

基于滑模观测器的非线性系统故障检测与重构

孟建基¹, 张巍巍²

1. 中冶集团建筑研究总院, 北京 100088

2. 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083

摘要 为提高控制系统的安全性和可靠性, 针对非线性系统传感器的故障诊断问题, 提出一种利用滑模观测器进行故障检测和重构的方法。首先引入积分变量将传感器故障转化为执行器故障, 通过对执行器故障的诊断间接诊断传感器故障。针对转化后的系统构造滑模观测器, 进而实现传感器故障重构。采用 Lyapunov 稳定性理论, 证明设计的滑模观测器的稳定性。对于构造的滑模观测器, 给出一种用线性矩阵不等式方法求解的简便算法。最后, 对于文献中给出的非线性系统, 就不同的故障类型作用在传感器上的几种情形进行仿真。仿真结果表明, 所设计的滑模观测器能够准确地重构非线性系统中传感器的缓变故障和突变故障; 当系统存在未知扰动时, 所设计的滑模观测器也能准确地重构故障。该方法从开始就对故障进行重构, 避免了产生和评价残差信号的复杂性。

关键词 故障检测; 非线性系统; 滑模; 观测器

中图分类号 TP273

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)11-0024-05

Fault Detection and Reconstruction for a Nonlinear System Based on Sliding Mode Observers

MENG Jianji¹, ZHANG Weiwei²

1. Building Research Institute, China Metallurgical Group Co., Ltd., Beijing 100088, China

2. National Engineer Research Center of Advanced Rolling, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract With the expansion of control systems in scale, the possibility of fault is getting high. The security and reliability of a control system becomes a key issue. So far, the fault diagnosis for linear systems sees many successes, but that for a nonlinear system remains a difficult problem. The traditional fault diagnosis method based on state observer can not effectively used for nonlinear systems; and its robustness of the diagnosis and localization can not be well ensured when a system has uncertainties and disturbances. In this paper, for the sensor fault diagnosis and for nonlinear systems, a method for fault detection and reconstruction based on sliding mode observers is proposed. The sensors fault is first augmented into actuator faults by introducing integral variants. Then a sliding mode observer is constructed for the augmented system. The stability of the sliding observers is proven by using the Lyapunov stability theory. Finally, the observers are designed by solving the Linear Matrix Inequalities (LMI) and the sensor faults can be reconstructed directly. Numerical simulation shows the effectiveness and accuracy of the reconstruction of the sensor faults using the proposed approach.

Keywords fault detection; nonlinear system; sliding mode; observer

0 引言

随着控制系统规模的扩大, 系统出现故障的可能性越来越高, 如何提高控制系统的安全性和可靠性, 日益成为控制领域需要解决的热点问题。目前, 控制系统的故障诊断在线性系统

中已经取得了许多丰硕的成果, 非线性系统的故障诊断依然是控制领域的一个难点问题。传统的基于状态观测器的故障诊断方法面临两方面的困难, 一是对一般的非线性系统缺乏有效手段; 二是当系统存在不确定性和扰动时如何保证故障检测和定

收稿日期: 2010-03-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2009AA04Z163)

作者简介: 孟建基, 硕士研究生, 研究方向为智能控制、控制系统的故障检测与诊断, 电子信箱: jime125@163.com; 张巍巍(通信作者), 博士研究生, 研究方向为非线性控制、工业过程控制, 电子信箱: zhv2008@gmail.com

