

153-158

# 动态系统的故障诊断方法\*

张 萍 王桂增 周东华 TP271  
(清华大学自动化系·北京, 100084)

**摘要:** 评述了动态系统故障诊断方法的发展状况, 将各种故障诊断方法分为三大类分别进行了重点介绍, 最后指出了这一领域中有待进一步研究的若干问题和发展趋势。

**关键词:** 故障检测; 故障诊断; 解析模型; 鲁棒性; 定性模型

**文献标识码:** A

动态系统 信号处理

## Fault Diagnosis Methods for Dynamic Systems

ZHANG Ping, WANG Guizeng and ZHOU Donghua

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084, P. R. China)

**Abstract:** This paper reviews the state-of-the-art of fault detection and diagnosis in dynamic systems. First, the available fault diagnosis methods are classified into three categories. Then the most important methods and new ideas in each category are outlined. Finally, further problems to be studied in this field and the development trends are pointed out.

**Key words:** fault detection; fault diagnosis; analytical model; robustness; qualitative model

### 1 引言(Introduction)

设备和系统的故障不仅会影响系统的安全运行, 甚至会造成人身伤亡和对环境的污染。随着控制系统的日益复杂化, 加之对环境保护的日益重视, 人们对于设备的安全性、可靠性和有效性的要求也越来越高, 因而故障诊断技术愈来愈受到人们的重视, 已成为国际自控界的热点研究方向之一<sup>[1]</sup>。我国对故障诊断技术十分重视, 高等学校和科研机构从 80 年代初期就开始了这方面的研究, 并取得了可喜的成果。方崇智、蒋慰孙、张洪钺和张育林等知名学者均长期从事这方面的研究并取得了许多成果<sup>[2-4, 14]</sup>。

故障可以理解为至少一个系统的重要变量或特性偏离了正常范围<sup>[5]</sup>。广义地讲, 故障可以理解为系统的任何异常现象, 使系统表现出所不期望的特性<sup>[6, 7]</sup>。根据故障发生的部位, 可以把动态系统的故障分为元部件故障、传感器故障和执行器故障。根据故障的时间特性, 可以把故障分为突变故障和缓变故障。根据故障发生的形式, 可以把故障分为加性故障和乘性故障。故障诊断技术包含了故障检测、故障分离、故障辨识等内容, 故障检测就是判断系统中是否发生了故障以及检测出故障发生的时刻, 故障分离就是在检测出故障后确定故障的类型和位置, 故障辨识就是在分离出故障后确定故障的大小和时变特性, 评价一个故障诊断系统的性能指标主要有: 故障检测的及时性; 早期故障检测的灵敏度; 故障的误报率和漏报率; 故障定位和故障评价的准确性; 故障检测和诊断系统的鲁棒性。

现有的故障诊断方法主要可以分为基于解析模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法<sup>[8]</sup>。下面分类加以介绍。

### 2 基于信号处理的方法 (Methods based on signal processing)

基于信号处理的方法通常利用信号模型, 如相关函数、频谱、自回归滑动平均等, 直接分析可测信号, 提取诸如方差、幅值、频率等特征值, 从而检测故障的发生。近年来出现了一些新的基于信号处理的故障诊断方法。

#### 2.1 利用 Kullback 信息准则检测故障 (Fault detection using Kullback information criterion)

Kullback 信息准则 (KDI) 能够度量系统的变化, 在不存在未建模动态特性时, 将 KDI 和阈值比较, 可以有效的检测故障。但是如果存在未建模动态特性, KDI 波动很大, 阈值检验的方法将不再适用。文[9]提出一种利用 Kullback 信息准则检测具有未建模动态特性的动态系统故障的方法。首先基于 Goodwin 随机嵌入方法把未建模动态特性当作软界估计, 利用遗传算法和梯度方法辨识系统参数和软界, 在 KDI 中引入一个新指标评价未建模动态特性, 设计合适的决策方案, 实现鲁棒故障检测。由于未建模动态特性的软界不能在线辨识, 此方法尚不能在线实现。

