

文章编号: 1001-0920(2009)01-0133-04

## 基于故障跟踪估计器的非线性时滞系统故障诊断

颜秉勇<sup>1</sup>, 田作华<sup>1</sup>, 施颂椒<sup>1</sup>, 翁正新<sup>1</sup>, 时 石<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 自动化系, 上海 200240; 2. 济南半导体元件实验所, 济南 250014)

**摘 要:** 提出一种可有效检测和估计一类非线性时滞系统故障的故障跟踪估计器. 根据预测控制和迭代学习控制的思想, 在所选取的优化时域长度内, 通过迭代算法调节故障跟踪估计器中的可调参数, 使之逼近系统中实际发生的故障. 与以往基于观测器的故障诊断方法不同的是, 故障跟踪估计器可同时检测和估计系统中发生的故障, 而且针对不同类型的故障亦有很好的适应性. 仿真结果表明了所提出算法的可行性和有效性.

**关键词:** 故障跟踪估计器; 预测控制; 迭代学习控制; 观测器; 故障诊断

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Fault diagnosis for nonlinear time-delay systems based on fault tracking approximator

YAN Bing-yong<sup>1</sup>, TIAN Zuohua<sup>1</sup>, SHI Song-jiao<sup>1</sup>, WENG Zheng-xin<sup>1</sup>, SHI Shi<sup>2</sup>

(1. Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Ji 'nan Semiconductor Component Laboratory, Ji 'nan 250014, China. Correspondent: YAN Bing-yong, E-mail: yanby@sju.edu.cn.)

**Abstract:** A fault tracking approximator-based method is proposed for fault detection and identification for a class of nonlinear time-delay systems. Motivated by the predictive control and iterative learning control theory, an iterative learning algorithm is designed to update the adjustable parameter in the fault tracking approximator within a specified horizon. The adjustable parameter can give an estimation of the real fault occurred in the system. Different from the traditional fault observers based fault diagnosis methods, the approach proposed in this paper can not only detect the system faults, but also approximate the fault function, and can easily accommodate different kinds of faults. Finally, simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** Fault tracking approximator; Predictive control; Iterative learning control; Fault observer; Fault diagnosis

### 1 引 言

近年来,有关时滞系统故障诊断问题的研究已成为人们关注的热点之一,取得了大量的研究成果.然而,实际系统不可避免地具有不同程度的非线性,因此研究非线性时滞系统的故障诊断问题具有重要的科学价值和工程意义.近年来,对于非线性系统故障诊断问题的研究已取得很大进展<sup>[1-4]</sup>.文献[1]采用微分几何的方法设计非线性系统的状态观测器,以检测系统故障;[2]采用在线学习的方法针对一类不确定非线性系统的故障诊断问题进行了研究.但是,这些方法主要应用于非线性系统的故障检测,而关于非线性时滞系统的故障估计问题的研究

却鲜有报道<sup>[5-7]</sup>. [5]采用  $H$  滤波器技术针对非线性摄动时滞系统的故障诊断问题进行了研究,并给出了解存在的条件和求法,但只研究了故障检测问题,无法有效地估计出系统中发生的故障. [7]采用迭代观测器方法针对一类非线性时滞系统的故障诊断问题进行了研究,然而[7]只根据前几个周期的信息进行更新训练参数,因而故障估计的精度会受到很大影响.

本文受预测控制和迭代学习控制<sup>[8]</sup>的启发,提出一种可实时在线检测和估计非线性时滞系统中故障的故障跟踪估计器.首先,根据系统状态方程,引入一个可以代表系统中实际发生故障的虚拟故障,并利用它构建故障跟踪估计器;然后,根据预测控制

收稿日期: 2007-10-08; 修回日期: 2008-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574081).

作者简介: 颜秉勇(1980—),男,山东枣庄人,博士生,从事非线性时滞系统故障诊断的研究;田作华(1946—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,从事控制系统远程故障诊断、智能控制技术等研究.