位的鲁棒性^[1]。为此,学者们进行了大量的研究工作。文献[2]~[4]对几类特定的非线性系统设计观测器/滤波器,通过构造残差信号判断故障发生的位置和时间,坐标变换和观测器的设计都比较复杂。Sreedhar, Fernandez 和 Masada 将滑模观测器方法引入控制系统的故障诊断中,提高了故障诊断的鲁棒性;随后 Edwards, Spurgeon 和 Patton 提出等效输出注入概念,设计滑模观测器重构故障^[6];在此基础上, C. P. Tan 引入虚拟系统,将传感器故障转化为执行器故障进行检测和重构,其所采用的滑模观测器方法是,对于非线性系统,通过在工作点线性化后再进行检测。本文利用积分变量扩维方法,将滑模观测器方法推广到一类满足 Lipschitz 条件的非线性系统,证明了滑模观测器的稳定性,给出了稳定的滑模观测器的设计方法。在系统存在未知扰动时,所设计的滑模观测器也能准确地重构故障。

1 非线性系统描述

考虑如下非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + f(x, t) + Bu \\ y = Cx + f_s(x, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^p$ 分别为系统的状态向量、输入向量和输出向量, A 、 B 、 C 为已知的具有合适维数的矩阵, $f(x, t)$ 为非线性函数, $f_s(x, t)$ 为传感器故障。

假设 1 系统 (A, C) 可观。

假设 2 非线性函数 $f(x, t)$ 关于状态 x 满足 Lipschitz 条件, 即

$$\|f(x_1, t) - f(x_2, t)\| \leq \gamma \|x_1 - x_2\|$$

式中 γ 为 Lipschitz 常数。

假设 3 故障 $f_s(x, t)$ 范数有界, 即

$$\|f_s\| \leq \delta$$

式中 δ 为范数界。

2 滑模观测器设计与故障重构

2.1 滑模观测器的构造和故障重构

首先对式(1)描述的系统进行扩维。定义积分向量:

$$x_0 = \int_0^t y(\tau) d\tau = \int_0^t Cx + f_s(x, \tau) \quad (2)$$

系统(1)扩展为

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = Cx + f_s(x, \tau) \\ \dot{x} = Ax + f(x, t) + Bu \end{cases} \quad (3)$$

令

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \begin{bmatrix} x_0 \\ x \end{bmatrix} & \bar{A} &= \begin{bmatrix} 0 & A \\ 0 & C \end{bmatrix} & \bar{C} &= [I_p \quad 0] \\ \bar{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} & F(\bar{x}, t) &= \begin{bmatrix} 0 \\ f(x, t) \end{bmatrix} & B_s &= \begin{bmatrix} I_p \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

于是, 系统(1)可以写成

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + F(\bar{x}, t) + \bar{B}u + B_s f_s \\ \bar{y} = \bar{C}\bar{x} \end{cases} \quad (4)$$

通过上述扩展, 新系统中已经不包含传感器故障, 而变为执行器故障。这样的转换也具有明显的物理意义, 传感器的故障行为, 将造成控制器的误控制作用, 误控制作用将改变被控对象的动态方程, 因此可以通过对执行器故障的诊断间接诊断传感器故障。

由假设 1, 可证 $(\bar{A}, \bar{C})$ 是可观的, 因此可以设计增益阵 L , 使得 $\bar{A} - LC$ 稳定。

由假设 2, 可知下式成立:

$$\|F(\bar{x}_1, t) - F(\bar{x}_2, t)\| \leq \gamma \|\bar{x}_1 - \bar{x}_2\| \quad (5)$$

对于扩维后的系统(4), 考虑故障 f_s 的检测和重构问题, 构造滑模观测器:

$$\dot{\hat{x}} = \bar{A}\hat{x} + F(\hat{x}, t) + \bar{B}u - L(\hat{y} - \bar{y}) + B_s v \quad (6)$$

$$\hat{y} = \bar{C}\hat{x} \quad (7)$$

其中, $\hat{x} \in R^{n+p}$, L 为待定的观测器增益矩阵。滑模控制律为

$$v = \begin{cases} -\rho \frac{M(\hat{y} - \bar{y})}{\|M(\hat{y} - \bar{y})\|} & \|M(\hat{y} - \bar{y})\| \neq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, ρ 为正数。 ρ, M 满足:

