

复杂工业过程的故障诊断

张颖伟 S.Joe Qin 著

Fault Detection of
Complex Industrial Processes



東北大學出版社
Northeastern University Press

复杂工业过程的故障诊断

Fault Detection of Complex

Industrial Processes

张颖伟 S.Joe Qin 著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 张颖伟 S.Joe Qin 2007

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂工业过程的故障诊断 / 张颖伟, S.Joe Qin 著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2007.12

ISBN 978-7-81102-480-7

I. 复… II. ①张… ②S… III. 自动化系统—故障诊断
IV. TP277

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 190065 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳市北陵印刷厂有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 228mm

印 张: 12.5

字 数: 218 千字

出版时间: 2007 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2008 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 孟 颖 责任校对: 王 艺

封面设计: 唐敏智 责任出版: 杨华宁

ISBN 978-7-81102-480-7

定 价: 25.00 元

前 言

面对中国现代制造业的快速发展,很多学者和工程技术人员投身到提高产品质量、减少停产时间和增加设备运行的可靠性的研究上来,努力开发有效的过程监控方法,其中很多方法正在应用到实际工业系统中。本书把基于数据、知识和模型的过程监控方法放在一起介绍,缘于这些方法在工程中变得越来越重要。另外由于系统的复杂性越来越高,将三种技术结合起来,集中各自的优势进行过程监控,在许多工程中是有益的。

目前,控制理论与控制工程学科中有一些关于故障诊断的专著,对传统方法有详细介绍,但是这些专著所涵盖的内容仍然有限,许多近几年最新的方法,如独立元(Independent Component Analysis)方法、核主元(Kernel Principal Component Analysis)方法、核独立元(Kernel Independent Component Analysis)方法、免疫神经网络的故障预测方法和网络控制系统的故障诊断方法等几乎没有书籍进行论述。本书的出版会为上述问题提供有效的总结和介绍,使读者得以了解相关的新进展。

本书共分六部分内容:第一章综述了过程监控的方法和步骤;第二章提供了数据驱动的过程监测方法;第三章以连续采煤机为例讲述了基于模糊神经网络的故障诊断方法和基于免疫神经网络的故障预测方法;第四章讲述了鲁棒容错控制的解析方法;第五章讲述了网络控制系统的故障诊断;最后为本书的结束语。

本书不可避免地与作者自身的研究成果有许多相关之处。本书第一作者于2006—2007年访问了第二作者在德州大学奥斯汀分校的研究室,本书的编写工作主要是在此期间完成的。第二作者的研究室在许多方面的研究涉及到国外复杂工业过程故障诊断的前沿。尤其是数据驱动方法和计算智能方法,第二作者的研究室将十多年的时间和十部以上的博士论文用于这方面的研究,并通过科研企业联盟(Texas-Wisconsin-California Control Consortium)直接推广到复杂的生产过程,不乏在化工制造、半导体制造和纸浆制造等工业应用实例。作者认为有必要将这些

有效的方法与同行，特别是国内同行分享，于是决定编写本书。本书由 S. Joe Qin 定稿。本书给出了过程监控的理论背景和实用技术，让硕士研究生和博士研究生在课程学习过程中就接触到这些方法和技术，本书还可作为工业界的企业工程师的参考用书。

作者特别感谢教育部和东北大学出国留学基金计划为本书第一作者提供了在德州大学从事研究工作的机会；感谢教育部和清华大学自动化系的长江学者讲座教授计划，为第二作者提供了多次访问中国同行的机会；同时感谢 S. Joe Qin 所在的 University of Southern California(南加州大学)。在本书编写过程当中得到东北大学和南加州大学部分研究生的协助，在此一并感谢。