的思想,在所选取的优化时域长度内,根据故障跟踪估计器的输出与系统实际输出的差,通过反复迭代运算来调节虚拟故障,使虚拟故障逼近系统中实际发生的故障,从而达到对系统故障估计的目的。

与基于迭代观测器方法或神经网络等传统故障诊断方法相比,本文方法的最大优点是:1)不需要故障的先验知识,只需很少一部分系统运行的历史数据便可估计出系统中发生的故障;2)可以实时在线进行检测和估计系统中的故障,具有重要的理论价值和实际意义;3)本文设计的故障跟踪估计器不但可用来检测,而且可用来估计系统中发生的故障,对于系统中缓慢变化的故障也能有效地估计出来;4)不需求解繁琐的非线性方程,通过简单的迭代运算便可估计出系统中发生的故障,为解决非线性系统故障诊断问题提供了新的思路。

## 2 问题描述

考虑如下一类含有故障的非线性时滞系统:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-d) + Bu(t) + g(x(t), t) + B_f f(t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (2)$$

其中: $x(t) \in R^n$ 为系统的状态向量; $u(t) \in R^p$ 为系统的控制输入向量; $y(t) \in R^q$ 为系统的输出向量; $f(t) \in R^p$ 为需要检测和估计的故障信号,可表示为 $f(t) = [f_1, f_2, \dots, f_p]^T$ ;  $A, A_d, B, B_f$ 为适当维数的已知矩阵; $d > 0$ 为滞后时间常数。

**假设 1** 矩阵 $(C, A)$ 是可观测的;

**假设 2** 系统(2)的初始值已知,即 $x(0)$ 和 $y(0)$ 已知;

**假设 3**  $g(x(t), t)$ 为系统的非线性项,且满足如下条件(Lipschitz 条件):

$$\|g(x_1(t), t) - g(x_2(t), t)\| \leq L \|x_1(t) - x_2(t)\|, \quad (3)$$

其中 $L$ 为已知正实数。

## 3 主要结论

### 3.1 故障跟踪估计器的设计

对系统(1)和(2)设计如下形式的故障跟踪估计器:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(t) = & A\hat{x}_k(t) + A_d\hat{x}_k(t-d) + Bu_k(t) + \\ & g(\hat{x}_k(t), t) + L(y_k(t) - \hat{y}_k(t)) + B_f f_k(t), \quad (4) \end{aligned}$$

$$\hat{y}_k(t) = C\hat{x}_k(t), \quad (5)$$

$$r_k(t) = Ce_k(t), \quad (6)$$

$$f_{k+1}(t) = f_k(t) + r_k(t), \quad (7)$$

$$y_k(t) - \hat{y}_k(t) = e_k(t), \quad (8)$$

$$t \in [t - P, t]. \quad (9)$$

其中:下标 $k$ 表示在一个优化时域 $P$ 内进行的第 $k$ 次迭代运算; $\hat{x}(t) \in R^n, \hat{y}(t) \in R^q$ 分别为系统状态和系统输出的估计值; $e(t)$ 定义为 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ ;  $L$ 为预先确定的估计器增益矩阵,使得矩阵 $A - LC$ 的特征根具有负实部; $f(t)$ 为引入的一个可调参数,称作虚拟故障,它可通过迭代算法加以调节(本文将证明虚拟故障 $f(t)$ 可逼近系统中实际发生的故障,从而可以估计出故障函数); $f_k(t)$ 表示在一个优化时域 $P$ 内进行了第 $k$ 次迭代运算后虚拟故障的大小; $r_k(t)$ 表示在一个优化时域 $P$ 内第 $k$ 次迭代运算后故障跟踪估计器的输出 $\hat{y}(t)$ 与系统实际输出 $y(t)$ 的差,即残差; $R^{p \times q}$ 为常数增益矩阵,取值一般在 $0 \sim 1$ ;  $\rho$ 为给定的性能指标.式(7)为虚拟故障的迭代调节算法.式(8)为故障跟踪估计器在一个优化周期内是否停止迭代运算的判断条件.与以往故障诊断方法不同的是,这里采用迭代控制<sup>[8]</sup>和预测控制原理中滚动优化的思想,使故障跟踪估计器中的虚拟故障参数 $f(t)$ 逼近系统中实际发生的故障,从而可以估计出系统中发生的故障。

