

# 基于解析模型的非线性系统鲁棒故障诊断方法综述

李令莱, 周东华

(清华大学自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 研究非线性系统的鲁棒故障诊断具有重要意义. 本文着重讨论了两类方法: 非线性未知输入观测器方法和基于自适应学习的方法, 并简要概述了其它一些方法. 还探讨了非线性系统鲁棒故障诊断的应用实例, 并指出了其中的若干关键问题以及今后的研究方向.\*

**关键词:** 故障诊断; 非线性系统; 鲁棒性; 观测器

**中图分类号:** TP13

**文献标识码:** A

## Robust Fault Diagnosis of Nonlinear System Based on Analytical Models: a Survey

LI Ling-lai, ZHOU Dong-hua

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Studies on robust fault diagnosis of nonlinear systems based on analytical models are of great significance. This paper mainly concerns two kinds of approaches: nonlinear unknown input observer scheme and the method based on adaptive learning, and summarizes some other approaches. In addition, we also discuss some applications of robust fault diagnosis of nonlinear systems, and point out some key issues and the future research direction.

**Keywords:** fault diagnosis; nonlinear systems; robustness; observer

### 1 引言(Introduction)

动态系统的故障诊断技术 30 年来得到了长足的发展, 尤其是近十几年来, 随着计算机科学、计算智能等新技术的快速发展, 许多新方法和新技术被引入到该领域<sup>[1]</sup>. 故障诊断方法可以分为三大类<sup>[2]</sup>: 基于解析模型的方法, 基于定性模型/知识的方法和基于过程历史数据的方法. 后两类方法中, 例如有向图、故障树、专家系统、神经网络及主元分析等, 在近年来发展很快, 但以控制理论为基础的基于解析模型的方法仍然具有很重要的研究意义. 然而, 基于解析模型的大部分研究都是针对线性系统的, 文[1]指出非线性系统的故障诊断和故障诊断的鲁棒性都是研究中值得关注的问题.

基于解析模型的故障诊断方法的鲁棒性问题具有极大的实用意义, 因为许多实际生产过程由于各种未知扰动、噪声等因素, 很难得到精确的数学模型. 由于建模不确定和故障实际上都是不期望的动态特性, 如果不能很好处理建模不确定的影响, 原有的故障诊断方法甚至会完全失效. 鲁棒故障诊断指

的就是在建模不确定的情况下, 故障诊断系统能在一定程度上区分扰动和故障, 仍然以较好的性能诊断出故障. 关于线性系统的鲁棒故障诊断已经有很丰富的成果<sup>[3,4]</sup>. 文[3]指出, 故障诊断的鲁棒性体现在两方面: 残差生成和残差评价. 鲁棒残差产生的方法<sup>[3,4]</sup>主要有未知输入观测器、特征结构划分、扰动解耦的等价空间检验、频域优化等方法; 鲁棒残差评价的方法<sup>[3]</sup>主要有自适应阈值、残差选择器、模糊逻辑等方法. 文[3]中提到了一些针对非线性系统鲁棒故障诊断的方法, 但内容不多. 专著[4,5]对非线性系统的故障诊断方法均有简要的概述, 但没有深入讨论其鲁棒性问题. 关于非线性系统鲁棒故障诊断已有两篇相应的综述文章[6,7], 其中主要有双线性/非线性未知输入观测器和自适应观测器方法. 近年来, 该领域又有不少新的发展, 本文将对该领域的主要方法进行简要的概述.

基于模型的故障诊断方法主要有观测器、等价空间、滤波器、参数估计和频域等方法<sup>[2,3]</sup>. 其中, 等价空间和频域方法都是针对线性系统设计的, 较难

\* 收稿日期: 2003-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60025307, 60234010); 国家 973 计划资助项目(2002CB312200)

推广到非线性系统; 对非线性系统, 参数估计的方法主要有强跟踪滤波器方法<sup>[5]</sup>, 但参数估计方法的一个弱点是需要比较准确的数学模型, 且计算量偏大<sup>[2]</sup>. 因此, 现有的非线性系统的鲁棒故障诊断方法大多是基于观测器的状态估计方法, 其中最主要的方法主要有两类: 对结构化未知扰动解耦的方法和自适应学习的方法. 以下本文将对上述两大类方法以及其它一些方法进行概述.