#### 2.2 基于自适应滑动窗格形滤波器的故障检测方法 (Fault detection based on lattice filter with adaptive sliding window)

其基本思想是取一个滑动窗内的系统输入和输出数据,

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (69874023), 863 计划和国家教育部基金 (863-511-945-004) 资助项目。  
收稿日期: 1999-01-25; 收修改稿日期: 1999-10-06。

利用自适应格形滤波器生成残差序列<sup>[10-12]</sup>。当系统处于正常状态时,残差序列将是零均值固定方差的高斯过程。如果系统发生了故障,则由故障引起的过渡过程将导致残差序列的均值或方差变化,构造合适的检验统计量,对残差序列进行假设检验,可以在线检测出系统的故障。此方法适用于突变及缓变故障的检测,且不需要系统的准确数学模型和先验知识。

**2.3 基于信号模态估计的故障诊断方法(Method of fault diagnosis based on estimation of signal mode)**

其基本思想是直接根据系统物理参数的变化诊断故障<sup>[13]</sup>。首先根据系统的闭环特征方程找到对应每一个物理参数变化的根轨迹集合,再取任何一个闭环信号,利用最小二乘算法估计被诊断系统的模态参数,采用模式识别技术,如多原型最小距离分类法,将估计模态与某一个物理参数对应的根轨迹集合匹配起来,从而分离出故障。同时根轨迹在复平面上的位置与物理参数的实际值有关,故从根轨迹上还可以估计出系统物理参数的变化量。该方法的不足之处在于计算量比较大。

**2.4 基于小波变换的故障诊断方法(Method of fault diagnosis based on wavelet transform)**

小波变换是80年代后期发展起来的应用数学分支,最初由法国学者 Daubechies 和 Malleat 引入信号处理领域,它具有许多优良的特性。文[15~16]给出了三种基于小波变换的故障诊断方法:利用观测信号的奇异性进行故障诊断,利用观测信号频率结构的变化进行故障诊断,利用脉冲响应函数的小波变换进行故障诊断。基于小波变换的故障诊断方法无

需对象的数学模型,且对于输入信号的要求较低,计算量不大,可以进行在线实时故障检测,灵敏度高,克服噪声能力强,是一种很有前途的故障诊断方法。

**3 基于解析模型的方法 (Analytical model based methods)**

基于解析模型的方法又可以分为状态估计方法、等价空间方法和参数估计方法,这三种方法虽然是独立发展起来的,但它们彼此之间并不是孤立的,而是存在一定的关系,文[17]证明了等价空间方法与观测器方法在结构上是等价的,文[18]讨论了参数估计方法和观测器方法之间的关系,指出参数估计方法得到的残差包含在观测器方法得到的残差中,两种方法本质上是互补的。文[19]指出了等价空间方法和参数估计方法之间的关系。

**3.1 状态估计方法(Method based on state estimation)**

状态估计方法一直是研究的热点<sup>[14,20-22]</sup>,其基本思想是利用系统的定量模型和测量信号重建某一可测变量,将估计值与测量值之差作为残差,以检测和分离系统故障。在能够获得系统的精确数学模型的情况下,状态估计方法是最直接有效的方法。然而在实际中,这一条件往往很难满足,所以目前对于状态估计方法的研究主要集中在提高检测系统对于建模误差、扰动、噪声等未知输入的鲁棒性及系统对于早期故障的灵敏度。通常说来,这两个指标是互相矛盾的,只能在二者之间根据具体的设计要求进行折衷。表1列出了近年来出现的一些新的基于状态估计的故障诊断方法。