时间仓促，疏漏难免，恳请读者批评、指正。

作者

2007 年 11 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 故障检测技术简介	2
1.1.1 故障的含义	2
1.1.2 故障检测的分类	2
1.2 工业过程故障诊断方法	3
1.2.1 基于数学模型的方法	3
1.2.2 基于信号处理的方法	3
1.2.3 基于知识的方法	3
1.2.4 基于数据的方法	4
1.3 故障诊断方法的研究现状	4
1.3.1 基于模型的方法	4
1.3.2 基于信号处理的方法	5
1.3.3 基于知识的方法	6
1.3.4 基于数据的故障诊断	9
1.4 近年来的新理论	9
1.4.1 基于数据的故障诊断	9
1.4.2 基于知识的故障预测	10
1.4.3 基于模型的故障调节	11
参考文献	12
第2章 基于数据的故障诊断方法	16
2.1 预备知识	16
2.1.1 主元分析方法	16
2.1.2 独立元分析方法	22
2.2 核主元分析方法	25
2.2.1 KPCA 算法	26
2.2.2 基于 KPCA 的故障检测	28
2.3 改进的核主元方法	29
2.3.1 特征空间的 k 均值聚类	29

2.3.2 基于重构的非线性故障辨识方法·····	31
2.3.3 仿真结果·····	34
2.4 核独立元分析方法·····	46
2.4.1 KICA 算法·····	47
2.4.2 基于核独立元分析的故障检测·····	48
2.5 改进的核独立元分析方法·····	48
2.5.1 相似性分析·····	49
2.5.2 故障诊断·····	52
2.5.3 实例·····	54
参考文献·····	63
第3章 基于知识的故障预测 ·····	68
3.1 模糊逻辑系统·····	70
3.1.1 模糊性·····	71
3.1.2 模糊集合与隶属函数·····	71
3.1.3 模糊集合的运算·····	74
3.1.4 模糊语言变量·····	75
3.1.5 模糊逻辑系统·····	76
3.1.6 模糊规则库·····	77
3.1.7 模糊推理机·····	78
3.1.8 模糊化和反模糊化·····	80
3.2 人工神经网络技术·····	81
3.2.1 人工神经网络的神经元模型·····	82
3.2.2 神经网络的拓扑结构·····	85
3.2.3 ELM 学习算法·····	86
3.3 仿真实例·····	91
3.4 模糊神经网络模型·····	93
3.4.1 模糊系统与神经网络的连接方式·····	93
3.4.2 模糊系统与神经网络的比较·····	94
3.4.3 模糊神经网络的构造·····	96
3.5 故障诊断·····	97
3.6 学习样本组织·····	99
3.7 模糊神经网络的训练与仿真·····	101
3.8 故障预测·····	104
3.8.1 本节的故障预测及诊断方法的步骤·····	106

3.8.2 实例研究	111
参考文献	120
第4章 基于模型的容错控制	124
4.1 状态观测器	126
4.2 鲁棒故障诊断	128
4.3 故障调节	131
4.4 非线性系统的故障补偿	135
4.5 实例研究——发酵过程介绍	143
参考文献	148
第5章 网络控制系统的故障诊断	152
5.1 网络控制系统	152
5.2 网络控制系统的研究状况	154
5.2.1 网络延迟	154
5.2.2 丢包问题	156
5.2.3 多通道传输	157
5.3 连续控制对象模型的离散化	159
5.3.1 不带延时的连续控制对象模型的离散化	159
5.3.2 包含延时的连续控制对象模型的离散化	159
5.4 网络控制系统的数学模型	164
5.4.1 网络控制系统的建模	164
5.4.2 单包传输	168
5.4.3 单包数据包丢失	169
5.4.4 多包传输	171
5.4.5 多包传输数据包丢失	175
5.5 网络控制系统数学模型的建立	175
5.5.1 无记忆降阶状态观测器的设计思想	176
5.5.2 无记忆降阶观测器的设计	176
5.6 残差的产生和故障检测	180
5.6.1 残差的产生	180
5.6.2 分析残差	182
5.7 仿真实例	183
参考文献	186
结束语	189