## 2 未知输入观测器方法( Unknown input observer method)

利用未知输入观测器对建模不确定系统进行故障诊断的方法最早由 Watanabe<sup>[8]</sup> 提出, 其基本思想是利用 Luenberg 观测器设计中富裕的自由度, 使其输出对于未知输入( 扰动、建模不确定等) 解耦, 从而实现鲁棒性的要求. 近 20 年来, 针对类似式 (1) 所示的线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ed \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

其中  $E$  为已知的扰动分布矩阵,  $d$  是未知扰动, 该类故障诊断方法得到了长足的发展. 代表文献如文 [9], Chen 等将未知输入观测器与著名的 Beard 故障检测滤波器结合, 给出了一种有效的故障诊断方法.

Watanabe 最早将此思想应用于非线性系统的故障诊断<sup>[10]</sup>, 其中非线性项也是通过一个分布矩阵引入状态方程, 而未知扰动、表征故障的参数均体现在该非线性函数里. 其两阶段策略, 首先是将非线性项整体视作扰动来设计未知输入观测器得到较准确的状态估计, 其次通过扩展 Kalman 滤波器对故障参数进行辨识.

近年来, 已有不少文献将未知输入观测器的思想拓展到非线性系统的鲁棒故障诊断, 例如双线性系统、多项式非线性系统等. 以下将对各种方法进行简要概述.

### 2.1 双线性系统的鲁棒故障诊断

作为一类特殊的非线性系统, 双线性系统与线性系统有很大的相似性. 因此, 在线性系统的基础上, 对双线性系统的故障诊断研究比较深入和系统. 作为一种理论上比较成熟的线性系统鲁棒故障诊断策略, 未知输入观测器方法也被推广到双线性系统.

针对如下一类离散双线性系统:

$$\begin{cases} x_{k+1} = A^0 x_k + Bu_k + \sum_{i=1}^h A^i u_k(i) x_k \\ \quad + Ed_k + \mathcal{G}_{a(k)} \\ y_k = Cx_k + \mathcal{G}_{s(k)} \end{cases} \quad (2)$$

文 [11] 对其构造如下双线性故障检测观测器:

$$\begin{cases} z_{k+1} = \hat{A}^0 z_k + B^0 y_k + Hu_k \\ \quad + \sum_{i=1}^h B^i u_k(i) y_k \\ \varepsilon_k = L_1 z_k + L_2 y_k \end{cases} \quad (3)$$

其中  $z_k = Tx_k$ . 注意到式 (2) 所描述的双线性系统与 (1) 式很接近, 只是多了状态与输入的交叉项. 因此, 与线性系统的未知输入观测器类似, (3) 式也要满足如下相同的解耦条件:

$$TE = 0 \quad (4)$$

除了 (4) 式和其它与线性系统类似的条件, (3) 式还必须满足一定专门针对双线性系统的附加条件, 使得 (3) 式所示的观测器能够在无故障情况下渐近收敛. 文 [11] 给出了满足上述条件的一组解和观测器设计算法. 在文 [11] 的基础上, 文 [12] 进一步给出了一种双线性故障诊断滤波器方法, 即在 (3) 式基础上对原观测器残差  $\varepsilon_k$  进行如下滤波:

$$\zeta_k = \varepsilon_k - L_1 \hat{A}^0 L_3 \varepsilon_{k-1} \quad (5)$$

由此可得到具有方向性的误差, 更有利于故障诊断; 此外, 对于观测器的初始状态和故障的影响具有最小拍性质.

文 [13] 对于一类连续双线性系统设计了一类类似 Kalman 滤波器的观测器, 而且同样满足未知扰动解耦的条件. 区别于一般的线性时不变观测器, 其观测器的反馈增益矩阵是时变的. 并且文 [13] 通过例子说明了采用类似 Kalman 滤波器的观测器能处理更多种类的双线性系统. 类似于文 [13], 文 [14] 对于一类带噪声的离散双线性系统设计 Kalman 滤波器, 且残差对未知扰动解耦, 并采用广义似然比检验的方法进行残差评价以消除噪声影响. 文 [15] 基于线性矩阵不等式 (LMI) 的设计方法, 进一步研究了奇异双线性系统的鲁棒故障诊断问题, 区别于一般双线性系统, 其状态方程的左边不是状态的导数, 而是其线性组合  $E\dot{x}$ .

