

一类非线性系统参数偏差型故障的 实时检测与诊断¹⁾

周东华 孙优贤

(浙江大学工业控制研究所, 杭州 310027)

席裕庚 张钟俊

(上海交通大学自动控制系, 200030)

摘 要

本文针对一类较一般的多变量非线性时变随机系统, 给出了一种全新的用于其参数偏差型故障的实时检测与诊断方法. 这类故障包容了诸如部件参数的阶跃型和缓变型故障等, 所给仿真实例证实了本文方法的有效性.

关键词: 非线性系统, 参数偏差, 参数估计, 故障检测, 故障诊断.

一、前 言

基于解析冗余的动态系统的故障检测与诊断技术(FDD)在过去的20年中得到了广泛的研究^[1-4]. 然而, 以往的研究大都局限于线性系统, 对非线性时变随机系统相对研究较少. 其主要原因是缺乏简单实用的用于此类系统状态及参数估计的滤波器. 由于实际过程严格上讲均是非线性系统, 因此研究此类系统的FDD方法成为目前FDD领域的前沿课题.

文[5-7]分别针对一些特殊类型的非线性系统给出了一些故障检测方法, 但只局限于故障的检测, 未给出有效的故障诊断方法. 笔者曾给出了一种自适应故障检测滤波器²⁾, 可以检测并分离出一类非线性系统部件参数的非经常跳变故障, 但它的实时性不够理想.

实际受控对象的典型故障有: 驱动回路及输出传感器回路的增益逐渐衰减或突然衰减以致超出允许范围; 驱动回路及输出传感器回路出现超限的阶跃型输出偏差或缓变型偏差; 由于老化或损坏等原因造成的本应具有定常参数的一些系统部件的参数值缓变或跳变等. 本文将这几类故障归于参数偏差型故障进行研究, 并针对一类较一般的非线性时变随机系统, 给出了一种全新的关于其参数偏差型故障的实时检测与诊断方法.

本文于1991年5月20日收到.

1) 本文曾在1991年全国过程控制学术交流会(广州)上宣读.

2) 周东华、席裕庚、张钟俊, 一类非线性系统的故障检测策略及其应用, 全国第四届空间及运动体控制技术会议论文集, 北京(1989), 366—374.

二、问题的提出

考虑由离散状态空间模型描述的非线性时变随机系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{f}(t, \boldsymbol{\theta}(t), \mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}(t, \boldsymbol{\theta}(t), \mathbf{x}(t)) \cdot \mathbf{u}(t) + \Gamma(t) \cdot \mathbf{v}(t), \\ \mathbf{y}(t+1) = \mathbf{h}(t+1, \boldsymbol{\theta}(t+1), \mathbf{x}(t+1)) + \mathbf{e}(t+1), \end{cases} \quad (1)$$

其中状态 $\mathbf{x} \in R^n$, 输入 $\mathbf{u} \in R^m$, 输出 $\mathbf{y} \in R^r$, 参数 $\boldsymbol{\theta} \in R^l$, $\mathbf{f} \in R^n$, $\mathbf{B} \in R^{n \times m}$, $\Gamma \in R^{n \times q}$, $\mathbf{h} \in R^r$, $\mathbf{v}(\cdot)$, $\mathbf{e}(\cdot)$ 分别为不相关的零均值, 协方差为 $Q_1(t)$ 及 $Q_2(t)$ 的高斯白噪声, 初始条件

$$E\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, E[\mathbf{x}(0) - \mathbf{x}_0] \cdot [\mathbf{x}(0) - \mathbf{x}_0]^T = P_0$$

假设正常运行时 $\boldsymbol{\theta}(t) \sim N(\boldsymbol{\theta}^0, \sigma_{\boldsymbol{\theta}^0}^2)$.

定义 1. 称系统(1)发生参数阶跃型偏差故障(第一类故障), 若其参数 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 发生阶跃型跳变. 此类故障可用下式描述:

$$\boldsymbol{\theta}(t+1) - \boldsymbol{\theta}(t) \geq \Delta_{\boldsymbol{\theta}}(\tau) \cdot \delta_{t+1, \tau}, \quad (2)$$

其中 $\Delta_{\boldsymbol{\theta}}(\tau) = [\Delta_{\theta_1}(\tau) \Delta_{\theta_2}(\tau) \cdots \Delta_{\theta_l}(\tau)]^T$ 为未知的故障幅值. $\tau \in \{1, 2, \cdots\}$ 为未知的故障时刻序列.

