

# 电子设备故障诊断 原理与实践

朱大奇 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# 电子设备故障诊断原理与实践

朱大奇 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍电子设备故障检测与诊断技术。重点阐述电子设备故障诊断的人工智能方法。其中心内容包括故障树分析法,光电雷达电子设备故障检测与诊断的虚拟仪器系统,电子设备故障诊断的神经网络方法和信息融合技术,最后讨论机电设备故障诊断的 Agent 技术。

本书可作为电子、自动化及相关专业研究生的教材,书中介绍的电子设备的故障成因、故障诊断的人工智能技术,以及大型电子设备故障自动搜寻实践,对相关理论的研究者和工程技术人员具有一定的指导意义。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子设备故障诊断原理与实践/朱大奇著. —北京:电子工业出版社, 2004.1

ISBN 7-5053-9405-3

I. 电… II. 朱… III. 电子设备—故障诊断 IV. TN05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 108766 号

责任编辑: 邓小瑜 特约编辑: 吴 华

印 刷: 北京东光印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×980 1/16 印张: 13 字数: 267 千字

印 次: 2004 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定 价: 24.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

# 前 言

电子技术的飞速发展,使得电子设备在国民经济各行业得到广泛的应用。像在工业现场的自动控制、家用电器、办公设备及航空航天系统中,电子设备都起到关键性的作用。另一方面,在电子技术飞速发展的同时,电子设备本身的功能越来越完备,其组成越来越复杂化和智能化,可靠性要求越来越高,因此对电子设备故障的准确检测与诊断也日益迫切。这里不仅有常见的基本电路和设备的故障检测,而且有更复杂、要求更高的军用电子设备的故障诊断。但是,目前出版的故障诊断专著大多是研究机械设备的故障诊断,而在电子设备智能故障诊断方面,还未有著作出版。本书是以作者的博士论文《航空电子设备故障诊断新技术研究》为主要基础,结合国内外电子设备故障诊断的最新成就,系统地阐述电子设备的常规诊断方法和人工智能故障诊断方法。

全书共分9章,其中第1章为绪论,系统阐述故障诊断技术的研究概况及发展趋势;第2章介绍电子设备故障产生机理及故障统计分析;第3、4章总结电子设备的常规故障诊断方法,如模拟电路、数字电路的诊断;第5章阐述电子设备故障诊断的故障树分析法基本理论;第6章介绍故障树分析法诊断实践:光电雷达电子设备故障检测与诊断的虚拟仪器系统;第7章介绍电子设备故障诊断的神经网络方法;第8章阐述电子设备故障诊断的信息融合技术及其应用;第9章介绍基于Agent的机电设备故障诊断的设计与实践。全书内容可以分成3大部分:第1章为故障诊断技术综述,接下来的3章为电子设备故障诊断经典常规方法,后5章为电子设备故障诊断的人工智能技术和实践。

本书理论与实践相结合,既有电子设备常见实用的诊断方法总结,也有大型复杂电子设备故障自动诊断系统的分析与实践,重点讨论电子设备故障诊断的人工智能技术,并将故障树分析法、多传感器信息融合方法和Agent技术应用到电子设备的故障诊断之中。

本书可作为电子、自动化及相关专业研究生的教材,书中介绍的电子设备的故障成因、故障诊断的人工智能技术,以及大型电子设备故障自动搜寻实践,对相关理论研究者和工程技术人员具有一定的指导意义。

由于作者水平所限,书中难免有不足和错误,敬请读者批评指正。

## 致 谢

在本书的撰写出版过程中，江南大学博士生导师徐保国教授审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵建议。远在海外的纪志成教授为作者寄来了珍贵的文献资料。在申请出版基金的过程中，还得到了同事徐玲教授、杨慧中教授的大力推荐。在此对以上各位专家表示衷心感谢！

