} \left\{ g^T(x(t)) \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} g(x(t)) \right\}, \quad (7)$$

其中 $V(x(t))$ 为一个正定的径向无界的关于 x 二次连续可微函数.

针对上述随机非线性系统引入一个稳定性概念:

定义 1 随机系统(6)的解序列 $\{x(t), t \geq 0\}$ 是概率意义下有界的,如果满足

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \sup_{0 \leq t < \infty} P\{\|x(t)\| > \varepsilon\} = 0. \quad (8)$$

对应于上述依概率有界的概念,有下列基本引理将在下面的观测器设计中起关键作用.

引理 1^[12] 对于随机系统(6),如果存在一个正定的径向无界的二次连续可微函数 $V(x(t))$, 使得

$$LV(x(t)) \leq -\mu V(x(t)) + \varepsilon$$

成立.其中: $\mu > 0, \varepsilon \geq 0$ 为常数.则有: 1) 系统(6)几乎处处有唯一解; 2) 系统(6)为概率意义下有界的.

2.3 问题描述

本文将针对系统(1),在满足假设 1~假设 3 的条件下设计状态观测器,使得观测器误差收敛于零点的一个邻域内,且邻域大小可通过设计不同的参数进行调节,即观测误差是依概率最终有界的.

由于系统中含有不确定非线性函数和状态相关的随机扰动,导致系统的观测器设计变得更加复杂.由假设 3 可以看出,系统中的不确定非线性函数的界中除包含一些已知的信息外,还含有不可测状态信号

及多个不确定参数,这就要求在设计观测器时需解决不可测状态的同时还需解决多参数不确定问题。

针对上述问题,下面将进行不确定随机非线性系统(1)的自适应观测器设计,其中通过设计一个自适应学习律,同时解决多参数不确定的问题,并最大限度地利用关于不确定非线性函数的已知信息,进而得到高性能的非线性观测器。

3 自适应观测器设计

对于系统(1)构造下列自适应非线性观测器:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} - K\tilde{y} - \theta P^{-1}C^T S(\hat{x}, \rho_1, \rho_2)(\hat{y} - y), \quad (9)$$

$$S(\hat{x}, \rho_1, \rho_2) = 1 + \rho_1^2 + \|\hat{x}\|^2 \rho_1^2 + \rho_2^2 + \|y\|^2, \quad (10)$$

$$\dot{\theta} = M\|\hat{y} - y\|^2 S - M\delta\theta. \quad (11)$$

其中: $K \in R^{n \times p}$, 满足 $A_0 = A - KC$ 是 Hurwitz 的; $\hat{y} = C\hat{x}$, $\hat{y} - y$ 为系统输出值的观测误差,因此是可以获得的; $M > 0, \delta > 0$ 为待定参数。

自适应非线性观测器的实现框图如图 1 所示。

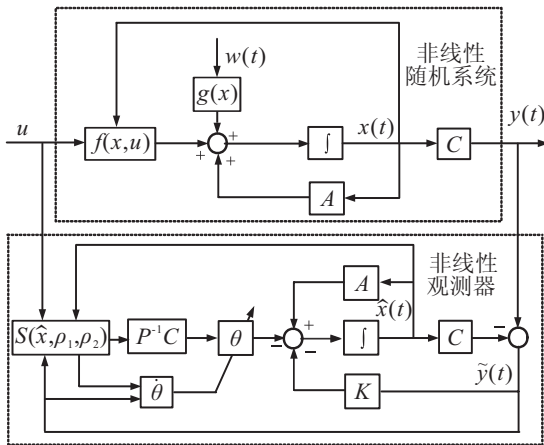


图 1 非线性观测器结构框图

注 2 观测器(9)~(11)只包含了非线性不确定项上界中的已知函数,无需精确知道非线性项的结构或其上界的精确参数,只要非线性不确定项满足假设 3 即可。其中 S 既补偿了非线性不确定项 $f(x, u)$ 也补偿了 $It\dot{\omega}$ 微分项 $g(x)d\omega$ 。式(11)通过设计一个参数自适应律,同时解决了不确定非线性函数上界中的多参数不确定问题。