本文研究的故障跟踪估计器的设计问题可归结如下:根据系统(1)和(2)运行时的输出 $y(t)$ ,采用迭代算法(7)来调节故障跟踪估计器中的虚拟故障参数 $f(t)$ ,使得故障跟踪估计器的输出 $\hat{y}(t)$ 与系统(1)和(2)的实际输出 $y(t)$ 满足式(8).故障跟踪估计器的具体设计步骤如下:

Step1: 选取跟踪允许误差 $\epsilon$ ,优化时域长度 $P$ ,最多迭代运算次数 $N$ ;

Step2: 启动系统(1)和(2),并记录 $P$ 个时间单位内的系统输出 $y$ ,系统控制向量 $u$ ;

Step3: 在系统(1)和(2)运行 $P$ 个时间单位后,启动故障跟踪估计器,按式(4)~(9)构建估计器;

Step4: 根据式(7)的迭代算法,在系统已运行过的 $P$ 个时间单位内进行迭代运算,使得估计器输出 $\hat{y}(t)$ 与系统实际输出 $y(t)$ 在 $P$ 个时间单位内满足式(8);

Step5: 如果跟踪误差小于给定的跟踪误差 $\epsilon$ ,或迭代次数超过 $N$ ,则停止运算,等待在下一个优化时域 $P$ 内进行迭代运算;

Step6: 返回 Step4.

**注 1** 本文设计的故障跟踪估计器,可通过选取适当的跟踪误差、优化时域和最多迭代运算次数等参数实时在线进行检测和估计系统中的故障.对于非线性时滞系统而言,其中优化长度 $P$ 的选取满足 $P > 2d$ .

### 3.2 设计思想

定义状态误差 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ ,残差信号 $r$

= y(t) - ŷ(t), 故障调节误差  $\tilde{f}(t) = f(t) - \hat{f}(t)$ , 可得残差系统状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & (A - LC)e(t) + A_d e(t - d) + \\ & B_f \tilde{f}(t) + g(x(t), t) - g(\hat{x}(t), t), \quad (10) \end{aligned}$$

$$r(t) = Ce(t). \quad (11)$$

如果令系统(4), (5)中的虚拟故障参数  $f(t)$  的初始值为零, 则对比系统(1), (2)和系统(4), (5)可以看出, 在系统(1), (2)未发生故障的情况下, 在系统(4), (5)中观测出的  $\hat{x}(t) \in R^p, \hat{y}(t) \in R^q$  分别等于系统实际运行时的状态和输出; 在发生故障的情况下, 在系统(4), (5)中观测出的状态和输出将偏离实际系统运行时的真实值. 于是, 启动迭代调节算法, 在一个有限的优化时域内反复进行迭代运算, 调整故障跟踪估计器中的虚拟故障参数  $f(t)$ , 以使系统(4), (5)的输出跟踪实际系统运行的输出. 这样, 故障跟踪估计器中的虚拟故障参数  $f(t)$  将会在  $(\cdot)$  范数的意义下无限逼近系统中发生的故障, 从而达到故障估计的目的. 更为重要的是, 根据上述方法设计出的故障跟踪估计器, 不但可用来检测系统中发生的故障, 而且能有效地估计出发生故障的函数, 这对于容错控制器的设计具有重要的理论意义和实际价值.

