

## 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

# 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)<sup>[1]</sup>。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<sup>[2-6]</sup>, 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<sup>[1,3]</sup>, 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<sup>[3]</sup>:

(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。

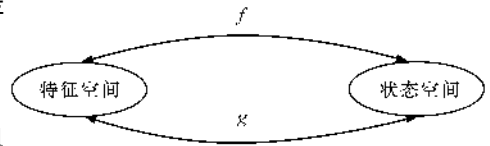
故障诊断有两种涵义：一种指利用某些专用的仪器来检测某些机械设备的运转是否正常；另一种是指由计算机利用系统的解析冗余完成工况分析，对生产是否正常和是什么原因引起的故障，故障的程度如何等问题进行分析、判断，得出结论。目前所说的故障诊断技术<sup>[7]</sup>一般都是指后者，是 20 世纪 70 年代初期以来首先从美国发展起来的<sup>[8-11]</sup>。这项技术诞生以后逐渐引起了学术界的关注，并且在近 10 多年来得到了迅速的发展，已经取得了许多应用成果<sup>[12-26]</sup>。

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。

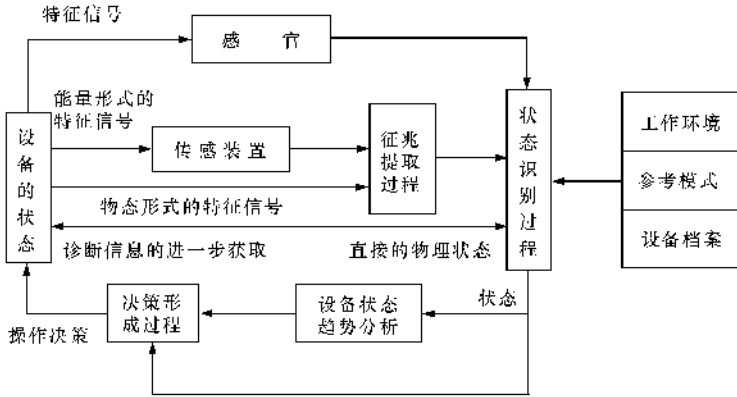


图 1.2 故障诊断过程简图

## 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<sup>[2]</sup>:

(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<sup>[2]</sup>。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<sup>[27-29]</sup>,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的化工、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<sup>[30]</sup>,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<sup>[31-33]</sup>: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<sup>[34]</sup>: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<sup>[35-37]</sup>: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<sup>[40]</sup>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<sup>[41]</sup>,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<sup>[43]</sup>: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<sup>[44-49]</sup>: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<sup>[50]</sup>。

#### (3)基于信息融合的方法<sup>[51]</sup>

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<sup>[52]</sup>进行决策。

(4)信息校核的方法<sup>[30]</sup>: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<sup>[40]</sup>。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<sup>[54-58]</sup>: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<sup>[52,59]</sup>;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<sup>[60]</sup>。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<sup>[61-63]</sup>;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<sup>[64]</sup>,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<sup>[65]</sup>;自适应诊断专家系统研究<sup>[66]</sup>;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<sup>[67-68]</sup>;基于信息的专家系统研究<sup>[69]</sup>;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<sup>[70]</sup>。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<sup>[71-74]</sup>。

(4)组合智能故障诊断方法<sup>[75-81]</sup>;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<sup>[82]</sup>,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<sup>[83-95]</sup>。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<sup>[96-107]</sup>。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,主要表现如下: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<sup>[108-110]</sup>: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<sup>[111-112]</sup>: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

用来对“模糊”进行处理以达到消除模糊的逻辑。事实上,模糊逻辑本身也是一种精确的方法,只是其处理的对象是一些不精确、不完全的信息。它的最大特点是能够比较自然地处理人类的语言信息和知识。许多故障诊断问题最终都可以归结为模式识别的问题,基于模糊理论的故障诊断方法实质上也是一种模式识别问题,根据所提出的征兆信息来识别系统的状态是诊断过程的核心。模式识别的内容十分丰富,其基本原则有“择近原则”与“最大隶属度原则”两种。