$$\rho - \delta \geq 0 \quad (9)$$

$$PB_s = \bar{C}^T M^T \quad (10)$$

定义误差 $e = \hat{x} - \bar{x}$, 则 $\dot{e} = \dot{\hat{x}} - \dot{\bar{x}}$, 将式(4)、(6)带入, 得到误差系统为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \bar{A}e - L(\hat{y} - \bar{y}) + (F(\hat{x}, t) - F(\bar{x}, t)) + B_s(v - f_s) \\ &= (\bar{A} - LC)e + (F(\hat{x}, t) - F(\bar{x}, t)) + B_s(v - f_s) \end{aligned} \quad (11)$$

定理 1 对于系统(4), 假设 1 至假设 3 成立, 如果存在对称正定矩阵 P , 使下面线形矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} (\bar{A} - LC)^T P - P(\bar{A} - LC) + I & P \\ P & -\frac{1}{\gamma^2} I \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

则可使误差:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0 \quad (13)$$

定理 1 给出了闭环误差系统稳定的充分条件。下面采用 Lyapunov 稳定性理论证明滑模观测器的稳定性。

引理 1 如果 $f(x, t)$ 满足 Lipschitz 条件, 则存在对称正定矩阵 P , 使得

$$2e_1^T P(f(x_1, t) - f(x_2, t)) \leq \gamma^2 e_1^T P P e + e_1^T e_1 \quad (14)$$

其中, $e_1 = x_1 - x_2$ 。

引理 2 (Schur 补引理) 非线性矩阵不等式 $R(x) < 0$, $Q(x) - S(x)R^{-1}(x)S^T(x) < 0$, 其中 $Q(x) = Q^T(x)$, $R(x) = R^T(x)$, 等价于线性矩阵不等式 $\begin{bmatrix} Q(x) & S(x) \\ S^T(x) & R(x) \end{bmatrix} < 0$, 其中 $R(x) < 0$ 。

证明 取 Lyapunov 函数 $V(t) = e^T P e$, 则有

$$\dot{V}(t) = e^T [(\bar{A} - LC)^T P - P(\bar{A} - LC)] e + 2e^T P(F(\hat{x}, t) - F(\bar{x}, t)) + 2e^T P B_s(v - f_s)$$

由引理 1 和式 (10), 可得

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &\leq e^T[(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})^T\bar{P}-\bar{P}(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})]e+\gamma^2e^T\bar{P}\bar{P}e+e^Te+2e^T\bar{C}^T\bar{M}^T(v-f_s) \\ &=e^T[(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})^T\bar{P}-\bar{P}(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})]e+\gamma^2e^T\bar{P}\bar{P}e+e^Te+2(\bar{M}\bar{C}e)^Tv- \\ &\quad 2(\bar{M}\bar{C}e)^Tf_s \\ &\leq e^T[(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})^T\bar{P}-\bar{P}(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})]e+\gamma^2e^T\bar{P}\bar{P}e+e^Te-2\rho\|\bar{M}\bar{C}e\|+ \\ &\quad 2\|\bar{M}\bar{C}e\|\delta \\ &=e^T[(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})^T\bar{P}-\bar{P}(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})]e+\gamma^2e^T\bar{P}\bar{P}e+e^Te-2\|\bar{M}\bar{C}e\|(\rho-\delta) \\ &\leq e^T[(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})^T\bar{P}-\bar{P}(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})+\gamma^2\bar{P}\bar{P}+I]e\end{aligned}$$

根据 Schur 补引理, 如果

$$\begin{bmatrix} (\bar{A}-\bar{L}\bar{C})^T\bar{P}-\bar{P}(\bar{A}-\bar{L}\bar{C})+I & P \\ P & -\frac{1}{\gamma^2}I \end{bmatrix} < 0$$