表1 基于状态估计的故障诊断方法

Table 1 Fault diagnosis based on state estimation

方法	特点	文献
连续有限记忆观测器方法	采用连续有限记忆观测器,具有无振荡和有限记忆的特点;可以实现对未知输入的解耦,可以把等价空间方法扩展到连续域。	[23]
自适应观测器方法	用一个检测观测器检测故障的发生,利用自适应观测器诊断故障;鲁棒性强,且可以给出突变常增益故障或缓变故障的估计值。	[24,25]
基于多目标优化的观测器方法	将鲁棒性和灵敏度的要求表示为多个性能指标的最小化问题;不需要关于扰动分布矩阵的先验知识,在存在建模不确定性和扰动时能够有效地检测早期故障。	[26]
矩阵束方法	对可观子系统设计全阶观测器;数值可靠,易于计算机实现,未考虑鲁棒性问题。	[27]
故障分离滤波器方法	从对偶的角度出发,利用有关静态状态反馈解耦的结论,用一个全阶观测器检测和分离多个故障;可同时对分离的故障个数等于系统输出测量量的个数。	[28]
鲁棒故障检测滤波器方法	结合了未知输入观测器和 Beard 故障检测滤波器的优点;解决了 Beard 故障检测滤波器不具备鲁棒性的问题。	[29]
一类线性时变系统的检测滤波器方法	构造与原系统有相同可控子空间的线性时不变系统,对此线性时不变系统设计故障检测滤波器;适用于系统矩阵存在线性时变参数扰动的一类线性时变系统。	[30]
对策论故障检测滤波器方法	把故障检测过程看作扰动衰减问题,设计目标是使除故障之外的所有外部信号的传输都是有界的;可以很好地应用于线性时变系统。	[31]
集成设计方法	将残差产生器与残差评价及阈值选取结合在一起集成设计;可以有效提高系统的灵敏度,同时降低误报率。	[32,33]

以上方法都是针对线性系统的,目前故障诊断研究主要集中在线性系统,对于非线性系统的研究成果还比较少,然而实际系统绝大多数都是非线性系统,目前处理非线性系统故障诊断的方法主要可以分为两类,一类方法是将非线性系统在一个或几个工作点附近线性化,用一个线性模型集表示系统,建模误差当作未知输入,应用未知输入解耦方法设计残差,使之不受建模误差的影响。另一类方法是基于非线性模型的方法,如基于非线性观测器的方法和基于非线性参数估计的方法,这些方法往往都是针对某种特定的非线性系统。

文[34]给出了一类存在建模不确定性的非线性动态系统的突变故障的诊断方法,通过局部微分同胚映射把系统变换为自适应控制和观测器中广泛使用的规范型,再应用自适应观测器设计技术,在线估计故障函数。文[35,36]讨论了对双线性系统设计故障检测观测器和故障检测滤波器的方法,文[37]提出了另一种未知输入双线性观测器的设计方法,首先构造一个状态变换,对变换后的系统设计降阶观测器,再利用状态估计值和变换后的系统方程及输出方程设计合适的诊断策略。文[38]讨论了一类具有全局 Lipschitz 非线性的描述系统,首先把原系统变换成特殊的奇异值分解形式,然后基于连续的代数 Riccati 方程设计非线性观测器,对输出估计误差滤波,得到残差,最小化从扰动到残差的传递函数的范数,使残差对扰动具有鲁棒性。

### 3.2 等价空间方法(Method based on parity space)

等价空间方法的基本思想就是利用系统的输入输出的实际测量值检验系统数学模型的等价性(即一致性)以检测和分离故障。

#### 1) 基于约束优化的等价方程方法

基本思想是用有限多个模型描述系统,表示模型参数的不确定性,用滑动平均等价方程产生残差,将残差的鲁棒性和灵敏度以及故障分离的要求转化为在满足非凸平方不等式约束集的前提下最小化平方代价函数<sup>[39]</sup>,此优化问题利用现有的优化软件很容易求得数值解,最后基于累积和检验构造决策逻辑,检测并分离故障。