(3)基于专家系统的故障诊断方法<sup>[61-63]</sup>;专家系统实质上是应用大量人类专家的知识 and 推理方法求解复杂的实际问题的一种人工智能计算机程序。它主要由专家知识库(诊断规则库)、数据库、推理机(推理算法)、解释程序、知识获取等部分组成。专家系统故障诊断主要是在专家知识库、数据库的基础上,通过推理机综合利用知识库中的知识,按一定的推理方法去逐步推理,诊断出故障原因。它具有能汇集众多的专家知识对随机发生的故障进行诊断等优点。其主要缺点是知识获取困难、知识库更新能力差、多个领域专家知识之间的矛盾难于处理、现有的逻辑理论的表达能力和处理能力有很大的局限性,使得基于规则的专家系统有很大的局限性。

(4)基于神经网络的诊断方法<sup>[113-121]</sup>;神经网络是一个大量简单的处理单元广泛连接组成的复合网络,是利用现代神经生理学和心理学研究人脑组织所取得的成果提出来的。神经网络技术代表了一种新的方法,它以分布的方式存储信息,利用网络的拓扑结构和权值分布实现非线性的映射,并利用全局并行处理实现从输入空间到输出空间的非线性信息变换。对于特定问题适当建立的神经网络故障诊断系统,可以从输入数据(故障症状)直接推出输出数据(故障原因),从而实现故障检测与诊断。神经网络故障诊断方法存在以下缺点:①训练样本获取的困难性。神经网络故障诊断建立在大量的故障样本训练基础上,系统性能受到所选训练样本的数量及其分布情况的限制,如果样本选择不当,特别在训练样本少、样本分布不均匀的情况下,很难得到良好的诊断能力。②对于复杂的系统,网络节点数较多,因而训练所需要的计算量大,耗费时间较多。③基于神经网络的诊断方法无法对诊断结果做出解释。

(5)基于灰色理论的诊断方法<sup>[122-124]</sup>;设备故障的灰色诊断是应用灰色系统的理论对故障的征兆模式和故障模式进行识别的技术。灰色系统理论认为,在客观世界中,既有大量的已知信息,也有不少未知、不确定的信息。未知、不确定的信息是黑色的,已知的信息称为白色的,既有未知信息又有已知信息的系统称为灰色系统。大多数运行的机械设备系统发生故障时,必然有一些征兆,但也有不是全知的征兆,都具有灰色系统的特征。故障诊断就利用已知的信息去认识这个包含未知信息的系统的特征、状态和发展趋势,并对未来作出预测和决策,来完成故障诊断的任务。

(6)基于传统人工智能的融合技术的诊断方法<sup>[125-130]</sup>;所谓传统人工智能方法是指建立于20世纪60年代到20世纪80年代之间的人工智能技术,包括模糊逻辑、专家系统、神经网络和遗传算法等,这种称谓是相对于近期在国际上引起研究高潮的支持向量机而言的。各种智能诊断方法各有优劣,从而使得诊断专家们纷纷开展各种集成方法的研究,并在集成研究中不断融入各种技术,如信息熵理论、小波变换、遗传算法、混沌理论等。目前主要融合方式为:

①专家系统与神经网络的集成:专家系统和神经网络从其本质上讲是密切相关的,犹如人的左右两个半球:专家系统适合逻辑,如人的左半球;神经网络长于形象思维,相当于人的右半球。因而它们的有效集成能起到优势互补的作用,使得建立的诊断系统同时具有很强的学习能力、鲁棒性、解释能力和推理能力。

专家系统与神经网络的融合方式有两种,其一是构造基于神经网络的专家系统,整个诊断系统就是一个神经网络;其二是将神经网络作为一种知识表示方式,和其他知识表示方式一起构成整个诊断系统的知识库。

②模糊系统与神经网络的集成:在诊断领域,模糊逻辑理论和神经网络技术在知识表示、知识存贮、推理速度及克服“知识窄台阶”和“组合爆炸”等方面起到了很大的作用,但由于它们各有侧重,互有优劣,因而一种自然的想法就是对它们进行集成,使之兼备神经网络和模糊系统的优点。

模糊系统与神经网络的集成方法有两种:一是以模糊系统为主,使建立的模糊神经网络与一个模糊系统相对应;二是使传统神经网络模糊化,使其处理模糊信息。

③遗传算法与神经网络的集成:在故障诊断中,遗传算法与神经网络的融合方式通常以神经网络为基础,遗传算法的作用有二:一是优化神经网络结构;二是训练神经网络,克服神经网络训练中经常出现的局部最小问题。