定义 2. 称系统(1)发生参数缓变型偏差故障(第二类故障), 若其参数出现较大的漂移. 此类故障可描述为

$$\boldsymbol{\theta}(t+1) - \boldsymbol{\theta}(t) = \mathbf{D}_{\boldsymbol{\theta}}(t), \quad (3)$$

其中 $\mathbf{D}_{\boldsymbol{\theta}}(t) = [D_{\theta_1}(t) D_{\theta_2}(t) \cdots D_{\theta_l}(t)]^T$, $D_{\theta_i}(t)$, $i = 1, 2, \cdots, l$ 为在 t 时刻, $\theta_i(t)$ 的漂移量.

$$\text{当} \quad |\theta_i(\tau) - \theta_i^0| > \beta_i \quad (4)$$

时, 认为 θ_i 出现缓变型偏差故障. 式中 β_i 为预定的阈值.

问题 1) 实时检测出系统(1)是否发生上述的两类故障, 若已发生, 则判别出是哪一类故障. 2) 若发生的是第一类故障, 需判别是哪些 θ_i 发生此类故障, 并估计出故障的幅值 Δ_{θ_i} , 若发生的是第二类故障, 需判别是哪些 θ_i 发生此类故障, 并估计出总的参数偏差量. 为解决上述问题, 对系统(1)提出如下假设:

- 1) 状态 \mathbf{x} 及参数 $\boldsymbol{\theta}$ 是可辨识的;
- 2) 第一类故障是非经常发生的, 也即不经常发生.

三、问题的解决

本节给出一个系统性的参数偏差型故障的检测与诊断 (FDDPB) 算法, 如图 1 所示.

扩展卡尔曼滤波器(EKF)与残差加权平方和算法(WSSR)构成快速故障检测算法¹⁾,

1) 周东华、席裕庚、张钟俊, 一种非线性自适应故障检测滤波器, 全国控制理论与应用年会论文集, 杭州, (1990), 663—666.