第 1 章

绪 论

在日益大型化、复杂化的自动控制生产过程中,如何保证安全生产和环境保护是一个不容忽视的问题。生产过程中的故障不仅影响产品的质量和产量,而且可能引发严重的人身、设备事故和环境污染。应运而生的控制系统的故障检测与诊断技术(Fault Detection and Diagnosis, FDD)为提高复杂工业系统的安全性和可靠性提供了一项重要的途径。

工业系统的故障诊断技术包括故障检测、故障分离和故障辨识等。故障诊断能够判断故障的发生与否、发生时刻,并确定故障的类型和位置,在分离出故障后进一步确定故障的大小和时变特性。

基于解析冗余的故障诊断技术起源于1971年麻省理工学院的Beard发表的论文以及Mehra和Peschon发表在《Automatica》上的论文。Beard首先提出了用解析冗余代替硬件冗余,并通过系统的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的新思想,标志着这门技术的开端。之后,在1976年,Willsky在《Automatica》上发表了第一篇FDD方面的综述文章。Himmelblau于1978年出版了国际上第一本FDD方面的学术专著。FDD技术蓬勃发展起来。我国从20世纪80年代开始进行FDD方面的研究。

国际上,FDD的发展直接促成了IFAC技术过程的故障诊断与安全性技术委员会的成立(1993)。从1991年起,IFAC每三年定期召开FDD方面的国际专题学术会议。在我国,自动化学会也于1997年批准成立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,并于1999年5月在清华大学召开了首届全国技术过程的故障诊断与安全性学术会议。

FDD 是一门交叉性的综合技术。它涉及多门学科, 包括现代控制理论、信号处理、模式识别、人工智能、人工神经网络、计算机工程、模糊数学和数理统计等。30 多年来, FDD 的研究得到了迅猛的发展, 并应用了多种新的理论与方法。例如, 小波变换、神经网络、模糊系统、遗传算法、模式识别、自适应理论和非线性理论等。

1.1 故障检测技术简介

1.1.1 故障的含义

故障通常是指系统所出现的一些异常现象导致其难以完成所规定的功能。故障的含义根据问题的出发点不同大致分为两类: 一类是在控制回路前提下定义的故障 (如, Frank et al., 2000), 这类故障通常指控制回路部分的故障, 如传感器执行机构和过程部件等。另一类故障是指复杂工业生产过程的故障, 这些复杂过程对象通常包括控制回路, 但也包括无控制回路的监测变量。这类故障包括硬系统故障, 还包括过失操作带来产品质量下降和生产效率降低等 (如, MacGregor, et al., 1996; Dauia and Qin, 1998; Qin, 2003)。由于这类故障时常发生, 直接影响产品质量和成品率, 并且难以通过仪表直接测量, 近年来在实际复杂工业过程中应用很广。

故障检测就是指当系统发生故障时可以及时发现并报警。通常, 任何故障检测子系统都不可能百分之百地正确检测出控制系统的各种故障。因此提高故障的正确检测率, 降低故障的漏报率 (发生故障没报警) 和误报率 (未发生故障反而报警) 一直是故障检测与诊断领域的前沿课题。