### 2.2 多项式非线性系统的鲁棒故障诊断

多项式非线性系统是双线性系统的一种推广, 其状态方程中含有状态变量的交叉项. 文 [16] 考察了二次多项式非线性系统的鲁棒故障诊断, 即含有状态变量的二次交叉项, 类似文 [12] 给出了鲁棒故障检测观测器成立的充分条件和设计算法. 文 [17] 考察了一般阶次多项式非线性系统的鲁棒故障诊断问题, 并且给出了最优和次优算法.

### 2.3 其它非线性系统的鲁棒故障诊断

由于非线性系统的特殊性, 至今仍然没有统一有效的解决方法, 此问题也同样存在于故障诊断领域. 对于部分特殊的非线性系统, 类似上述对未知输入解耦的思想, 人们也提出了非线性未知输入观测器的方法进行鲁棒故障诊断. Frank 的几篇综述里对此均提到了相应的一些成果<sup>[3, 6, 7]</sup>. 下面简述部分具有代表性的工作.

一类特殊的非线性系统经过坐标变换可以得到如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(y, u) + E_1 d_1 + K_1 f_1 \\ y = Cx + E_2 d_2 + K_2 f_2 \end{cases} \quad (6)$$

文[18]将线性未知输入观测器的方法推广到如(6)式所示的非线性系统. 可以看到如上的推广是很直观的, 其观测器满足的条件和设计方法都与线性系统的雷同.

注意到, 上述考察的系统其扰动分布矩阵  $E$  和故障分布矩阵  $K$  都是已知常数矩阵. 文[19]考察了如下一般更一般的非线性系统鲁棒故障诊断问题:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x, u) + K(x, u)f + E(x)d \\ y = C(x) \end{cases} \quad (7)$$

其基本思路是找到一个非线性坐标变换  $z = T(x)$  使得其对未知扰动  $d$  解耦, 即:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial x} E(x) = 0 \quad (8)$$

注意到条件(8)与(4)在本质上是一致的. 而要实现故障分离的目的, 除了要对  $E$  解耦, 状态变换矩阵还要对故障分布矩阵的特定列解耦.

### 3 基于自适应学习的方法(Method based on adaptive learning)

与未知输入观测器类方法考察的是结构化扰动(即扰动通过一定的分布矩阵加在系统方程上)不同, 该类方法对建模不确定性的基本假设是范数有界. 文[20]考虑一类如下形式非线性系统的元部件或执行器的故障诊断问题:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + \alpha(y, u) + \varphi(z, u, t) \\ \quad + \beta(t-T)\phi(y, u) \\ y = Cz \end{cases} \quad (9)$$

其中, 建模不确定项  $\|\varphi(z, u, t)\| \leq \varphi_0$ ;  $\phi(y, u)$  是故障函数, 而  $\beta(t-T)$  表征故障的发生时间为  $T$ . 对此系统构造如下非线性观测器:

$$\begin{cases} \dot{z} = (A - KC)\hat{z} + \alpha(y, u) + Ky + \\ \quad \hat{\phi}(y, u; \hat{\theta}) + \Omega \dot{\hat{\theta}} \\ \dot{\Omega} = (A - KC)\Omega + Z(y, u; \hat{\theta}) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\hat{\phi}(y, u; \hat{\theta})$  为在线估计器( $\hat{\theta} \in R^q$  是待估计参数), 用以估计故障函数  $\phi(y, u)$ , 可以采用神经网络等多种形式, 而  $Z(y, u; \hat{\theta}) = \frac{\partial \hat{\phi}(y, u; \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}}$ . 在故障发生前, 保持在线观测器的输出为零, 由于系统(9)的建模不确定性有界, 系统稳定, 因此由观测器(10)得到的输出的误差  $e_y = y - Cz$  也是有界的<sup>[20]</sup>, 记此上界为  $\varepsilon$ . 则选择如下自适应律:

