

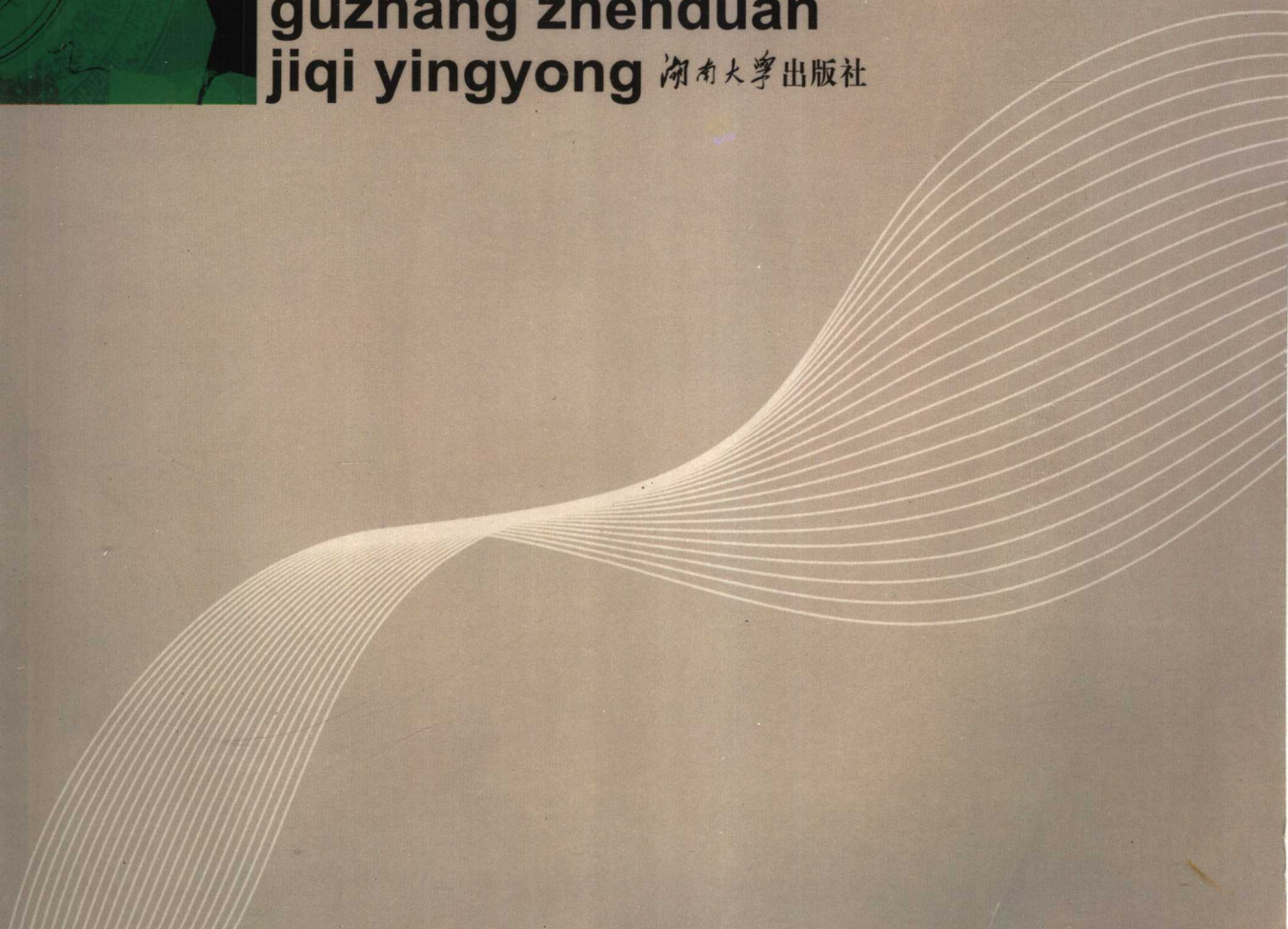
鄂加强 编著



智能故障诊断 及其应用

guzhang zhenduan

jiqi yingyong 湖南大学出版社



智能故障诊断及其应用

鄂加强 编 著

湖南大学出版社

2006 年 · 长沙

内 容 简 介

本书较系统地论述了故障诊断知识处理、故障征兆信号提取方法和神经网络、模糊理论与专家系统等人工智能理论,以及神经网络、模糊理论和专家系统等人工智能理论融合成的智能诊断系统在复杂工业设备故障诊断中的应用。

本书适合作为高等学校热能工程、动力工程、机电工程、控制工程以及冶金工程等专业的研究生或高年级本科生的教材,也可供热能工程、动力工程、机电工程、控制工程以及冶金工程等领域从事设备监测与诊断、维修的科研工作者与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能故障诊断及其应用/鄂加强编著. —长沙: 湖南大学出版社, 2006. 11

ISBN-7-81113-097-1

I. 智... II. 鄂... III. 人工智能—故障诊断

IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 122707 号

智能故障诊断及其应用

Zhineng Guzhang Zhenduan jiqi Yingyong

作 者: 鄂加强 编著

责任编辑: 卢 宇

封面设计: 吴颖辉

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山

邮 编: 410082

电 话: 0731-8821691 (发行部), 8821315 (编辑室), 8821006 (出版部)

传 真: 0731-8649312 (发行部), 8822264 (总编室)

