

文章编号: 1001-0920(2008)02-0233-04

基于预测观测器的时滞系统故障诊断

颜秉勇, 田作华, 施颂椒
(上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

摘要: 提出一种新的可有效检测和估计时滞系统故障的预测观测器. 借助预测控制思想, 在选取的优化时域内构建预测观测器, 通过调节预测观测器中的可调参数来跟踪系统实际输出. 与以往基于 H 滤波器的故障诊断不同, 预测观测器将其转化为控制问题来解决, 不但能检测出故障的发生, 而且还可估计出故障函数, 对不同类型的故障也有很好的适应性. 对各类故障的仿真结果表明了该方法的可行性和有效性.

关键词: 预测观测器; 时滞系统; 故障诊断; 预测控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Fault diagnosis for time-delay systems based on predictive observer

YAN Bing-yong, TIAN Zuohua, SHI Song-jiao

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: YAN Bing-yong, E-mail: yanby@sjtu.edu.cn.)

Abstract: A new predictive-observer based approach for fault diagnosis for time-delay systems is presented. Based on the predictive control theory, the predictive observer is constructed within a specified horizon. The parameter is adjusted to track the actual system outputs. Different from the traditional H filter based fault diagnosis methods, the predictive observer uses the methods of control theory to solve the problem of fault diagnosis. It can not only detect the system faults, but also approximate the fault function, and can adapt to different kinds of faults. Simulation results to all kinds of faults show the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

Key words: Predictive observer; Time-delay systems; Fault diagnosis; Predictive control

1 引言

近年来,有关时滞系统的故障诊断问题已成为研究的热点之一,并取得了相应的成果^[1-12]. 文献[1]采用降阶故障观测器对未知输入时滞系统的故障诊断问题进行了研究. 文献[2-4]针对一类不确定时滞系统,采用 LMI 方法设计了基于 H 的滤波器并进行故障检测. 文献[5]采用 consensus 滤波器,针对一类非线性随机时滞系统的故障检测问题进行了研究. 但这些结果都集中于系统的故障检测,到目前为止,对于时滞系统故障估计问题的研究甚少. 文献[6]采用在线学习的方法,针对一类不确定非线性系统的故障问题进行了研究. 其主要思想是采用神经网络来估计系统故障,这样不但需要大量的训练样本数据,而且还需在线实时训练网络,降低了其实时性和可用性.

受预测控制原理的启发,本文设计了一种预测

观测器. 首先根据系统已知模型构建预测观测器;然后将系统的实际输出作为预测观测器输出的跟踪轨迹,根据预测观测器的输出与系统实际输出之差来自适应调节预测观测器中的可调参数,以达到对系统故障诊断的目的. 与以往基于 H 滤波器的故障诊断不同,预测观测器将一类估计问题转化为控制问题来解决,不但可以检测出系统故障的发生,而且还可有效地估计出故障函数.

2 问题描述

考虑如下—类含有故障的线性离散时滞系统:

$$x(k+1) = Ax(k) + A_d x(k-d) + Bu(k) + B_f f(k) + B_w w(k), \quad (1)$$

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

其中: $x(k) \in R^n$ 为系统的状态量; $u(k) \in R^p$ 为系统的输入量; $y(k) \in R^q$ 为系统的输出量; $f(k) \in R^n$ 为需要检测和估计的故障信号; $w(k) \in R^m$ 为系统

收稿日期: 2006-10-12; 修回日期: 2007-04-13.

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.

不确定项(包括建模误差和外界扰动输入信号等); A, A_d, B, B_f, B_w, C 为适当维数且已知的矩阵或向量; $d > 0$ 为滞后时间常数.

在设计预测观测器之前,先对系统(1),(2)作如下假设:

- 1) 系统的状态是可测的;
- 2) 系统中只考虑一个故障发生的情况;
- 3) 系统不确定项满足范数有界,即 $w(t) \leq N$.

