

文章编号: 1001-0920(2008)07-0771-05

基于自适应观测器控制系统的快速故障调节

张柯, 姜斌, 刘京津

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对基于自适应观测器故障调节设计中的两个难点, 即系统满足严格正实 (SPR) 条件与故障估计的准确性和快速性, 首先引入适当的坐标变换, 有效地放松了严格 SPR 条件, 适用于一大类控制系统的故障诊断; 其次, 针对变换后的系统, 提出一种快速故障估计的设计方法, 明显改善了故障估计的性能; 再次, 基于故障估计值修正控制律以补偿故障所带来的影响, 使故障调节后的系统稳定; 最后通过仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 快速故障估计; 故障调节; 自适应观测器; 主动容错控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Fast fault accommodation of control systems by using adaptive observer

ZHANG Ke, JIANG Bin, LIU Jing-jin

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China.

Correspondent: JIANG Bin, E-mail: binjiang@nuaa.edu.cn)

Abstract: For the two difficults based on adaptive observer-based fault accommodation, strictly positive real (SPR) condition and rapidity and accuracy of fault estimation, a linear change of coordinates is firstly introduced to relax the SPR requirement, which can be applied to a wider class of systems. Then based on the changed system, a approach is proposed to evidently improve the performance of fault estimation. By using the fault estimate, the controller is reconstructed to compensate the fault, which can guarantee the stability of systems. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed techniques.

Key words: Fast fault estimation; Fault accommodation; Adaptive observer; Active fault tolerant control

1 引言

在实际工业过程控制中, 系统的安全性和可靠性非常重要. 故障可能发生在任何部位, 如执行器和传感器等, 因此用故障调节来提高系统的稳定性和可靠性受到广泛的关注, 并成为最近几年研究的一个热点.

故障调节是在故障发生后通过故障检测、隔离、估计和附加控制律等一系列步骤来确保系统的稳定性. 在故障检测和隔离之后, 要对故障进行估计. 故障估计是故障调节中一个非常重要的环节, 因为附加控制律是依据故障估计值设计的, 所以故障估计的准确性与快速性始终是故障调节的一个难点. 人们相继提出了许多方法, 如基于学习的方法^[1-3], 基于滑模观测器的方法^[4-6], 基于自适应观测器的方

法^[7-9]等.

基于学习的方法需要设计复杂的在线学习算法, 而且通常要求状态全部可测, 这在实际系统中并不多见. 基于滑模观测器的故障估计项其本质是比例项, 可以确保对于时变故障快速性的要求, 但对于定值故障的估计会存在稳态误差. 基于自适应观测器故障估计的准确性和对未知参数的鲁棒性均好, 但通常要求系统满足严格正实 (SPR) 条件, 在实际系统中很难满足. 同时基于自适应观测器的故障估计项是纯积分项, 这样就不能同时满足系统对故障估计准确性和快速性的要求.

本文对于控制系统的故障调节采用简单、实用的基于自适应观测器的方法. 针对基于自适应观测器方法中存在的两个难点提出了有效的解决方法.

收稿日期: 2007-04-30; 修回日期: 2007-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60574083); 国家 863 计划项目 (2006AA12A108).

作者简介: 张柯 (1981—), 男, 河北邯郸人, 博士生, 从事故障诊断与容错控制的研究; 姜斌 (1966—), 男, 江西鄱阳人, 教授, 博士生导师, 从事故障诊断与容错控制等研究.

首先引入文献[10]的坐标变换,有效地放松了 SPR 条件,适用于一大类控制系统,包括一些实际系统.然后,将重点放在故障估计性能的改进上,提出一种比例加积分项的故障估计方法,使得确保故障估计准确性的同时,可大幅度提高其快速性.同时,本文给出一套系统的完整的基于自适应观测器快速故障调节的设计方法,并采用 Lyapunov 稳定性理论证明了系统的稳定性.最后通过一个例子验证了所提出方法的有效性.