作者在南京航空航天大学攻读博士学位期间，导师于盛林教授为我提供了宽松的研究环境并进行精心的指导，为本书的写作打下了坚实的基础，在此表示真诚的感谢！

书中引用了一些学者的论著和研究成果，为此向他们表示深深的谢意！没有这些研究成果的加入，本书难成体系。

在本书的撰写过程中，作者的学生尤瑜、李克为、孙峥、浦争鸣等帮助进行了文字输入和绘图。

作者同时要感谢电子工业出版社的敖然副社长、赵丽松主任、邓小瑜老师及中国海洋工业出版社的王勇主任，没有他们的大力支持和辛勤工作，就没有本书的出版。

本书得到了江南大学基础科学研究基金的资助。

朱大奇  
于江南大学青山湾校区

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 设备故障诊断的目的与意义	1
1.2 故障诊断技术的发展与现状	1
1.3 设备故障诊断方法的分类	2
1.3.1 故障诊断方法的分类	3
1.3.2 基于知识的故障诊断方法	4
1.4 电子设备故障诊断技术	9
1.4.1 数字电路故障诊断的方法与进展	9
1.4.2 模拟电路故障诊断的方法与进展	11
1.5 电子设备故障诊断人工智能技术	13
1.5.1 现有电路故障诊断技术的不足	13
1.5.2 电子设备故障诊断的人工智能技术	14
1.6 小结	15
参考文献	16
第 2 章 电子设备故障统计分析	21
2.1 设备故障的统计分析基础	21
2.1.1 设备故障的基本概念	21
2.1.2 电子设备故障模式与分布	25
2.2 故障机理分析	30
2.2.1 电子元器件失效机理分析	30
2.2.2 电子设备故障机理分析	32
2.3 电子设备故障宏观规律分析	35
2.3.1 浴盆曲线规律	35
2.3.2 复杂设备无耗损区规律	37
2.3.3 设备全寿命故障率递减规律	37
2.4 小结	38
参考文献	38
第 3 章 模拟电路故障诊断的常规方法	39
3.1 模拟电路故障特点及诊断	39
3.1.1 模拟电路故障特点	39
3.1.2 常用模拟电路故障诊断方法概述	40

3.2	模拟电路常用电子元器件的检测与诊断 .....	41
3.2.1	半导体分立器件的一般检修 .....	41
3.2.2	印制电路板(印制板)的一般检修 .....	45
3.3	模拟电路故障诊断方法实例分析 .....	47
3.3.1	电路故障状态字典建立 .....	47
3.3.2	电路故障状态模糊集划分 .....	50
3.3.3	分析判定电路故障状态 .....	52
3.4	小结 .....	53
	参考文献 .....	54
<b>第4章</b>	<b>数字电路故障诊断的常规方法 .....</b>	<b>55</b>
4.1	数字电路故障的特点及诊断 .....	55
4.2	数字电路常规检测与诊断技术 .....	56
4.2.1	组合逻辑电路故障诊断 .....	56
4.2.2	时序逻辑电路故障诊断 .....	60
4.3	数字 IC 芯片的检测与诊断方法 .....	64
4.3.1	数字 IC 芯片的故障原因分析 .....	65
4.3.2	数字 IC 芯片的故障诊断 .....	65
4.4	小结 .....	72
	参考文献 .....	72
<b>第5章</b>	<b>电子设备故障诊断的故障树分析法 .....</b>	<b>73</b>
5.1	故障树的基本概念 .....	73
5.1.1	故障树 .....	73
5.1.2	故障树符号 .....	73
5.1.3	故障树建造 .....	74
5.2	故障树的定性分析 .....	75
5.2.1	故障树的数学描述 .....	76
5.2.2	割集和最小割集 .....	78
5.2.3	基于故障树定性分析的故障诊断 .....	80
5.3	故障树的定量分析 .....	87
5.3.1	故障树定量分析的内容 .....	87
5.3.2	故障树底事件及顶事件故障概率计算 .....	87
5.3.3	故障树重要度分析 .....	88
5.3.4	基于故障树定量分析的故障诊断 .....	88
5.4	小结 .....	91
	参考文献 .....	92