可以得到 $\dot{V} < 0$, 那么 $e \rightarrow 0$, 式 (14) 成立。

设计上述的滑模观测器, 根据式 (11), 可得

$$f_s - v(t) = O(e, \dot{e})$$

其中, $O(e, \dot{e})$ 由 e 和 $\dot{e}$ 造成。在滑动模态区, $e=0$ 且 $\dot{e}=0$, 因此 $f_s=v(t)$ 。考虑到式 (6)~(8) 的滑模观测器在实际应用中可能出现高频抖振, 将式 (8) 等价控制由如下连续逼近函数替代:

$$v_{eq} = -\rho \frac{M(\hat{y}-\bar{y})}{\|M(\hat{y}-\bar{y})\| + \varepsilon} \quad (15)$$

其中, 参数 ε 为非常小的正数。只要参数 ε 取得足够小, 式 (14) 描述的等价控制就可以无限逼近控制律。故障 f_s 可以由等价控制 v_{eq} 重构, 即

$$f_s = v_{eq} = -\rho \frac{M(\hat{y}-\bar{y})}{\|M(\hat{y}-\bar{y})\| + \varepsilon} \quad (16)$$

2.2 滑模观测器求解

针对状态观测器的设计, 文献[9]总结了儿种求解观测器增益矩阵 L 的方法。 L 都是构造性选取的, 由于选取参数的随意性, 使得对应的 Riccati 不等式的可解性不能保证。本文针对上述构造的滑模观测器, 给出了一种用线性矩阵不等式方法求解观测器的简便算法。

为了求解 L, P 和 M , 假定

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}$$

其中, $P_1 \in R^{p \times p}, P_2 \in R^{n \times n}$ 。又 $B_s = \bar{C}^T$, 根据式 (12), 解得

$$M = \begin{bmatrix} P_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

令 $\bar{P} = PL$, 由式 (12) 可得

$$\begin{bmatrix} A^T\bar{P} + \bar{P}A - \bar{C}^T\bar{P}^T - \bar{P}\bar{C} + I & P \\ P & -\frac{1}{\gamma^2}I \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

利用 LMI 工具可解出 P 和 $\bar{P}$, 从而得到

$$L = P^{-1}\bar{P} \quad (18)$$

这样, 通过假设矩阵 P 的构造, 利用线形变换, 将式 (12) 的求解问题转化为对式 (16) 的求解, 在保证可解性的同时便于利用 LMI 工具求解。

3 数值仿真

考虑如下非线性系统^[3]:

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & -2 \end{bmatrix} & f(x, t) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.2\sin(x_1x_2) \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} & C &= I_2 & u &= -0.2x_1\end{aligned}$$

由系统 (4) 可得

$$\begin{aligned}\bar{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix} & F(x, t) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.2\sin(x_1x_2) \end{bmatrix} \\ \bar{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \bar{C} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & B_s &= \bar{C}^T\end{aligned}$$

取 $\gamma=0.5$, 由第 2.2 节滑模观测器求解算法可以解得:

$$\begin{aligned}P &= \begin{bmatrix} 1.5473 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.5473 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.6277 & 0.6427 \\ 0 & 0 & 0.6427 & 1.6277 \end{bmatrix} \\ L &= \begin{bmatrix} 1.8239 & 0 \\ 0 & 1.8239 \\ 1.1235 & -0.4436 \\ -0.4436 & 1.1235 \end{bmatrix} & M &= \begin{bmatrix} 1.5437 & 0 \\ 0 & 1.5437 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

本文对不同故障类型在不同输出通道上的儿种情形进行了仿真。

情形 1 第 1 个输出传感器发生故障, 第 2 个输出传感器正常工作, 考虑故障为突变故障, 在 $t=1s$ 时发生。其形式为

$$f_{s1}=0.4 \quad f_{s2}=0$$

情形 2 第 1 个输出传感器正常工作, 第 2 个输出传感器发生故障, 考虑故障为缓变故障, 在 $t=1s$ 时发生。其形式为

$$f_{s1}=0 \quad f_{s2}=\begin{cases} 0.2t & 1 < t < 3 \\ -0.2t & 3 < t < 5 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