2 系统描述

考虑如下系统:

$$\dot{x}_0(t) = A_0 x_0(t) + B_0 u(t) + E_0 f(t), \quad (1)$$

$$y(t) = C_0 x_0(t). \quad (2)$$

其中: $x_0(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^p$ 分别为系统的状态向量、输入向量和输出向量; $f(t) \in R^r$ 表示系统的执行器故障, $f(t) = f_0$ 和 $\dot{f}(t) = f_1$, 这里 f_0 和 f_1 是正数, 分别表示故障和故障一阶导数的上界; A_0, B_0, E_0 和 C_0 为已知的适维矩阵, 且 $r \leq p \leq n$, E_0 和 C_0 分别为列满秩和行满秩矩阵, (A_0, B_0) 可控, (A_0, C_0) 可观测.

首先,给出如下的假设和引理:

假设 1 $\text{rank}(C_0 E_0) = r$.

假设 2 (A_0, E_0, C_0) 的不变零点是稳定的.

假设 3 $\text{rank}(B_0, E_0) = \text{rank}(B_0)$.

引理 1^[8] 对于任意给定的正数 $\mu > 0$ 和对称正定矩阵 P , 下述不等式成立:

$$2x^T P y \leq \frac{1}{\mu} x^T P x + \mu y^T P y, \quad x, y \in R^n. \quad (3)$$

由文献[10],若系统(1)和(2)满足假设1和假设2时,存在一个坐标变换 T 使得 $x_0 = T^{-1}x$, 则系统变换为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ef(t), \quad (4)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (5)$$

其中: $x(t) = [x_1^T(t) \ x_2^T(t)]^T$, $x_1(t) \in R^{(n-p)}$, $x_2(t) \in R^p$. 变换之后的各个矩阵具有如下形式:

$$A = TA_0 T^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad B = TB_0 = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix},$$

$$E = TE_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad C = C_0 T^{-1} = [\mathbf{0} \quad I_p],$$

其中 $A_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}$ 是 Hurwitz 矩阵.

设计自适应观测器

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + E\hat{f}(t) - L(\hat{y}(t) - y(t)), \quad (6)$$

$$\dot{\hat{y}}(t) = C\hat{x}(t). \quad (7)$$

其中: $\hat{x}(t) \in R^n$, $\hat{y}(t) \in R^p$ 分别是观测器的状态向

量和输出向量; $\hat{f}(t) \in R^r$ 是对故障 $f(t)$ 的在线估计; $L \in R^{n \times p}$ 是自适应观测器的增益矩阵,

$$L = \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^s \end{bmatrix},$$

式中 $A_{22}^s \in R^{p \times p}$ 是 Hurwitz 矩阵.

定义状态估计误差 $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$, 输出残差 $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$, 故障估计误差 $e_f(t) = \hat{f}(t) - f(t)$. 则误差动态方程可表示为

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + Ee_f(t), \quad (8)$$

$$e_y(t) = Ce(t). \quad (9)$$

3 快速故障估计的算法

定义新的变量

$$s(t) = \dot{e}(t) + e(t), \quad (10)$$

$$s_y(t) = Cs(t). \quad (11)$$

其中: $s(t) = [s_1^T(t) \ s_2^T(t)]^T \in R^n$, $s_1(t) \in R^{n-p}$, $s_2(t) \in R^p$; $R^{n \times n}$, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$, 且 $\lambda_i > 0$. 对式(10)进行微分,并考虑式(8)可得

$$\dot{s}(t) = (A - LC)s(t) + E(\dot{e}_f(t) + e_f(t)), \quad (12)$$

$$s_y(t) = s_2(t). \quad (13)$$

上述新变量的作用在下文将具体表现出来. 下面考虑两种故障类型,即定值故障和时变故障,并分别对其进行讨论.

3.1 定值故障估计

定值故障表现为故障是定值或定值跳变的,满足 $\dot{f}(t) = 0$, 于是故障估计误差的微分表示为

$$\dot{e}_f(t) = \dot{f}(t). \quad (14)$$

定理 1 对于系统(4)和(5),当发生定值故障时,如果存在对称正定矩阵 $Q \in R^{n \times n}$, $P = \text{diag}(P_1, P_2) \in R^{n \times n}$, 其中: $P_1 \in R^{(n-p) \times (n-p)}$, $P_2 \in R^{p \times p}$, 满足

$$P(A - LC) + (A - LC)^T P - 2PEE^T P = -Q, \quad (15)$$

则采用如下自适应故障估计算法:

$$\dot{\hat{f}}(t) = -E^T P s(t), \quad (16)$$

其中 $R^{r \times r}$ 是自适应学习律,且 $\lambda = \Lambda^{-1} > 0$, 能确保 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_f(t) = 0$.