#### 2) 广义残差产生器方案<sup>[40]</sup>

满足一定条件时,可以通过一些变换从原系统中消去未知输入项,利用新的等价系统的输入输出描述构造等价方程,产生基本残差,显然该基本残差与未知输入解耦,用动态加权阵变换基本残差,增加设计的自由度,满足故障检测和分离的要求,选取适当的动态加权阵使得从故障到残差的传递函数为对角阵,则残差为固定方向的残差,可以同时分离多个故障,类似于广义观测器方案的基本思想,构造一组广义残差产生器,产生结构化的残差,实现故障分离。

#### 3) 具有方向性的残差序列

文[41]提出了基于系统的动态输入输出模型,用动态等价方程产生具有方向性残差的方法,在指定的故障响应中包含故障系统的不变零多项式,可以得到多项式形式的残差产生器,此方法设计方向性残差比故障检测滤波器更直观简

单,适用于更多的情况,输出传感器故障也可以仅限于某个方向而不是一个平面,且不存在非最小相位零点问题。

#### 4) 基于近似扰动解耦的等价空间方法

文[42]着重处理了乘性扰动和故障时的鲁棒故障诊断,首先用等价方程方法构造基本残差,再对基本残差做线性变换,使得最后得到的残差和扰动解耦,并且关于故障是结构化的或是有方向性的,便于故障分离,变换后得到的残差能够完全解耦的扰动和故障的总数是有限的,然而在实际中扰动的个数可能很多,以至无法实现完全解耦,文中提出两种近似解耦的方法:一种是利用奇异值分解技术得到扰动输入矩阵在最小二乘意义下的最优降阶近似;另一种方法是最小化一个关于扰动的残差的平方性能指标,故障响应用等式约束表示,采用近似解耦方法,扰动的个数不受限制,但是随扰动个数的增加,解耦的质量会下降,由于乘性扰动是建模误差的最自然的表现形式,这两种近似解耦方法可以很好地解决关于建模误差的鲁棒性问题。

### 3.3 参数估计方法(Method based on parameter estimation)

参数估计方法根据模型参数及相应的物理参数的变化来检测和分离故障<sup>[43]</sup>,与状态估计的方法相比,参数估计法更利于故障的分离,参数估计方法要求找出模型参数和物理参数之间的一一对应关系,且被控过程需充分激励,因此将参数估计方法和其它基于解析模型的方法结合起来使用,可以获得更好的故障检测和分离性能。

#### 1) 强跟踪滤波器方法

强跟踪滤波器的实质是指对于模型不确定性具有鲁棒性,对于突变状态和缓变状态始终具有很强的跟踪能力的滤波器<sup>[44]</sup>,文[45]给出了一种非线性系统参数偏差型故障的检测与诊断算法,其基本思想是由扩展卡尔曼滤波器得到残差序列,用残差加权平方和算法快速检测故障,再采用强跟踪滤波器,得到系统状态和非线性时变参数的联合估计,基于修正的贝叶斯分类算法检验各参数估计值,诊断故障并估计故障幅值,此方法对于传感器故障、执行器故障和元部件故障都适用,文[46]进一步给出了一种特定的非线性时变随机系统传感器故障的检测和诊断方法。

#### 2) 参数估计和观测器方法的结合

首先构造故障检测观测器,快速检测故障并进行故障预分离,再基于包含可能故障的简化模型作参数估计,进一步分离故障<sup>[47,48]</sup>,此方法减少了待估参数的个数从而降低参数估计方法对输入激励的要求,并且可以分离在系统状态空间中有相同方向的故障。

#### 3) 参数估计和等价空间方法的结合

首先利用连续时间的等价空间方法快速检测故障,再根据等价残差估计某个线性参数的变化,从而回避参数估计算法对持续激励的要求<sup>[49]</sup>,对于存在慢时变参数的系统,使等价方程的系数对估计出的参数变化值具有自适应能力,可以提高故障检测的性能。

## 4 基于知识的方法(Knowledge based method)

在实际情况下,我们常常无法获得对象的精确数学模

型,这就大大限制了定量方法的使用范围.基于知识的方法不需要对象的精确数学模型,因此是很有生命力的方法.基于知识的方法主要可以分为基于症状的方法和基于定性模型的方法.基于症状的方法有神经网络方法、专家系统方法、模糊推理方法和模式识别方法等.基于定性模型的方法有知识观测器方法等<sup>[50]</sup>.