电子邮箱: pressluy@hnu.cn

网 址: <http://press.hnu.cn>

印 装: 湖南大学印刷厂

开本: 787×1092 16 开

印张: 14.25

字数: 330 千

版次: 2006 年 12 月第 1 版

印次: 2006 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1~3 000 册

书号: ISBN 7-81113-097-1/TP·53

定价: 25.00 元

版权所有, 盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错, 请与发行部联系

前言

在复杂工业系统中,某一关键设备因为故障而无法继续运行,往往会波及整个生产流程的进行,而恢复整个生产流程的正常运行需要花费很长的时间,这将会造成巨大的经济损失。良好的智能故障诊断系统能通过复杂工业设备大量的运行状态信息对其进行实时故障诊断及报警,这将有利于操作人员及时地采取相应的调整措施来提高复杂工业设备运行状态的可靠性和安全性。

故障诊断技术是以可靠性理论、信息论、控制论和系统论为理论基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,结合各种诊断对象(系统、设备、机器、装置、工程结构以及工艺过程等)的特殊规律逐步形成的一门新技术。它的开发涉及现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别、人工智能等多门学科理论,具有诊断对象广泛、技术具体、工程应用性强以及与高技术紧密结合等特点。

早在20世纪60年代末与70年代初,在美国、英国和日本等少数工业发达国家,就掀起了现代设备故障诊断研究的热潮。现代设备故障诊断技术在工程中的应用,带来了显著的社会效应和经济效益。20世纪80年代中期以来,经过广大科技工作者的不懈努力,我国在现代设备故障智能诊断领域不仅取得了许多重要的理论研究成果,而且也积累了宝贵的工程实践经验。

现在国内有关故障诊断的教材不少,其中也不乏优秀之作,但作为研究生教材,在广度和深度方面尚不能完全满足教学需要。研究生课程学时较少,来自各专业的研究生参加了各种各样的科研任务,所提的问题非常广泛和深入,并希望教材有一定的广度和深度,以便他们进一步研究和应用,本书在此方面做了一些努力。

本书各章安排如下:第1章为绪论,介绍故障诊断的基本概念、故障诊断技术的发展与研究现状、与故障诊断方法和智能故障诊断技术未来发展相关的新技术、智能故障诊断系统发展的现状以及智能故障诊断系统的发展趋势;第2章从诊断知识的获取、诊断知识的表示以及基于知识的诊断推理等方面讨论故障诊断知识的智能处理方法;第3章从数值型征兆自动提取、语义型征兆的自动获取和图形征兆自动提取等方面论述故障征兆的自动提取理论与方法;第4章重点介绍前馈神经网络中的BP神经网络和径向基函数神经网络结构以及学习算法;第5章主要介绍专家系统的基本组成、知识库的建立和维护、全局数据库及管理系统、推理机和解释子系统设计;第6章从模糊理论的背景出发,对模糊集合论、模糊关系与模糊矩阵、隶属函数确定、模糊逻辑与模糊推理、模糊聚类分析、模糊综合评判和模糊模式识别等模糊理论基础进行系统介绍;第7章从信息融合技术的发展、信息融合系统的构成、信息融合技术的理论和方法、信息融合关键技术等几方面对信息融合技术进行介绍;第8章主要讨论支持向量机的发展概况、统计学习理论以及支持向量机的理论与方法;第9章主要介绍车用柴油机模糊故障专家系统的开发与应用实例;第10章主要介绍铜精炼炉神经网络故障诊断专家系统开发与应用

实例；第11章主要介绍煤粉锅炉燃烧系统模糊神经网络故障诊断专家系统的开发与应用实例；第12章主要介绍船舶柴油机冷却系统模糊逻辑推理故障诊断系统的开发与应用实例；第13章主要介绍油气输送管道故障融合诊断。在讲授过程中，可根据需要选择教学内容。

感谢湖南省科技攻关项目 [2002287]、湖南省教研教改项目、湖南大学国家“985”二期子项目（教重函〔2004〕1号）、湖南省自然科学基金项目 [06JJ50103] 等基金给予的部分资助。

应当说明的是，故障智能诊断是一门涉及多个领域技术、并且正在发展的新兴的综合性学科，虽然许多理论与方法问题已被研究多年，但完整的故障智能诊断的系统理论仍未达到成熟阶段，许多问题尚有待于进一步研究和探索，对其进行完整和系统的研究是一项艰巨而又困难的工作，因此本书在某种程度上仅能起到抛砖引玉的作用。希望有更多的科技工作者参加到智能故障诊断的研究和开发行列中来，以推动它的进一步发展。限于作者水平，书中错误遗漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

2006年7月

目 次

第 1 章 绪 论

1.1 故障诊断的基本概念	2
1.2 故障诊断技术的发展与研究现状	4
1.3 故障诊断方法概述	8
1.4 智能故障诊断技术未来发展的相关新技术	12
1.5 智能化故障诊断系统发展的现状	13
1.6 智能故障诊断系统的发展趋势	14
参考文献	15

第 2 章 故障诊断知识智能处理

2.1 诊断知识的基本概念	22
2.2 故障诊断知识的获取	23
2.3 诊断知识的表示	26
2.4 基于知识的诊断推理	38
参考文献	45

第 3 章 故障征兆自动提取

3.1 数值型征兆自动提取	46
3.2 语义型征兆的自动获取	51
3.3 图形征兆的自动提取	52
参考文献	55

第 4 章 神经网络模型

4.1 人工神经网络的发展历程	57
4.2 神经元模型	60
4.3 神经元互连模式	61
4.4 神经网络学习规则	63
4.5 前馈神经网络及其学习算法	64
参考文献	72