为检测和估计系统故障,本文基于预测控制思想,设计了如下一种预测观测器:

$$\hat{x}(k+1) = Ax(k) + A_dx(k-d) + L(x(k) - \hat{x}(k)) + B_f v(k) + Bu(k), \quad (3)$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k). \quad (4)$$

其中: $\hat{x}(k) \in R^n, \hat{y}(k) \in R^q$ 分别为预测观测器的状态和输出; $x(k), x(k-d)$ 分别为系统(1),(2)的状态; L 为具有适当维数的观测器增益矩阵; $v(t)$ 为新引入的可调参数,用来检测和估计系统中发生的故障.为更好地阐述预测观测器的思想,对式(3)作如下变形:

$$\hat{x}(k+1) = -L\hat{x}(k) + [A + L \quad A_d \quad B] \times \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-d) \\ u(k) \end{bmatrix} + B_f v(k), \quad (5)$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k). \quad (6)$$

预测观测器的主要设计思想是:将式(5)中的参数 $v(k)$ 看作控制向量,利用预测控制思想,求控制向量序列 $v(k)$,使预测观测器的输出跟踪系统(1),(2)的输出.这样,根据预测控制原理求出的控制向量 $v(k)$ 不但可以检测,而且还能有效估计出故障函数.预测观测器的原理如图1所示.

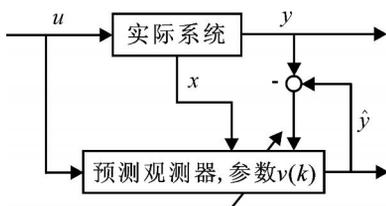


图1 预测观测器原理图

基于预测观测器的故障诊断问题可转化为一类控制问题,即:已知系统期望轨迹曲线 $y(k)$,选择合适的观测器增益矩阵 L ,控制时域 M ,优化时域 P ,误差权矩阵 Q ,求系统(5)和(6)中的控制向量 $v(k)$,并最小化如下性能指标:

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^P q_i (y(k+i) - \hat{y}(k+i))^2. \quad (7)$$

其中: $v(k) = v(k) - v(k-1), Q = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_p), y(k)$ 为系统(1),(2)的实际输出值.

注1 这里的设计思路是用待求的控制向量 $v(k)$ 来抵消系统(1),(2)中故障项 $B_f f(k)$ 和噪声项 $B_w w(k)$ 对系统的影响.当系统(1),(2)没发生故障时, $v(k)$ 用来抵消 $B_w w(k)$ 对系统的影响.

与以往基于 H 滤波器的故障诊断不同,预测观测器不但可以判断故障的发生,而且可以估计出故障的函数.更为重要的是,该方法不但可检测和估计系统中突变的故障信号,而且还可检测和估计出系统中缓慢变化的故障信号.下面将根据预测控制的思想具体介绍系统(5),(6)中控制向量 $v(k)$ 的求解方法.

3 预测观测器的设计

3.1 预测模型

在 k 时刻,假设系统(5),(6)的控制量 $v(k)$ 从该时刻起有 $M (M < P)$ 个控制增量

$$v(k), v(k+1), \dots, v(k+M-1).$$

在这 M 个控制增量的作用下,预测系统(5)和(6)在未来 P 个时刻系统的输出为

$$\hat{y}(k+i/k) = C\hat{x}(k+i/k), i = 1, 2, \dots, P, \quad (8)$$

其中 $\hat{x}(k+i/k)$ 可由下式计算求得:

$$\hat{x}(k+1) = -L\hat{x}(k) + [A + L \quad A_d \quad B] \times \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k-d) \\ u(k) \end{bmatrix} + B_f v(k). \quad (9)$$

这里: M 和 P 分别为控制时域和优化时域, $(k+i/k)$ 表示在 k 时刻对 $k+i$ 时刻的预测值.因此,在任一时刻 k ,只要知道了系统控制增量 $v(k), (k+1), \dots, v(k+M-1)$,便可根据式(8)预测系统在未来 P 个时刻系统的输出.