#### 4.1 神经网络方法(Method based on neural networks)

人工神经网络由于具有模拟任何连续非线性函数的能力和从样本学习的能力,因而在故障诊断中得到了广泛的重视.人工神经网络用于故障诊断主要有四种方式<sup>[51,52]</sup>: 1) 用神经网络产生残差; 2) 用神经网络评价残差; 3) 用神经网络做一步诊断; 4) 用神经网络作自适应误差补偿.

定性知识具有表达不确定、不准确知识的能力,所以近年来人们在应用神经网络解决故障诊断问题时,有一个明显的趋势就是希望能够在神经网络的框架下集成定性知识.为此,模糊神经网络成为研究的一个热点<sup>[53-55]</sup>.此外在B-样条网络中也可以包括符号知识<sup>[56]</sup>.

#### 4.2 模糊方法(Fuzzy based method)

模糊推理符合人类的自然思维过程,便于处理定性知识,成为故障诊断方法研究的一个热点<sup>[50,57-60]</sup>.基于模糊推

理的故障诊断方法主要有: 1) 基于模糊模型的故障诊断方法; 2) 基于自适应模糊阈值的残差评价方法; 3) 基于模糊聚类的残差评价方法; 4) 基于模糊逻辑的残差评价方法; 5) 基于模糊模式识别的故障诊断方法.模糊方法适用于测量值较少且无法获得精确模型的系统.

#### 4.3 基于定性模型的方法(Methods based on quantity model)

基于定性模型的故障诊断方法近年来在欧洲受到了高度重视,得到了迅猛发展.定性仿真真是基于定性模型的故障诊断方法的重要部分,它用表示系统物理参数的定性变量和表示各参数间相互关系的定性微分方程构成约束模型,描述并模仿系统的结构,以确定从给定的初始状态出发得到的系统状态.文<sup>[50]</sup>提出了一种新颖的知识观测器的概念,类似于基于解析模型的方法中的状态观测器和Kalman滤波器.知识观测器由四个部分组成:定性模型、差异检测器、候选人发生器(candidate generator)和诊断策略,其中定性模型是知识观测器的核心.这种基于定性模型的故障诊断方法比起基于专家系统的方法,大大简化了知识获取的过程.

#### 5 故障诊断方法的典型应用(Typical applications of fault diagnosis)

虽然现有的故障诊断方法很多,但它的实际应用还比较少.表2列出了一些较为典型的应用例子.

表2 故障诊断方法应用实例

Table 2 Applications of fault diagnosis

序号	应用对象	采用方法	文献
1	导弹运输车、长输管道	基于小波变换的故障诊断方法	[15,16]
2	机器人	观测器方法	[21]
3	三容水箱	观测器方法	[22]
4	水力实验装置	双线性故障检测观测器,参数估计方法	[35,47]
5	汽车发动机	等价空间方法	[61]
6	机床	参数估计	[43]
7	液压系统	基于模糊神经网络的故障诊断方法	[53]
8	空调实验装置的冷却线圈	基于模糊模型的故障诊断方法	[57]

#### 6 结束语(Conclusion)

近年来,控制理论、信号处理、人工智能、模式识别等学科的发展,促进了故障诊断技术的不断发展.基于解析模型的故障诊断方法研究得最为系统,建模误差、扰动及噪声的存在,使得鲁棒性问题的重要性日益凸显.围绕着如何消除这些未知输入因素的影响,尤其是建模误差的影响,减少误报率,提高正确检测率,人们提出了各种各样的方法.