(7)基于核方法的故障诊断方法:核方法<sup>[131-132]</sup>能够实现数据空间到特征空间的非线性变换,采用不同的核函数可以满足不同的非线性变换的要求。由于在很多数据处理问题中都包含向量的内积运算,因此,核方法有着广泛的应用前景。

核方法的优势在于数据空间中难以处理或处理效果不好的问题在特征空间中变得容易处理或处理效果相对好些。核方法的迷人之处在于由数据空间到特征空间之间的映射非常复杂,然而设计需要的计算却是相对简单得多的核函数运算。

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)从本质上讲是一种核方法,它诞生于1995年。最近10年,国外人工智能界已将SVM作为一大研究热点,但由于开展研究的时间不长,所取得的成果还不是很系统。在学习样本数较少的情况下,支持向量机分类方法比BP神经网络分类方法具有较强的适应性、更好的分类能力和更高的计算效率。且该方法不需要对数据进行预处理就可达到满意的效果,为设备故障诊断提供了很好的数据实时处理的手段。表明该方法在故障诊断领域具有很好的应用前景。支持向量机的应用为故障诊断向智能化方向发展提供了一条新的途径<sup>[133]</sup>。

近几十年来,以解析冗余为指导的控制系统故障诊断技术得到了深入研究,取得了大量的理论成果<sup>[134-138]</sup>。但是,与其他较为成熟的理论成果相比,其应用研究亟待加强。目前,基于人工智能的故障诊断及应用研究较基于数学模型的方法有所增长。仍然有待研究的问题有:

- (1)多输入输出系统故障诊断,其系统中存在两个以上故障时的检测与辨识。
- (2)基于人工智能的方法,研究分布式、层次性的故障推理。
- (3)研究模糊故障树、模糊理论与图论理论结合的故障诊断推理方式。
- (4)具有未建模动态、外部干扰影响较大系统的故障诊断研究。
- (5)由于实际诊断问题的复杂性,不能寄希望于任何一种单一的方法就能解决所有问

题,基于人工智能的方法和数学模型方法作为两种有代表性的控制系统故障诊断方法,如能结合起来,其意义将是深远的。

(6)根据实际工程的需要,开发出实用的工程故障诊断系统软件,使我国自动控制系统向高可靠性发展。

## 1.4 智能故障诊断技术未来发展的相关新技术

人工智能在故障诊断领域的应用,实现了基于人类专家经验知识的设备故障诊断技术,并且将其提高到一个新的水平——智能化诊断水平。

### 1.4.1 机器学习

对于机器学习,目前众说纷坛。一般认为,学习是一个有特定目的的知识获取过程,从学习的内在行为看,是从未知到知的过程,是知识增加和积累经验的过程;从外在表现看,学习是使系统改进性能、适应环境,使其在下次完成同样的或类似的任务时比前一次更有效。

当前机器学习已成为人工智能的核心,它的应用遍及人工智能的各个领域,特别是专家系统、模式识别、计算机视觉等。学习是一切智能行为的基础,但是现存的智能系统都普遍缺乏学习的能力。例如,当它们遇到错误时,不能自我改正;它们不会通过经验改善自身的性能,它们不能自动产生合理的启发式方法和推理策略;它们的推理只限于演绎而缺乏归纳,因此它们至多能够证明已存在的事实、定理,而不能发现新的定律、定理。为了克服这些局限性,人工智能不得不求助于机器学习。

因为通过机器学习,智能系统往往可以克服知识获取瓶颈问题、知识脆弱性问题,克服知识库过于庞大和非结构性问题、求解方法单一问题以及系统直觉判断能力差的问题。

### 1.4.2 智能计算机

所谓智能计算机就是用来模拟、延伸、扩展人类智能的一种新型计算机。它与目前人们使用的冯·诺伊曼型计算机相比,无论在体系结构、运行模式还是功能上都有本质的不同。传统的冯·诺伊曼型计算机虽然在科学与工程计算、工程控制与现代化管理等领域取得了惊人成就,极大地推动了人类社会与科学技术的发展与进步,但与人脑相比,冯·诺伊曼型计算机存在着如下一些局限性:

(1)冯·诺伊曼型计算机的数据处理与存储是完全分离的,在处理器与存储器之间仅仅通过一条狭窄的通道逐字地交换数据,与大脑中记忆与思维合一及信息分布的方式不一致,不能满足模拟人类记忆与思维的需要。

