

# 故障检测与诊断技术

周东华 席裕庚 张钟俊

(上海交通大学自动控制系)

**摘要:** 本文介绍了故障检测与诊断技术的历史及发展状况, 对其所用的各种方法分类进行了详细评述, 指出了当前亟待解决的若干前沿课题, 并对这门技术的发展进行了展望。

**关键词:** 故障检测与诊断; 状态估计; 参数估计; 人工智能

## 1 引言

故障检测与诊断(FDD—Fault Detection and Diagnostics)技术是由于建立“监控系统”的需要而发展起来的。由于所建系统规模的不断扩大, 复杂性的提高以及系统投资的巨大, 人们迫切需提高系统的可靠性和安全性。因而有必要建立一个监控系统来监视整个系统的运行状态, 不断检测系统的变化和故障, 进而采取必要的措施, 防止系统的损坏和事故的发生。而其前提则是必须具有检测和诊断故障的能力。

以软件为主导的 FDD 技术是从本世纪 70 年代初首先在美国发展起来的。麻省理工学院 Beard 的博士论文(1971)<sup>[1]</sup>首先提出了用解析冗余代替硬件冗余并通过系统自组织使系统闭环稳定, 通过比较观测器的输出得到系统故障信息思想, 标志了这门技术的开端。

从广义上讲, 故障可理解为任何系统异常现象, 使系统表现出所不期望的特性。从系统的结构来看, 系统的故障可分为三种类型<sup>[2]</sup>: 1) 受控对象故障; 对象的某部分设备失效。2) 仪表故障; 包括传感器, 控制机构和计算机接口故障。3) 软件故障; 即计算机诊断程序和控制程序可能发生的故障。从故障的程度来看, 一段可分为两类: 1) 缓慢失效型故障; 即执行机构和传感器等输出偏差逐渐增大, 增益逐渐衰减。2) 突发性故障; 即系统的某些参数突然跳变或某些外部原因造成系统输出发生跳变。

故障检测及诊断包含如下三个方面内容:

- 1) 故障的检测。
  - 2) 故障的分离与估计。
  - 3) 故障的分类, 评价与决策。
- } 诊断

FDD 是一门综合性技术, 它涉及多学科, 如现代控制理论、信号处理模式识别、计算机科学、人工智能、电子技术、统计数学以及相应的应用学科。

几十年来, FDD 技术得到深入广泛的研究, 提出了众多可行的方法。综述文章<sup>[1, 3-7]</sup>给出了较为详细的评述。FDD 技术已经在飞机自动驾驶、人造卫星、惯性导航、宇宙飞船、核反应堆、汽轮发电机组、天然气管道、透平机、宾馆空调系统<sup>[1, 8]</sup>、大型电网系统<sup>[1]</sup>、汽

车船舶发动机、冶金设备、石化设备、机床、齿轮和轴承、矿山机械、家用电器<sup>[10]</sup>等各个领域得到应用,取得了大量的应用成果,并得到了巨大的经济效益。

现有的 FDD 方法,概括起来可分成以下四大类:

- 1) 基于直接测量系统输出输入及信号处理的方法.
- 2) 基于状态估计的 FDD 方法.
- 3) 基于参数估计的 FDD 方法.
- 4) 基于人工智能的故障诊断方法.

在下面几节,我们详细给出各类方法的主要特点.

## 2 基于直接测量系统输出输入及信号处理的方法

### 2.1 直接测量系统输出输入

在正常情况下,被控过程的输入在正常范围内变动:

$U_{\min}(t) < U(t) < U_{\max}(t)$ ,  $Y_{\min}(t) < Y(t) < Y_{\max}(t)$ . 当此范围被突破时可认为故障已经发生或将要发生. 另外还可通过测量输出输入的变化率是否满足  $\dot{U}_{\min}(t) < \dot{U}(t) < \dot{U}_{\max}(t)$ ,  $\dot{Y}_{\min}(t) < \dot{Y}(t) < \dot{Y}_{\max}(t)$  来判别故障是否发生.

### 2.2 基于因果关系的信号处理方法

系统的输出在幅值、相位、频率及相关性上与故障源之间会存在一定的联系. 这些联系可以用一定的数学形式表达,如输出量的频谱等. 在故障发生时则可利用这些量进行分析与处理,来判断故障源的所在. 常用的方法有:谱分析法、概率密度法、相关分析法及互功率谱分析法等(参见[18,19]).