$$\dot{\hat{\theta}} = P\{\Gamma \Omega^T C^T D[e_y]\} \quad (11)$$

其中死区算子  $D[e_y] = \begin{cases} 0 & \text{if } \|e_y\| < \varepsilon \\ e_y & \text{otherwise} \end{cases}$ ; 而  $P\{\cdot\}$  是投影算子, 将参数限定在一个凸紧集内, 以避免参数发散<sup>[20]</sup>. 由(11)式可知, 在故障发生前在线估计器不会开始自适应学习, 而一旦在线估计器开始自适应学习过程, 则检测到故障. 因此, 死区算子  $D$  保证了故障检测的鲁棒性. 文[20]证明了如上故障诊断策略的稳定性, 输出误差在故障发生后仍然保持有界; 并且给出了灵敏性条件, 即故障函数满足一定条件的情况下, 故障是可被检测的.

文[21]进一步考察了系统(9)同时引入传感器建模不准确和传感器故障的情形, 并同样给出了鲁棒故障检测的阈值和自适应学习算法, 类似地也给出了灵敏性及稳定性的证明.

以上方法只是故障检测和估计, 文[22]又讨论了该类非线性系统的故障分离问题. 假设故障函数  $\phi(y, u)$  属于如下的故障集  $F = \{\phi^1(y, u), \dots, \phi^N(y, u)\}$ , 其中每类故障  $\phi$  均可表示成如下形式:  $\phi^s(y, u) = [(\theta_1^s)^T g_1^s(y, u), \dots, (\theta_n^s)^T g_n^s(y, u)]^T$ , 其中  $\theta$  是未知参数,  $g_i^s$  为已知函数向量. 除了同上构造形如(10)式的观测器进行故障检测外, 还将另外设计  $N$  个观测器以进行故障分离. 这  $N$  个观测器在形式上同(10)式, 不同在于其在线估计器采用如上故障集的已知故障函数, 即:  $\hat{\phi}(y, u; \hat{\theta}^s) = [(\theta_1^s)^T g_1^s(y, u), \dots, (\theta_n^s)^T g_n^s(y, u)]^T$ , 相应的自适应学习参数也变为  $\hat{\theta}^s$ , 但其自适应律不需要死区算子, 因为该  $N$  个观测器是在检测到故障之后才开始工作. 可以看到, 这  $N$  个故障分离观测器分别匹配故障集中的一种类型故障. 直观的, 如果发生第  $s$  种类型的故障, 则相应的第  $s$  个故障分离观测器的输出误差应该维持在阈值之内, 而其余  $N-1$  个故障分离观测器的输出误差则会超出阈值, 由此可以得到故障分离算法. 文[22]进一步在理论上给出了用于故障分

离的自适应阈值以及可分离条件.

然而可以由(9)式表达的非线性系统很少, 必须满足一定的条件<sup>[20]</sup>, 通过非线性坐标变换才能得到如(9)式的形式. 文[23~25]考察了另外一类特殊的非线性系统的鲁棒故障诊断问题, 其系统如(12)式所示:

$$\dot{x} = \xi(x, u) + \eta(x, u) + B(t-T)f(x, u) \quad (12)$$

其中  $\xi$  是标称系统;  $\eta$  是建模不确定项, 且  $|\eta_i(x, u)| < \bar{\eta}_i$ ;  $B(t-T)$  和  $f(x, u)$  同上, 分别表示故障发生时间和故障函数. 其特殊之处在于假设该系统是全状态可测的, 由此才可以如上类似地构造观测器, 形式如下:

$$\dot{\hat{x}} = -G\hat{x} + \xi(x, u) + Gx + \hat{f}(x, u; \hat{\theta}) \quad (13)$$

其中  $G$  为正定的对角矩阵. 由此可类似推出在故障发生前的状态估计误差的上界, 以此作为鲁棒故障检测的阈值, 也即如下自适应律中死区算子的边界值:

$$\dot{\hat{\theta}} = P\{\Gamma Z^T D[e]\} \quad (14)$$

文[23]给出了系统的稳定性证明. 文[24]专门讨论了故障的可检测性条件, 并给出了检测时间的上界. 特别的, 故障可检测的一个充分条件<sup>[24]</sup>是:  $\exists i$  使得在一定时间内始终满足  $|f_i(x, u)| > 2\bar{\eta}_i$ , 其直观意义是故障必须超过建模不确定的影响才能被检测到, 这是由于建模不确定项和故障项在状态方程中均是以加性扰动形式表示, 在结构上没有区别. 同文[22], 文[25]也给出了对如上全状态可测非线性系统的故障分离算法.