1.1.2 故障检测的分类

按故障部件划分, 控制系统的主要故障有: 被控过程原部件故障; 传感器故障; 执行器故障; A/D, D/A 等计算机接口故障, 计算机硬件故障; 控制器故障。

按故障类型可划分为: 脉冲型故障, 阶跃型故障, 缓慢漂移型故障, 以及控制性能下降 (如, Harris, 1989; Qin, 1998)。

传感器故障与执行器故障是: 传感器和执行器的输出出现突变型或缓变型偏差。传感器与执行器增益逐渐衰减。元部件参数出现阶跃型跳

变或元部件参数有缓慢漂移。

1.2 工业过程故障诊断方法

故障诊断与检测方法基本上可以分为四类：基于数学模型的方法、基于信号处理的方法、基于数据的方法和基于知识的方法。

1.2.1 基于数学模型的方法

基于数学模型的方法发展最早，需要建立被诊断对象的数学模型。它利用检测信号或估计出系统的物理参数，或在噪声背景下重构系统的状态，通过参数变化和故障间的联系，对状态估计残差序列的检验和识别等技术对故障进行预报、定位、定量和定因。因此，它又可以分为参数估计法和状态估计法两种。当参数有显著变化时，可利用已有的多种参数估计方法，根据参数变化的统计性特性来检测故障的发生。当被控过程状态直接反映系统运行状态，且可观或部分可观，则可以采用状态估计法的状态观测器或滤波器来进行故障诊断。这类方法虽然综合利用了系统的结构、功能和行为信息，但是由于很多非线性系统的数学模型难以建立，成为了制约此类方法应用的因素。

1.2.2 基于信号处理的方法

基于信号处理的方法不需建立被诊断对象的数学模型，因而适用性较强。它基于信号分析理论，提供系统时域和频域中较深层次的多种特征向量，利用这些特征向量与系统故障源之间的联系，对系统信号进行分析和处理，从而判断故障源位置。它又可分为基于小波变换的方法和基于信息校核的方法、基于信号模式估计的方法。虽然它适用于线性系统和非线性系统，但是它仅仅是挖掘了信号中包含的信息，而对于系统结构的信息并没有利用，同时对高维信号之间的关联利用不够。

1.2.3 基于知识的方法

基于知识的方法出现于20世纪80年代。它既不需要被诊断对象的数学模型，又引入了被诊断系统的大量数据或规则，因此有着普遍适应力。基于知识的方法又分为专家系统方法、神经网络方法、定性模型方法、模糊方法、模式识别方法和故障树方法等多种类型。它们除了开发、利用了启发性知识，并将启发性知识中的大量信息用于故障诊断

外, 还引入了学习机制和人机协作的工作方式, 因此不但可以对故障进行预测和定位, 还能够对故障定量、定因. 该方法的缺陷是规则产生不完备或自相冲突和系统维护困难等.

1.2.4 基于数据的方法

基于数据的方法已经广泛地应用于工业过程中. 它既不需要建立复杂数学模型, 也不需要准确的先验知识, 而且采用的数据是工业过程中的第一手资料, 更接近于真实情况, 适用于复杂的工业过程, 附加成本低, 易维护. 其缺陷是对故障来源无法像模型法那样确定, 而只能精确到贡献的变量, 但是由于假定前提少, 处理数据维数大, 在复杂工业过程中有最广泛的应用.

1.3 故障诊断方法的研究现状

根据以上分类方法, 分别讨论各类故障诊断方法研究现状.

1.3.1 基于模型的方法

基于数学模型的方法首先要建立起系统动态数学模型, 根据对数学模型处理的方式不同, 又分为参数估计法和状态估计法两种.

(1) 参数估计法

参数估计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. 这种方法不需计算残差序列, 且较利于故障的分离. 因此, 可以和一些状态估计法相结合对非线性系统进行诊断, 以得到更好的故障诊断效果. 目前研究得较为广泛的有强跟踪滤波器方法, 参数估计和观测器结合的方法等. 强跟踪滤波器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具有很强的跟踪能力的滤波器. 基于强跟踪滤波器的故障诊断方法利用强跟踪滤波器来估计模型参数, 把参数当作模型的非线性状态, 使用强跟踪滤波器得到系统参数和状态的联合估计, 再用分类决策算法检验每个参数的估计值, 来进行故障诊断. 只要所研究系统的状态和参数是可以辨识的, 则此方法对非线性系统的故障检测效果显著, 尤其适于估计故障的幅值.