基于信号处理的故障诊断方法不需要数学模型,适用于一类被诊断对象.小波变换作为一项崭新的信号处理技术,拥有许多优良特性,它在故障诊断中的应用,尚有待进一步的研究.

文<sup>[32,33]</sup>提出了故障检测系统的集成设计方法,探讨了残差产生和残差评价之间的内在联系,开辟了一个新的思路.目前基于解析模型的故障诊断方法的研究成果主要集中在线性系统,非线性系统由于其复杂性,研究成果还比较少.

而实际的系统绝大部分都是非线性系统,因此深入研究非线性系统的通用故障诊断方法具有重要意义.基于知识的方法无需系统的定量数学模型,因此更适用于实际的工业装置.人工智能发展的同时,人们也越来越意识到操作人员的常识及人的自然智能的优越性,在故障诊断系统中适当考虑人的作用会降低误报率.

误报和漏报是任何故障诊断方法均存在的问题,故障的误报率和漏报率是评价故障诊断系统性能的重要指标,但是对于误报和漏报的深入系统的分析,目前尚未见到.

人们常将控制器的设计与故障诊断子系统的设计分开进行.实际上,设计合适的控制器,可以提高故障的可诊断性能.控制器与故障诊断子系统的集成设计,是又一个值得研究的理论课题.