注意到, 与之前的自适应观测器不同的是, 该方法中, 其建模不确定项被描述为范数有界的加性扰动形式, 而其核心在于利用在线估计器对故障函数进行估计, 估计结果可以进一步用于故障分离和辨识, 甚至可以用于容错控制<sup>[20]</sup>. 其问题在于: 没有在理论上证明故障估计准确性, 虽然仿真结果中估计效果不错.

## 4 其它方法(Other methods)

### 4.1 减弱扰动影响的方法

鲁棒故障诊断最重要的工作就是消除或者减弱建模不确定的影响. 未知输入观测器是通过结构化信息对未知扰动精确解耦, 而另一个办法是尽量减小未知扰动对系统的影响. 文[26]针对一类建模不确定仿射非线性系统设计了二阶滑模观测器, 并且通过自适应学习得到了故障的估计值. 文[27]将迭

代学习观测器引入到非线性系统的鲁棒故障诊断中, 文[28]针对一类非线性系统设计了一种高增益非线性观测器, 使未知扰动对其影响尽量减弱, 并研究了其在故障检测中的应用可能. 然而以上方法都没有考虑在减弱未知扰动影响的同时, 故障的可检测性是否受到影响.

### 4.2 系统分解方法

文[29, 30]的基本思路是: 满足一定条件的非线性系统可以通过状态变换化为两个子系统, 其中一个不受故障影响, 对此可以设计出稳定的观测器进行状态估计; 而另一个子系统受故障影响, 且其状态可以由输出表达, 即全状态可测. 基于以上分解即得到所有的状态估计, 由此可得到故障估计值的表达式, 并在理论上给出阈值: 当故障估计值超过阈值的时候即认为故障发生. 文[29]研究了一类具有建模不确定性的双线性系统的故障诊断, 并采用自适应观测器得到第一个子系统的准确状态估计. 文[30]类似地研究了仿射非线性系统的鲁棒故障诊断, 并采用滑模观测器对第一个子系统进行状态估计. 此类方法的一大缺陷是只能针对执行器和部件故障, 不能解决传感器故障问题.

### 4.3 非线性等价空间/方程方法

等价空间方法是线性系统故障诊断的一种经典方法, 但是由于其残差的构造方式完全基于线性系统描述, 因此很难推广到非线性系统. 文[31, 32]分别将经典的等价空间方法推广到了双线性系统和类似(6)式描述的非线性系统的鲁棒故障诊断, 这是由于这两类系统与线性系统具有很大的相似性. 文[33]又将等价空间的方法推广到了多项式非线性系统.

文[34]应用等价原理, 提出非线性等价方程的概念. 其系统描述为非线性自回归滑动平均(NARMAX)模型, 其思路是通过前向方程得到输出的估计值, 与实际输出比较进行传感器故障检测; 而对原系统方程变换可得到后向方程(即通过输出计算输入的NARMAX模型)对输入进行估计, 通过与实际输入比较进行执行器故障检测. 当有扰动存在时, 假设对第  $i$  个传感器进行故障检测, 利用除去第  $i$  个传感器的输出量构造关于扰动的后向方程对扰动进行估计, 再将扰动估计值带入前向方程得到第  $i$  个传感器的鲁棒估计, 进而对第  $i$  个传感器进行故障检测. 但是如上方法缺乏有效的理论证明, 满足的条件以及设计算法.

## 5 应用领域(Applications)

由于非线性系统的鲁棒故障诊断方法大多还处于理论和仿真研究阶段, 相对不太成熟, 因此其实际应用还相对较少. 表 1 列出了一些应用实例, 但大多都还处于实验阶段.