综上所述, 本文设计的故障跟踪估计器问题可归结为: 假定当前时刻为  $t$ , 选取迭代运算时段长度  $P$ , 根据系统(1), (2)实际运行时的输出  $y(t)$ , 设计虚拟故障  $f(t)$  的一个迭代算法. 在时段范围  $[t - P, t]$  内反复进行迭代运算, 使得系统(4), (5)的输出  $\hat{y}(t)$  与系统(1), (2)的实际输出满足  $\|y(t) - \hat{y}(t)\| \leq \epsilon$ . 在时段范围  $[t + i * P, t + (i + 1) * P] (i = 0, 1, \dots)$  重复进行同样的优化算法, 即每间隔  $P$  个时间单位进行一次迭代运算. 其中  $\epsilon$  为容许的跟踪误差.

### 3.3 稳定性分析

**定理 1** 对于系统(1), (2), 设计系统(4) ~ (9)所示的故障跟踪估计器. 选取优化时域长度  $P$ , 故障跟踪估计器的状态  $\hat{x}_k(t)$  和输出  $\hat{y}_k(t)$  的初始值分别为  $x(0), y(0)$ . 在有限时间区间  $t \in [T - P, T]$  内, 故障估计迭代算法  $f_{k+1}(t) = f_k(t) + r_k(t)$  可以使系统(4), (5)的输出  $\hat{y}(t)$  跟踪系统(1), (2)的实际输出  $y(t)$ , 即  $\lim_k r_k(t) = 0$ . 其中:  $T$  代表当前时刻;  $x(T - P)$  表示系统(1), (2)在  $T - P$  时刻的状态;  $y(T - P)$  表示系统(1), (2)在  $T - P$  时刻的输出;  $\hat{x}_k(T - P), \hat{y}_k(T - P)$  分别表示第  $k$  次迭代运算的故障跟踪估计器的状态和输出的初始值.

限于篇幅, 证明略.

**定理 2** 根据定理 1 设计的故障跟踪估计器, 可使其中的虚拟故障参数  $f(t)$  在  $(\cdot)$  范数的意义下无限逼近系统中实际发生的故障, 即

$$\lim_k \lim_{t \rightarrow t_0^+} \|f(t) - \hat{f}(t)\|_{(\cdot)} = 0.$$

限于篇幅, 证明略.

定理 2 证明了本文设计的故障跟踪估计器中的虚拟故障在  $(\cdot)$  范数的意义下可逼近实际系统中所发生的故障, 从而达到故障估计的目的.

## 4 仿真实例

考虑如下含有故障的一类非线性时滞系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 0 & -5 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -0.2 & 0 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix} x(t-1) + \\ & \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} -0.1 \sin(t) \\ -0.1 \sin(t) \end{bmatrix} x(t) + \\ & \begin{bmatrix} -0.1 \sin(t-1) \\ -0.1 \sin(t-1) \end{bmatrix} x(t-1) + \\ & \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f(t), \end{aligned}$$

$$y(t) = [1 \ 0]x(t).$$

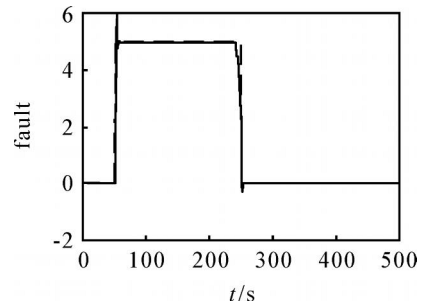


图 1 阶跃函数故障

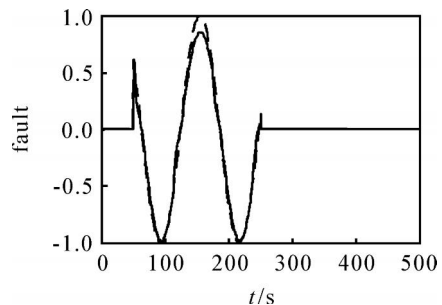


图 2 正弦函数故障

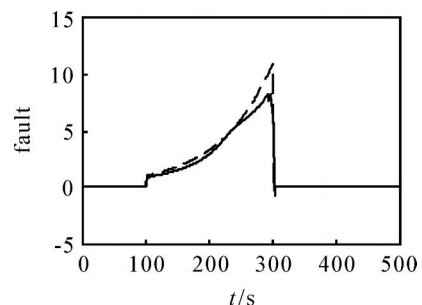


图 3 指数函数故障

选取系统参数如下:允许跟踪误差  $\epsilon = 0.1$ , 优化时域长度  $P = 10$ , 迭代算法常数增益矩阵  $\Gamma = 0.7$ , 故障跟踪估计器增益矩阵  $L = [0.2 \ 0.5]^T$ . 利用定理 1 所设计的迭代算法估计系统中发生的故障. 假设故障函数分别为