(2)目前计算机的工作方式不是像串行与并行共存且以并行为主的人的思维过程一样,而是顺序的、串行的,它们所能执行的算法都是串行算法。当需要计算机求解问题时,必须事先用某种程序设计语言编制程序,具体地指出先做什么,后做什么以及怎样做,计算机只能按程序规定的次序顺序地执行,只能完成程序指定的工作。

(3)目前的计算机是基于两态逻辑,任何数据或符号在计算机内部都是用二进制表示

的。因此,需要用计算机求解的问题必须先转化为一系列的布尔代数运算,这样才能在计算机上实现。对于不确定性信息的处理,还需要从软件上想办法,这就增加了软件设计的复杂性及难度。

(4)目前在计算机上进行处理的问题都必须表示为一串符号序列,并且还要给出处理这些符号的规则,它们所能解决的问题仅仅局限于逻辑思维所能解决的问题范畴内,对于那些需要形象思维的问题,只能望尘莫及。

(5)目前计算机也不能像人一样具有多种形式的表达能力及行为能力,以及能对外部刺激及时作出反应。

根据研究,人类大脑的左半脑和右半脑是有分工的,左半脑承担推理思考,右半脑承担感知、认识、学习。目前的冯·诺伊曼型计算机,从模拟人类大脑的功能方面看,属于承担推理思考能力、进行数值计算的左半脑型,可以说是人类大脑的延伸,但在视觉、听觉、触觉及形象思维方面的功能特别差,与人类大脑相比还相差甚远。智能计算机应该是一个包括“左半脑”计算机和“右半脑”计算机在内的,更接近人类智能的完整计算机系统。为了实现人类智能在计算机上的模拟、延伸、扩展,必须对其体系结构、工作模式、处理能力、接口方式等进行彻底的变革,这样造出来的计算机才能称为智能计算机。然而,至今人类对大脑的认识还很肤浅,智能计算机不是一朝一夕就可以实现的,许多问题需要今后的科学家去探索。

智能计算机的研究目标大体上是:

(1)像人脑一样能进行自然信息/数据的处理,而不像现代(第4代)计算机那样,单纯地把信息和数据数字化(二值)后再进行计算或处理。

(2)像人脑一样,处理的信息/数据既可取数字形式,也可取模拟形式。

(3)像人脑一样采用并行、分布的模式处理信息/数据。

(4)信息/数据存储及处理的硬件均采用分布式、密集式互连的巨量处理机的构架。

近年来,为了实现上述要求,让计算机模仿人脑的方式来处理自然信息,各经济发达国家开展了人工神经网络的研究。人工神经网络是采用大量的、比较简单的人工神经元作为基本单元,依靠单元之间复杂繁多的连接关系构成具有良好功能的网络。它是一种动态非线性系统,以分布式存储和广泛并行协同处理为特征,具有容错、联想记忆、自学习进化等特性。同冯·诺伊曼型计算机相比,人工神经网络在人工智能和形象思维等相关领域具有明显优势,被公认为解决下一代(第6代)智能型计算机的主要途径。

根据实现人工神经网络计算机的不同技术,可把它分为电子神经网络计算机、光学神经网络计算机和生物分子计算机等类型。

## 1.5 智能化故障诊断系统发展的现状

### 1.5.1 智能化故障诊断系统的发展现状

智能化故障诊断系统的发展历史虽然短暂,但在电路与数字电子设备、机电设备、军事设备、船舶等方面的应用已取得了令人瞩目的成就<sup>[1-2]</sup>。

在电路和数字电子设备方面,麻省理工学院研制了用于模拟电路操作并演绎出故障可能原因的电路系统等;美国海军人工智能中心开发了用于诊断电子设备故障的系统;波音航空公司研制了诊断微波模拟接口的系统;意大利米兰工业大学研制了用于汽车启动器电路故障诊断的系统。

在机电设备方面,如日本日立公司研制了用于核反应堆的故障诊断系统;法国 CGE 研究中心研制了旋转机械故障诊断专家系统;美国通用电气公司研制了用于内燃电气机车故障诊断的专家系统;华中理工大学研制了用于汽轮机组工况监测和故障诊断的智能系统;哈尔滨工业大学和上海发电设备成套设计研究所联合研制了汽轮发电机组故障诊断专家系统 MMMD-2;清华大学研制了用于锅炉设备故障诊断的专家系统等。