表 1 非线性鲁棒故障诊断的应用实例

Tab. 1 Applications of robust fault diagnosis on nonlinear systems

应用实例	采用方法
水轮机实验装置	双线性未知输入观测器方法 <sup>[11]</sup>
	多项式未知输入观测器方法 <sup>[16]</sup>
三容水箱	非线性未知输入观测器方法 <sup>[35]</sup>
温室	非线性未知输入观测器方法 <sup>[39]</sup>
工业高温燃气炉	双线性未知输入观测器方法 <sup>[37]</sup>
内燃机	非线性等价方程方法 <sup>[34]</sup>

## 6 结束语(Conclusions)

非线性系统的鲁棒故障诊断无论在理论研究, 还是实际应用中都有重大的意义. 其难点之一在于如何处理建模不确定的影响, 以达到鲁棒性的要求. 未知输入观测器方法的核心思想在于对建模不确定/未知扰动解耦, 其关键在于未知扰动是结构化的, 典型情况就是状态方程中引入加性扰动  $Ed$ . 其中能否成功设计未知输入观测器的一个重要条件是: 扰动分布矩阵  $E$  满足如下条件<sup>[4, 9]</sup>:

$$\text{rank}(CE) = \text{rank}(E) \quad (15)$$

所有的未知输入观测器类方法都有类似的条件, 其本质是未知扰动的维数不大于输出的维数, 才能设计出对未知扰动完全解耦的观测器. 如何确定结构化信息  $E$  是未知输入观测器类方法应用的重要研究课题之一<sup>[4]</sup>.

由上可以看到, 实现鲁棒故障诊断的一个关键在于信息量, 例如输出维数、结构化信息等, 信息量越大, 其设计自由度也越大, 也就越容易实现鲁棒性的要求. 然而, 在信息量不足的情况下对扰动精确解耦很难实现, 而且扰动分布矩阵  $E$  本身也很难精确确定. 对此设计原则应该修改为最优解耦, 即: 对故障尽量敏感而对未知扰动尽量鲁棒, 有如下两式<sup>[1]</sup>:

$$\min J = \left\| \frac{\partial r}{\partial d} \right\| / \left\| \frac{\partial r}{\partial f} \right\| \quad (16)$$

$$\text{或 } \min J = \left\| \frac{\partial r}{\partial d} \right\|, \text{ 约束条件为 } \left\| \frac{\partial r}{\partial f} \right\| > \alpha \quad (17)$$

其中  $r$  指的是故障诊断的残差,  $d$  表示建模不确定性或者未知扰动,  $f$  表示故障信号. 针对线性系统的频域、等价空间等最优设计方法参见文<sup>[3, 4]</sup>. 文<sup>[38]</sup>对于双线性系统设计了基于线性时不变观测器的故障检测滤波器, 其设计指标即是最优解耦, 并且给出了残差评价函数和阈值选取方法.

而基于在线估计器的方法关于建模不确定性没有任何结构信息, 只有扰动范数有界的信息, 且建模不确定和故障均以加性扰动的形式体现在状态和测量方程中, 因此具有不可避免的缺陷: 只有当故障幅值超过未知扰动的影响时, 故障才可被检测到, 即对微小故障不敏感.

另一难点在于非线性系统缺乏统一有效的数学描述, 因此上述方法都只能处理一类非线性系统, 特别是在观测器的设计上, 没有象线性系统 Luenberg 观测器那样的统一方法. 因此, 如何设计非线性观测器也是非线性系统鲁棒故障诊断的一个核心问题.

故障诊断领域的一个重要课题是各种矛盾的处理, 最常见的即漏报率和误报率的矛盾. 在非线性系统鲁棒故障诊断里也有相应的问题, 例如鲁棒性与灵敏性, 鲁棒性与可分离性. 鲁棒性与灵敏性的矛盾可以归结到如上提到的最优解耦, 其关键在于保证鲁棒性的同时不能削弱对故障的灵敏性, 例如 4.1 节所述方法就没有深入讨论该问题. 其中, 一个重要问题是对微小故障、缓变故障的诊断. 突变故障的影响通常明显大于建模不确定性的影响, 容易诊断; 但微小故障则很容易被建模不确定性所湮没. 而鲁棒性与可分离性的矛盾本质也在于信息量, 相比于故障检测, 故障分离需要更多的信息和设计自由度.