### 2.3 基于信息匹配的方法

此方法引入了类似向量,类似空间,一致性等概念,将系统的输出序列在类似空间中划分成一系列子集. 分析各个子集的一致性并将其按一致性强弱进行排列,一致性最强的一组子集的鲁棒性也最强,可用于系统辨识. 而一致性最差的子集则可能已发生故障<sup>[11-17]</sup>. 通常类似向量值很小,而当故障发生时,类似向量将在与此故障相应的方向上增大,因此类似向量的增加表明了故障的发生,而其方向给出了故障传感器的位置<sup>[12]</sup>.

## 3 基于状态估计的 FDD 方法

被控过程的状态直接反映系统的运行状态. 通过估计出系统的状态并结合适当模型则可进行 FDD<sup>[1,20]</sup>. 首先重构被控过程的状态,并构成残差序列(新息序列). 残差序列中包含各种故障信息. 基于残差序列,通过构造适当的模型并采用统计检验法,才能把故障从中检测出来并作进一步的分离、估计及决策,通常可用各种状态观测器<sup>[1,21]</sup>及滤波器进行状态估计<sup>[8,22-24]</sup>.

### 3.1 FDD 中所用的状态估计方法

为便于研究,人们通常把故障检测又分为装置故障检测(IFD);如传感器故障检测,以及元件故障检测(CFD);如执行机构及被控过程元件故障检测两种,已有的用于 IFD 的状态估计法的主要特点由表1给出.

表 1 用于 IFD 的状态估计法

方法 性质	奉献观测器法 (DOS)	简化观测器法 (SOS)	广义观测器法 (GOS)	自适应观测器/ 滤波器法
特点	假设系统全状态或其子集可从每个测量中观测出来	只采用一个全阶/降阶观测器或滤波器,由唯一的测量输出驱动	采用某些可以交迭的输出子集驱动观测器	观测器参数可随系统参数变化而变动,鲁棒性强
文献	[1]	[1]	[1]	[25-26]

现有的用于 CFD 的状态估计法有:

### 1) 递阶观测器法

一个自然的想法是把整个系统划分成许多子系统,形成递阶结构.当各子系统之间的耦合可测量或比较弱时,则可对每个子系统分别设计观测器,并得到残差,由此进行子系统的故障检测与诊断<sup>[1]</sup>.

### 2) 鲁棒观测器法

文[27-29]给出了一种鲁棒观测器方法用于线性时不变系统的 FDD.其基本原理是构造一种鲁棒观测器使其对系统的某些故障具有鲁棒性而对其它故障敏感.这样可通过压制一些故障的表现来突出另外一些故障的表现.然后采用适当的逻辑来判别分离出故障.

### 3) 马氏链法

文[30,31]给出了一种处理系统结构变化的方法.该文把系统结构变化假定可用一组变化参数来描述.这组参数的变化规律则用一个有限状态,离散时间马尔可夫链来描述.因此得到了一种检测系统结构变化以及估计系统状态的方法.文[32]将系统结构变化用一可控半马氏链描述,并给出了一种渐近局部算法用于结构变化的检测及估计.

### 4) 系统结构知识及特征值灵敏度方法

文[17]提出了一种利用系统结构知识及特征值灵敏度来检测并分离元件故障的方法.其原理是:当系统元件发生故障时,系统 $(A, B, C)$ 的 $A(\cdot)$ 中的元素将发生变动.系统的状态将随之受到影响.令 $A(\cdot) = (a_{kj})$ ,则当 $a_{kj}$ 变动时,首先影响到是与 $a_{kj}$ 有关的状态 $X_k$ ,使其偏离预定值,由此可检测出故障的发生.

## 3.2 决策方法

在利用状态估计法得到残差序列后,主要的问题是如向建立适当的决策模型进行故障的检测及诊断.现有的可用的决策方法的主要特点由表2给出.