虽然故障诊断在理论方面取得了许多突破和进展,但是它的实际应用还比较少,如何将故障诊断方法应用到实际中

去是一项应当引起充分注意的重要工作。

### 参考文献(References)

- [1] 周东华,王庆林. 基于模型的控制系统的故障诊断技术和最新进展[J]. 自动化学报, 1995, 21(2): 224 - 247
- [2] 叶银忠, 潘日芳, 蒋慰孙. 动态系统的故障检测与诊断方法[J]. 信息与控制, 1986, 15(6): 27 - 34
- [3] 张育林, 李东旭. 动态系统故障诊断理论与应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997
- [4] 闻新, 张洪钺, 周露. 控制系统的故障诊断和容错控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [5] Isermann R and Baile P. Trends in the application of model based fault detection and diagnosis of technical processes [C]. Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 1 - 12
- [6] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 故障检测与诊断技术[J]. 控制理论与应用, 1991, 8(1): 1 - 9
- [7] Frank P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy — a survey and some new results [J]. Automatica, 1990, 26(3): 459 - 474
- [8] 周东华, 王桂增. 故障诊断技术综述[J]. 化工自动化及仪表, 1998, 25(1): 58 - 62
- [9] Kumamaru K, Hu J, Inoue K and Soderstrom T. Robust fault detection using index of Kullback discrimination information [C]. Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 205 - 210
- [10] 萧德云, 李渭华, 方崇智. 一种适用于故障检测的归一化滑动窗协方差格形滤波器[J]. 控制理论与应用, 1995, 12(2): 230 - 235
- [11] 李渭华, 萧德云, 方崇智. 一种基于自适应滑动窗格形滤波算法的故障检测器[J]. 自动化学报, 1996, 22(2): 251 - 253
- [12] 萧德云, 李渭华. 双通道自适应 Lattice 滤波器及其在故障检测中的应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(3): 277 - 280
- [13] Jiang J and Jia F. A robust fault diagnosis scheme based on signal modal estimation [J]. Int. J. Control, 1995, 62(2): 461 - 475
- [14] Ge W and Fang C Z. Detection of faulty components via robust observation [J]. Int. J. Control, 1988, 47(2): 581 - 599
- [15] 叶昊, 王桂增, 方崇智. 小波变换在故障检测中的应用[J]. 自动化学报, 1997, 23(6): 736 - 741
- [16] 叶昊, 王桂增, 方崇智, 张永光, 刘志军. 一种基于小波变换的导弹运输车辆故障诊断方法[J]. 自动化学报, 1998, 24(3): 301 - 306
- [17] Magni J F and Mouyon P. On residual generation by observer and parity space approaches [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(2): 441 - 447
- [18] Garcia E A and Frank P M. On the relationship between observer and parameter identification based approaches to fault detection [C]. Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 25 - 29
- [19] Gertler J. Diagnosing parametric faults: from parameter estimation to parity relations [C]. American Control Conference, Seattle, USA, 1995, 1615 - 1620
- [20] Frank P M and Ding X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems [J]. J. Process Control, 1997, 7(6): 403 - 424
- [21] Schneider H and Frank P M. Observer-based supervision and fault detection for robots [C]. International Conference on Fault Diagnosis Toulouse, 1993, 773 - 779
- [22] Ding S X and Jeansch T. Application of observer based FDI schemes to the three tank system [C]. Proc. of European Control Conference, Karlsruhe, Germany, 1999
- [23] Medvedev A. State estimation and fault detection by a bank of continuous finite-memory filters [J]. Int. J. Control, 1998, 69(4): 499 - 517
- [24] Wang H and Daley S. Actuator fault diagnosis: an adaptive observer-based technique [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(7): 1073 - 1078
- [25] Wang H, Huang Z J and Daley S. On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis [J]. Automatica, 1997, 33(2): 217 - 225
- [26] Chen J, Patton R J and Liu G P. Optimal residual design for fault diagnosis using multi-objective optimization and genetic algorithms [J]. International Journal of System Science, 1996, 27(6): 567 - 576
- [27] Patton R J and Hou M. Design of fault detection and isolation observers: a matrix pencil approach [J]. Automatica, 1998, 34(9): 1135 - 1140
- [28] Liu B and Si J. Fault isolation filter design for linear time-invariant systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(5): 704 - 707
- [29] Chen J, Patton R J and Zhang H Y. Design of unknown input observers and robust fault detection filters [J]. Int. J. Control, 1996, 63(1): 85 - 105
- [30] Edelmayer A, Bokor J, Sziget F and Keviczky L. Robust detection filter design in the presence of time-varying system perturbations [J]. Automatica, 1997, 33(3): 471 - 475
- [31] Chung W H and Speyer J L. A game theoretic fault detection filter [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(2): 143 - 161
- [32] Ding X and Guo L. On observer-based fault detection [C]. Preprints of IFAC Sym. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, 1997, 112 - 120
- [33] Ding X and Guo L. An approach to time domain optimization of observer-based fault detection systems [J]. Int. J. Control, 1998, 69(3): 419 - 442
- [34] Vemuri A T and Polycarpou M M. Robust nonlinear fault diagnosis in input-output systems [J]. Int. J. Control, 1997, 68(2): 343 - 360
- [35] Yu D and Shields D N. A bilinear fault detection observer [J]. Automatica, 1996, 32(11): 1597 - 1602
- [36] Yu D and Shields D N. A bilinear fault detection filter [J]. Int. J. Control, 1997, 68(3): 417 - 430
- [37] Yang H and Saif M. State observation, failure detection and isolation (FDI) in bilinear systems [J]. Int. J. Control, 1997, 67(6): 901 - 920
- [38] Shields D N. Observer design and detection for nonlinear descriptor systems [J]. Int. J. Control, 1997, 67(2): 153 - 168
- [39] Kinnaert M. Design of redundancy relations for failure detection and