3.2 滚动优化

在时刻 k ,为使系统(5),(6)在控制向量 $v(k), v(k+1), \dots, v(k+M-1)$ 的作用下,系统在未来 P 时刻的输出尽可能接近系统(1),(2)的实际输出 $y(k) (k = 1, 2, \dots, P)$,引入性能指标

$$\min J(k) = \sum_{i=1}^P q_i (y(k+i) - \hat{y}(k+i))^2, \quad (10)$$

其中 q_i 为加权系数,是对跟踪误差的抑制.令

$$\hat{y}_0(k+i/k) = -CL\hat{x}(k+i-1) + C[A + L \quad A_d \quad B] \begin{bmatrix} x(k+i-1) \\ x(k+i-d-1) \\ u(k+i-1) \end{bmatrix} + CB_f(v_i(k+i-2)), i = 1, 2, \dots, P.$$

其中: L 为预先确定的矩阵; $u(k), x(k), x(k-d)$ 分

别为系统 (1), (2) 的控制向量和状态向量. 将 $\hat{y}_0(k + i / k)$ 的表达式代入式 (10), 经整理可得

$$\min J(k) = \begin{cases} \sum_{i=1}^P q_i (y(k+i) - \hat{y}_0(k+i/k) - CB_f(v_i(k+i-1)))^2, & i < M; \\ \sum_{i=1}^P q_i (y(k+i) - \hat{y}_0(k+i/k) - CB_f(v_i(k+M-1)))^2, & i = M. \end{cases} \quad (11)$$

其中 $y(k)$ 为系统 (1), (2) 的实际输出值. 写成向量的形式可表示为

$$\min J(k) = \|y(k) - \tilde{y}_{r0}(k) - M v(k)\|_Q^2.$$

其中

$$y(k) = [y(k+1), \dots, y(k+P)]^T,$$

$$\tilde{y}_{r0}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}_0(k+1/k) \\ \dots \\ \hat{y}_0(k+P/k) \end{bmatrix},$$

$$M = \text{diag}(CB_f, \dots, CB_f), \quad Q = \text{diag}(q_1, \dots, q_P),$$

$$v(k) = \underbrace{[v(k), \dots, v(k+M-1)]}_{M} \underbrace{[v(k+M-1), \dots, v(k+M-1)]}_{P-M}^T.$$

由 $\frac{dJ(k)}{dv(k)} = 0$, 可得

$$v(k) = (M^T Q M)^{-1} (M^T Q (y(k) - \tilde{y}_{r0}(k))). \quad (12)$$

计算出控制增量 $v(k)$ 之后, 构成实际的控制向量 $v(k) = v(k-1) + v(k)$ 并作用于系统 (5), (6). 到下一个时刻, 可类似求出 $v(k+1)$.

3.3 反馈校正

在下一采样时刻, 首先检测出系统 (1), (2) 的实际输出 $y(k+1)$; 然后将其与系统 (5), (6) 的预测输出 $\hat{y}(k+1/k)$ 相比较, 构成输出误差

$$e(k+1) = y(k+1) - \hat{y}(k+1/k), \quad (13)$$

其中 $\hat{y}(k+1/k)$ 表示在 k 时刻预测系统 (5), (6) 在 $k+1$ 时刻的输出. 这一误差信息反映了系统 (1), (2) 中出现的故障以及不确定扰动信号对系统输出的影响. 为及时校正预测输出值, 这里采用下式来修正系统 (5), (6) 对未来时刻系统输出的预测:

$$\hat{y}_{cor}(k+i/k+1) = \hat{y}(k+i/k) + h_i e(k+1), \quad i = 1, 2, \dots, P. \quad (14)$$

其中 $\hat{y}_{cor}(k+i/k+1)$ 表示在 $k+1$ 时刻修正过的系统的预测输出, h_i 为待选择的校正系数. 由于时间基点的变动, 在 $k+1$ 时刻需将 $\hat{y}_{cor}(k+1)$ 的元素进行移位才能成为下一时刻的初始预测值, 即