<b>第 6 章 基于故障树的光电雷达电子设备故障诊断系统</b> .....	93
6.1 光电雷达电子设备故障诊断系统组成 .....	93
6.1.1 光电雷达电子设备介绍 .....	93
6.1.2 电子设备诊断系统硬件组成 .....	96
6.2 电子设备的性能检测、故障树结构分析及故障诊断 .....	97
6.2.1 电子设备整机性能检测 .....	97
6.2.2 电子部件的性能检测 .....	101
6.2.3 电子设备故障元器件的搜寻与定位 .....	103
6.3 电子设备故障诊断系统的软件设计 .....	106
6.3.1 虚拟仪器编程语言 Lab-windows/CVI 介绍 .....	106
6.3.2 电子设备测试诊断软件的模块组成 .....	107
6.3.3 测试诊断系统子模块软件设计介绍 .....	107
6.4 小结 .....	111
参考文献 .....	112
<b>第 7 章 电子设备故障诊断的神经网络方法</b> .....	113
7.1 神经网络与故障诊断 .....	113
7.1.1 人工神经网络模型及其基本原理 .....	113
7.1.2 神经网络与故障诊断 .....	120
7.2 BP 神经网络在电路故障诊断中的应用 .....	121
7.2.1 BP 神经网络模型及其学习算法 .....	121
7.2.2 BP 神经网络与电路故障诊断 .....	126
7.3 Hopfield 神经网络在电路故障诊断中的应用 .....	131
7.3.1 Hopfield 神经网络模型与功能 .....	132
7.3.2 Hopfield 神经网络与故障诊断 .....	135
7.4 SOM 神经网络在电路故障诊断中的应用 .....	139
7.4.1 SOM 神经网络模型与算法 .....	139
7.4.2 SOM 神经网络与故障诊断 .....	142
7.5 ART 神经网络在电路故障诊断中的应用 .....	145
7.5.1 ART 神经网络模型与算法原理 .....	146
7.5.2 ART 神经网络与故障诊断 .....	150
7.6 小结 .....	150
参考文献 .....	151
<b>第 8 章 电子设备故障诊断的信息融合技术</b> .....	153
8.1 多传感器信息融合 .....	153
8.1.1 信息融合的定义 .....	153



8.1.2	信息融合的基本原理 .....	153
8.1.3	信息融合与故障诊断 .....	155
8.2	故障诊断的信息融合方法 .....	157
8.2.1	贝叶斯信息融合方法 .....	157
8.2.2	模糊信息融合方法 .....	158
8.2.3	D-S 证据理论信息融合方法 .....	160
8.2.4	神经网络信息融合方法 .....	162
8.3	简单模拟电路信息融合故障诊断实例 .....	164
8.3.1	简单模拟电路模糊信息融合故障诊断实验 .....	164
8.3.2	简单模拟电路神经网络信息融合故障诊断 .....	170
8.4	光电雷达压-码转换电路板信息融合故障诊断 .....	174
8.4.1	故障信息的获取 .....	174
8.4.2	压-码电路板故障诊断实验数据分析 .....	176
8.5	小结 .....	180
	参考文献 .....	180
<b>第 9 章</b>	<b>机电设备故障诊断的 Agent 技术</b> .....	<b>183</b>
9.1	Agent 的基本概念 .....	183
9.1.1	Agent 的定义 .....	183
9.1.2	Agent 的基本特征及结构 .....	184
9.1.3	Agent 的语言 .....	186
9.1.4	多 Agent 系统 .....	187
9.2	基于 Agent 的机电设备故障诊断系统 .....	189
9.2.1	基于 Agent 的诊断系统的设计 .....	190
9.2.2	基于 Agent 的诊断系统的实现 .....	193
9.3	小结 .....	195
	参考文献 .....	196

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 设备故障诊断的目的与意义

设备故障诊断技术是近 40 年发展起来的一门新学科，它是为适应各种工程需要而形成的多学科交叉的综合学科。在当今技术竞争日益激烈的环境下，工业企业成功的关键因素之一是产品和制造过程的质量控制；而在军事领域里，对武器装备的可靠性、保障性和可维修性有更高的要求。另一方面，随着现代工业及科学技术的迅速发展，特别是计算机技术的发展，设备的结构越来越复杂，自动化程度也越来越高，不仅同一设备的不同部分之间互相关联，紧密耦合，而且不同设备之间也存在着紧密的联系，在运行过程中形成一个整体。因此，一处故障可能引起一系列连锁反应，导致整个设备甚至整个过程不能正常运行，轻者造成停机、停产，重者会产生严重的甚至灾难性的人员伤亡。最典型的灾难性故障如：1984 年 12 月印度博帕尔农药厂毒气泄漏事故，造成 2000 多人死亡，成为目前为止世界工业史上空前的大事故；1986 年 4 月，前苏联切尔诺贝利核电站放射性泄漏事故，损失达 30 亿美元，核污染波及周边各国；1986 年 1 月，“挑战者”号航天飞机由于固体燃料助推火箭密封泄漏而引起燃料箱爆炸，导致 7 名宇航员全部遇难，总计损失达 12 亿美元；更近的如 2003 年 2 月 1 日，载有 7 名宇航员的美国哥伦比亚号航天飞机，在结束了为期 16 天的太空任务之后，返回地球，在着陆前发生意外故障，航天飞机全部解体坠毁，不仅造成巨大的经济损失，而且使人类探索太空的航天事业遭受重大影响。这些灾难性的事件无时无刻不在警示人们，现代设备系统运行的安全性和可靠性的重要。目前，设备的状态监测与故障诊断已成为现代工业生产、航空航天和国防建设中的重要内容，也是科学界研究的热点之一。