表 2 用于 FDD 的决策方法

方法 性质	阈值法		
	加性决策函数法	乘性决策函数法	序列概率比法 (SPRT)
特点	适用广	对故障更加敏感	在指定误差概率下, 为识别二个状态所需要的样本数目最少
文献	[1]	[1]	[34—35]
方法 性质	假设检测法		
	广义似然比法 (GLR)	极大似然比法	贝叶斯决策
特点	用于线性系统, 状态及输出中阶跃及脉冲类故障的检测	用于线性系统存有恒值突变偏差的检测及估计	适用于故障发生时刻的估计, 并可估计出系统未知脉冲输入值
文献	[36—42]	[43—45]	[46]

### 3.3 FDD 算法中参数敏感性的降低

由于基于新息序列的 FDD 算法对模型参数变动非常敏感, 有必要研究降低参数敏感性的方法, 提高检测精度。

鲁棒观测器 (ROS)<sup>[1]</sup>是指选择最优的观测器增益, 使得观测器的输出对参数变动的敏感性最小。

另一种微分观测器方法 (DEOS)<sup>[1]</sup>的原理是当参数变动对通道  $j$  及  $i$  的影响相近时, 则对由通道  $j$  及  $i$  驱动的观测器  $j$  及  $i$  的输出之差的影响将会因相互抵消而降低, 因此可采用此输出之差做为残差序列。

### 3.4 采用状态估计方法的前提条件

- 1) 过程数学模型知识 (结构及参数)。
- 2) 噪声的统计特性。
- 3) 系统可观测或部分可观测。
- 4) 方程解析解应有一定精度。
- 5) 在许多场合下将模型线性化并假设干扰为白噪声。

## 4 基于过程参数估计的 FDD 方法

基于过程参数估计的 FDD 方法与上节方法不同, 不需计算新息序列, 而是根据参数变化的统计特性来检测故障的发生<sup>[4,5,47]</sup>。其设计步骤是:

- 1) 建立被控过程的输出输入模型。
- 2) 建立模型参数与过程参数之间的联系。
- 3) 基于系统的输出输入序列, 估计出模型参数序列。
- 4) 由模型参数序列计算过程参数序列。

- 5) 决定过程参数的变化量序列(由其标称值).
- 6) 基于此变化量序列的统计特性,检测故障的发生.
- 7) 故障的分离,估计及分类.

由于可建立故障与过程参数的精确联系,因此这种方法较状态估计法更利于故障的分离,显然这种方法需要下列前提条件:

- 1) 需要建立精确的过程模型.
- 2) 需要有效的参数估计方法.
- 3) 被控过程的充分激励.
- 4) 选择适当的过程参数.
- 5) 必要的统计决策方法.

尽管已经提出了众多的参数估计方法,但最小的乘法由于简单实用,并且有极强的鲁棒性,因此仍是参数估计的首选方法.

#### 4.1 故障的检测及分类

若假设过程参数序列具有正态分布,并且统计独立,则依据贝叶斯决策方法可推得一个故障检测及分离方法<sup>[4]</sup>.

首先确定过程参数的正常运行时的数学期望及方差,然后定义一个决策函数及阈值,则当此决策函数超出阈值时,可认为相应的参数已发生故障.

#### 4.2 基于协方差阵的检测方法

文[48]给出了一种基于协方差阵的检测方法.首先估计出过程参数序列,然后计算出其协方差阵.过程参数的变化则可反映在协方差阵中.若假设过程参数的分布是正态的,则可计算出其概率密度,并定义一个决策函数,采用 SPRT 法来检测故障的发生.

#### 4.3 同时辨识状态及参数

当无故障时,可用通常的卡尔曼滤波器估计状态变量,并且由其残差序列根据 SPRT 法判别是否发生故障.若故障是由于系统内部参数引起的,则可以扩展状态方程,然后采用扩展卡尔曼滤波器同时估计状态及参数<sup>[49]</sup>.当是非线性系统时,参见文献[50].