参数估计和观测器结合的方法是首先使用故障观测器检测故障、预分离故障, 然后对可能包含故障的简化模型作参数估计, 进一步分离故障. 这种方法的优点是可以减少参数估计数量, 且有益于分离故障. 近

年来,参数估计法的发展主要集中于提高参数估计准确度方面。

(2) 状态估计法

状态估计法是当系统可观和部分可观时,重构被控过程的状态,将估计值与测量值进行比较,构成残差序列,以检测和分离系统故障。当能够获得系统精确的数学模型时,状态估计法最为直接有效。实际上,由于控制系统日趋复杂化、大型化,难以建立精确的数学模型。因此,目前对于此方面的研究集中于在保证系统灵敏度的同时提高系统鲁棒性,较新的发展又将模型参考自适应思想引入到故障诊断中,此方法能进一步提高系统的鲁棒性。

状态估计法的研究目前主要针对线性系统,常见的方法有:伦伯格观测器方法、自适应观测器/滤波器方法、多重观测器/滤波器方法和鲁棒观测器方法等。但是实际系统大多数是非线性系统,对于非线性系统一般有两种处理方法:一是将非线性系统线性化;二是针对某些特定的非线性系统创建非线性模型。目前较为成熟的非线性系统状态估计法有:自适应非线性观测器方法、非线性未知输入观测器方法、扩展卡尔曼滤波器方法和自适应扩展卡尔曼滤波器方法。

1.3.2 基于信号处理的方法

基于信号处理的方法不需要对对象建模,适用性强。例如,振动信号的谱分析法是至今仍普遍采用的元件故障诊断的有效手段。目前大多数基于信号处理的方法是针对线性系统提出的,但是都可以很方便地推广到非线性系统。以下是几种较新的基于信号处理的方法。

(1) 基于小波变换的故障诊断方法

小波变换是一种新型信号处理方法,它是一种具有多分辨率分析特点的时间-尺度分析方法。目前国内已经有所研究应用的主要有三种基于小波变换的故障诊断方法:由于连续小波变换可以检测信号的奇异性,可以利用观测信号的奇异性进行故障诊断;由于离散小波变换可以检测随机信号频率结构的突变,可以利用观测信号频率结构的变化进行故障诊断;此外,由于小波变换的系数可以反映系统故障导致的系统脉冲响应函数的变化,还可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对输入信号的要求低,对噪声的抑制能力强,灵敏度高,运算量适中,同时适用于突变和缓变故障,可以进行在线实时检测。此方法在机械系统的故障诊断中已经取得了成功的应用,并有很好的研究前景。由小波变换与神经网络相结合形成的小波网络对

任意函数或信号都有良好的逼近能力, 便于有师学习和故障分离.

(2) 基于信息校核的故障诊断方法

目前, 基于信息校核的故障诊断方法研究较多的有利用 Kullback 信息准则检测故障的方法和利用自适应滑动窗格型滤波器检测故障的方法.

利用 Kullback 信息准则检测故障的方法是使用 Kullback 信息准则度量系统的变化, 在不存在未建模动态特性的时候, 把它和阈值相比较即可检测故障; 但若存在未建模动态特性, Kullback 信息准则值波动大, 不可以使用阈值检测法, 此时可以在其中引入一个新指标评价未建模动态特性, 这样也可以实现离线的故障检测. 利用自适应滑动窗格型滤波器检测故障的方法, 不但不需要系统的准确数学模型, 也不需要任何先验知识, 且检测范围宽. 其基本思想是取一个滑动窗内的系统输出、输入数据, 利用自适应格型滤波器产生残差序列, 并构造适合的检验统计量, 对残差序列的方差和均值进行假设检验, 从而进行故障检测.

(3) 基于信号模态估计的故障诊断方法

基于信号模态估计的故障诊断方法先根据被诊断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, 再任取一个闭环信号, 用最小二乘法估计系统的模态参数, 最后采用模式识别技术, 将估计出的模态参数与某一物理参数变化的根轨迹集合匹配, 以达到诊断出故障的目的. 此方法可以直接根据系统物理参数变化进行诊断, 而且可以估计出物理参数的实际变化量, 但是计算量却比较大.