4 稳定性分析

定义观测误差为 $\tilde{x} = \hat{x} - x, C\tilde{x} = \hat{y} - y$ 。

由式(9)减去(1)可得观测误差动态方程为

$$d\tilde{x} = [A_0\tilde{x} - \theta P^{-1}C^T S(\hat{x}, \rho_1, \rho_2)(\hat{y} - y) - f]dt - g d\omega. \quad (12)$$

下面证明观测误差系统(12)为依概率最终有界的。首先,假设存在 θ 的理想值 $\theta^* > 0$, 使得当 $\theta = \theta^*$ 时,观测器性能达到最优。

定理 1 对于系统(1)和观测器(9)~(11),如果系统(1)满足假设 1~假设 3,则观测误差 $\tilde{x}(t)$ 和自适应参数 θ 为概率意义下有界的。

证明 选择 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2}[\tilde{x}^T P \tilde{x} + M^{-1}(\theta - \theta^*)^2], \quad (13)$$

将式(13)沿着(12)进行 $It\dot{\omega}$ 微分可得

$$LV = \frac{1}{2}\tilde{x}^T(A_0^T P + P A_0)\tilde{x} - f^T(x, u)P\tilde{x} - \theta\tilde{x}^T C^T S(\hat{x}, \rho_1, \rho_2)C\tilde{x} + \frac{1}{2}g^T(x)Pg(x) + M^{-1}(\theta - \theta^*)\dot{\theta}. \quad (14)$$

应用假设 2 可得

$$LV \leq -\frac{1}{2}\tilde{x}^T Q \tilde{x} - \theta\tilde{x}^T C^T S(\hat{x}, \rho_1, \rho_2)C\tilde{x} - f_0^T C\tilde{x} + \frac{1}{2}\lambda_{\max}(P)\|g(x)\|^2 + M^{-1}(\theta - \theta^*)\dot{\theta}. \quad (15)$$

进而应用假设 3,由式(15)可得

$$LV \leq -\frac{1}{2}\tilde{x}^T Q \tilde{x} + \|\hat{y} - y\| [c_1 + c_2 \|x\| \rho_1 + c_3 \rho_2] - \theta\tilde{x}^T C^T S C \tilde{x} + \frac{1}{2}\lambda_{\max}(P)b_1^2 \|y\|^2 + M^{-1}(\theta - \theta^*)\dot{\theta}. \quad (16)$$

由于 $\|x\| \leq \|\tilde{x}\| + \|\hat{x}\|$, 代入式(16)可得

$$LV \leq -\frac{1}{2}\lambda_{\min}(Q)\|\tilde{x}\|^2 + c_1\|\hat{y} - y\| + c_2\|\hat{y} - y\|\|\hat{x}\|\rho_1 + c_2\|\hat{y} - y\|\|\tilde{x}\|\rho_1 + c_3\|\hat{y} - y\|\rho_2 - \theta(\hat{y} - y)^T S(\hat{y} - y) + \frac{1}{2}\lambda_{\max}(P)b_1^2 \|y\|^2 + M^{-1}(\theta - \theta^*)\dot{\theta}. \quad (17)$$

应用 Young's 不等式,对于 $\forall \alpha > 0$, 有下式成立:

$$c_2\|C\tilde{x}\|\|\tilde{x}\|\rho_1 \leq \frac{1}{2}c_2\left(\alpha\|C\tilde{x}\|^2\rho_1^2 + \frac{1}{\alpha}\|\tilde{x}\|^2\right), \quad (18)$$

其中取 $\alpha \geq 2c_2/\lambda_{\min}(Q)$, 即 $c_2/2\alpha \leq \lambda_{\min}(Q)/4$ 。因此可得

$$LV \leq -\frac{1}{4}\lambda_{\min}(Q)\|\tilde{x}\|^2 + c_2\|\hat{y} - y\|\|\hat{x}\|\rho_1 + c_1\|\hat{y} - y\| + \frac{\alpha}{2}c_2\|\hat{y} - y\|^2\rho_1^2 + c_3\|\hat{y} - y\|\rho_2 - \theta(\hat{y} - y)^T S(\hat{y} - y) + \frac{1}{2}\lambda_{\max}(P)b_1^2 \|y\|^2 + M^{-1}(\theta - \theta^*)\dot{\theta}. \quad (19)$$