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+1+i/k+1) &= \hat{y}_{cor}(k+1+i/k+1), \\ & \quad i = 1, 2, \dots, P-1; \\ \hat{y}(k+1+P/k+1) &= \hat{y}_{cor}(k+P/k+1), \\ & \quad i = P. \end{aligned} \quad (15)$$

求出 $\hat{y}(k+1+i/k+1)$ 的预测值之后, 象上面那样进行 $k+1$ 时刻的优化计算, 得出 $v(k+1)$. 整个过程就是以这种结合反馈校正的滚动优化的方式反复在线进行的.

注 2 因为 $y(k)$ 是测得的系统实际输出, 而前面设计的预测观测器需要知道 P 个时刻后的状态和输出, 所以, 令预测观测器的启动时间滞后于系统 (1), (2) P 个时刻.

预测观测器的设计步骤如下:

- 1) 初始化系统, 选择合适的增益矩阵 L , 控制时域 M 和优化时域 P , 校正系数 $h_i (i = 1, 2, \dots, P)$, 并且初始化控制向量 $v(0)$ 和预测输出 $y(0)$;
- 2) 在 k 时刻, 检测系统 (1), (2) 的实际输出 $y(k)$, 并与上一时刻已经预测的系统输出 $\hat{y}(k)$ 相比较, 形成误差 $e(k)$;
- 3) 利用式 (14) 校正在 k 时刻对系统 (5), (6) 输出值的预测;
- 4) 根据式 (15) 进行移位, 设置初始预测值;
- 5) 根据式 (12) 计算系统 (5), (6) 的控制增量 $v(k) (i = 1, 2, \dots, P)$;
- 6) 根据式 $v(k) = v(k-1) + v(k)$ 计算控制量, 并计算系统 (5), (6) 的输出预测值;
- 7) 在 $k+1$ 时刻, 重复 2) ~ 6).

4 仿真实例

考虑一类含有故障的时滞系统

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \begin{bmatrix} -0.6 & 0 \\ 0 & -0.7 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} x(k-1) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} w(k), \\ y(k) &= [1 \quad 1]x(k). \end{aligned}$$

设计预测观测器

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= \begin{bmatrix} -0.6 & 0 \\ 0 & -0.7 \end{bmatrix} \hat{x}(k) + \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \hat{x}(k-1) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) + L(x(k) - \hat{x}(k)) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} v(k), \\ \hat{y}(k) &= [1 \quad 1]\hat{x}(k). \end{aligned}$$

假设系统滞后时间 $d = 1$, 增益矩阵 $L = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$, 外部扰动信号 $w(k)$ 的能量为 0.1 的白噪声, 取优化时域 $P = 10$, 控制时域 $M = 6$.