1.3.3 基于知识的方法

基于知识的方法在 20 世纪 80 年代中期得到了大家的广泛重视和研究, 一度成为发展的热点. 这主要是因为在目前控制系统日趋大型化、复杂化的情况下, 系统的模型越来越难以精确地建立, 而基于知识的方法恰好不需要对象的数学模型, 而且能对故障定量、定因, 提高故障诊断的决策水平. 基于知识的方法主要有如下几种.

(1) 基于专家系统的故障诊断方法

专家系统是一种智能计算机软件, 一般主要由人机接口、知识库、数据库和推理机组成, 是人工智能学科的研究方向. 基于专家系统的故障诊断将人们长期的实践经验和大量的故障信息知识归纳成计算机能够利用的规则提供给知识库, 并将被诊断系统的实时数据供给数据库, 专

家系统通过综合运用知识库中的规则对已有的知识及数据库中的数据推理和分析,就可以查找到最终故障或有可能发生的故障。并且,专家系统还可以进行自学习,当它的假设故障被否定后,就会自动修改推理策略,专家系统就能够不断地完善,更准确地寻找到故障源。使用专家系统进行故障诊断可以达到准确的诊断效果,并已经有大量应用。但是,专家系统解决问题的能力依赖于知识库的质量,而知识获取及不确定性处理是目前建造专家系统的瓶颈问题。

(2) 基于人工神经网络的故障诊断方法

人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)由于能够大规模并行处理、分布式存储信息,且具有自适应学习能力,因此是一种能快速处理信息、鲁棒性强大、智能的故障诊断方法。更为重要的一点是ANN能够有效地实现输入到输出的非线性映射。由于大部分自动控制系统都是非线性系统,而且难以建模,用本身就是非线性映射的ANN来模拟难以建模的非线性系统恰好解决了这一难题。

ANN用于故障诊断起源于20世纪80年代末,随着神经网络研究的第二次热潮,由Himmelblau及Hoskins(1998)等人率先从过程工业入手进行故障监测的研究。他们证明了ANN的实时性较专家系统要强得多,而且不像专家系统要将数据转化为符号信息,可以直接使用时间序列数据。经过一段时间的研究,人们发现了ANN更多的优点:ANN具有滤出噪声及在有噪声的情况下得出正确结论的能力;ANN具有分辨原因及故障类型的能力;ANN在出现新颖故障时,可通过自学习,不断调整权值和阈值以提高检测率,降低误报和漏报率等。

ANN方法的缺点是需要大量的正常和故障数据。ANN用于故障诊断主要有四种方式:用ANN产生残差的方式,用ANN评价残差的方式,用ANN作一步诊断和用ANN作自适应误差补偿的方式。

ANN虽然可以通过样本学习的方法将网络的输入、输出关系以权值的方式储存下来,但是网络内部的知识表达方式不明确,学习时不能利用已有的经验和知识,且对训练样本的可靠性依赖较大。因此,近年来的常见应用都是将ANN和模糊方法结合,用模糊方法构造网络,使网络中的权值具有明显意义,用ANN引入学习机制,学习的结果改善原来的规则,进行优势互补。因此,模糊神经网络方法的研究成为很具有发展潜力的技术。

(3) 基于定性模型的故障诊断方法

近年来在欧洲基于定性模型的故障诊断方法受到了广泛的重视。它

主要有两种手段：一是定性仿真，一是知识观测器。

定性仿真方法首先使用一组表示系统物理参数的定性变量和一组表示各参数间相互关系的定性微分方程构成定性模型，然后将系统的结构描述为状态转化图，以确定从给定的初始状态出发得到的当前系统状态。

在基于知识的方法中的知识观测器类似于基于数学模型方法中的状态滤波器和卡尔曼滤波器。知识观测器主要由四部分组成：定性模型、差异检测器、候选人产生器以及诊断策略。其中定性模型是核心部分，它运用定性仿真或符号有向图进行推理，用于预测系统的行为。由于它简化了知识获取的过程，因此比传统的专家系统方法更为简洁。