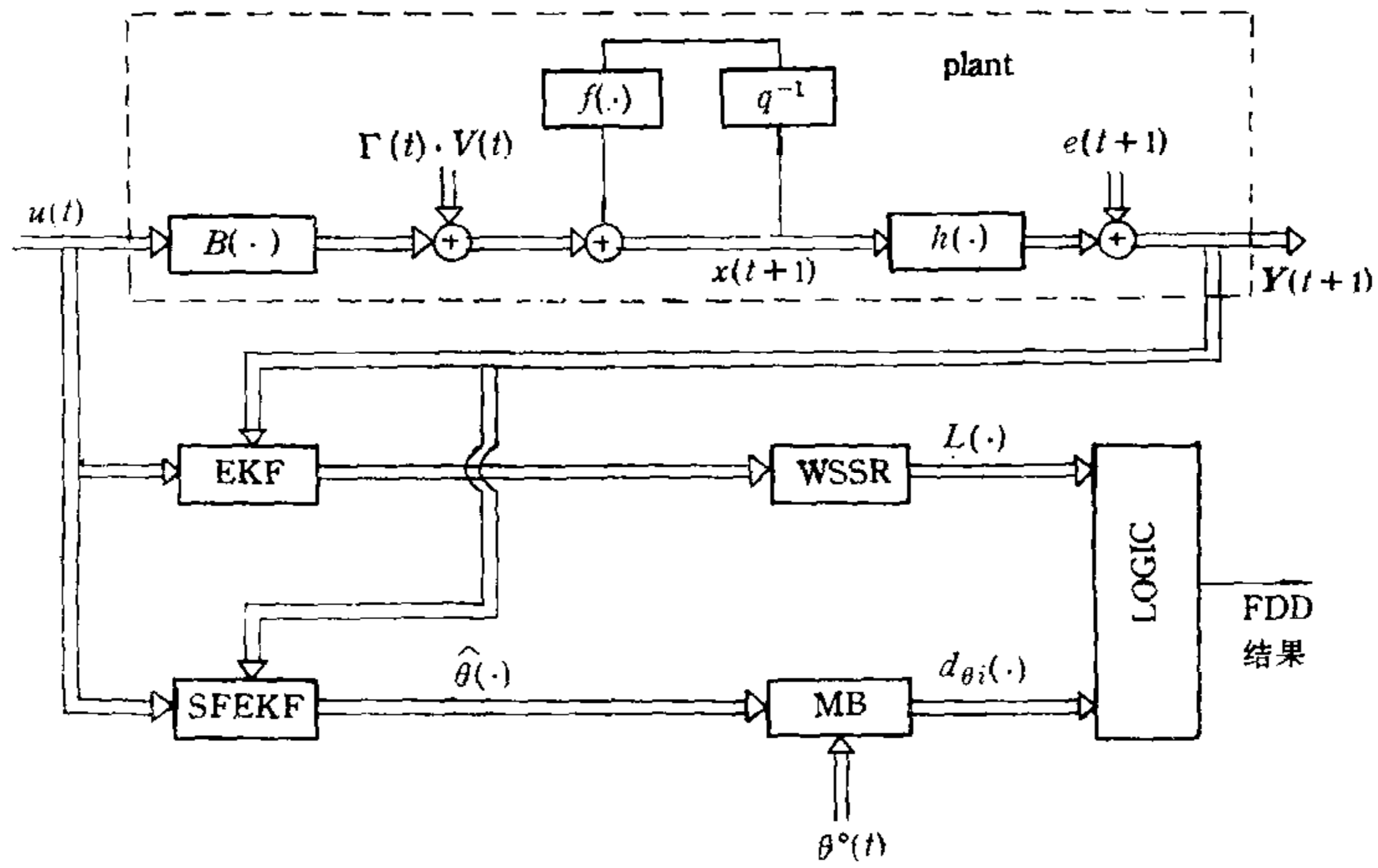


图 1 FDDPB 算法结构框图

SFEKF 为一种带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器^[8,9]。MB 为修正的贝叶斯分类算法,由下式给出:

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{\theta_i}(t) &= \frac{1}{N_1} \cdot \sum_{j=1}^{N_1} \hat{\theta}_i(t-j), \\ \hat{\sigma}_{\theta_{i|l}}^2(t) &= \frac{1}{N_1-1} \cdot \sum_{j=1}^{N_1} [\hat{\theta}_i(t-j) - \theta_i^0]^2, \\ \hat{\sigma}_{\theta_{i|l}}^2(t) &= \frac{1}{N_1-1} \cdot \sum_{j=1}^{N_1} [\hat{\theta}_i(t-j) - \hat{\mu}_{\theta_i}(t)]^2, \\ d_{\theta_i}(t) &= \frac{\hat{\sigma}_{\theta_{i|l}}^2(t)}{\sigma_{\theta_i}^2} - \ln \frac{\hat{\sigma}_{\theta_{i|l}}^2(t)}{\sigma_{\theta_i}^2} - 1. \end{aligned} \tag{5}$$

其中 N_1 为数据窗长度,定义阈值 β_{θ_i} ,则

$$d_{\theta_i}(\tau) \begin{matrix} H_0 \\ \leq \\ H_1 \end{matrix} \beta_{\theta_i}. \tag{6}$$

FDDPB 的算法如下:

Step 1. 基于 EKF 及 WSSR,在 $t = \tau$ 时刻进行如下判断:

- 1) 当 WSSR 算法的 H_1 成立时,可判定系统(1)发生了第一类故障,并转向 Step 3.
- 2) 当 WSSR 算法的 H_0 成立时,继续本步监测并转向 Step 2.

Step 2. 由 SFEKF^[8,9] 得参数估值序列 $\hat{\theta}(t+1) = [\hat{\theta}_1(t+1)\hat{\theta}_2(t+1)\cdots\hat{\theta}_l(t+1)]^T$, 对参数 $\hat{\theta}_j(t+1)$, $j = 1, \cdots, l$, $t = 0, 1, \cdots$ 基于 MB 算法进行如下验证:

1) 在 $t = \tau$ 时刻,当式(6)的 H_1 成立时,可判断系统(1)的 θ_j 已发生第二类故障,对 $j = 1, \cdots, l$ 分别进行检验,得到发生此类故障的一组参数 $\theta_{j_1}, j_1 = I_1, I_2, \cdots, I_{n_1} \in \{1, 2, \cdots, l\}$,且故障幅值约为

$\hat{\theta}_{j_1}(\tau+1) - \theta_{j_1}^0, j_1 = I_1, I_2, \cdots, I_{n_1}$, 转向 Step 1.

2) 当式(6)的 H_0 成立时,转向 Step 1.