情形 3 系统存在未知噪声干扰时对故障的重构, 系统的故障形式为 f_{s1} 和 f_{s2} , 分别单独发生在第 1 个和第 2 个输出传感器上。干扰为均值 0, 方差 0.001 的高斯噪声信号。

仿真结果分别如图 1~3 所示。由图可以看出, 利用所设计的滑模观测器能够很好地重构实际的传感器故障, 可以利用重构信号准确定位故障和估计故障的大小。当系统存在未知扰动时, 所设计的滑模观测器也能准确地重构故障。这种方法从一开始就对故障进行重构, 避免了产生和评价残差信号的复杂性。

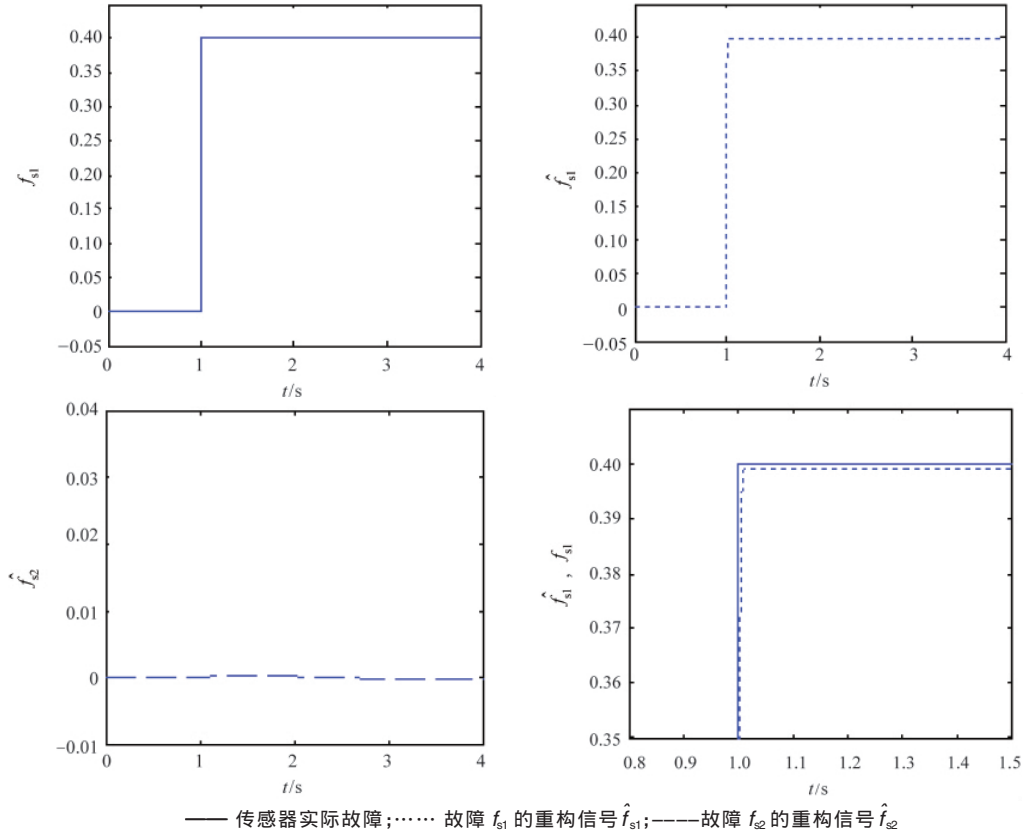


图 1 情形 1 的故障 f_{s1} 信号、重构故障信号 $\hat{f}_{s1}$ 和 $\hat{f}_{s2}$

Fig. 1 Fault f_{s1} , reconstructed faults $\hat{f}_{s1}$ and $\hat{f}_{s2}$ in case 1