将式(10),(11)带入(19)可得

$$LV \leq -\frac{1}{4}\lambda_{\min}(Q)\|\tilde{x}\|^2 + c_2\|\hat{y} - y\|\|\hat{x}\|\rho_1 + c_1\|\hat{y} - y\| + \frac{\alpha}{2}c_2\|\hat{y} - y\|^2\rho_1^2 + \lambda_{\max}(P)b_1^2\|C\hat{x}\|^2 + c_3\|\hat{y} - y\|\rho_2 + \lambda_{\max}(P)b_1^2\|\hat{y} - y\|^2 - \delta\theta(\theta - \theta^*) - \theta^*\|\hat{y} - y\|^2(1 + \rho_1^2 + \|\hat{x}\|^2\rho_1^2 + \rho_2^2 + \|y\|^2) \leq -\frac{1}{4}\lambda_{\min}(Q)\|\tilde{x}\|^2 + \frac{c_1^2}{4\theta^*} + \frac{1}{4\theta^*}(c_2^2 + c_3^2) + \frac{1}{2}\delta\theta^* - \frac{1}{2}\delta(\theta - \theta^*)^2 \leq$$

$$-\mu V + \varepsilon = -\mu(V - \mu^{-1}\varepsilon). \quad (20)$$

其中

$$\varepsilon = \frac{c_1^2}{4\theta^*} + \frac{1}{4\theta^*}(c_2^2 + c_3^2) + \frac{1}{2}\delta\theta^*. \quad (21)$$

$$\mu = \min \left\{ \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\lambda_{\min}(P)}, \delta M \right\}. \quad (22)$$

$$\bar{\theta}^* = \theta^* - b_1^2 \lambda_{\max}(P). \quad (23)$$

$$\theta^* \geq \max \{ b_1^2 \lambda_{\max}(P), \alpha c_2 / 2, b_1^2 \lambda_{\max}(P) / \lambda^2 \}. \quad (24)$$

$$\lambda = \begin{cases} \|\hat{y} - y\|, & \|\hat{y} - y\| \geq c_0; \\ c_0, & \|\hat{y} - y\| < c_0; \end{cases} \quad (25)$$

$c_0 > 0$ 为任意小常数.

定义 $\Omega = \{(\tilde{x}, \theta) \in R^n \times R : V(\tilde{x}, \theta) \leq \mu^{-1}\varepsilon\}$. 由于 $\mu > 0, \varepsilon > 0$, 可知 Ω 是紧集. 再由式 (20) 可知, 当 (\tilde{x}, θ) 在紧集 Ω 之外时, LV 是严格单调递减的, 因此由引理 1 可知, \tilde{x} 和 θ 是依概率有界的.

注 3 由式 (21) 和 (22) 可知, 若 θ^* 充分大且 δ 充分小, 则可使剩余误差 $\mu^{-1}\varepsilon$ 充分小, 这样能够使估计误差充分小. 由于 θ^* 是 θ 的理想值, 需要 θ 充分大. 由式 (22) 可知, 可通过选取充分大的 M 和充分小的 δ 来使 $\dot{\theta} > 0$, 进而使 θ 的值增大.

5 数值仿真

考虑如下随机非线性系统:

$$\begin{cases} dx_1 \\ dx_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} x_1 x_2^2 \\ x_2 \sin x_1 \end{bmatrix} d\omega + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_1 x_1^2 x_2 / (\alpha_2 + \alpha_3 e^{\alpha_4 x_2}) \end{bmatrix} dt, \quad (26)$$

$$y = x_1 + x_2. \quad (27)$$

其中: $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, 4)$ 为未知参数, ω 为一维标准 Wiener 过程. 仿真中取 $\alpha_1 = -2, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = 0.5, \alpha_4 = 1$.