证明 选取如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V(t) = s^T(t) P s(t) + e_f^T(t) \Lambda^{-1} e_f(t). \quad (17)$$

取 $V(t)$ 的导数并考虑式(12),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & s^T(t) (P(A - LC) + (A - LC)^T P) s(t) + \\ & 2s^T(t) PE(\dot{e}_f(t) + e_f(t)) + \\ & 2e_f^T(t) \Lambda^{-1} \dot{e}_f(t). \end{aligned} \quad (18)$$

由式(16)可得

$$2s^T(t) PE\dot{e}_f(t) = -2s^T(t) PE E^T P s(t), \quad (19)$$

$$2 e_f^T(t) \dot{e}_f(t) = - 2 e_f^T(t) E^T P s(t). \quad (20)$$

将式(19)和(20)代入(18),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & s^T(t) (P(A - LC) + (A - LC)^T P - \\ & 2PE - E^T P) s(t) + 2 s^T(t) P E e_f(t) - \\ & 2 e_f^T(t) E^T P s(t) = \\ & - s^T(t) Q s(t). \end{aligned} \quad (21)$$

因此,根据 Lyapunov 稳定性理论,系统将一致渐近稳定,可保证状态估计误差和故障估计误差收敛到零.

注 1 本文考虑系统状态向量不可测,基于自适应观测器的故障估计仅依赖于控制系统的输入向量和输出向量.自适应故障估计算法(16)表面上是 $e(t)$ 的函数,但将 E 和 P 代入式(16)可得

$$\begin{aligned} \dot{f}(t) = & - E_2^T P_2 s_2(t) = \\ & - E_2^T P_2 (\dot{e}_y(t) + e_y(t)). \end{aligned} \quad (22)$$

在系统初始的过渡阶段之后,残差 $e_y(t)$ 渐近收敛到零.考虑到故障发生在过渡阶段之后,且故障的初始值设为零,对式(22)积分可得

$$f(t) = - E_2^T P_2 \left(e_y(t) + \int_{t_0}^t e_y(\tau) d\tau \right),$$

其中 t_0 是故障发生的时间.因此,故障 $f(t)$ 的估计值是用系统残差求出的.

3.2 时变故障估计

对于时变故障,由于 $\dot{f}(t) \neq 0$,故障估计误差的微分可表示为

$$\dot{e}_f(t) = \dot{f}(t) - \dot{f}(t). \quad (23)$$

定理 2 对于系统(4)和(5),当发生时变故障时,如果存在对称正定阵 $M_1, M_2 \in R^{n \times n}, P = \text{diag}(P_1, P_2) \in R^{(n-p) \times (n-p)}, P_2 \in R^{p \times p}$ 和正数 μ_1, μ_2 满足

$$\begin{aligned} P(A - LC) + (A - LC)^T P + \\ \mu_1 (A - LC)^T P(A - LC) = - M_1, \end{aligned} \quad (24)$$

$$- 2 \frac{1}{\mu_1} P + \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right) P = - M_2. \quad (25)$$

则用自适应故障估计算法(16),可使得状态估计误差和故障估计误差一致最终有界.

证明 选取 Lyapunov 函数

$$V(t) = e^T(t) P e(t) + \frac{1}{\mu_1} e_f^T(t) e_f(t). \quad (26)$$

取 $V(t)$ 的导数并考虑式(8),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & e^T(t) (P(A - LC) + (A - LC)^T P) e(t) - \\ & 2 \frac{1}{\mu_1} e_f^T(t) E^T P E e_f(t) - 2 \frac{1}{\mu_2} e_f^T(t) \dot{f}(t) - \\ & 2 \frac{1}{\mu_2} e_f^T(t) E^T P(A - LC) e. \end{aligned} \quad (27)$$