## 1.2 故障诊断技术的发展与现状

设备故障诊断技术的发展是和人类对设备的维修方式紧密相连的。在工业革命后的相当长的时间内，由于当时的生产规模、设备的技术水平和复杂程度都较低，设备的利用率和维修费用未引起人们的重视，人类对设备的维修方式基本上是事后维修，即在设备运行出现问题之后进行故障的分析与维护；20 世纪以后，由于大生产的发展，尤其是流水线生产方式的出现，设备本身的技术水平和复杂程度都大大提高，设备故障对生产的影响显著增加，这样出现了定期维修，以便在事故发生之前加以处理。

大约在 20 世纪 60 年代, 美国军方意识到定期维修的一系列弊病, 开始变定期维修为预知维修, 即在设备的正常运行过程中就开始进行监测, 以发现潜在的故障因素, 及早采取措施, 防止突发性故障的产生。军方的这种主动维修方式, 很快被其他企业所效仿, 设备故障诊断技术很快发展起来。

从科学研究发展史来看, 设备诊断技术的产生也是多学科交叉发展的结果。20 世纪 40 年代以来, 人类的生产方式日益向大工业方向发展。在这种宏观的社会大背景下, 系统论、混沌学纷纷诞生, 尤其是控制理论出现了重大突破, 产生了一系列的现代控制方法。生产系统庞大化和复杂化的同时也暴露出一些问题, 即如何防止设备运行中故障的发生, 这就要有一门相应的诊断技术。同一时期, 电子技术, 尤其是计算机技术的发展, 为设备故障诊断技术提供了必要的技术基础; 20 世纪 60 年代, 快速傅里叶变换的出现, 使诊断技术产生了飞跃; 近年来, 传感器技术、信号处理技术(如各种滤波技术、谱分析技术)、人工智能技术(如专家系统、神经网络、信息融合等)的发展, 使得设备故障诊断技术得到更进一步的发展。

从故障诊断技术的各分支技术来看, 美国占有领先地位。美国的许多权威机构, 如美国的机械工程师学会(ASME), 美国宇航局(NASA)等都参与了这一领域的研究, 投入了大量的资金。不少高校和企业也都设立了故障诊断技术研究中心。开发了许多实用的诊断系统, 如 1967 年美国研制的飞机数据系统“AIDS”, 1977 年美国使用的“TRENOS”飞机发动机状态监测诊断系统及近些年美军装备到部队的 AN/TPQ-36 和 AN/TPQ-37 雷达机内测试和故障诊断系统等, 其中大多数不仅具有完善的监测功能, 而且具有较强的诊断功能。在宇航、军事、工业等方面有广泛的应用。

我国故障诊断技术的发展始于 20 世纪 70 年代末, 虽然起步较晚, 但近年来发展较快, 在某些理论研究方面已和国外不相上下。目前, 在一些特定设备的诊断研究方面很有特色, 形成了一批自己的产品。如西安交通大学的“大型旋转机械计算机状态监测与故障诊断系统”, 哈尔滨工业大学的“机组振动微机监测和故障诊断系统”等。综观我国的设备诊断技术现状, 其应用集中在化工、电力、冶金、国防等行业, 科研则主要集中在高校进行, 如清华大学、上海交通大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、东北大学、东南大学等都成立了颇具实力的诊断工程中心。这些研究机构对我国诊断技术的发展做出了较大的贡献。

### 1.3 设备故障诊断方法的分类

所谓故障, 广义地讲, 可以理解为任何系统的异常现象, 使系统表现出所不期望的特性。故障诊断技术主要包含 3 方面的内容: 故障检测、故障隔离、故障辨识。所谓故障检测是判断系统中是否发生了故障及检测出故障发生的时刻; 故障隔离就是在检测出故障后确定故障的位置和类型; 故障辨识是指在分离出故障后确定故障的大小