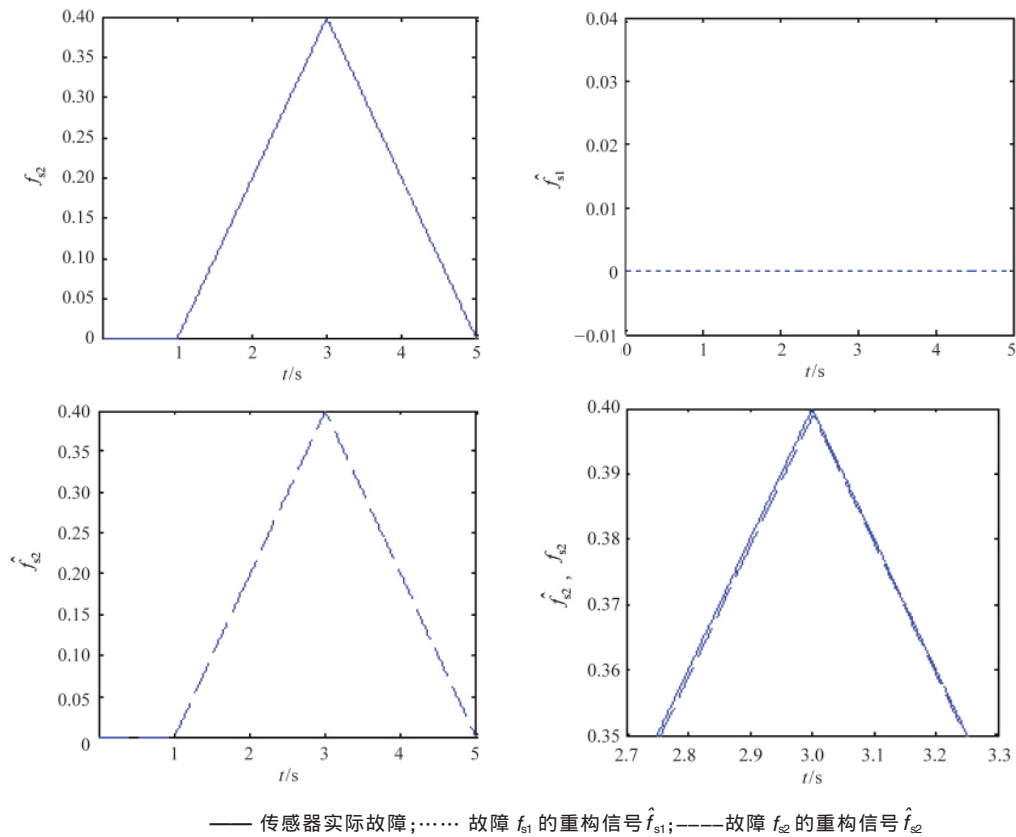
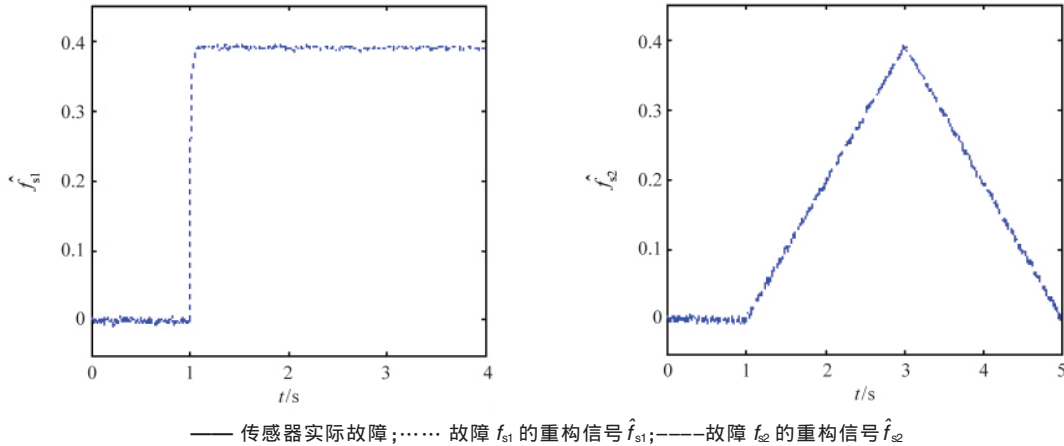