由引理 1 可得

$$\begin{aligned} & - 2 \frac{1}{\mu_1} e_f^T(t) E^T P(A - LC) e(t) \\ & - \frac{1}{\mu_1} e_f^T(t) E^T P E e_f(t) + \\ & \mu_2 e^T(t) (A - LC)^T P(A - LC) e. \end{aligned} \quad (28)$$

由于 E 是列满秩, E 的广义逆 $E^+ = (E^T E)^{-1} E^T$ 存在且唯一.

$$\begin{aligned} & - 2 \frac{1}{\mu_1} e_f^T(t) \dot{f}(t) = \\ & - 2 \frac{1}{\mu_1} e_f^T(t) E^T (E^+)^T \dot{f}(t) = \\ & - 2 \frac{1}{\mu_1} e_f^T(t) E^T P P^{-1} (E^+)^T \dot{f}(t) \\ & - \frac{1}{\mu_2} e_f^T(t) E^T P E e_f(t) + \\ & \mu_2 f^T(t) \dot{f}(t) E^+ P^{-1} (E^+)^T \dot{f}(t) \\ & - \frac{1}{\mu_2} e_f^T(t) E^T P E e_f(t) + \\ & \mu_2 f_1^2 \max(\lambda^{-1}(E^+ P^{-1} (E^+)^T)), \end{aligned}$$

则

$$\dot{V}(t) \leq - \lambda_1 \|e(t)\|^2 - \lambda_2 \|e_f(t)\|^2 + \dots \quad (29)$$

其中

$$\begin{aligned} \lambda_1 = & \min(M_1), \quad \lambda_2 = \min(E^T E) \min(M_2), \\ = & \mu_2 f_1^2 \max(\lambda^{-1}(E^+ P^{-1} (E^+)^T)). \end{aligned}$$

因此,当 $\lambda_1 \|e(t)\|^2 + \lambda_2 \|e_f(t)\|^2 > 0$ 时, $\dot{V}(t) < 0$. 所以 $e(t)$ 和 $e_f(t)$ 是一致最终有界的.

4 容错控制

容错控制的目的是为了在系统出现故障的情况下,尽可能在最短时间内恢复或在一定程度上保持系统的性能.

由于系统的状态向量未知,系统正常工作情况下的控制律用状态估计的函数来实现系统的控制,使得正常系统具有期望的行为.当系统出现故障时,基于快速在线故障估计,通过附加控制律来保证系统的稳定性.基于自适应观测器控制系统的快速故障调节结构如图 1 所示.

下面设计附加控制律 $u_f(t)$. 由文献[9]可知,假设 3 相当于存在一个矩阵 $B^* \in R^{m \times n}$,使得

$$(I_n - B B^*) E = 0. \quad (30)$$

注 2 对式(30)进行说明.假设 3 表明,由 E_0 的列向量张成的子空间是由 B_0 的列向量张成子空间的子集,即 $\text{span}(E_0) \subseteq \text{span}(B_0)$. 经过坐标变换

$$\text{rank}(TB_0, TE_0) = \text{rank}(TB_0),$$

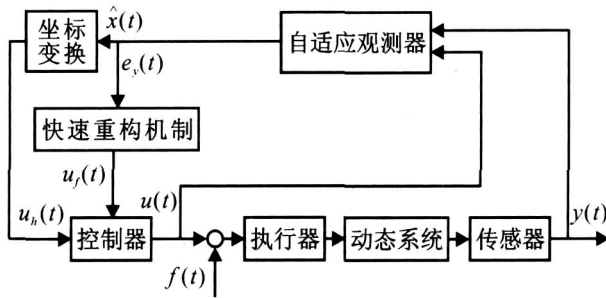


图1 基于自适应观测器的快速故障调节结构

即

$$\text{rank}(B, E) = \text{rank}(B).$$

可知 $\text{span}(E) \subseteq \text{span}(B)$, 即存在非零变换矩阵 $\bar{E} \in R^{m \times r}$, 使得 $E = B\bar{E}$. 又因为 B 是列满秩矩阵, 所以 B 的广义逆存在且唯一, 即 $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$, 使得 $B^+ B = I_m$. 同时可得

$$(I_n - BB^+)B = B - B(B^+B) = B - B = 0.$$

进一步可得

$$(I_n - BB^+)E = (I_n - BB^+)B \cdot \bar{E} = 0 \cdot \bar{E} = 0.$$

由此可知式(30)成立. 因此 B^+ 取为 B 的广义逆 B^+ 即可, 特别是当 $E_0 = B_0$, 即 $E = B$ 时, 可得非零变换矩阵 $\bar{E} = I_m$.