第 5 章 专家系统

5.1 专家系统的基本组成	74
---------------------	----

5.2 知识库的建立和维护·····	76
5.3 全局数据库及管理系统·····	78
5.4 推理机·····	78
5.5 解释子系统设计 ·····	80
5.6 基于规则的专家系统中的不精确推理·····	81
参考文献 ·····	82

第6章 模糊理论基础

6.1 模糊理论的背景·····	83
6.2 模糊集合论·····	84
6.3 模糊关系与模糊矩阵·····	86
6.4 隶属函数的确定·····	88
6.5 模糊逻辑与模糊推理·····	91
6.6 模糊聚类分析·····	93
6.7 模糊综合评判·····	94
6.8 模糊模式识别·····	95
参考文献 ·····	96

第7章 信息融合技术

7.1 信息融合技术的发展·····	97
7.2 信息融合系统的构成·····	98
7.3 信息融合技术的理论和方法 ·····	101
7.4 信息融合的关键技术 ·····	106
参考文献·····	108

第8章 支持向量机

8.1 支持向量机发展概况 ·····	109
8.2 统计学习理论 ·····	111
8.3 支持向量机的理论与方法 ·····	117
参考文献·····	121

第9章 车用柴油机模糊故障诊断专家系统

9.1 车用柴油机模糊故障诊断专家系统知识库设计 ·····	124
9.2 车用柴油机模糊故障诊断专家系统推理机设计 ·····	129
9.3 车用柴油机模糊故障诊断专家系统实现问题 ·····	136
参考文献·····	141

第 10 章 铜精炼炉神经网络故障诊断专家系统

10.1 铜精炼炉神经网络故障诊断专家系统知识库·····	142
10.2 铜精炼炉神经网络故障诊断专家系统推理机·····	150
10.3 铜精炼炉炉况故障智能诊断实现·····	155
参考文献·····	161

第 11 章 煤粉锅炉燃烧系统模糊神经网络故障诊断专家系统

11.1 锅炉炉况故障诊断研究现状·····	162
11.2 煤粉锅炉燃烧系统模糊神经网络故障诊断模型·····	164
11.3 煤粉锅炉燃烧系统故障知识库构建·····	174
11.4 煤粉锅炉燃烧系统故障诊断推理机设计·····	177
11.5 煤粉锅炉燃烧系统模糊神经网络故障诊断专家系统应用实现·····	180
参考文献·····	184

第 12 章 船舶柴油机冷却系统模糊逻辑推理故障诊断系统

12.1 船舶柴油机冷却系统模糊逻辑推理故障诊断系统总体规划·····	186
12.2 模糊器设计·····	189
12.3 解模糊器设计·····	190
12.4 模糊规则库设计·····	191
12.5 模糊推理机·····	194
12.6 船舶柴油机冷却系统模糊逻辑推理故障诊断系统实现·····	197
参考文献·····	199

第 13 章 油气输送管道故障融合诊断

13.1 油气输送管道故障诊断研究现状·····	200
13.2 油气输送管道 TPD 信号的初步分类研究 ·····	204
13.3 油气输送管道 TPD 定位诊断 ·····	207
13.4 基于证据理论的油气输送管道 TPD 融合诊断理论 ·····	209
13.5 油气输送管道 TPD 融合诊断原理 ·····	212
13.6 油气输送管道故障智能诊断应用·····	213
参考文献·····	218

第 1 章 绪 论

故障诊断 (Fault Diagnosis, FD) 始于机械设备的故障诊断, 其全名为状态监测与故障诊断 (Condition Monitor and Fault Diagnosis, CMFD)^[1]。在工程技术领域中, 对机械设备的运行状态进行诊断的技术至今已有很长的历史, 可以说几乎是与机器的发明同时产生的。最初, 机械设备较为简单, 维修人员主要靠感觉器官、简单仪表和个人经验就能胜任故障的诊断和排除工作, 这一般被称作传统的诊断技术。随着现代工业及科学技术的迅速发展, 生产设备日趋大型化、高速化、自动化和智能化, 而设备元器件的老化、日常维护的不足、系统应用环境的变化以及操作人员的失误等因素的影响又往往不可避免, 从而导致无论设计得多么精良的机械设备在运行时都可能产生故障, 造成巨大的财产损失, 甚至人员伤亡。传统的诊断技术在现代化设备故障诊断面前已经无能为力。近年来, 因关键设备故障而引起的灾难性事故时有发生^[2-6], 例如: 1984 年 12 月位于印度博帕尔市的美国碳化物公司农药厂发生毒气泄漏, 造成 2 000 多人死亡, 20 多万人受害, 成为世界工业史上最大的恶性事故; 1986 年 1 月 28 日, 美国航天飞机“挑战者号”因密封圈损坏、燃烧而引起空中爆炸, 导致 7 名宇航员全部遇难, 总计损失达 12 亿美元; 1986 年 4 月 27 日, 前苏联切尔诺贝利核电站的大量放射性元素外泄, 导致 2 000 余人死亡, 数万居民撤离, 损失达 30 亿美元。我国机械设备发生故障引起的损失也十分惊人, 如 1985 年大同电厂和 1988 年秦岭电厂的 200 MW 汽轮发电机组的严重断轴毁机事件; 1997 年北京东方化工厂乙烯装置发生爆炸, 直接经济损失约 10 亿元人民币。这些严重的或灾难性的事件不断发生, 迫使人们在设备诊断方面进行了大量的研究, 形成了机器设备、工程结构和工艺过程的故障诊断这一新兴的研究领域。国内外许多资料表明^[1,3], 开展故障诊断研究的经济效益是明显的。据日本统计, 采用机组设备的故障诊断技术后, 可使每年的维修费用减少 25%~50%, 故障停机时间减少 75%, 维修费降低 25%~50%; 英国对 2 000 个企业的调查表明, 采用故障诊断技术后每年节省维修费 3 亿英镑, 用于诊断技术的费用仅为 0.5 亿英镑, 净获利 2.5 亿英镑; 据美国统计, 每年工业设备定期维修费用约 2 500 亿美元, 专家估计其中“过剩维修”费用约占 750 亿美元。据有关部门统计, 我国每年用于设备维修的费用仅冶金部所属企业就达 250 亿元, 如果将故障诊断这项技术推广, 每年可减少事故 50%~70%, 节约维修费用 10%~30%, 效益相当可观。