图 2 情形 2 的故障 f_{s2} 信号、重构故障信号 $\hat{f}_{s1}$ 和 $\hat{f}_{s2}$

Fig. 2 Fault f_{s2} , reconstructed faults $\hat{f}_{s1}$ and $\hat{f}_{s2}$ in case 2



—— 传感器实际故障; ····· 故障 f_{s1} 的重构信号 $\hat{f}_{s1}$; ——— 故障 f_{s2} 的重构信号 $\hat{f}_{s2}$

图 3 情形 3 有噪声时的重构故障信号 $\hat{f}_{s1}$ 和 $\hat{f}_{s2}$

Fig. 3 Reconstructed fault $\hat{f}_{s1}$ and reconstructed fault $\hat{f}_{s2}$ with noise in case 3

4 结论

提出了一种新的非线性系统传感器故障的诊断和重构的方法。通过定义积分变量,将传感器故障的诊断问题转化为执行器的诊断问题;基于 Lyapunov 稳定性理论证明了所设计的滑模观测器的稳定性,给出了稳定性的充分条件,观测器的设计可以通过求解 LMI 完成。仿真结果证明了所提出方法的有效性和准确性。

参考文献 (References)

- [1] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K. A review of process fault detection and diagnosis: Part 1 Quantitative model-based methods [J]. *Computer & Chemical Engineering*, 2003, 27: 293-311.
- [2] Gauthier J P, Hammouri H, Othman S. A simple observer for nonlinear systems application to bioreactors [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(6): 875-880.
- [3] 陈茂银, 周东华. 一类非线性系统的故障诊断 [J]. *自动化学报*, 2004, 30(11): 1011-1016.
Chen Maoyin, Zhou Donghua. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(11): 1011-1016.

- [4] Sharma R, Aldeen M. Fault detection in nonlinear systems with unknown inputs using sliding mode observer [C]//Proceedings of 2007 American Control Conference (ACC'07). New York, NY, 2007: 432-437.
- [5] Sreedhar R, Fernandez B, Masada G Y. Robust fault detection in nonlinear systems using sliding mode observers [C]//IEEE Conference on Control Applications. Vancouver, 1993: 715-721.
- [6] Edwards C, Spurgeon S K, Patton R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation [J]. *Automatica*, 2000, 36: 541-553.
- [7] 俞立. 鲁棒控制: 线性矩阵不等式处理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
Yu Li. *Robust control: The linear matrix inequality method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [8] Chee P T, Edwards C. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults [J]. *Automatica*, 2002, 38: 1815-1821.
- [9] 王占山, 张化光, 黎明, 等. 一类非线性状态观测器的设计 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2003, 24(11): 1025-1028.
Wang Zhanshan, Zhang Huaguang, Li Ming, et al. *Journal of Northeastern University: Natural Science Edition*, 2003, 24(11): 1025-1028.

(责任编辑 朱宇)

· 学术动态 ·



“第八届海峡两岸土壤肥料学术研讨会”征文

中国土壤学会将于 2010 年 12 月 5—12 日在中国台北市召开“第八届海峡两岸土壤肥料学术研讨会”。

征文内容包括: 土壤基础研究, 土壤肥力与施肥技术, 土壤生态与微生物利用, 土壤环境与污染整治, 土壤改良与土壤物理, 土壤信息与管理应用。

截稿时间: 论文摘要, 2010 年 6 月 30 日; 论文全文, 2010 年 10 月 31 日。

联系方式: 南京市北京东路 71 号中国土壤学会 (210008), 电话: 025-86881532, 86881538; 电子信箱: sssc@issas.ac.cn。