Step 3. 基于 MB 算法, 进行如下判断:

1) 当对某个 $L \in \{0, 1, 2, \dots\}$, 对 $\forall T \in \{L \cdot T_2 + 1, \dots, L \cdot T_2 + T_3\}$, $L \cdot T_2 \geq \tau$ 时, 有 $|\hat{\theta}_j(T) - \hat{\theta}_j(T-1)| < \varepsilon_{\theta_j}$, 且(6)式的 H_1 均成立时, 在 $t = L \cdot T_2 + T_3$ 时刻, 可判定 $\theta_j(t)$ 已发生阶跃型偏差故障, 且故障幅值约为

$$\Delta\theta_j = \left[\frac{1}{T_3} \cdot \sum_{T=L \cdot T_2+1}^{L \cdot T_2+T_3} \hat{\theta}_j(T) \right] - \theta_j^0.$$

其中 T_2, T_3 为选定的正整数, ε_{θ_j} 为选定的阈值, 转向 Step 1.

2) 当1)中的条件不完全成立时, $t+1 \rightarrow t$, 继续本步监测.

四、FDDPB 算法的应用与仿真实例

1. 驱动回路输出偏差型故障的检测与诊断

当系统(1)中 $f(\cdot), B(\cdot), h(\cdot)$ 中的参量可认为基本不变时, 可采用模型

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t)) + B(t, \mathbf{x}(t)) \cdot [\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}_0(t)] + \Gamma(t) \cdot \mathbf{v}(t), \\ \mathbf{u}_0(t+1) &= \mathbf{u}_0(t), \quad \mathbf{u}_0(0) = 0, \\ \mathbf{y}(t+1) &= \mathbf{h}(t+1, \mathbf{x}(t+1)) + \mathbf{e}(t+1). \end{aligned} \quad (7)$$

对系统(1)驱动回路偏差型故障进行检测与诊断. 这里只需扩展状态为

$$\mathbf{x}_a(t) = [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{u}_0^T(t)]^T,$$

将 $\mathbf{u}_0(t)$ 看成时变参数, 则仍可采用 FDDPB 算法进行此类故障的检测与诊断¹⁾. 此外, 在引言中所述的几类典型故障均可采用此 FDDPB 算法进行检测与诊断¹⁾.

2. 仿真实例

某轮船驱动系统可由下式模拟:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= 0.1 \times a(t) \times x^2(t) + x(t) + 0.1 \times b(t) \times u(t) + v(t), \\ y(t+1) &= x(t+1) + e(t+1), \\ Q_1 &= 0, \quad Q_2 = 0.001, \quad x(0) = 0. \end{aligned}$$

式中, $a(t)$ 代表船壳所受阻力, $b(t)$ 代表发动机的效率. 其标称值 $a^0 = -0.58, b^0 = 0.2$, $x(\cdot)$ 表示轮船速率.

图 2 给出了驱动回路增益逐渐衰减型故障的 FDD 结果. 设在 $t = 300$, 增益 $\alpha_u(t)$ 开始按下式衰减:

$$\alpha_u(t+1) = \alpha_u(t) - \frac{2}{5000}, \quad \alpha_u(300) = 1, \quad t \geq 300, \quad \text{仿真中取 } \beta_{\alpha_u} = 15, \varepsilon_0 = 0.001,$$

$$T_2 = T_3 = 50.$$

由图 2(d) 看到, 在 $t = 550$, 诊断出系统已发生驱动回路增益逐渐衰减型故障, 且故障幅值约为 -0.08 .

图 2(e) 给出了 SFEKF^[8] 中次优渐消因子 $\lambda(t)$ 的变化曲线, 揭示了次优渐消因子自动调节功能的机理.

1) 周东华, 一类非线性系统故障检测与诊断的滤波器方法, 上海交通大学博士学位论文, (1990), 38-128.