故障诊断技术的最终目的是根据检测的信息特征判别系统的工况状态, 用来指导生产操作, 提高生产效率, 稳定生产运行状态, 分析故障原因, 防患于未然。在复杂工业系统中, 如果某一关键设备因为故障而无法继续运行, 往往会波及整个生产流程的进行, 而恢复整个生产流程的正常运行需要花费很长的时间, 从而造成巨大的经济损失。因此, 作为复杂工业过程及设备安全可靠运行的关键技术之一, 故障诊断技术具有极为重要的研究意义并受到了广泛的重视。

1.1 故障诊断的基本概念

一般来说,故障诊断对象可以是一个比较复杂的大系统(甚至是巨系统),也可以是一个简单的元件或部件(子系统)。严格地说,从不同的层次观察可对诊断对象有不同的划分。当无特别说明时,诊断对象都被视为系统,其诊断也就看做系统诊断。

所谓系统的故障,是指系统的运行处于不正常状态(劣化状态),并可导致系统相应的功能失调,即导致系统相应的行为(输出)超过允许范围,使系统的功能低于规定的水平,这种劣化状态称为故障。该定义具有以下特点:

(1)强调系统的输出(行为),从而有利于给出系统状态的测量途径。

(2)强调系统故障评判的多样性,即从系统的所有行为表现都可以进行评判。系统的输出是以多种方式表现:一些能直接表现系统的功能行为(称功能输出),一些则是实现系统功能时所附带产生的行为(称附加输出)。如发动机输出功率、缸体发热都是发动机的输出,前者是其功能输出,后者则是附加输出。

(3)强调对故障认识的主观性,即系统的状态“超过允许范围”是人参与的体现。

(4)该定义也不排斥客观性,即“超过允许范围”是一个诊断标准问题。一旦标准确立,则具有客观性与公正性。

对故障的分类目前还缺乏系统的方法,现在从不同角度给出以下几种分类方法^[3]:

(1)按故障发生的时间历程分,有突发性故障和渐进性故障。突发性故障在发生故障前不能提前测试与预测,并表现出随机性;而渐进性故障是由系统参数的逐步劣化产生的,这种故障能够在一定程度上早期预测,一般在其有效寿命的后期才表现出来。

(2)按故障存在的时间历程分,有间歇性故障和永久性故障。间歇性故障是系统功能输出或附加输出在短时间内超过规定界限的现象,如工业窑炉高温下工作时输送燃料管路阀门失控致使间歇性燃料过剩;永久性故障是系统功能输出或附加输出持续超过界限的现象,如发动机气缸磨损后引起异响等。

(3)按故障的显现状况来分,有潜在故障和功能故障。潜在故障是系统功能输出并未超过允许范围,但其附加输出已有明显的表现;功能故障则是系统的功能输出超过规定范围,一般是子系统的功能降低,严重的情况是零部件损坏。

(4)按故障原因分,有内在故障和环境故障。内在故障是系统内部各部分结构关系不协调或结构劣化引起的,如由于设计、制造和装配以及零件变形或子系统异常等引起的故障是内在故障;而环境故障是系统的输入异常引起的,是指其从环境中获得的能量、物质和信息异常,例如,发动机输入的燃料不足、海拔过高、驾驶员操纵失误等引起的发动机输出超界,这些都是环境故障。

故障的主要性质表现如下:①层次性:从系统论的观点看,系统是由“元素”按一定的规律聚合而成的。显然,系统是有层次的,故障的产生对应于系统的不同层次而表现出层次性;②时间性:系统故障的产生与表现常常与时间有关,并由其运行的动态性所决定,如渐进性故障、间歇性故障等;③相关性:复杂系统(如锅炉)是若干相互联系的子系统组成的整体,某些子系统的故障常常是由于与之相关子系统或下一级子系统故障传递所致,从

而表现出相关性;④模糊性:系统运行状态中存在着模糊性,在状态监测和技术诊断中也存在着许多模糊的概念及方法;⑤随机性:故障的发生常常和与时间紧密相关的随机过程有关;⑥未确知性:不同于故障描述的模糊性与随机性,由于主观条件的限制,在系统故障产生后,不能准确说明其发生的部位与原因,而它又确实已经存在,只是条件不足以完全感知;⑦相对性:系统故障与一定的条件和环境有关,不同环境条件下的故障表现以及对其描述与划分存在不一致性。