设计容错控制律为

$$u(t) = u_h(t) + u_f(t). \quad (31)$$

其中: 正常控制律采用状态反馈

$$u_h(t) = -K\hat{x}(t), \quad (32)$$

附加控制律

$$u_f(t) = -B^+ E f(t). \quad (33)$$

于是将容错控制律代入式(4)可得

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - BK)\hat{x}(t) - BKe(t) - Ee_f(t). \quad (34)$$

从定理2可知, $e(t)$ 和 $e_f(t)$ 是一致最终有界的. 根据 Lyapunov 稳定性理论可知, 式(34)中 $\hat{x}(t)$ 也是一致最终有界的.

最后, 经过坐标反变换可知, 原系统在发生故障时同样是稳定的. 存在一个矩阵 $B_0^+ \in R^{m \times m}$ 使得

$$(I_n - B_0 B_0^+) E_0 = 0, \quad (35)$$

可以得出使原系统保持稳定的正常控制律和附加控制律分别为

$$u_{h0}(t) = -K_0 T^{-1} \hat{x}(t), \quad (36)$$

$$u_{f0}(t) = -B_0^+ E_0 f(t), \quad (37)$$

其中 $K_0 \in R^{m \times n}$ 使得 $(A_0 - B_0 K_0)$ 是 Hurwitz 矩阵.

注3 传统的基于自适应观测器的故障估计是纯积分环节, 若选取较小的学习速率, 则故障估计收敛速度较慢; 若选取较大的学习速率, 则系统将产生很大的超调量, 故难以同时满足系统对故障估计准确性和快速性的要求. 本文提出的快速故障估计包

含比例项和微分项, 以确保故障估计准确性和快速性的同时可避免超调量.

5 仿真算例

考虑非线性倒立摆系统^[4]

$$(M + m)\ddot{x} + F_x \dot{x} + ml(\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) = u, \\ J\ddot{\alpha} + F_\alpha \dot{\alpha} - mlg \sin \alpha + ml\ddot{x} \cos \alpha = 0.$$

选取状态变量 $[x \quad \dot{x} \quad \alpha]^T$, 在平衡点进行线性化可得系统的各个矩阵, 并取 $E_0 = B_0$. 可以验证, 系统满足假设1~假设3, 经坐标变换可得各矩阵, 详见文献[4].

设计状态反馈矩阵以稳定正常系统

$$K_0 = [-41.2181 \quad -171.6711 \quad -43.1211 \quad -29.3803].$$

计算 $B_0^+ = [0 \quad 0 \quad 0.2857 \quad -0.8999]$, 以此设计附加控制律. 选取参数 $\lambda = 10$, 自适应故障估计算法中的自适应学习律 $\gamma = 3 \times 10^3$.

下面将所设计的控制律和自适应故障估计算法用于倒立摆非线性系统的仿真, 初始条件为 $[0 \quad 5/57.3 \quad 0 \quad 0]^T$.

考虑系统分别发生如下的定值故障:

$$f_1(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t < 4, \\ 2, & 4 < t < 8. \end{cases}$$

基于快速在线故障估计, 系统在出现故障时仍能保持很好的性能, 如图2所示. 在图3中, 故障的估计值快速地收敛于故障的真实值.

再考虑系统发生如下的时变故障:

$$f_2(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t < 4; \\ \sin(t) \cos(2t), & 4 < t < 8. \end{cases}$$