- isolation by constrained optimization [J]. *Int. J. Control*, 1996, 63(3): 609 - 622
- [40] Hwang D S, Chang S K and Hsu P L. A practical design for a robust fault detection and isolation system [J]. *International Journal of System Science*, 1997, 28(3): 265 - 275
- [41] Gertler J and Monajemy R. Generating directional residuals with dynamic parity relations [J]. *Automatica*, 1995, 31(4): 627 - 635
- [42] Gertler J and Kumwer M M. Optimal residual decoupling for robust fault diagnosis [J]. *Int. J. Control*, 1995, 61(2): 395 - 421
- [43] Isermann R. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing — tutorial paper [J]. *Automatica*, 1993, 29(4): 815 - 835
- [44] 周东华, 孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994
- [45] 周东华, 孙优贤, 席裕庚, 张钟俊. 一类非线性系统参数偏差型故障的实时检测与诊断[J]. *自动化学报*, 1993, 19(2): 184 - 189
- [46] 周东华. 一种非线性系统的传感器故障检测与诊断新方法[J]. *自动化学报*, 1995, 21(3): 362 - 365
- [47] Yu D. Fault diagnosis for a hydraulic drive system using a parameter-estimation method [J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(9): 1283 - 1291
- [48] Garcia E A, Han Z and Frank P M. FDI based on parameter and output estimation; an integrated approach [C]. *Submitted to European Control Conference, Karlsruhe, Germany, 1999*
- [49] Hofling T and Isermann R. Adaptive parity equations and advanced parameter estimation for fault detection and diagnosis [C]. *Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 55 - 60*
- [50] Frank P M. New developments using AI in fault diagnosis [C]. *Proc. of the IFAC Workshop on Artificial Intelligence in Real-Time Control, Bled, Slovenia, 1995*
- [51] Koppen-Seliger B and Frank P M. Neural networks in model-based fault diagnosis [C]. *Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 67 - 72*
- [52] Zhou J and Bennett S. Adaptive error compensation for robust fault detection [J]. *International Journal of Systems Science*, 1998, 29(1): 57 - 64
- [53] 张建华, 王占林. 基于模糊神经网络的故障诊断方法的研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 1997, 23(4): 502 - 506
- [54] Zhang J, Morris A J and Martin E B. Robust process fault detection and diagnosis using neuro-fuzzy networks [C]. *Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 169 - 174*
- [55] Gomm J B. On-line learning for fault classification using an adaptive neuro-fuzzy network [C]. *Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 175 - 180*
- [56] Benkhedda H and Patton R J. B-spline network integrated qualitative and quantitative fault detection [C]. *Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 163 - 168*
- [57] Maruyama N, Benouarets M and Dexter A L. Fuzzy model-based fault detection and diagnosis [C]. *Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 121 - 126*
- [58] Frank P M and Kiupel N. Residual evaluation for fault diagnosis using adaptive thresholds and fuzzy inference [C]. *Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 115 - 120*
- [59] Dalton T, Kremer N, Alcorta-Garcia E and Frank P M. Application of fuzzy residual analysis to the winding machine [C]. *Submitted to European Control Conference, Karlsruhe, Germany, 1999*
- [60] Boudaoud A N, Masson M H and Dubuisson B. On-line diagnosis of a technological system; a fuzzy pattern recognition approach [C]. *Proc. of IFAC World Congress, San Francisco, USA, 1996, 103 - 107*
- [61] Gertler J and Costin M. Model-based diagnosis of automotive engines — Case study on a physical vehicle [Z]. *Preprints of IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Process, 1994, 421 - 430*

### 本文作者简介

张 萍 1977年生, 1997年在华中理工大学自动控制工程系获学士学位, 现为清华大学自动化系博士研究生. 研究方向是: 故障诊断.

王桂增 1941年生, 清华大学自动化系教授, 博士生导师, 中国自动化学会技术过程的故障诊断与安全性专业委员会主任. 研究方向: 故障诊断, 先进过程控制等.

周东华 1963年生, 1990年获工学博士学位, 清华大学自动化系教授, 博士生导师, 中国自动化学会副秘书长, 技术过程的故障诊断与安全性专业委员会秘书长. 研究方向是: 故障诊断, 容错控制等.