和时变特性。本质上,故障诊断技术是一个模式分类与识别问题。即把系统的运行状态分为正常和异常两类,判别异常的信号样本究竟又属于哪种故障,这又属于一个模式识别问题。

近几十年来,故障诊断技术得到了深入广泛的研究,提出了众多可行的方法。从1991年起,IFAC每3年召开一次世界性的控制系统故障诊断专题学术会议,一些著名的自动控制学术会议如ACC, CDC等也设有故障诊断专题,有关研究论文越来越多。从Isermann和Balle统计的1991年到1995年发表的有关研究论文情况看,基于解析模型的故障诊断方法得到了较深入研究,神经网络与其他故障检测相结合的方法逐步增多。特别是近些年来,人工智能故障诊断方法得到了广泛关注,发表了大量的研究论文,推动了故障诊断这门学科快速发展。

### 1.3.1 故障诊断方法的分类

根据参考文献1~5的观点,现有的故障诊断方法,概括起来可分为3大类。

#### 1. 基于信号处理的方法

所谓基于信号处理的方法,通常是利用信号模型,如相关函数、频谱、自回归滑动平均、小波变换等,直接分析可测信号,提取诸如方差、幅值、频率等特征值,从而检测出故障。如旋转机械中的滚动轴承在出现疲劳脱落、压痕或局部腐蚀等故障时,其振动信号的功率谱就会出现相应的反应,利用这种反应就可诊断系统故障。近年来出现的基于信号处理的方法主要有以下几种。

① 小波变换方法<sup>[30-32]</sup>:小波变换是一种时-频分析方法,具有多分辨分析的特性,非常适合非平稳信号的奇异性分析。故障诊断时,对采集的信号进行小波变换,在变换后的信号中除去由于输入变化引起的奇异点,剩下的奇异点即为系统发生的故障点。基于小波变换的方法可以区分信号的突变和噪声,故障检测灵敏准确,克服噪声能力强,但在大尺度下会产生时间延迟,且不同小波基的选取对诊断结果有影响。该方法随着小波理论研究的深入而发展较快。近年来,将小波变换与模糊集合论、神经网络理论相结合,提出了模糊小波和小波网络的故障诊断方法。

② 主元分析方法<sup>[26-29]</sup>:主元分析(PCA)是一种有效的数据压缩和信息提取方法,该方法可以实现在线实时诊断,一般应用于大型的、缓变的稳态工业过程的监控。主元分析用于故障诊断的基本思想是:对过程的历史数据采用主元分析方法建立正常情况下的主元模型,一旦实测信号与主元模型发生冲突,就可判断故障发生,通过数据分析可以分离出故障。主元分析对数据中含有大量相关冗余信息时故障的检测与分离非常有效,而且还可以作为信号的预处理方法用于故障的特征量提取。

③ 利用 $\delta$ 算子和利用Kullback信息准则的故障检测<sup>[33-35]</sup>:利用 $\delta$ 算子的故障诊断是基于算子构造Hilbert空间的最小二乘投影向量集,推导出完整的格形滤波器作

为故障检测滤波器,用 $\delta$ 算子描述的后向预测误差向量的首位元素作为残差,并采用自适应噪声抵消技术使残差对故障敏感。该方法可以在线实时检测,具有灵敏度高、计算量小、抗噪声能力强的优点。但有时其无限宽数据窗使故障信息难以消除;基于 Kullback 信息准则的故障检测,是利用 Kullback 信息准则度量系统的变化,在不存在未建模动态时将其与阈值比较可以有效检测故障。

## 2. 基于解析模型的方法<sup>[1,10][16-25]</sup>

基于解析模型的方法是在明了诊断对象数学模型的基础上,按一定的数学方法对被测信息进行诊断处理,可分为状态估计法和参数估计法。1971年 Beard 首先提出故障检测的检测滤波器的概念,标志着基于状态估计的故障诊断方法的诞生。这种诊断方法发展至今已形成三种基本方法:① Beard 提出的故障检测滤波器的方法;② Menra 和 Peshon 提出的基于 Kalman 滤波器的方法、Dlark 提出的构造 Kalman 滤波器阵列或 Lunberg 观测器阵列的方法;③ Deckert 提出的一致性空间的方法。这类方法实现故障诊断一般分为两步:一是形成残差,即真实系统的输出与状态观测器或卡尔曼滤波器输出的差值;二是从残差中提取故障特征进而实现故障诊断。