### 5 基于人工智能的故障诊断法

#### 5.1 基于专家系统的方法

基于专家系统的故障诊断方法的原理如图1所示.对于在线监视或诊断系统,数据库的内容是实时检测到的工作数据.对于离线诊断,数据库的内容可是故障时检测到的数据的保存,也可是人为检测的一些特征数据.知识库中存放的一般知识可以是系统的工作环境,系统知识则反映系统的工作机理以及系统结构知识.规则集则是一组规则,反映系统的因果关系.人机接口可以为数据库增添系统故障前或故障发生时观测到的一些特殊现象.专家系统的诊断程序在知识库和数据库的支持下,综合运用各种规则,进行一系列的推理,必要时还可随时调用各种应用程序.它在

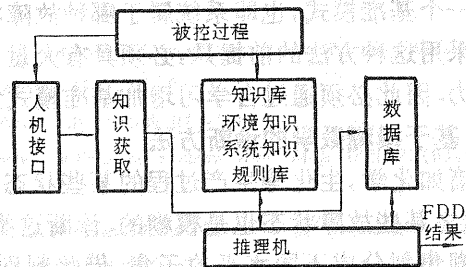


图1 诊断专家系统结构框图

运行过程中向用户索取必要的信息后,就可快速地直接找到最终故障,或是最有可能的故障,再由用户来证实(参见[51-56]).

一些新的探索是:Michael等<sup>[53]</sup>提出了一种由失误驱动的故障诊断策略的自学习方法.其基本出发点是,当一个假定在以后被否定时,应该自动修改故障诊断策略,以免以后犯类似错误.这样随着系统运行,系统将不断完善,使其能更有效地寻找到故障. Chien Y. Huang等<sup>[54]</sup>提出了应特别利用被控过程元件间的因果知识,以便诊断罕见的故障和广泛意义上的故障,扩大系统的诊断范围.文献[55]的诊断“新颖故障”的方法同样也利用了系统元件间的因果知识.

### 5.2 基于故障树的诊断方法

这是个在实际中常用的比较有效的故障诊断方法.所需要的前提是有关故障与原因的先验知识和故障率的知识.诊断过程是从系统的某一故障开始的.通过不断提问“为什么会出现这种现象?”而逐级构成一个递阶故障树.通过对此故障树的启发式搜索,会查到故障的最终原因.在提问过程中有效合理地使用系统的实时动态数据将有助于诊断过程的进行.图2给出了一棵诊断收音机无声的故障树的示意图.

目前这种方法的发展是:由计算机自动或辅助生成故障树,并自动生成故障树的搜索过程,这对大型复杂系统是十分必要的(参见[57]).

### 5.3 基于模式识别的诊断方法

这种故障诊断方法的步骤是:

1) 故障模式向量的形成;也即选择能够表达系统故障状态的向量集.

2) 特征向量的提取;由于故障模式向量中各参数的重要性不同,它们也不一定相互独立,因此,从中选择出对故障状态最敏感的特征参数,构成特征向量集,也即构成了故障的基准模式集.

3) 判别函数的形式;它是由特征向量以一定形式构成的,用于识别系统目前状态属于哪一个基准模式,也即系统属于哪种故障状态(参见[58,59]).

采用这种方法的前提是:必须具有大量有关故障的先验知识,对新颖故障此方法则无能为力.因此必须通过自学习增加基准模式集.

### 5.4 基于模糊数学的诊断方法

诸如化学,生化等生产过程的某些状态是不分明的,不确定的.因此可用模糊集来描述,随之某些故障状态也是模糊的.诊断这类故障的一个有效方法是采用模糊聚类分析,将模糊集划分成不同水平的子集,借此判别故障最可能属于的子集<sup>[60]</sup>.另一个有效方法是首先建立故障集的模糊向量  $S$ ,同时建立当前故障的模糊向量  $D$ .这两个模糊向量是通过一个模糊关系阵  $R$  的模糊方程  $S = R \cdot D$  联系起来的.现已知  $S$  和  $R$ ,则通过此模糊方程的反解,则可得到故障原因  $D$ (参见[61]).

## 6 总结及展望

基于直接测量系统输出输入的方法,虽然简单可靠,但不可避免地有其局限性.对某

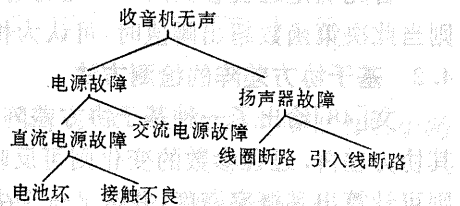


图2 故障树示意图

些系统来说,某些状态发散并不能导致输出量的发散.基于状态估计的方法的基础是残差序列的产生.残差序列中包含了大量的系统运行信息及故障信息.这类方法均是以处理残差序列,增强故障特征并进行提取、分离,达到 FDD 的目的.基于参数估计的方法的一个重要方面就是从模型参数到过程参数的转换是否能够完成.此方法的困难是,缺乏对非线性动态系统参数估计的有效方法.基于人工智能的诊断专家系统法,主要是利用了计算机的推理能力及领域专家的丰富经验,以及系统内部的因果关系,并利用了人工智能中的机器学习功能,因此是很有生命力的方法.