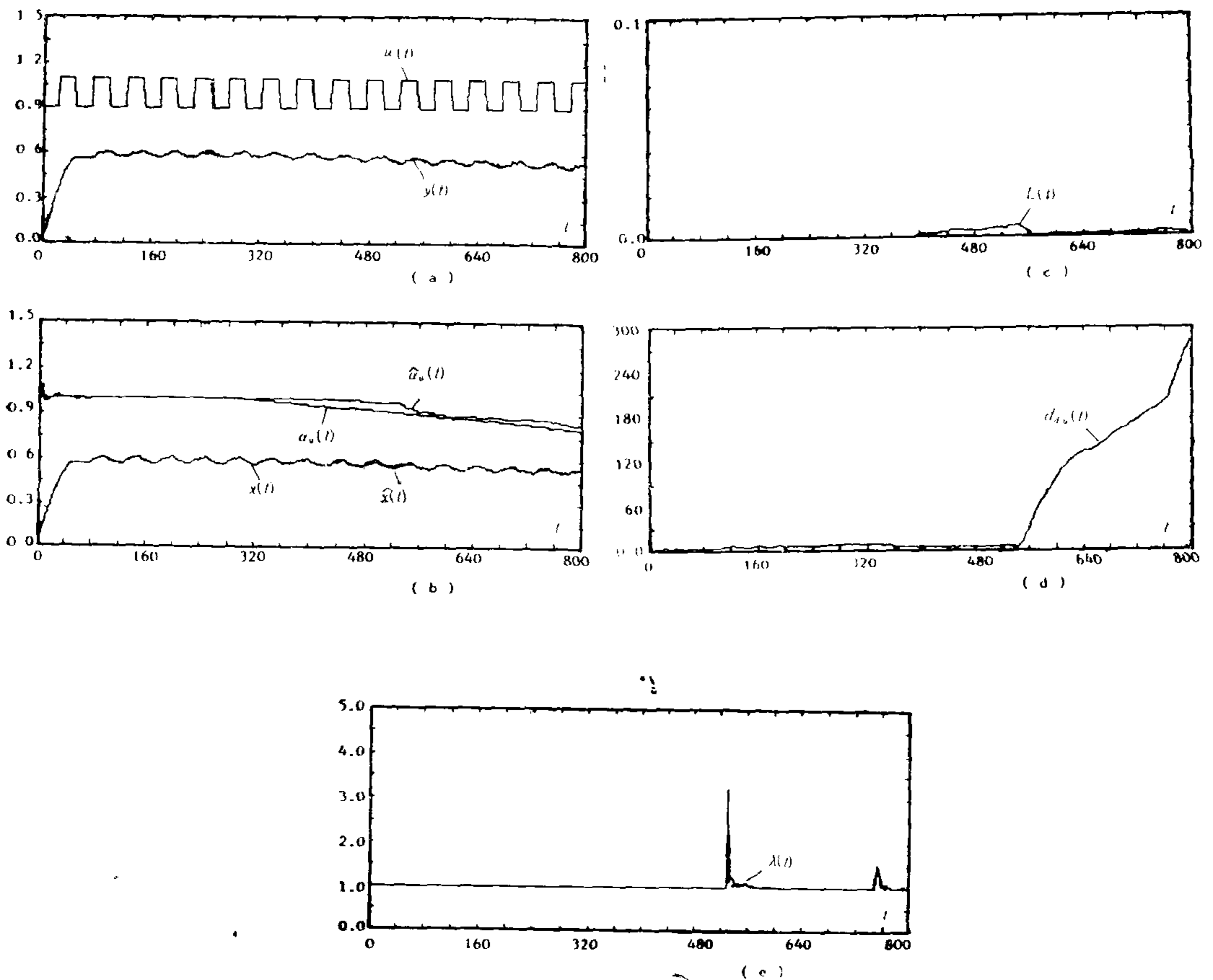


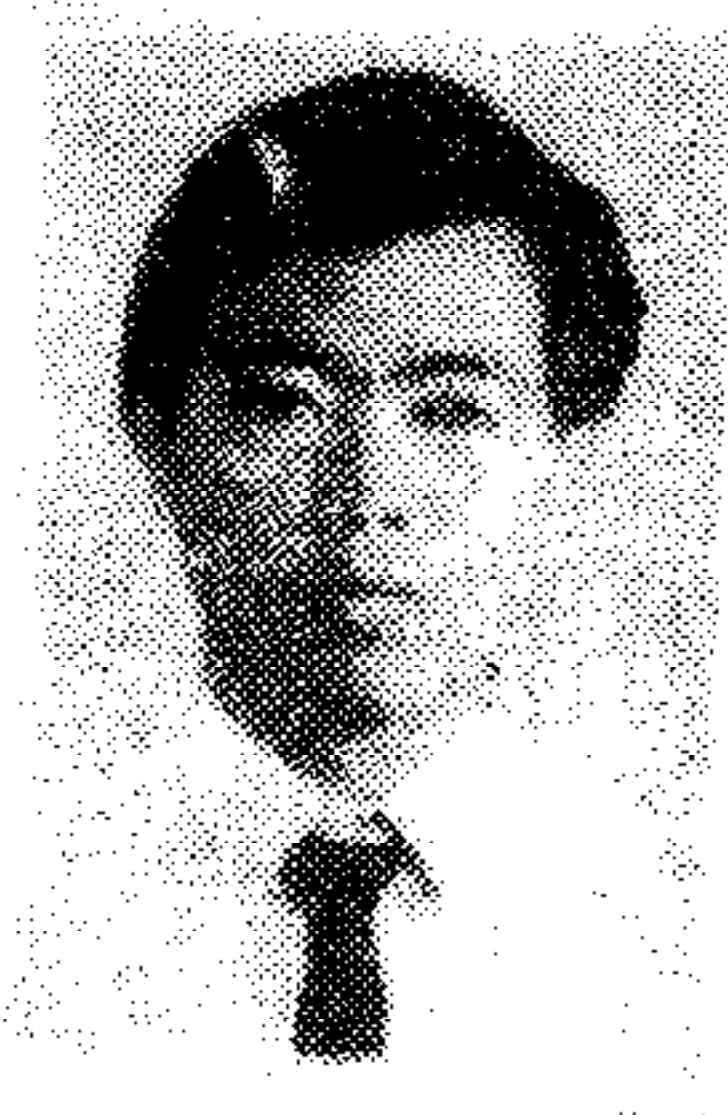
图2 驱动回路增益衰减型故障的 FDD 结果

本文针对一类较一般的非线性系统，给出了一种实时检测与诊断其参数偏差型故障的方法。此方法的核心是由 SFEKF^[8,9] 实时得到参数的估值序列。参数偏差型故障包含了几大类动态系统的典型故障，因此本文方法具有很广泛的适用性。由于本文算法由离散型递推公式给出，计算复杂性较低，因此它又是一种实时算法。有待于进一步研究的问题是，系统(1)的可辨识性以及所需满足的条件。

参 考 文 献

- [1] Willsky, A. S., A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems, *Automatica*, 12 (1976), 601—611.
- [2] Frank, P. M., Fault Diagnosis in Dynamic System via State Estimation——A Survey, Proc. of First European Workshop on Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge Based Approach, 35—98, (1987).
- [3] Isermann, R., Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods——A Survey, *Automatica*, 20(1984), 387—404.
- [4] 周东华、席裕庚、张钟俊, 故障检测与诊断技术, 控制理论与应用, 8(1991), (1), 1—10.
- [5] Usoro, P. B., Schick, I. C. and Negahdaripour, S., HVAC System Fault Detection and Diagnostics, Proc. of American Control Conference, (1984), 606—612.
- [6] Tylee, J. L. and Purviance, J. E., Instrument Failure Detection in Nonlinear System, Proc. of American Control Conference, (1984), 271—273.

- [7] Lancraft, R. E. and Caglayan, A. K., A Fault Tolerant Approach to State Estimation and Failure Detection in Nonlinear System, Proc. of American Control Conference, (1987), 799—804.