1984年 Iserman 对于参数估计的故障诊断方法作了完整的描述。这种故障诊断方法的思路是,由机理分析确定系统的模型参数和物理元器件参数之间的关系方程  $\theta = f(p)$ ,由实时辨识求得系统的实际模型参数  $\theta'$ ,由  $\theta = f(p)$  和  $\theta'$  求解实际的物理元器件参数  $p'$ ,将  $p$  和  $p'$  的标称值比较从而得知系统是否有故障及故障的程度。

目前基于解析模型的方法得到比较深入的研究,但在实际情况中,常常难以获得对象的精确数学模型,这就大大限制了基于解析模型诊断方法的使用范围和效果。

## 3. 基于知识的故障诊断方法

近年来,人工智能及计算机技术的飞速发展,为故障诊断技术提供了新的理论基础,产生了基于知识的诊断方法,此方法由于不需要对象的精确数学模型,而且具有“智能”特性,因此是一种很有生命力的方法。基于知识的故障诊断方法主要可以分为:专家系统故障诊断方法、模糊故障诊断方法、故障树故障诊断方法、神经网络故障诊断方法、信息融合故障诊断方法及基于 Agent 故障诊断方法等。

### 1.3.2 基于知识的故障诊断方法

#### 1. 专家系统故障诊断方法<sup>[8-9][36-37]</sup>

专家系统故障诊断方法,是指计算机在采集被诊断对象的信息后,综合运用各种规则(专家经验),进行一系列的推理,必要时还可以随时调用各种应用程序,运行过程中向用户索取必要的信息后,就可快速找到最终故障或最有可能的故障,再由用户来证实。此种方法国内外已有不少应用。专家系统故障诊断方法可用图 1-1 所示

的结构来说明,它由数据库、知识规则库、人机接口、推理机等组成。其各部分的功能如下所述。

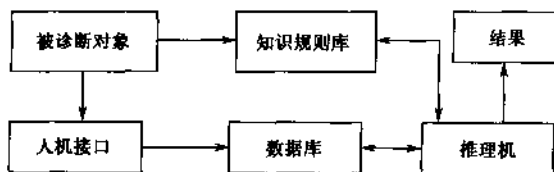


图 1-1 专家系统故障诊断结构图

**数据库:** 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状态数据;对于离线诊断,数据库内容可以是故障时检测数据的保存,也可以是人为检测的一些特征数据,即存放推理过程中所需要和所产生的各种信息。

**知识规则库:** 存放的知识可以是系统的工作环境,系统知识(反映系统的工作机理及系统的结构知识);规则库则存放一组的规则,反映系统的因果关系,用于故障推理。知识库是专家领域知识的集合。

**人机接口:** 人与专家系统打交道的桥梁和窗口,是人机信息的交接点。

**推理机:** 根据获取的信息综合运用各种规则,进行故障诊断,输出诊断结果。是专家系统的组织控制机构。

专家系统故障诊断其根本目的在于利用专家的领域知识、经验为故障诊断服务。目前在机械系统、电子设备及化工设备故障诊断等方面已有成功的应用。但专家系统的应用依赖于专家的领域知识获取。知识获取被公认为专家系统研究开发中的“瓶颈”问题,另外,在自适应能力、学习能力及实时性方面也都存在不同程度的局限。

## 2. 模糊故障诊断方法<sup>[38-44]</sup>

故障诊断是通过研究故障与征兆(特征元素)之间的关系来判断设备状态。由于实际因素的复杂性,故障与征兆之间的关系很难用精确的数学模型来表示,随着某些故障状态模糊性的出现,就不能用“是否有故障”的简易诊断结果来表达,而要求给出故障产生的可能性及故障位置和程度如何。此类问题用模糊逻辑能较好地解决,这就产生了模糊故障诊断方法。其典型方法是模糊故障向量识别法,诊断过程如图 1-2 所示。