在军事设备方面,故障智能诊断技术应用较多的领域是导弹武器系统,较有代表性的系统是美国佛罗里达空军基地研制开发的系统 EMMA 和美国马里兰大学计算机系研制开发的系统 AMM<sup>[1]</sup>。

### 1.5.2 现有智能化故障诊断系统存在的问题

(1) 知识库庞大:目前故障智能诊断系统大多采用产生式规则来表示专家的经验知识。为了使诊断系统达到高效、实用的目标,必然需要大量的专家经验知识组成庞大的知识规则库。

(2) 解决问题能力的局限性:由于受到系统中知识的限制,大多数诊断系统只能解决狭窄的专家知识领域以内的问题,而对其他领域的知识通常是一无所知的。这使它的解决问题的能力受到很大的限制。

(3) 深、浅知识结合能力差:在具体故障智能诊断系统中,系统在实现某领域的基本原理和专家知识相结合时表现出较差的能力。

(4) 自动获取知识能力差:目前多数故障智能诊断系统在自动获取知识方面表现的能力还比较差,这限制了系统的自我完善、发展和提高。虽然一些系统或多或少地加入了机器学习的功能,但是基本上不能在运行中发现和创造知识,系统的诊断能力往往局限于知识库原有的知识。目前人工神经网络技术应用于各类故障智能诊断系统中,一个重要目的就是提高系统的学习能力。

## 1.6 智能故障诊断系统的发展趋势

### 1.6.1 多种知识表示方法的结合

在实际的诊断系统中,往往需要多种方式的组合才能表达清楚诊断知识,这就存在着多种表达方式之间的信息传递、信息转换、知识组织的维护与理解等问题,这些问题影响着对诊断对象的描述和表达。近几年在面向对象的程序设计技术的基础上,发展起来一种称为面向对象的知识表达方法,为这一问题的解决提供了一条很有价值的途径。

### 1.6.2 经验知识与理论知识的紧密结合

这两种知识各自使用不同的表示方法构成两种不同类型的知识库,每个知识库有各

自的推理机。它们在各自的权力范围内形成子系统,两种子系统再通过一个执行器综合起来构成一个特定诊断问题的专家系统。这个执行器记录诊断过程的中间结果和数据,并且负责经验与原理知识之间的切换。相比之下整个系统更加完善、功能更强。

### 1.6.3 诊断系统与神经网络的结合

神经网络理论为故障智能诊断系统发展开辟了崭新的途径。用神经网络技术建立诊断系统,不需要组织大规模的产生式规则,也不需要进行树搜索,系统可以自组织、自学习,并可进行模糊推理,这对用传统人工智能方法建立专家系统最感困难的知识获取和推理等问题提供了新的解决方法。神经网络具有实现右半球大脑直觉形象思维的特征,而专家系统理论与方法则具有实现左脑逻辑思维的特征,两者有着很强的互补作用。

### 1.6.4 虚拟现实技术和故障智能诊断系统的结合

虚拟现实技术(Virtual Reality,VR)是继多媒体技术后另一个在计算机界引起广泛关注的研究热点,它有4个重要的特征,即感知性、存在性、交互性和自主性。这种技术是人们通过计算机对复杂数据进行可视化、操作及交互的一种全新的方式。应用该技术后,用户、计算机和控制对象被视为一个整体,通过各种直观的工具将信息进行可视化,用户直接置身于这种三维信息空间中自由地操作、控制计算机。可以预言,随着虚拟现实技术的进一步发展,虚拟现实技术将在故障智能诊断系统中得到广泛的应用。

### 1.6.5 数据库技术与人工智能技术相互渗透

和数据库相比,人工智能缺乏较为成熟的理论基础和实用技术。与数据库的结合是其发展的方向,并被认为是成功的一个关键。对于故障诊断系统来说,知识库一般比较庞大,因此可以借鉴数据库关于信息存储、共享、并发控制和故障恢复技术,改善诊断系统的性能。人工智能与数据库技术的相互渗透将会给智能故障诊断系统带来更广阔的应用前景。

