

数据融合驱动 电气设备故障的智能诊断

吕 锋 杜文霞 杜海莲 编 著



科学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍数据融合驱动故障诊断方法及其在电气设备中的应用,在对电气设备故障诊断技术的国内外研究现状进行系统分析的基础上,重点介绍了变压器、旋转电机等电气设备故障发生的机理和常规诊断方法。同时比较全面地论述了故障诊断的新理论、新方法及其应用技术,主要包括基于主元分析、神经网络、证据理论、支持向量机、小波分析和信息融合的故障诊断及应用技术,探讨了实现电气设备状态监测及故障诊断技术的合适方法。

本书适合高等学校电气工程与电子信息等专业的研究生使用,亦可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

数据融合驱动电气设备故障的智能诊断/吕锋,杜文霞,杜海莲编著. —北京:科学出版社,2013.1

ISBN 978-7-03-036206-3

I. ①数… II. ①吕…②杜…③杜… III. ①电气设备-故障诊断 IV. ①TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 303792 号

责任编辑:潘斯斯 张丽花/责任校对:郭瑞芝

责任印制:闫磊/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

化学工业出版社印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2013年2月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:394 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着现代化生产的发展和科学技术的进步,大型设备的结构越来越复杂,自动化程度越来越高。由于许多无法避免的因素影响,有时设备会出现各种故障,甚至造成严重的乃至灾难性的事故。因此,如何提高现代复杂系统的可靠性与安全性,是我们面临的技术难题和新的挑战。故障诊断技术正是伴随着这样的工程背景应运而生并迅速发展起来的。故障诊断技术经过 30 年的发展,已由传统的离线监测发展到在线监测,由人工诊断发展到自动诊断,实现了故障的早期诊断与预测。故障诊断技术的研究领域涉及信息科学、控制科学与技术、测试技术和计算机技术等当代前沿科学,故障诊断技术已广泛应用于机器控制、智能仪器系统和电力系统等领域,并显示出其强大的发展潜力。近年来,随着我国电力系统的飞速发展,对电力设备制造、系统运行与维护、综合自动化等提出了更高的要求。针对电气设备状态监测和故障诊断技术得到了应用和推广,并不断取得新的进展和成果。本书正是基于此思想编写完成的。书中针对基于数据融合驱动的电气设备故障诊断技术的国内外研究现状进行了深入分析,介绍了电气设备故障的发生机理及常规的诊断方法,探讨了基于数据融合驱动的故障诊断方法,以及在电气设备中成功应用的案例。本书的编写原则是既能比较全面地介绍故障诊断新理论方法与技术,又能适度反映国内外专家学者近年来在本领域所取得的最新科研进展和成果,同时融入了本课题组近 10 年的科研体会。本书突出了电气设备故障诊断中的新理论、新方法和新技术。

本书共 8 章。吕锋编写第 1、2、8 章,杜文霞编写第 4、5 章,杜海莲编写第 3、6、7 章。本书所涉及的研究成果得到众多科研机构的支持。其中特别感谢国家自然科学基金委员会资助的项目“多传感器信息融合集成故障诊断方法的研究”(60974063)、项目(61175059)、河北省自然科学基金委员会资助的项目“一类非线性系统故障诊断方法研究”(F2008000197)和“基于多尺度动态系统故障的综合诊断方法及在电气设备中应用”(F2004000180)。杭州电子科技大学的文成林教授、北京理工大学的闫丽萍博士后等提供了部分很有参考价值的资料。此外,对周东华、赵家礼、朱德恒、沈标正、张建文、吴广宁、何友、杨万海、潘立登、胡昌华、杨风暴等诸多专家学者(书中主要参考文献作者),以及对本书编著出版给予各种帮助的人们,在此一并表示诚挚的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2012 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 故障诊断技术的国内外研究现状	1
1.1.2 故障诊断技术的经济效益	2
1.2 故障诊断技术的常用术语及基本内容	3
1.2.1 故障诊断技术的常用术语	3
1.2.2 故障诊断技术的基本内容	4
1.3 数据驱动故障诊断的方法与分类	6
1.3.1 定性分析的方法	7
1.3.2 基于解析模型的方法	8
1.3.3 基于数据驱动的方法	9
1.4 电气设备故障诊断技术及热点问题	11
1.4.1 电气设备概述	11
1.4.2 电气设备故障诊断技术现状	11
1.4.3 电气设备状态监测与故障诊断	12
1.5 电气设备故障诊断数据驱动与人工智能技术	13
1.5.1 电气设备故障诊断涉及的学科领域	13
1.5.2 电气设备故障诊断中的重要环节	13
1.5.3 电气设备故障诊断系统	14
1.5.4 电气设备故障诊断技术的应用	15
1.6 故障诊断技术的发展趋势	16
1.6.1 应用故障诊断技术的优势	16
1.6.2 故障诊断技术的发展方向	16
参考文献	17
第 2 章 电气设备故障及常规诊断方法	21
2.1 电气绝缘的基本知识	21
2.1.1 电介质及介质的击穿	21
2.1.2 绝缘材料老化	22
2.2 电气设备的主要类型及工作制	24
2.2.1 电磁基本定律和电机主要类型	24
2.2.2 电动机工作制	25
2.2.3 电动机运行条件	26
2.3 电气设备检测的常规方法	26
2.3.1 利用人的感官检查设备故障	26