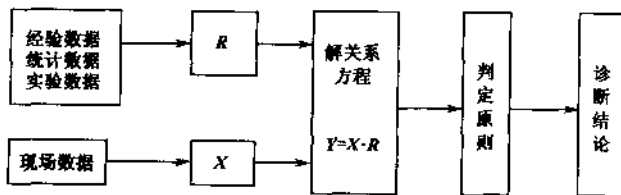


图 1-2 模糊故障诊断方法

① 根据经验、统计和实验数据，建立故障与征兆之间的模糊关系矩阵  $R$ （隶属度矩阵）。矩阵中的每个元素的大小表明它们之间的相互关系的密切程度。

$$R = \{\mu_R(x_i, y_j); x_i \in X; y_j \in Y\} \quad (1-1)$$

式中， $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\} = \{y_i \mid i=1, 2, \dots, n\}$  表示可能发生故障的集合， $n$  为故障总数。 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} = \{x_i \mid i=1, 2, \dots, m\}$  表示由上面这些故障所引起的各种特征元素（征兆）的集合， $m$  为各种特征元素（征兆）的总数。

② 根据待诊断对象的现场测试数据，提取特征参数向量  $X$ 。

③ 求解关系矩阵方程  $Y = X R$ ，得到待检状态的故障向量  $Y$ ，再根据一定的判断准则，如最大隶属度原则、阈值原则或择近原则等，得到诊断结果。

模糊故障诊断方法是利用模糊集合论中的隶属函数和模糊关系矩阵的概念来解决故障与征兆之间的不确定关系，进而实现故障的检测与诊断。这种方法计算简单，应用方便，结论明确直观。在模糊故障诊断中，构造隶属函数是实现模糊故障诊断的前提，但由于隶属函数是人为构造的，含有一定的主观因素；另外，对特征元素的选择也有一定的要求，如选择得不合理，诊断结果的准确性会下降，甚至造成诊断失败。

### 3. 故障树故障诊断方法<sup>[11][45-51]</sup>

故障树 FT (Fault Tree) 模型是一个基于被诊断对象结构、功能特征的行为模型，是一种定性的因果模型，以系统最不希望事件为顶事件，以可能导致顶事件发生的其他事件为中间事件和底事件，并用逻辑门表示事件之间联系的一种倒树状结构。它反映了特征向量与故障向量（故障原因）之间的全部逻辑关系。图 1-3 示出一个简单的故障树。图中顶事件：系统故障，由部件 A 或部件 B 引发，而部件 A 的故障又是由两个元器件 1, 2 中的一个失效引起的，部件 B 的故障在两个元器件 3, 4 同时失效时发生。

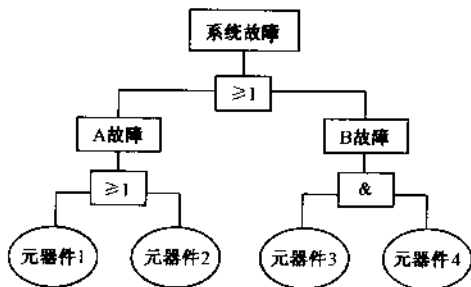


图 1-3 简单故障树

在利用故障树进行故障搜寻与诊断时。根据搜寻方式不同，又可分为逻辑推理诊断法和最小割集诊断法。更详细的内容见本书第 5 章。

#### 4. 神经网络故障诊断方法<sup>[6-7][12-15][52-59]</sup>

对于故障诊断而言其核心技术是故障模式识别,而人工神经网络由于其本身信息处理特点,如并行性、自学习、自组织性、联想记忆功能等,使其能够出色解决那些传统模式识别方法难以圆满解决的问题,所以故障诊断是人工神经网络的重要应用领域之一。目前神经网络是故障诊断领域中的一个研究热点。已有不少应用系统的报道。

神经网络在设备诊断领域的应用研究主要集中在两个方面:一是从模式识别的角度应用它作为分类器进行故障诊断;二是将神经网络与其他诊断方法相结合而形成的复合故障诊断方法。模式识别的神经网络故障诊断过程,主要包括学习(训练)与诊断(匹配)两个过程。其中每个过程都包括预处理和特征提取两部分。具体诊断过程如图 1-4 所示。