由式 (26)~(27) 可知

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 1].$$

仿真实验中选择观测增益为 $K = [5 \ 5]^T$, 则有

$$A_0 = A - KC = \begin{bmatrix} -5 & -4 \\ -5 & -5 \end{bmatrix};$$

取 $Q = \begin{bmatrix} 80 & -10 \\ -10 & 80 \end{bmatrix}$, 由式 (3) 可解得 $P = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$,

则 $P^{-1}C = [0.1 \ 0.1]^T$.

由式 (9)~(11) 可得自适应非线性观测器为

$$\begin{aligned} [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2]^T &= \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 5 \\ 5 \end{bmatrix} (\hat{x}_1 + \hat{x}_2 - y) - \end{aligned}$$

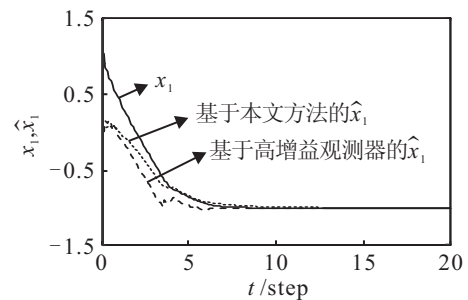
$$\theta \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix} (\hat{x}_1 + \hat{x}_2 - y) [1 + y^4 + (\hat{x}_1^2 + \hat{x}_2^2)y^4 + y^2]. \quad (28)$$

自适应律为

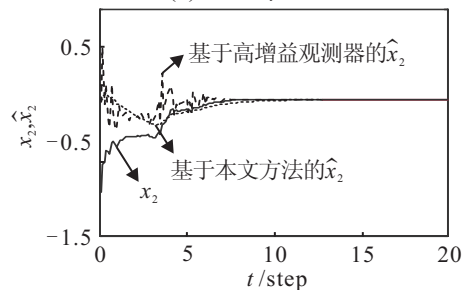
$$\dot{\theta} = M(\hat{x}_1 + \hat{x}_2 - y)^2 [1 + y^4 + (\hat{x}_1^2 + \hat{x}_2^2)y^4 + y^2] - M\delta\theta. \quad (29)$$

仿真中取 $M = 800, \delta = 0.00001$.

下面分别应用高增益观测器和本文的自适应非线性观测器对状态 x_1, x_2 进行估计, 仿真结果如图 2 所示. 仿真实验中高增益参数取 $L = 10, k_1 = 6, k_2 = 9$. 图 3 给出了两种方法的估计误差对比曲线, 图 4 给出了自适应参数 θ 的估计曲线.