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Frank P M, Ding S X, K9 pper Seliger B. Current developments in the theory of FDI [A]. 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS' 2000) [C]. Budapest, Hungary: 2000. 16~ 27.
- [2] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, et al. A review of process fault detection and diagnosis Part I: quantitative model based methods [J]. Computer & Chemical Engineering, 2003, 27(3): 293 ~ 311.
- [3] Frank P M, Ding X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer based fault detection systems [J]. Journal of Process Control, 1997, 7(6): 403~ 424.
- [4] Chen J, Patton R J. Robust Model based Fault Diagnosis for Dynamic Systems [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 2000.
- [5] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

- [6] Frank P M. On line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: a survey [J]. *International Journal of Systems Science*, 1994, 25(12): 2129~ 2154.
- [7] Garcia E A, Frank P M. Deterministic nonlinear observer based approaches to fault diagnosis: a survey [J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(5): 663~ 670.
- [8] Watanabe K, Himmelblau D M. Instrument fault detection in systems with uncertainties [J]. *International Journal of Systems Science*, 1982, 13(2): 137~ 158.
- [9] Chen J, Patton R J, Zhang H Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters [J]. *International Journal of Control*, 1996, 63(1): 85~ 105.
- [10] Watanabe K, Himmelblau D M. Incipient fault diagnosis of nonlinear processes with multiple causes of faults [J]. *Chemical Engineering Science*, 1984, 39(3): 491~ 508.
- [11] Yu D L, Shields D N. A bilinear fault detection observer [J]. *Automatica*, 1996, 32(11): 1597~ 1602.
- [12] Yu D L, Shields D N. A bilinear fault detection filter [J]. *International Journal of Control*, 1997, 68(3): 417~ 430.
- [13] Kinnaert M. Robust fault detection based on observers for bilinear systems [J]. *Automatica*, 1999, 35(11): 1829~ 1842.
- [14] Kinnaert M, El Bahir L. Innovation generation for bilinear systems with unknown inputs [A]. Nijmeijer H, Fossen T I. *New Directions in Nonlinear Observer Design, Lecture Notes in Control and Information Science 244* [C]. London: 1999.445~ 465.
- [15] Zasadzinski M, Magarotto E, Rafaralahy H, *et al.* Residual generator design for singular bilinear systems subjected to unmeasurable disturbances: an LMI approach [J]. *Automatica*, 2003, 39(4): 703~ 713.
- [16] Shields D N, Daley S. A quantitative fault detection method for a class of nonlinear systems [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 1998, 20(3): 125~ 133.
- [17] Shields D N, Du S. Fault detection observers for continuous nonlinear polynomial systems of general degree [J]. *International Journal of Control*, 2003, 76(5): 437~ 452.
- [18] Wuenneberg J. Observer based fault detection in dynamic systems [D]. Duisburg, Germany: University of Duisburg, 1990.
- [19] Seliger R, Frank P M. Fault diagnosis by disturbance decoupled nonlinear observers [A]. *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control* [C]. Brighton, England 1991. 2248~ 2253.
- [20] Vemuri A T, Polycarpou M M. Robust nonlinear fault diagnosis in input output systems [J]. *International Journal of Control*, 1997, 68(2): 343~ 360.
- [21] Trunov A B, Polycarpou M M. Automated fault diagnosis in nonlinear multivariable systems using a learning methodology [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2000, 11(1): 91~ 101.
- [22] Zhang X D, Polycarpou M M, Parisini T. Robust fault isolation for a class of nonlinear input output systems [J]. *International Journal of Control*, 2001, 74(13): 1295~ 1310.
- [23] Demetriou M A, Polycarpou M M. Incipient fault diagnosis of dynamical systems using online approximators [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(11): 1612~ 1617.
- [24] Polycarpou M M, Trunov A B. Learning approach to nonlinear fault diagnosis: detectability analysis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(4): 806~ 812.
- [25] Zhang X D, Polycarpou M M, Parisini T. A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(4): 576~ 592.
- [26] Chen W, Saif M. Robust fault detection and isolation in constrained nonlinear systems via a second order sliding mode observer [A]. *Preprints of IFAC 15th Triennial World Congress* [C]. Barcelona, Spain: 2002. 1498~ 1500.
- [27] Chen W, Saif M. An iterative learning observer based approach to fault detection and accommodation in nonlinear system [A]. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control* [C]. Orlando, Florida, USA: 2001. 4469~ 4474.
- [28] Besancon G. High gain observation with disturbance attenuation and application to robust fault detection [J]. *Automatica*, 2003, 39(6): 1095~ 1102.
- [29] Jiang B, Wang J L. Actuator fault diagnosis for a class of bilinear systems with uncertainty [J]. *Journal of Franklin Institute*, 2002, 339(3): 361~ 374.
- [30] Jiang B, Cocquemot V, Christophe C. Fault diagnosis using sliding mode observer for nonlinear systems [A]. *Preprints of IFAC 15th Triennial World Congress* [C]. Barcelona, Spain: 2002. 674~ 679.
- [31] Yu D L, Shields D N. Extension of the parity space method to fault diagnosis of bilinear systems [J]. *International Journal of Systems Science*, 2001, 32(8): 953~ 962.
- [32] Getler J, Staroswiecki M. Structured fault diagnosis in mildly nonlinear systems: parity space and input output formulations [A]. *Preprints of IFAC 16th Triennial World Congress* [C]. Washington, USA: 2003. 439~ 444.
- [33] Staroswiecki M, Comtet-Varga G. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems [J]. *Automatica*, 2001, 37(5): 687~ 699.
- [34] Krishnaswami V, Luh G C, Rizzoni G. Fault detection in IC engines using nonlinear parity equations [A]. *Proceedings of the 1994 American Control Conference* [C]. Baltimore, Maryland: 1994. 2001~ 2005.
- [35] Zolghadri A, Henry D, Morsion M. Design of nonlinear observers for fault diagnosis: a case study [J]. *Control Engineering Practice*, 1996, 4(11): 1535~ 1544.