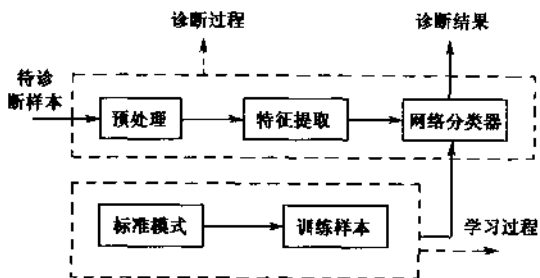


图 1-4 神经网络故障诊断过程

**学习过程:** 在一定的标准模式样本的基础上,依据某一分类规则来设计神经网络分类器,并用标准模式训练;

**诊断过程:** 将未知模式与训练的分类器进行比较来诊断未知模式的故障类别。

① **预处理:** 首先对映射得到的样本空间数据进行预处理,主要是通过删除原始数据中的无用信息得到另一类故障模式,由样本空间映射成数据空间。在数据空间上,通过某种变换(如对模式特征矢量进行量化、压缩和规格化等)使其有利于故障诊断。

② **特征提取:** 将从诊断对象获得的数据看做一组时间序列,通过对该时间序列的分段采样,可以将输入数据映射成样本空间的点。这些数据可能包含故障的类型、程度和位置等信息。但从样本空间看,这些特征信息的分布是变化的,因此,一般不能直接用于分类,需经合适的变换来提取有效的故障特征。而所提取的这些特征对于设备的参数应具有不变性。常用的特征提取方法有:傅里叶变换、小波变换、分形维数等。

③ **网络分类器:** 常用于故障诊断分类的神经网络有:BP 网络、双向联想记忆(BAM)网络、自适应共振理论(ART)、自组织网络 SOM 和 B 样条网络等。更详细的内容见本书第 7 章。



利用各种诊断方法的优点,将其他诊断方法与神经网络相结合,可以得到效率更高的复合故障诊断方法。如将神经网络与专家系统相结合的诊断方法;模糊神经网络故障诊断系统和神经网络信息融合故障诊断系统等,都显示出其特别的诊断特性。

神经网络故障诊断虽然有它独特的优越性,但也存在一些困难,主要表现在三方面:一是训练样本获取困难;二是忽视了领域专家的经验知识;三是网络权值表达方式难以理解。

### 5. 信息融合故障诊断方法<sup>[11][60-75]</sup>

信息融合就是利用计算机对来自多传感器的信息按一定的准则加以自动分析和综合的数据处理过程,以完成所需要的决策和判定。目前信息融合在军事领域中已有广泛的应用,但在设备故障诊断中的应用还是近年来的事情。信息融合应用于故障诊断的起因有三个方面:一是多传感器形成了不同通道的信号;二是同一信号形成了不同的特征信息;三是不同诊断途径得出了有偏差的诊断结论。融合诊断的最终目标是综合利用各种信息提高诊断准确率。

目前,信息融合故障诊断方法主要有 Bayes 推理、模糊融合、D-S 证据推理及神经网络信息融合等。更详细的内容见本书第 8 章。

### 6. 基于 Agent 故障诊断方法<sup>[84-87]</sup>

Agent 理论与技术研究源于 20 世纪 80 年代中期的分布式问题求解,它是当今人工智能与软件工程中的研究热点。Agent 是一个具有自主性、反应性、主动性和社会性特性的基于硬件或软件(更多情况)的计算机系统,通常还具有人类的智能特性,如知识、信念、意图和愿望等。

故障诊断的 Agent 系统,是将多个 Agent 组合起来工作,设计出一组分工协作的多 Agent 系统,不仅使诊断系统准确率得以提高,而且增强环境的适应性。使系统在运行过程中发现和挖掘知识,提高学习能力,实现诊断系统性能的自我完善、发展和提高。

一般的 Agent 故障诊断系统需要解决的关键问题有:① 故障信号的检测,特征信息的提取;② 故障诊断 Agent 的刻画;③ 管理控制 Agent 及数据挖掘 Agent 的设计;④ 各 Agent 之间的通信与协作。更详细的内容见本书第 9 章。

设备故障诊断技术发展至今,这 3 种诊断方法均已取得了丰硕的成果。基于数学模型的诊断方法研究较早,对于线性系统的诊断也较完善;对于非线性系统的故障诊断仍是当前的研究热点和难点问题,采用非线性理论、自适应观测器及定性方法等可以对一些简单的非线性系统进行故障诊断。另一方面,故障诊断的鲁棒性研究也日益重要,它和故障诊断的灵敏性要求的合理折中又是一个难点;此外,故障检测的最优阈值的选取和故障的准确定位等诊断性能方面的问题也是研究方向之一。