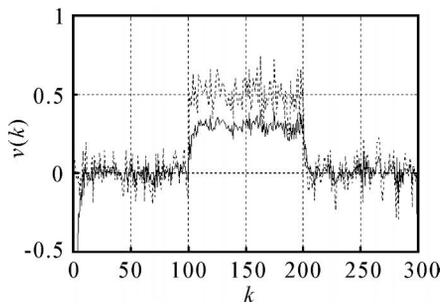


图2 阶跃故障

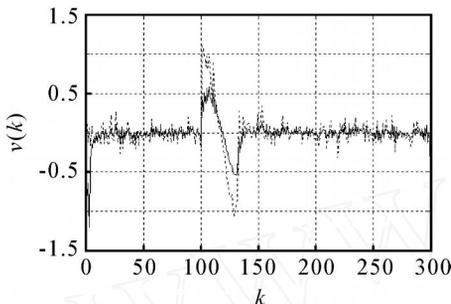


图3 正弦故障

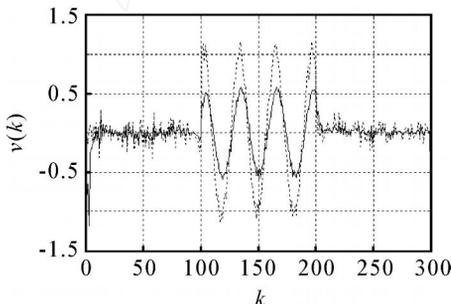


图4 周期故障

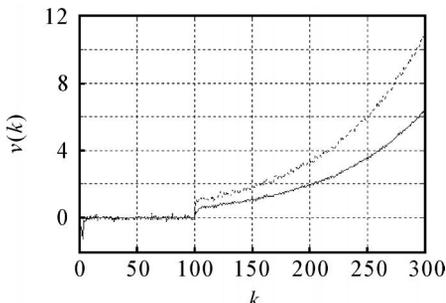


图5 缓变故障

图2~图5分别为对不同类型故障的仿真结果,其中:虚线为实际故障与噪声之和,实线为估计出的故障.可以看出,本文所设计的预测观测器不但能检测出系统中的故障信号,而且还可对故障进行估计.更重要的是,预测观测器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 语

本文根据预测控制原理,设计了一种新的观测器——预测观测器.该方法的最大特点是将故障诊断问题转化为一类系统的控制问题.根据预测控制的思想,利用系统输出和系统输出估计值之差来调

整预测观测器中的可调参数,以达到故障诊断的目的.该方法不但可用来检测系统中出现的故障,而且还可对系统的故障进行估计.针对非线性系统如何设计预测观测器,是需要进一步深入研究的内容.

参考文献(References)

- [1] Yang H L, Mehrdad S. Observer design and fault diagnosis for state-retarded dynamic systems [J]. Automatica, 1998, 34(2): 217-227.
- [2] 钟麦英, 汤兵勇, Steven X Ding, 等. 状态时滞系统故障诊断问题的LMI方法研究[J]. 控制与决策, 2002, 17(1): 15-18.
(Zhong Mai-ying, Tang Bing-yong, Steven X Ding, et al. LMI approach to design state-delayed fault detection system [J]. Control and Decision, 2002, 17(1): 15-18.)
- [3] 白雷石, 田作华, 施颂椒. 基于H滤波器的不确定状态时滞系统鲁棒故障诊断[J]. 信息与控制, 2005, 34(1): 163-166.
(Bai Lei-shi, Tian Zuo-hua, Shi Song-jiao. Fault diagnosis for uncertainty time-delay system based on H filter [J]. Information and Control, 2005, 34(1): 163-166.)
- [4] Zhong M Y, Ye Tao, Chen G Y, et al. An ILMI approach to RFDF for uncertainty linear systems with nonlinear perturbations [J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(2): 297-300.
- [5] 颜秉勇, 田作华, 吕冬梅. 一类非线性随机时滞系统的故障诊断[J]. 化工自动化及仪表, 2007, 1(2): 12-15.
(Yan Bing-yong, Tian Zuo-hua, Lv Dong-mei. Fault diagnosis for a class of nonlinear stochastic time-delay systems [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2007, 1(2): 12-15.)
- [6] Zhang Xiao-dong, 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.
- [7] You Fu-qiang, Tian Zuo-hua, Shi Song-jiao. Actuator fault diagnosis of a class of time-delay systems [C]. Proc of the 5th IFAC World Congress. Hangzhou, 2004: 1798-1802.
- [8] Bin Jiang, Marcel Starowiecki, Vincent Cocquemot. Fault identification for a class of time-delay systems [C]. Proc of the American Control Conf. Anchorage, 2002: 2239-2244.
- [9] Arun T Vemuri. Sensor bias fault diagnosis in a class of nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(6): 949-954.

(下转第240页)

全静止下的最大车流密度时才结束.

分析图 3 和图 4 可得出如下结论:

1) 实际发生交通堵塞的临界密度与理论阻塞密度并不相等,即实际发生交通堵塞的临界密度小于理论阻塞密度.