- [8] 周东华, 席裕庚, 张钟俊, 非线性系统的带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波, 控制与决策, 5(1990), (1), 1—6.
- [9] 周东华, 席裕庚, 张钟俊, 非线性时变随机系统状态及参数的实时联合估计, 信息与控制, 6(1990), (1), 1—5.



周东华 1963年生。分别于1985, 1988及1990年在上海交通大学自控系获工学学士, 硕士及博士学位, 现为浙江大学工业控制技术研究所博士后。目前的研究方向是非线性系统的状态与参数估计以及故障检测与诊断技术。



孙优贤 51岁, 教授, 博士生导师, 工业控制技术国家重点实验室主任, 工业自动化工程研究中心主任, 中国自动化学会理事, 中国自动化学会应用委员会副主任。主要研究方向是多变量过程建模及控制, 容错控制理论及应用, H^∞ 控制理论及应用, 鲁棒控制应用理论研究。

席裕庚 照片、简介见本刊第17卷第六期。

张钟俊 照片、简介见本刊第17卷第六期。

REAL-TIME DETECTION AND DIAGNOSIS OF "PARAMETER BIAS" FAULTS FOR NONLINEAR SYSTEMS

ZHOU DONGHUA, SUN YOUXIAN

(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

XI YUGENG, ZHANG ZHONGJUN

(Department of Automatic Control, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

ABSTRACT

A systematic method for real-time detection, isolation and estimation of "parameter bias" faults for a general class of nonlinear time-varying stochastic systems is proposed. The "parameter bias" faults may be of jump or slow drift type faults representing several large classes of system faults, such as the jump/slow drift type faults of the components, etc. Numerical results for a ship propelling model illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: Nonlinear stochastic system; parameter bias; parameter estimation; fault detection; fault diagnosis.