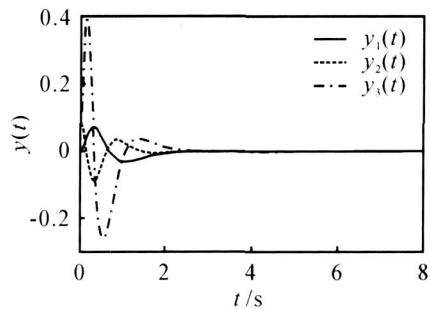


图2 系统发生定值故障时存在故障调节的输出

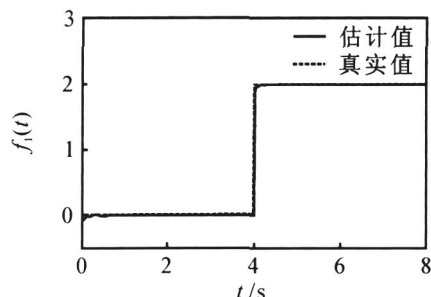


图3 定值故障的估计

基于快速在线故障估计,系统在出现时变故障时仍能保持很好的性能,如图 4 所示.在图 5 中,因为自适应学习律 选取较大,所以减小了故障估计误差,提高了故障估计的精度.

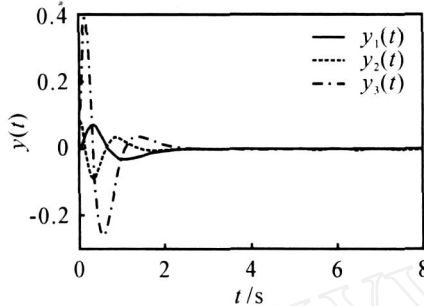


图 4 系统发生时变故障时存在故障调节的输出

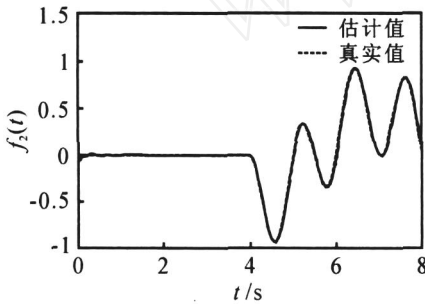


图 5 时变故障的估计

6 结 论

本文基于自适应观测器,给出了一套系统、完整的故障调节设计方法.针对自适应观测器中两个难点问题进行了深入的讨论,并给出了具体的解决方法.将本文思想推广到非线性系统的故障调节中,提高故障估计的性能,通过设计附加控制律使系统保持稳定,这将是下一步研究的重点.

参考文献(References)

[1] Polycarpou M M. Fault accommodation of a class of multivariable nonlinear dynamical systems using a learning approach [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(5): 736-742.

[2] 张颖伟,王福利,于戈. 基于一个学习逼近的非线性系统的故障调节[J]. 自动化学报, 2004, 30(5): 757-762.
(Zhang Y W, Wang F L, Yu G. Fault accommodation of a class of nonlinear systems using a learning approach [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(5): 757-762.)

[3] 冒泽慧,姜斌. 基于神经网络观测器的一类非线性系统的故障调节[J]. 控制与决策, 2007, 22(1): 11-15.
(Mao Z H, Jiang B. Fault accommodation for a class of nonlinear systems based on neural network observer[J]. Control and Decision, 2007, 22(1): 11-15.)

[4] Edwards C, Spurgeon S K, Patton R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation [J]. Automatica, 2000, 36(4): 541-553.

[5] Tan C P, Edwards C. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults [J]. Automatica, 2002, 38(10): 1815-1821.

[6] 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(6): 1011-1016.
(Chen M Y, Zhou D H. Fault detection and isolation in a class of nonlinear systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(6): 1011-1016.)

[7] Wang H, Daley S. Actuator fault diagnosis: An adaptive observer-based technique[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(7): 1073-1078.

[8] Jiang B, Wang J L, Soh Y C. An adaptive technique for robust diagnosis of faults with independent effects on system outputs [J]. Int J of Control, 2002, 75(11): 792-802.

[9] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(9): 1578-1583.

[10] Edwards C, Spurgeon S K. On the development of discontinuous observers[J]. Int J of Control, 1994, 59(5): 1211-1229.

(上接第 770 页)

[16] Civalleri P, Gilli M. Practical stability criteria for cellular neural networks [J]. Electronics Letters, 1997, 33(11): 970-971.

[17] Kosko B. Neural networks and fuzzy systems [M]. New Delhi: Prentice Hall, 1992.

[18] Haykin S. Neural networks[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

[19] Gopalsamy K. Stability and oscillations in delay differential equations of population dynamics [M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 1992.