任何 FDD 方法的直接目的都是为了提高故障的检测率降低误报率以及漏报率,推断出故障发生的准确时间,发生故障的部位并估计出大小.由于实际系统的复杂性,导致了辨识故障时间以及分离出故障部位非常困难.因此故障分离问题仍是当前的前沿课题.

虽然 FDD 技术已得到全面研究和发展的,并已得到大量应用,但由于其巨大的实用价值及客观需要,使它仍处于不断的发展之中.不少具有重大意义的理论课题仍有待于进一步研究,下面列举了其中的一部分:

—本质非线性动态系统的 FDD 方法;这里主要的问题是研究有效的状态/参数估计方法.

—无先验知识的被控过程结构变化的检测及识别;以前的方法均要求很强的先验知识.

—基于状态估计的复杂系统的 CFD 实用方法;现有的方法计算量都太大.

—用于 FDD 的实时专家系统的开发以及与基于过程模型的常规检测方法的结合.

—以 FDD 为中心的容错控制系统的研究;也即根据系统的不同故障,实时更换控制器或调整控制器参数,达到使系统稳定的目的,为提高系统的可靠性开辟了一条新途径,这是一个诱人的尚待开发的领域<sup>[62]</sup>.

FDD 是一门实用性很强的技术,因此只有在实际应用中才能体现出它的价值.同时又可发现新的问题,促进其自身的不断发展和完善.

## 参 考 文 献

- [1] Frank, P. M. . Fault Diagnosis in Dynamic Systems via State Estimation—A Survey. Proc. of First European Workshop on Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge Based Approach, 1987, 35—98
- [2] 夏启军. 工业过程模型化可靠控制应用理论研究. 浙江大学博士论文, 1989, 87—126
- [3] Willsky, A. S. . A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems. Automatica, 1976, 12(6): 601—611
- [4] Isermann, R. . Experience with Process Fault Detection Methods via Parameter Estimation. Proc. of First European Workshop on Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge Based Approach, 1987, 3—33
- [5] Isermann, R. . Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods—A Survey. Automatica, 1984, 20(4): 387—404
- [6] 杨良士, 钟延炯. 系统故障诊断技术. 机器人, 1987, 1(3): 37—41
- [7] 叶银忠, 潘日芳, 蒋慰孙. 动态系统故障检测及诊断方法. 信息与控制, 1985, 14(6): 27—34
- [8] Usoro, P. B. , Schick, I. C. , Negaharipour, S. . Hvac System Fault Detection and Diagnostics. Proc. of American Control Conference, 1984, 601—612