故障诊断是一种了解和掌握设备在使用过程中的技术原理,确定其整体或局部是否正常,早期发现故障及其原因并能预报故障发展趋势的技术。

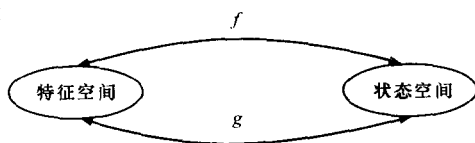
故障诊断有两种涵义:一种指利用某些专用的仪器来检测某些机械设备的运转是否正常;另一种是指由计算机利用系统的解析冗余完成工况分析,对生产是否正常和是什么原因引起的故障,故障的程度如何等问题进行分析、判断,得出结论。目前所说的故障诊断技术^[7]一般都是指后者,是20世纪70年代初期以来首先从美国发展起来的^[8-11]。这项技术诞生以后逐渐引起了学术界的关注,并且在近10多年来得到了迅速的发展,已经取得了许多应用成果^[12-26]。

故障诊断的基本思想一般可以这样表述,设被检测对象全部可能发生的状态(包括正常和故障状态)组成状态空间 S ,它的可观测量特征的取值范围全体构成特征空间 Y ,当系统处于某一状态 S 时,系统具有确定的特征 y ,即存在映射 g :

$$g: S \rightarrow Y.$$

反之,一定的特征也对应确定的状态,即存在映射 f :

$$f: Y \rightarrow S.$$



状态空间与特征空间的关系可用图1.1

表示。

图1.1 故障诊断描述

如果 f 和 g 是双射函数,即特征空间和状态空间存在一对一的单满射,则由特征向量可唯一确定系统的状态,反之亦然。故障诊断的目的在于根据可测量的特征向量来判断系统处于何种状态,也就是找出映射 f 。

若系统可能发生的状态是有限的,例如可能发生 n 种故障,这时把正常系统所处的状态称为 s_0 ,把存在不同故障的系统所处的不同状态称为 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 。当系统处于状态 s_i 时,对应的可测量特征向量为 $Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ 。故障诊断是由特征向量 $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$,求出它所对应的状态 s 的过程。因为一般故障状态并非绝对清晰的,有一定的模糊性,因此,它所对应的特征值也在一定范围内变动,在这种情况下,故障诊断就成为按特征向量对被测系统进行分类的问题或对特征向量进行状态的模式识别问题。因此,如图1.2所示,故障诊断实质上是一类模式分类问题,其过程有3个主要步骤:①检测设备状态的特征信号;②从所检测到的特征信号中提取征兆;③根据征兆和其他诊断信息来识别设备的状态,从而完成故障诊断。

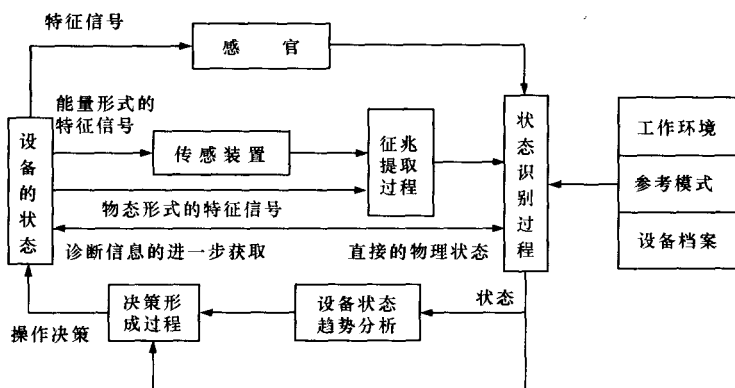


图 1.2 故障诊断过程简图

1.2 故障诊断技术的发展与研究现状

故障诊断技术是以可靠性理论、信息论、控制论和系统论为理论基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,结合各种诊断对象(系统、设备、机器、装置、工程结构以及工艺过程等)的特殊规律逐步形成的一门新技术。它的开发涉及现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别、人工智能等多门学科理论,具有诊断对象广泛、技术具体、工程应用性强以及与高技术紧密结合等特点。

故障诊断技术的任务包含以下 4 个方面内容。

(1)故障建模:按先验信息和输入输出关系,建立系统故障的数学模型,作为故障检测与诊断的依据。

(2)故障检测:判断系统中是否发生了故障并检测出故障发生的时刻。

(3)故障分离与估计:在检测出故障后确定故障的类型和位置,以区别故障原因是执行器、传感器和被控对象等或者是特大扰动;在弄清故障性质的同时,计算故障的程度、大小以及故障发生的时间等参数。

(4)故障的分类、评价与决策:判断故障的严重程度,以及故障对系统的影响和发展趋势,以便于针对不同的工况采取不同的措施,其中包括保护系统的启动。评价一个故障诊断系统性能的指标主要有: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。

故障诊断技术大体由 3 部分组成。

(1)故障机理研究:主要包括诊断对象的物理和化学过程的研究。例如对引起电气、机械部件失效的腐蚀、蠕变、疲劳、氧化、绝缘击穿、断裂、磨损等理化原因的研究;对流程工业的工艺过程、工艺特性及其各类故障特性和征兆的研究。只有研究诊断对象的故障机理才能有效地分清导致故障的主次因素,为准确地判断故障、确诊故障提供可靠的依据。

(2)故障信息的研究:主要包括故障信号的采集、选择、处理与分析,特征提取等过程。

例如通过传感器采集生产设备运行中的信号(如温度、转速),再经过时域和频域上的分析处理来识别和评价设备所处的状态或故障。作为故障诊断技术中不可缺少的环节,研究适当的故障信号检测方法是发现故障信息的重要手段。