2) 一般情况下,流量越大,遇到突发事件干扰时,其返回波速越大,发生交通突变导致交通阻塞的几率也越大.

3) 不同计算交通流量的快速路,其发生交通堵塞的车辆速度也不同.计算交通流量越高的快速路,其发生突变阻塞的速度反而越低.这是因为,流量愈高,遇到突发事件干扰时,其返回波速越大,发生交通突变导致交通阻塞的可能性也越大.

另外,通过得到的临界速度,可以实时地对交通流行为进行干预,当实际检测到的车流密度接近临界密度时,就应制定相应的交通管制策略和措施,如调节匝道进出口流量,总量控制快速路上的车辆数等.

4 结 语

利用交通波动理论,将交通流三参数模型转换为尖点突变数学模型,根据突变理论的原理从总体上对快速道路的阻塞状态及畅行状态进行了分析,并对其的临界状态也进行了较为深入的研究.

随着交通流状况变得越来越复杂,掌握的实测数据也更加详细具体,现有的交通流模型已不能满足研究的需要.突变理论的模型根据突变现象能够较精确地实时模拟交通流状况,不仅准确地建立了交通流三参数的关系模型,甚至可以挖掘影响交通流因素之间的关系,具有实际应用价值.

参考文献(References)

- [1] Lignos X, Ioannidis G, Kounadis A N. Non-linear buckling of simple models with tilted cusp catastrophe [J]. *Int J of Non-linear Mechanics*, 2003, 38(8): 1163-1172.
- [2] 宫晓燕, 汤淑明, 王知学, 等. 高速公路交通流建模综述[J]. *交通运输工程学报*, 2002, 2(1): 74-79.
(Gong Xiao-yan, Tang Shu-ming, Wang Zhi-xue, et al. Survey on freeway traffic flow modeling[J]. *J of Traffic and Transportation Engineering*, 2002, 2(1): 74-79.)
- [3] Jin Hong-zhang, Guo Jian, Wei Qi. Research on basic characteristics of complex system brittleness [J]. *J of Marine Science and Application*, 2004, 3(1): 57-63.
- [4] Guo Jian, Wu Dong-jian. Based on the relation of evolution among systems to analyze brittleness of complex system [C]. *The 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Dalian, 2006: 667-671.
- [5] 张亚平, 张起森. 尖点突变理论在交通流预测中的应用[J]. *系统工程学报*, 2000, 15(3): 272-276.
(Zhang Ya-ping, Zhang Qi-sen. The application of cusp catastrophe theory in the traffic flow forecast [J]. *J of Beijing University of Technology*, 2000, 15(3): 272-276.)
- [6] 杨永勤, 刘小明, 于泉, 等. 交通流三参数关系的研究[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(1): 43-48.
(Yang Yong-qin, Liu Xiao-ming, Yu Quan, et al. Research on three traffic flow parameters [J]. *J of Beijing University of Technology*, 2006, 32(1): 43-48.)
- [7] 唐铁桥, 黄海军. 用燕尾突变理论来讨论交通流预测[J]. *数学研究*, 2005, 38(1): 112-116.
(Tang Tie-qiao, Huang Hai-jun. The discussion of traffic flow forecast by using swallowtail catastrophe theory [J]. *J of Mathematical Study*, 2005, 38(1): 112-116.)
- [8] 熊烈强, 张正亚, 李杰. 交通流宏观建模方法研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2005, 29(1): 26-30.
(Xiong Lie-qiang, Zhang Zheng-ya, Li Jie. A study of establishing methods about traffic macro models [J]. *J of Wuhan University of Technology*, 2005, 29(1): 26-30.)
- [10] Frank P M. Enhancement of robustness in observer based fault detection [J]. *Int J of Control*, 1994, 59(4): 955-981.
- [11] 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.
- [12] Wang Y, Xie L, De Souza. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems [J]. *System Control Letter*, 1992, 19(12): 139-149.

(上接第 236 页)