智能故障诊断技术是在传统故障诊断技术的基础上,结合当前众多先进技术(包括计算机技术、面向对象技术)发展起来的综合性技术。

## 参考文献

- [1] 虞和济. 故障诊断的基本原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1989.
- [2] 王道平,张义忠. 故障智能诊断系统的理论与方法[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [3] 吴今培,肖健华. 智能故障诊断与专家系统[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [4] 黄文虎. 不断总结经验,将我国设备监测与诊断技术提高到新的水平[J]. 中国设备管理,1998(11): 3-5.
- [5] 钟秉林,黄仁. 机械故障诊断学[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [6] 陈进. 机械设备振动监测与故障诊断[M]. 上海:上海交通大学出版社,1999.
- [7] FRANK P M. New developments using AI in fault diagnosis[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence,1997,10(1):3-14.
- [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] FRANK P M. Fault diagnosis in dynamic system using analytical and knowledge based redundancy—a survey and some new results[J]. Automatica, 1990, 26(3): 459 – 474.
- [10] WILLISKY A S. A survey of design methods for failure detection in dynamic system[J]. Automation, 1976, 12: 601 – 611.
- [11] ISERMANN R. Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey[J]. Automatica, 1984, 20: 387 – 404.
- [12] DING X, GUO L, FRANK P M. Parameterization of linear observers and its application to observer design[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(8): 1648 – 1652.
- [13] DING X, FRANK P M. On-line fault detection in uncertain systems using adaptive observers[J]. European Journal of Diagnosis and Safety in Automation, 1993(2): 9 – 12.
- [14] DING X, GUO L. Optimization of observer-based fault detection systems[C]// Proc of IFAC Sym On SYSID97. Japan, 1997: 1201 – 1206.
- [15] BOUDAUD A N, MASSON M H, DUBUSSON B. On-line diagnosis of a technological system: a fuzzy pattern recognition approach[C]// Proc of IFAC World Congress. San Francisco, 1996: 103 – 107.
- [16] MARUYAMA N, BENOURETS M, DEXTER A L. Fuzzy model-based fault detection and diagnosis[C]// Proc of IFAC World Congress. San Francisco, 1996: 121 – 126.
- [17] FRANK P M. Application of fuzzy logic to process supervision and fault diagnosis[C]// Supervision and Safety for Technical Process. Finland, 1994: 531 – 538.
- [18] AGGARWAL R K, XUAN Q Y, JOHNS A T, et al. A novel approach to fault diagnosis in multicircuit transmission lines using fuzzy artmap neural networks[J]. IEEE Trans on Neural Network, 1999, 10(5): 1214 – 1221.
- [19] AGGARWAL R K, XUAN Q Y, JOHNS A T. Fault classification for double-circuit lines using self-organization mapping neural network[C]// Proc 32nd UPEC. UK, 1997: 440 – 443.
- [20] 周东华, 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.
- [21] ZHOU D H, FRANK P M. Actuator fault diagnosis of a class of nonlinear systems in closed-loops: a case study[C]// Proc of UKACC Int Conf. UK, 1996: 311 – 316.
- [22] GARCIA A E, FRANK P M. Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: a survey[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(5): 663 – 670.
- [23] ZHANG Q, BASSEVILLE M. Monitoring nonlinear dynamical systems: a combined observer-based and local approach[J]. IEEE CDC, 1998, (1): 1149 – 1154.
- [24] HIBEY J L, CHARALAMBOUS C D. Conditional densities for continuous-time nonlinear hybrid systems with applications to fault detection[J]. IEEE Trans on A C, 1998, 44(11): 2164 – 2169.
- [25] SALUDES S, FUENTE M J. Neural-networks-based fault detection and accommodation in a chemical reactor[C]// IFAC 14<sup>th</sup> Triennial World Congress. Beijing, 1999: 169 – 174.
- [26] PATTON R J, CHEN J, SIEW T. Fault diagnosis in nonlinear dynamic system via neural networks[C]// Proc of UKACC/IEE Int Conf Control94. Coventry, 1994: 1346 – 1351.
- [27] 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, 1985, 14(6): 27 – 34.
- [28] 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 – 10.
- [29] 李渭华, 萧德云, 方崇智. 基于模型的故障检测与分离技术[J]. 控制与决策, 1992, 7(6): 401 – 408.
- [30] 蒋慰孙, 赵捧. 对过程监测系统的若干看法[J]. 化工自动化及仪表, 1995, 22(3): 3 – 7.