- [29] 王红卫. 建模与仿真 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [30] Hudka M, *et al.* Introduction to system biology workbench [EB/OL]. <http://www.sbwr.sbm1.org/>.
- [31] Tamita M, *et al.* E Cell: software environment for whole cell simulation [J]. *Bioinformatics*, 1999, 15(1): 72~ 84.

## 作者简介

彭司华(1962-), 博士研究生. 研究领域为模式识别, 计算智能, 系统生物学等.

周洪亮(1971-), 博士. 研究领域为软测量, 过程控制, 计算智能等.

彭小宁(1967-), 博士. 研究领域为分子生物学, 分子遗传学, 肿瘤学等.

(上接第 456 页)

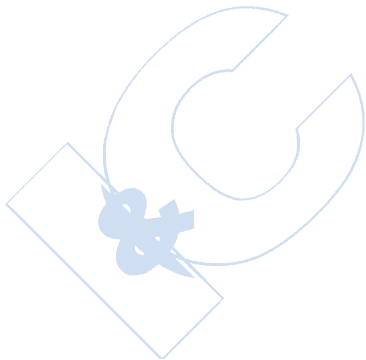
- [36] Linker R, Cutman P O, Seginer I. Observer-based robust failure detection and isolation in greenhouses [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(5): 519~ 531.
- [37] Yu D L. Diagnosing simulated faults for an industrial furnace based on bilinear model [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8(3): 435~ 432.
- [38] Zhong M Y, Ding S X, Jia L, *et al.* An optimization approach to fault detection for bilinear systems [A]. 5th IFAC Symposium on

Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Process (SAFEPROCESS 2003) [C]. Washington, USA: 2003. 669~ 674.

## 作者简介

李令莱(1979-), 男, 博士研究生. 研究领域为非线性系统的鲁棒故障诊断.

周东华(1963-), 男, 博士. 研究领域为动态系统的故障诊断与容错控制.



信息与控制  
Information and Control