(4) 基于模糊的故障诊断方法

基于模糊的故障诊断方法适用于系统状态及故障状态具有不确定性，并可采用模糊集描述的情况。其主要方法有四种：基于模糊模型的故障诊断方法，基于自适应模糊阈值的残差评价方法，基于模糊聚类的残差评价方法和基于模糊逻辑的残差评价方法。

但在实际应用中，一般不单独使用模糊方法进行故障诊断。模糊方法是一种半定量的方法，在表述知识和推理方面较为擅长，但不具备学习能力，因此常见的是把模糊方法和其它方法相结合进行故障诊断。例如，模糊神经网络方法、模糊专家系统方法、模糊小波分析方法和模糊定性仿真等，都可以克服模糊方法的一些缺点，进行优势互补，且更有针对性。由于目前多数工业过程具有不确定性，模糊方法得到了长足的发展。

(5) 基于模式识别的故障诊断方法

基于模式识别的故障诊断方法需要大量的有关故障的先验知识，还要做大量的故障仿真实验，且对新颖故障不能准确诊断，但是特别适合于复杂故障的情况。这种故障诊断方法首先要选择出能表达系统故障状态的向量集，作为故障模式向量；然后从模式向量中提取对故障状态最敏感的特征参数，构成故障的基准模式集；最后形成判别函数，用以识别系统目前状态属于哪种故障状态。若要系统能诊断新的故障，必须通过自学习增加基准模式集。

(6) 基于故障树的故障诊断方法

故障树是反映系统故障发生和传播的一种逻辑表示方式，是事件的与或关系组合，可以利用 Petri 网对其进行建模。它是一种常用的较为有效的故障诊断法，但必须预先知道有关故障的先验知识和故障率。此

方法在 20 世纪 60 年代初, 由美国贝尔实验室首先提出, 之后波音公司对其进行了改造, 使它适用于计算机处理. 诊断的过程由系统的最终故障开始, 不断搜索原因, 构成倒立的故障树. 通过对故障树的启发式搜索就可以查找到故障的最终原因. 由于系统日趋大型化、复杂化, 因此目前的研究均使用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.

1.3.4 基于数据的故障诊断

多变量统计方法包括主元分析 (Principal Component Analysis, PCA)、偏最小二乘 (Partial Least Square, PLS)、独立元分析 (Independent Component Analysis, ICA) 和支持向量机 (Support Vector Machine, SVM), 已经广泛地应用于化工业过程检测中.

① PCA, 一种流行可靠的技术, 把相关联的测量提出并将噪声压缩成更小、更简单的子空间. 它通过一系列的线性函数表达测量数据, 线性函数模拟了测量变量和潜在变量之间的相互关系.

② PLS, 将有两个变量模块, X 和 Y , 投影到一个潜在空间, 常用来分析多变量工业数据, 尤其是产品质量数据.

③ ICA, 一种高阶统计方法, 把观测数据分解成统计独立元的线性组合. 它提取高阶统计量, 不仅使数据互不相关, 还降低了高阶统计的依赖性, 使提取的数据的分布尽可能的独立, 更适合于非正态分布系统. 然而, 基于 ICA 的线性投影不太适合表达有着非线性结构的数据.

④ SVM, 通过非线性映射输入向量到一个高维空间, 使用线性模型来执行非线性类边界. 虽然 SVM 是一种非线性技术, 但它有监督学习、计算简单的特点.

1.4 近年来的新理论

非线性系统的故障诊断和容错控制是当前故障诊断与安全性研究领域的热点与难点问题, 因此, 本书从如下三个方面介绍了近年来的新理论.

1.4.1 基于数据的故障诊断

近来, 由 Schölkopf 等人首次提出的 Kernel PCA (KPCA) 是一种新的 PCA 的非线性扩展. KPCA 在高维特征空间计算主元, 此高维特