(3)故障诊断理论和方法的研究:主要包括基于逻辑、模型、推理以及人工智能等方法对故障的识别、推理、预测、分类、评价与决策等方面的研究。采用合适的方法,根据诊断对象的可检测故障表征进行分析和推理,识别故障并推理故障的发展趋势以确定下一步的检测部位,最终分析判断故障发生的部位和产生故障的原因,并形成正确的干预决策。作为故障诊断技术的核心研究内容,故障诊断理论和方法既是完成并实现故障诊断技术任务和目的的主要途径,亦是故障诊断领域的主要研究方向和长久不衰的研究热点。虽然诊断理论和方法已经有很多种,但仍有待于进一步发展和完善。同时还应深入研究新理论和新方法的应用。

1.2.1 故障诊断技术的发展历史

故障诊断技术起源于19世纪产业革命时期。综观其发展的历史过程,可以将它按以下4个阶段划分^[2]:

(1)原始诊断阶段:19世纪末至20世纪初,是故障诊断技术的产生阶段。在此阶段,个体专家依靠感官获取设备的状态信息,并凭借其经验作出直接判断。这种方法非常简便,在一些简单设备的故障诊断中显得经济、实用。

(2)基于材料寿命分析与估计的诊断阶段:20世纪初至20世纪60年代,由于可靠性理论的产生和应用,使得人们能够依靠事先对材料寿命的分析与估计以及对设备材料性能的部分检测来完成诊断任务。

(3)基于传感器与计算机技术的诊断阶段:这也是目前所处的比较成熟的发展阶段,这一阶段开始于20世纪60年代中期。由于传感器技术的发展,使得对各种诊断信号和数据的测量变得容易;计算机的使用,弥补了人类在数据处理上的低效率和不足,这种建立在信号测试基础上的诊断技术,目前广泛应用于钢铁、船舶、核设备等许多领域。

(4)智能化诊断阶段:智能化故障诊断技术是现代设备诊断技术发展的必由之路,虽然它已有30多年的发展历史,但实践证明,这一技术的发展还远远不能满足实际需要,还未形成一个比较系统和完整的理论体系。在智能故障诊断系统的概念体系、知识表示方法、推理策略、系统的开发策略与方法、面向对象技术的应用、不确定性系统理论的应用、神经网络技术的应用等许多方面有待于做深入系统的研究。人工智能技术的发展,特别是专家系统在故障诊断领域中的应用,为设备故障诊断的智能化提供了可能性,也使诊断技术进入了新的发展阶段;原来以数值计算和信号处理为核心的诊断过程被以知识处理和知识推理为核心的诊断过程所代替。目前已有了一些较成功的系统。故障智能诊断是当前诊断技术的发展方向,为此,人们对基于知识的诊断技术和诊断系统进行了深入的研究。

从世界范围来看,美国是最早研究故障诊断技术的国家。早在1967年,在美国宇航局和海军研究所的倡导和组织下,成立了美国机械故障预防小组,开始有计划地对故障诊断技术分专题进行研究。30多年来已召开数十次学术交流大会。在此期间,很多学术机

构、政府部门以及高等院校和企业都参与或进行了与本企业有关的故障诊断技术研究,并取得了大量的成果。目前美国的故障诊断技术在航空航天、军事、核能等尖端技术领域仍处于领先地位^[2]。英国对设备故障诊断技术的研究始于20世纪60年代末,以R. A. Col-lacot博士为首的英国机器保健中心,在宣传、培训、咨询及诊断技术的开发方面做了大量的工作,并取得了很好的效果。目前,英国在摩擦磨损、汽车、飞机发动机监测和诊断方面具有领先优势。日本的诊断技术研究始于20世纪70年代中期,1971年新日铁以丰田利夫教授为首率先开展对故障诊断技术的研究,到1976年已达到实用的阶段。尽管日本的起步较晚,但发展很快,其做法是密切注视世界各国的发展动向,特别注意研究美国故障诊断技术的发展,积极引进消化最新技术。目前,日本在钢铁、化工、铁路等民用工业方面的诊断技术处于领先地位。

故障诊断技术的研究在我国起步较晚,从20世纪70年代末期开始,广泛的研究则从20世纪80年代开始发展起来^[27-29],随后在各领域分别确定了设备诊断的目标、方向和试点单位。尽管我国设备诊断技术的研究起步较晚,但发展还是比较快的。目前,故障诊断技术在我国化工、冶金、电力、铁路等行业得到了广泛的应用,取得了可喜的成果。在基于知识的设备故障诊断技术的研究方面也取得了长足的进展。应当看到,诊断技术发展的历史并不长,诊断理论的诸多问题还未得到解决,特别是基于人工智能技术的故障智能诊断理论,远未达到成熟阶段,尚有许多问题有待于研究。

1.2.2 故障诊断技术研究现状及发展趋势

目前,故障诊断技术的研究大部分仍然停留在具有应用背景、计算机仿真或实验阶段,成功地应用于实践的实例仍属少数。究其原因,是因为大多数的故障诊断算法都是建立在一定量理想假设的情况下的,如故障算法中假设系统是线性的、系统没有外部干扰,或者系统的模型参数是不变的。因此,当这些故障算法应用于实际时,经常会发生故障误报或漏报的现象,以至于很难有实用价值。