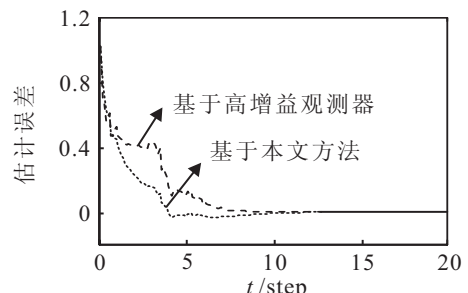


(a) 状态 x_1 仿真结果

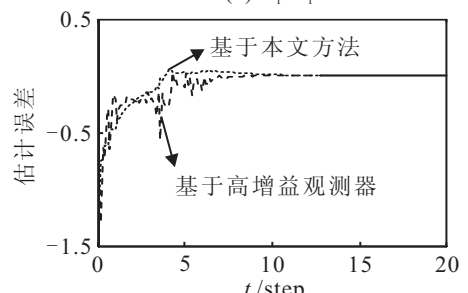


(b) 状态 x_2 仿真结果

图 2 状态及状态估计曲线



(a) $x_1 - \hat{x}_1$



(b) $x_2 - \hat{x}_2$

图 3 估计误差曲线

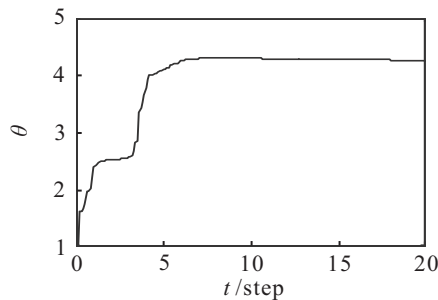


图 4 自适应参数 θ

由图 2 和图 3 可以看出, 观测器设计中考虑了不确定非线性函数和随机项的影响, 并给出了不确定参数的自适应律, 其响应速度优于高增益观测器。

6 结 论

针对带有非参数不确定随机非线性系统, 设计了非线性自适应观测器。主要结果有: 1) 设计了一个参数自适应律, 解决了多参数不确定问题; 2) 基于不确定函数及随机项系数的界的已知部分, 设计一个非线性函数, 进而应用于自适应非线性观测器的设计; 3) 应用 Lyapunov 稳定性理论, 结合 $It\hat{o}$ 随机微分理论, 证明了该观测器是最终有界的, 并且它的界可以通过设计观测器参数进行调节。最后, 引入一个数值仿真例子, 分别应用本文方法和高增益观测器进行对比, 结果表明了本文方法的有效性和优越性。

参考文献(References)

- [1] 朱芳来, 岑峰, 董学平. 一种基于全维和降维观测器的故障检测和重构方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 258-262.
(Zhu F L, Cen F, Dong X P. A kind of fault detection and fault reconstruction based on full-order and reduced-order observers[J]. Control and Decision, 2011, 26(2): 258-262.)
- [2] 康军, 戴冠中. 具有状态观测器的网络化控制系统的设计[J]. 控制与决策, 2010, 25(6): 943-947.
(Kang J, Dai G Z. Design of networked control systems with state observer[J]. Control and Decision, 2010, 25(6): 943-947.)
- [3] 蔡俊伟, 胡寿松. 基于观测器的非线性系统 H_∞ 模糊可靠控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 621-627.
(Cai J W, Hu S S. H_∞ fuzzy reliable control based on

- observer for nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2009, 24(4): 621-627.)
- [4] 张柯, 姜斌, 刘京津. 基于自适应观测器控制系统的快速故障调节[J]. 控制与决策, 2008, 23(7): 771-775.
(Zhang K, Jiang B, Liu J J. Fast fault accommodation of control systems by using adaptive observer[J]. Control and Decision, 2008, 23 (7): 771-775.)
- [5] Dong Ya-Li, Mei Sheng-Wei. Adaptive observer for a class of nonlinear systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(10): 1081-1084.
- [6] Liu Yusheng. Robust adaptive observer for nonlinear systems with unmodeled dynamics[J]. Automatica, 2009, 45(8): 1891-1895.
- [7] Hovakimyan N, Calise A J, Madyastha V K. An adaptive observer design methodology for bounded nonlinear processes[C]. Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control. Piscataway: IEEE, 2002, 4: 4700-4705.
- [8] Shu-Jun Liu, Zhong-Ping Jiang, Ji-Feng Zhang. Global output-feedback stabilization for a class of stochastic non-minimum phase nonlinear systems[J]. Automatica, 2008, 44(8): 1944-1957.
- [9] Yugang Niu, Daniel W C Ho. Robust observer design for $It\hat{o}$ stochastic time-delay systems via sliding mode control[J]. Systems & Control Letters, 2006, 55(10): 781-793.
- [10] Liu Yungang, Zhang Jifeng. Reduced-order observer based control design for stochastic nonlinear systems[J]. Systems & Control Letters, 2004, 52(2): 123-135.
- [11] 刘允刚, 张纪峰. 随机非线性系统最小阶状态观测器及输出反馈镇定控制设计[J]. 中国科学: E 辑, 2004, 34(4): 416-432.
(Liu R G, Zhang J F. Stochastic nonlinear system minimum-order observer and output feedback stabilization control design[J]. Science in China: Serial E, 2004, 34(4): 416-432.)
- [12] Psillakis H E, Alexandridis A T. Adaptive tracking control for stochastic uncertain nonlinear systems satisfying short- and long-term cost criteria[J]. Int J of Control, 2006, 79 (2): 107-118.

(上接第 1551 页)

- [9] Wu L, Shahidepour M, Fu Y. Security-constrained generation and transmission outage scheduling with uncertainties[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(3): 1674-1685.
- [10] Batut J, Renaud A. Daily generation scheduling optimization with transmission constraints: A new class of algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 982-989.