$$f(t) = \begin{cases} 5, & 50 \leq t \leq 250; \\ \sin(0.5t), & 50 \leq t \leq 250; \\ e^{1.2t}, & 100 \leq t \leq 300. \end{cases}$$

仿真结果如图 1 ~ 图 3 所示, 虚线为系统中实际发生的故障, 实线为估计出的故障.

仿真结果表明, 本文设计的故障跟踪估计器不但可以检测出系统中各种不同类型的故障信号, 而且可以对故障信号进行估计. 更重要的是, 本文算法可以对不同类型的故障进行检测和估计, 具有更广泛的适用性和实用性.

## 5 结 论

本文受预测控制和迭代学习控制原理的启发, 设计了一种故障跟踪估计器, 以检测和估计一类非线性时滞系统的故障. 该方法为解决非线性系统故障诊断问题提供了一种新的思路. 如何将该方法扩展到非线性不确定系统尚待进一步需深入研究.

## 参考文献 (References)

- [1] Arun T Vemuri, Marios M Polycarpou, Amt R Ciric. Fault diagnosis of differential-algebraic systems [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 2001, 31 (2): 143-152.
- [2] Marios M Polycarpou, Alexander B Trunov. Learning approach to fault diagnosis: Delectability analysis[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45 (4): 806-812.
- [3] Xiaodong Zhang, Marios M Polycarpou, Thomas Parisnin. A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 2001, 31 (2): 143-152.
- [4] Arun T Vemuri. Sensor bias fault diagnosis in a class of nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(6): 949-954.
- [5] 颜秉勇, 田作华, 吕冬梅, 等. 基于  $H$  滤波器的非线性摄动时滞系统的故障诊断[J]. 控制与决策, 2007, 22 (11): 1274-1279.  
(Yan B Y, Tian Z H, Lv D M, et al. Fault diagnosis for time-delay system with nonlinear perturbations based on  $H$  filter[J]. Control and Decision, 2007, 22 (11): 1274-1279.)
- [6] Ailun Liu, Yongyun Chen, Jinshou Yu. Sensor fault diagnosis in nonlinear and time-delay systems with uncertainties [C]. Proc of the 5th IFAC World Congress. Hangzhou, 2004: 1703-1706.
- [7] Wen C, Saif M. Fault detection and accommodation in nonlinear time-delay systems [C]. Proc of the ACC Conf. Colorado, 2003: 4255-4260.
- [8] 谢胜利, 田森平, 谢振东. 迭代学习控制的理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
(Xie S L, Tian S P, Xie Z D. The theory of iterative learning control and its application[M]. Beijing: Science Press, 2004.)
- [5] Julier S, Uhlmann J, Durrant-Whyte H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariance in filters and estimators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45 (3): 477-482.
- [6] Julier S, Uhlmann J. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Proc of the IEEE Aerospace and Electronic Systems, 2004, 92(3): 401-422.
- [7] Xiong K, Zhang H Y, Chan C W. Performance evaluation of UKF-based nonlinear filtering [J]. Automatica, 2006, 42(2): 261-270.
- [8] 杨波, 秦永元, 柴艳. UKF 在 INS/ GPS 直接法卡尔曼滤波中的应用[J]. 传感技术学报, 2007, 20 (4): 842-846.  
(Yang B, Qin Y Y, Chai Y. Application of UKF in direct method of Kalman filter for INS/ GPS[J]. Chinese J of Sensors and Actuators, 2007, 20(4): 842-846.)

(上接第 132 页)