故障诊断技术能应用于工程实际,一个必须解决的问题是故障诊断算法的鲁棒性,即故障诊断系统对故障具有高度敏感的同时,具有对噪声、干扰及建模误差的不敏感性。目前,故障检测的敏感性及鲁棒性问题的研究已经成为故障诊断领域的一个前沿课题。

在我国,经过专家学者们近10多年的努力,目前有许多研究成果得到了国际同行的首肯^[30],其中有基于数学模型的方法、基于信号处理的方法和基于人工智能的方法。

1.2.2.1 基于数学模型的方法

(1)强跟踪滤波器的方法^[31-33]:基于强跟踪滤波器理论,提出了一种高度系统化的参数偏差型故障检测及诊断方法,并应用于一类非线性时变随机系统,得到了一套系统检测、诊断这类系统部件、执行器故障和传感器故障的有效方法。故障类型可以是阶跃型、缓慢漂移型,在特定条件下可以是脉冲型。在国际上还首次得到了一种非线性系统故障幅值的在线估计方法,为进一步实现容错控制创造了条件。

(2)参数跟踪自适应观测器的方法^[34]:对系统状态进行观测,得到状态偏差方程和系统偏差方程。针对观测器与实际对象参数不匹配的情况,提出了一种自适应参数跟踪观测器的设计方法,使得观测器跟踪对噪声不敏感,而对实际对象的状态又能很好地估计。

然后基于这个观测器进行自适应参数跟踪设计,产生状态与系统残差,进行系统的故障诊断。

(3)大系统的故障诊断方法^[35-37]:文献[38]提出一种故障检测方案,通过构造一组全阶未知输入观测器来估计局部状态,而这些局部估计无须任何局部信息,这些观测器的残差被用于故障检测。文献[39]用 Patton^[40]的特征结构配置方法,去除动态交联项与故障残差的耦合,便于进行故障诊断。

(4)鲁棒故障诊断法:文献[39]利用 Clark 的奉献观测器的思想^[41],提出了一种两级故障诊断方法,通过局部、整体联合检测,提高了诊断的鲁棒性;文献[42]针对系统模型含有不确定性误差、传感器增益漂移,给出一种辅助系统产生故障特征信号,然后采用拟合的方法,从观测器残差中提出故障信息。

1.2.2.2 基于信号处理的方法

(1)基于 s 算子的方法^[43]:基于 s 算子构造 Hilbert 空间中的最小正交二乘投影算子,推导出完整的格型滤波器算法,用后向预测误差向量的首位元素作为包含系统故障信息的残差,考虑到工程信号不可避免地会受到噪声污染,引用自适应噪声抵消技术,使残差仅对故障敏感。

(2)基于小波变换的方法^[44-49]:基于连续小波变换的信号奇异性检测方法与基于连续小波变换的动态系统特性的描述结合起来进行故障检测;基于离散正交小波变换的信号时域分析原理,通过分析观测信号的频谱随时间的变化情况来检测故障;根据脉冲响应函数的小波变换在大尺度下的少数几个关键系数进行故障检测^[50]。

(3)基于信息融合的方法^[51]

为了充分利用检测量所提供的信息,在可能的情况下,对每个检测量采用多种诊断方法进行诊断,将各诊断方法得到的结果加以综合,用模糊推理的方法或用 Mary 理论^[52]进行决策。

(4)信息校核的方法^[30]:在许多控制系统的故障诊断中,都没有考虑信息校核的方法。实际上系统的信息校核是进行故障诊断时比较简单有效的方法。因为信息是进行系统过程监测的依据,所以利用错误的信息去进行计算和推理是徒劳无益的,相反还会得出错误的结论。该方法依据物料平衡与能量平衡等物理化学规律及数理统计知识来进行信息的校核。信息的矛盾一般意味着信号获取上的故障或矛盾。

(5)工艺参数的判断方法:在过程控制系统中,常常需要对工艺参数做出判断。工艺参数的正常与失效和过程模型精度、信息污染程度及具体工艺要求有密切的关系。只有深入了解工艺过程,才能根据具体情况给出合适的数值,根据工艺的具体要求把工艺参数数值区域分为满意区、合格区和故障区^[40]。对不同的区域采取不同的监测方式,可以提高监测系统的有效性。

(6)统计检验方法:文献[53]研究了均值检验的分离的方法,提出通过求取最优性能指标得到分离故障的检测量,该方法可以扩展到检测两个或更多传感器出现故障的情况。

1.2.2.3 基于人工智能的方法

(1)基于神经网络的方法^[54-58]:神经网络具有处理复杂多模式及进行联想、推理和记忆的功能。目前国内学者将其用于故障诊断时,先计算匹配度,然后将其送到第二级输

出,再反馈到网络第一级,用学习算法训练相应的网络权值。重复上述过程直至达到期望目标为止。当输入的故障征兆信息出现残缺时,能够恢复和联想。基于神经网络的故障诊断技术分为离线和在线两种方法。

(2)基于图论的模型推理方法^[52,59]:基于图论方法的故障诊断技术实质上是根据一个实际系统中各个元件之间所存在的非常普遍的故障传播关系构成故障诊断网络,利用搜索和测试技术进行故障定位^[60]。该方法已在大型工业过程和空间飞行器等领域得到了应用。