- [9] Mili, L., et al. Decision Theory for Fault Diagnosis in Electric Power Systems. *Automatica*, 1987, 23(3): 335—353
- [10] 张瑞林,等. 机械故障诊断的发展现状及展望. 第二届全国机械设备故障诊断学术会议论文集, 北戴河, 1988, 13—18
- [11] Chow, E. Y., Willisky, A. S.. Issues in the Development of A General Design Algorithm for Reliable Failure Detection. *Proc. of Conference on Decision and Control*, 1980, 1006—1012
- [12] Mukund, D., Asok, R.. A Fault Detection and Isolation Methodology. *Proc. of Conference on Decision and Control*, 1981, 1363—1369
- [13] Mukund, D., Asok, R.. A Fault Detection and Isolation Methodology—theory and Application. *Proc. of American Control Conference*, 1984, 262—270
- [14] Asok, R., Mukund, D.. A Redundancy Management Procedure for Fault Detection and Isolation. *Trans. of the ASME, JDSMC*, 1986, 108(3): 248—254
- [15] Lou, X. C., Willisky, A. S., Verghese, G. C.. Failure Detection with Uncertain Models. *Proc. of American Control Conference*, 1983, 956—959
- [16] Pattipati, K. R., et al. A Design Methodology for Robust Failure Detection and Isolation. *Proc. of American Control Conference*, 1984, 1755—1762
- [17] Lou, X. C., Willisky, A. S., Verghese, G. C.. Optimally Robust Redundancy Relations for Failure Detection in Uncertain Systems. *Automatica*, 1986, 22(3): 333—344
- [18] 张泉南. 信号处理技术与声振源识别. 第二届全国机械设备故障诊断学术会议论文集, 北戴河, 1988, 157—168
- [19] 梅志坚,等. 信号功率谱特征变化的时域快速诊断. 第二届全国机械设备故障诊断学术会议论文集, 北戴河, 1988, 136—141
- [20] Yeh, H. G.. A Design Method for Failure Proof Systems. *Proc. of American Control Conference*, 1983, 1219—1221
- [21] Clark, R. N., Fosth, D. C., Walton, V. M.. Multifunctions in Control Systems. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1975, 11(4): 465—473
- [22] Hertmann, G. L., Stein, G.. Specific Failure Identification Algorithms for the F—8. *Proc. of American Control Conference*, 1976, 29—31
- [23] Mehra, R. K., Peschon, J.. An Innovation Approach to Fault Detection and Diagnosis in Dynamic Systems. *Automatica*, 1971, 7(6): 637—640
- [24] Louis, J., Purviance, J. E.. Instrument Failure Detection in Nonlinear Systems. *Proc. of American Control Conference*, 1984, 271—273
- [25] Sidar, M.. Implementation of Failure Detection Systems with Adaptive Observers. *Proc. of American Control Conference*, 1983, 1205—1211
- [26] Halme, A., Selkainaho, J.. Instrument Fault Detection Using an Adaptive Filtering Method. *IFAC Proc. Series*, 1984, 1765—1770
- [27] 葛卫. 生产过程故障诊断的观测器方法. 清华大学博士论文, 1988
- [28] Ge, W., Fang, C. Z.. Detection of Faulty Components via Robust Observation. *Int. J. Control*, 1988, 47(2): 581—599
- [29] 葛卫, 方崇智. 一种基于数学模型的故障诊断方法. 全国过程控制校际交流会, 首届学术报告会论文集, 第8分册, 杭州, 1987, 1—19
- [30] Tugnait, J. K.. Detection and Estimation for Abruptly Changing Systems. *Proc. of Conference on Decision and Control*, 1981, 1357—1362
- [31] Tugnait, J. K.. Detection and Identification of Abrupt Changes in Linear Systems. *Proc. of American Control Conference*, 1983, 960—965
- [32] Benveniste, A., Basseville, M., Moustakides, G. V.. The Asymptotic Local Approach to Change Detection and Model Validation. *IEEE Trans. On Automatic Control*, 1987, 32(7): 583—591
- [33] Shoureshi, R., Hoskin, R. F.. Failure Detection and Isolation Using System Structure Knowledge and Eigenvalue Sensitivity. *Proc. of American Control Conference*, 1986, 1933—1939