(3)基于专家系统的方法^[61-63]:基于专家系统方法的故障诊断技术是目前国内最活跃的研究领域。近年来的主要研究进展有:机器学习的研究^[64],学习系统根据知识库中已有的知识、用户对系统提问的动态应答及故障示例等,采用各种学习方法来得到新的知识以提高系统性能^[65];自适应诊断专家系统研究^[66];基于规则的产生式系统与神经网络方法相结合,利用神经网络的自适应和自学习功能,克服传统专家系统不能用于非线性领域的弱点,取得了一系列的研究成果^[67-68];基于信息的专家系统研究^[69];将时态推理技术引入专家系统,建立基于时态推理的故障模型^[70]。值得一提的是近年来国内基于深知识模型的故障诊断正在逐渐引起人们的兴趣,它具有浅知识模型所没有的许多优点^[71-74]。

(4)组合智能故障诊断方法^[75-81]:专家系统的知识处理模拟的是人的逻辑思维,神经网络的知识处理模拟的则是人的经验思维(即模式类比,也叫形象思维)机制。在人类自身的思维过程中,逻辑思维和经验思维巧妙结合而成为有机整体,因此将专家系统与神经网络结合组成的故障诊断方法能够有效地对系统进行诊断。

1.3 故障诊断方法概述

故障诊断学作为一门综合性学科,还是近些年发展起来的,它涉及现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊理论、信号处理、模式识别和人工智能等多门学科。从不同的角度,故障诊断具有不同的分类方法。按照国际故障诊断权威,德国 Frank 教授的观点^[82],所有的故障诊断方法可以划分为基于信号处理的方法、基于解析模型的方法和基于知识的方法。当可以建立比较准确的被控过程的数学模型时,基于解析模型的方法是首选的方法;当可以得到被控过程的输入输出信号,但很难建立被控对象的解析数学模型时,可采用基于信号处理的方法;当很难建立被控对象的定量数学模型时,可以采用基于知识的方法。下面分类加以介绍。

1.3.1 基于解析模型的故障诊断方法

基于解析模型的方法是最早发展起来的,此方法需要建立诊断对象的较为精确的解析模型。它又包括参数估计法、状态估计法和等价空间法^[83-95]。其主要诊断思路是:利用观察器和滤波器对系统的状态和参数进行重构,并构成残差数列,然后采取相应的措施来增强残差数列中所包括的故障信息,抑制模型误差等非故障信息,通过对残差数列的统计分析就可检测出故障的发生并进行故障的诊断。复杂的系统一般是非线性系统,因此

系统的解析模型很难建立起来。

1.3.2 基于信号处理的故障诊断方法

这类方法不需要建立诊断对象的精确数学模型,包括利用 Kullback 信息准则检测故障方法、基于小波变换以及经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法的故障诊断方法、谱分析法、概率密度法等^[96-107]。其主要诊断思路是:系统的输出在幅值、相位、频率及相关性上与故障之间会存在一定的联系,这些联系可以用数学形式来表示。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。

1.3.3 基于知识的方法

当前的控制系统变得越来越复杂,不少情况下要想获得系统的精确数学模型是非常困难的,而基于知识的方法不需要精确的数学模型,因此具有很好的应用前景。同时基于人工智能的诊断方法还具有以下优点:①适合用于模拟人的逻辑思维过程,解决需要进行逻辑推理的复杂诊断问题;②知识可用显式的符号表示,在已知基本规则的情况下,无须输入大量的细节知识;③便于模块化,当个别事实发生变化时易于修改;④能与传统的符号数据库进行接口;⑤能解释自己的推理过程,并解释结论是怎样获得的。

但是基于知识的诊断方法也存在着明显的局限性,主要表现为:①知识获取的瓶颈问题。专家的某些经验知识往往只能意会,不能言传,很难用一定的规则来描述。因此把专家的经验知识以适当的方式组织成高质量的知识库是很困难的,这已成为研制基于知识的专家系统的瓶颈问题。②自适应能力差。许多知识处理诊断系统通常以专业领域的经验为基础,对那些超出系统所拥有的专业领域经验知识的问题,即使问题所涉及的知识与现有专业知识有细微的差别,诊断系统也得不出结论,甚至会出现错误的结论。③学习能力差。专家的经验知识在不断地积累,而目前的知识处理诊断系统大多缺乏学习能力,限制了系统的自我完善和提高。

基于知识的故障诊断方法主要有以下几种:

(1)基于故障树的诊断方法^[108-110]:故障树分析法是把所研究系统的最不希望发生的故障状态作为故障分析的目标,然后寻找导致这一故障发生的全部因素,再找出造成下一事件发生的全部直接原因,一直追查至无需再深究的因素为止。这些因素构成了一棵倒立的故障树。

故障树分析法将系统故障形成的原因从总体至部分按树状一级级细化。因为这种方法简单,概念清晰,容易被人们接受,所以它是对动态系统的设计、工厂实验或现场设备工况状态进行分析的一种较好的工具。

(2)基于模糊理论的诊断方法^[111-112]:客观世界中一方面存在一些精确的概念和现象,另一方面也存在许多模糊的概念与现象。因为这些概念的外延没有明显的边界,所以它们难以用经典的二值或多值逻辑来描述。在故障诊断中,“故障”状态与“正常”状态之间也没有完全确定的界限,它们之间存在着一些模糊的过渡状态。无论是现象的获取、现象到故障的推理,还是诊断的基本原理,这三个方面都存在着模糊性,因此可以采用模糊理论方法来进行故障诊断。应该指出的是,基于模糊理论的模糊逻辑本身并不模糊,而是