- [34] Chien, T. T., Adams, M. B. . A Sequential Failure Detection Technique and Its Application. IEEE Trans on Automatic Control, 1976, 21(5): 750—757
- [35] Bonivento, C., Tonielli, A. . A Detection—estimation Multifilter Approach with Nuclear Application. IFAC Proc. Series, 1984, 1771—1776
- [36] Willsky, A. S., et al. Adaptive Filtering and Self—test Methods for Failure Detection and Compensation. Proc. of Joint American Control Conference, 1974, 846—853
- [37] Willsky, A. S., Jones, H. L. . A Generalized Likelihood Ratio Approach to the Detection and Estimation of Jumps in Linear Systems. IEEE Trans. on Automatic Control, 1976, 21(1): 108—112
- [38] Bueno, R., et al. State Report on the Generalized Likelihood Ratio Failure Detection Technique, with Application to the F—8 Aircraft. Proc. of American Control Conference, 1976, 38—45
- [39] Madiwala, A., Friedland, B. . Comparison of Innovation—based Analytical Redundancy Methods. Proc. of American Control Conference, 1983, 940—945
- [40] Deyst, J. J., Deckert, J. C. . Application of Likelihood Ratio Methods to Failure Detection and Identification in the NASA F—8 Aircraft. Proc. of American Control Conference, 1975, 237—237
- [41] Kerr, T. H. . The Controversy over Use of SPRT and GLR Techniques and Other Loose—ends in Failure Detection. Proc. of American Control Conference, 1983, 966—977
- [42] Willsky, A. S., Jones, H. L. . A Generalized Likelihood Ratio Approach to State Estimation in Linear Systems Subject to Abrupt Changes. Proc. of Conference on Decision and Control, 1974, 637—645
- [43] Friedland, B., Grabovsky, S. . Estimating Sudden Changes of Bias in Linear Dynamic Systems. IEEE Trans on Automatic Control, 1982, 27(1): 237—240
- [44] Friedland, B. . Maximum—likelihood Estimation of A Process with Random Transitions (Failures). IEEE Trans. on Automatic Control. 1979, 24(6): 932—937
- [45] Friedland, B. . Multidimensional Maximum Likelihood Failure Detection and Estimation. IEEE Trans, on Automatic Control, 1981, 26(2): 567—571
- [46] Sanyal, P., Shen, C. N. . Bayes Decision Rule for Rapid Detection and Adaptive Estimation Scheme with Space Applications. IEEE Trans. on Automatic Control, 1974, 19(3): 228—231
- [47] Dava, M. H. A. . The Application of Nonlinear Filtering to Fault Detection in Linear Systems. IEEE Trans. on Automatic Control, 1974, 19(1): 257—259
- [48] Rault, A., Jaume, D., Verge, M. . Industrial Process Fault Detection and Localization. Proc. of IFAC Proc. Series, 1984, 1789—1794
- [49] Yoshimura, T. et al. A Sequential Failure Detection Approach and the Identification of Failure Parameters. Int. J. Systems Sci., 1979, 10(7): 827—836
- [50] Lainiotis, D. G. . Joint Detection, Estimation and System Identification. Information and Control, 1971, 19(1): 75—92
- [51] 杨良士, 钟延炯. 动态系统故障诊断的新方法——专家系统. 信息与控制, 1988, 17(5): 26—31
- [52] 董心. 液压系统故障的识别与诊断. 信息与控制, 1988, 17(5): 26—31
- [53] Pazzani, M. J. . Failure—Driven Learning of Fault Diagnosis Heuristics. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 17(3): 380—384
- [54] Huang, C. Y., Stengel, R. F. . Failure Model Determination in A Knowledge Based Control System. Proc. of American Control Conference, 1987, 1643—1649
- [55] Yoon, W. C., Hammer, J. M. . Aiding the Operator During Novel Fault Diagnosis. IEEE Trans. on System, Man Cybernetics, 1988, 18(1): 142—147
- [56] Su, Y. L., Govindaraj, T. . Fault Diagnosis in A Large Dynamic System; Experiments on A Training Simulator. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1986, 16(1): 129—141
- [57] Teague, T. L., Power, G. J. . Diagnosis Procedures for Fault Tree Analysis. Proc. of Joint American Control Conference, 1981, FA—2C

- [58] 骆明飞,段志善,闻邦椿. 灰色系统理论在机械故障模式识别中的应用. 第二届全国机械设备故障诊断学术会议论文集,北戴河,1988,231—238
- [59] 张永泉,高翔. 液压泵故障诊断的模式识别法. 第二届全国机械设备故障诊断学术会议论文集,北戴河,1988,614—615
- [60] 付春生,张明华,王骥程. 一种新的故障诊断的FUZZY模型化方法及其应用. 第二届过程控制科学论文报告会论文集,富阳,1988,312—319
- [61] 顾家柳. 旋转机械故障振动诊断技术展望. 第二届全国机械设备故障诊断学术会议论文集,北戴河,1988,45—51
- [62] 周东华,陆鼎,席裕庚,张钟俊. 基于知识的非线性动态系统的容错控制研究. 第一届中国人工智能联合学术会议论文集,长春,1990,F66

## A Survey on Fault Detection and Diagnostics Techniques

Zhou Donghua, Xi Yugeng, Zhang Zhongjun

(Department of Automatic Control Shanghai Jiaotong University)

**Abstract:** A survey on fault detection and diagnostics techniques is presented in this paper. Various methods are divided into four groups and got discussed. Some problems which are worthy of particular attention are given. Future development of this technique has also been discussed.

**Key words:** fault detection and diagnostics; state estimation; parameter estimation; artificial intelligence