2.3.2	故障检测装置及其使用方法	29
2.4	电力变压器故障及常规诊断方法	35
2.4.1	变压器的基本工作原理和结构	35
2.4.2	变压器的数学模型	37
2.4.3	变压器的故障检测	39
2.5	异步电动机故障及常规诊断方法	43
2.5.1	三相异步电动机工作原理	43
2.5.2	异步电动机机械特性	45
2.5.3	异步电动机的数学模型	45
2.5.4	异步电动机故障机理	47
2.5.5	异步电动机的故障检测	48
2.6	同步发电机故障及常规诊断方法	50
2.6.1	同步发电机	50
2.6.2	同步发电机的故障检测	52
	参考文献	54
第3章	基于主元分析的故障诊断及应用技术	55
3.1	引言	55
3.2	主元分析	56
3.2.1	主元分析建模的方法	56
3.2.2	主元分析的性质	58
3.2.3	主元子空间和残差子空间	58
3.2.4	多尺度主元分析	61
3.3	基于 PCA 故障检测	72
3.3.1	基于传统贡献图的故障诊断技术	74
3.3.2	基于传感器有效度指标的故障诊断技术	75
3.3.3	基于重构贡献图的故障诊断技术	75
3.3.4	PCA 方法及其在故障诊断中的应用	76
	参考文献	81
第4章	基于神经网络的故障诊断及应用技术	84
4.1	引言	84
4.1.1	神经网络的发展	84
4.1.2	神经网络的特点及功能	86
4.2	神经网络基础	88
4.2.1	神经网络原理	88
4.2.2	神经网络学习规则	89
4.3	BP 神经网络	90
4.3.1	BP 神经网络的前向计算	90
4.3.2	BP 神经网络加权系数的调整规则	91
4.3.3	BP 学习算法计算步骤及注意事项	93
4.4	RBF 神经网络	93

4.4.1	RBF 神经网络概述	93
4.4.2	RBF 神经网络模型	94
4.4.3	RBF 网络的学习方法	95
4.4.4	BRF 学习算法的改进	96
4.5	神经网络方法在故障诊断中的应用	98
4.5.1	BP 神经网络在故障诊断中的应用	99
4.5.2	RBF 神经网络在故障诊断中的应用	107
	参考文献	111
第 5 章	基于证据理论的故障诊断及应用技术	113
5.1	引言	113
5.1.1	证据理论的发展概况	113
5.1.2	证据理论的应用	115
5.1.3	证据冲突的问题	116
5.2	D-S 证据理论	118
5.2.1	识别框架与基本信任分配函数	118
5.2.2	信任函数、众信度函数与似然函数	119
5.2.3	函数的几何意义	123
5.2.4	证据理论的合成规则	123
5.3	D-S 证据理论故障检测	127
5.3.1	概率分配函数	127
5.3.2	基于基本概率赋值的决策	129
5.4	D-S 证据理论方法及在故障诊断中的应用	129
5.4.1	电动执行器故障	129
5.4.2	电动执行器故障实验	132
5.4.3	电动执行器故障诊断系统设计	133
	参考文献	138
第 6 章	基于支持向量机的故障诊断及应用技术	140
6.1	引言	140
6.1.1	机器学习的基本问题	140
6.1.2	支持向量机的研究现状	141
6.2	支持向量机的理论基础	144
6.2.1	支持向量机的基本原理	144
6.2.2	支持向量机的特点	148
6.2.3	基于支持向量机故障诊断的基本步骤	149
6.3	基于支持向量机的故障诊断方法	149
6.3.1	最小二乘支持向量机的故障诊断方法	150
6.3.2	基于多类分类支持向量机的故障诊断方法	151
6.4	支持向量机在故障诊断中的应用	153
6.4.1	支持向量机在电机故障诊断中的应用	153
6.4.2	基于独立主成分分析的支持向量机在交流电机故障诊断中的应用	154

6.4.3	最小二乘支持向量机在变压器故障诊断中的应用	159
6.4.4	基于 K-均值聚类的支持向量机在变压器故障诊断中的应用	161
	参考文献	163
第 7 章	基于小波分析的故障诊断及应用技术	167
7.1	引言	167
7.2	小波分析	167
7.2.1	傅里叶变换到小波分析	167
7.2.2	连续小波变换	171
7.2.3	离散小波变换	173
7.2.4	小波包	177
7.3	小波分析故障检测	181
7.3.1	李普西兹指数的定义	181
7.3.2	基于连续小波变换的极值点进行故障检测	182
7.4	小波分析方法及在故障诊断中的应用	183
7.4.1	电机故障的小波分析	183
7.4.2	电机故障的振动与噪声分析	186
7.4.3	电动机转子断条小波诊断	191
	参考文献	196
第 8 章	基于信息融合的故障诊断及应用技术	199
8.1	引言	199
8.1.1	信息融合技术的国内外研究现状分析	199
8.1.2	信息融合技术在工程领域中的应用	200
8.1.3	信息融合技术潜在能力及发展方向	200
8.2	信息融合技术	201
8.2.1	信息融合理论基础	201
8.2.2	信息融合系统的结构模型和功能模型	202
8.2.3	信息融合技术方法	205
8.3	状态估计理论基础	206
8.3.1	离散系统卡尔曼最优预测基本方程	206
8.3.2	离散系统卡尔曼最优滤波基本方程	207
8.4	多尺度系统理论	208
8.5	信息融合故障诊断方法及应用	210
8.5.1	多传感器状态/参数融合估计	210
8.5.2	基于强跟踪滤波器的变压器故障在线诊断	221
8.5.3	异步信息融合故障模型	227
8.5.4	基于智能技术的故障诊断方法	230
	参考文献	237

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

自 20 世纪 60 年代以来,控制理论已经在工业生产过程、军事科技、航空航天等领域得到了成功的应用。但随着现代科学技术的不断发展,现代化的工程技术系统正朝着大规模、复杂化、高速化和自动化的方向发展,这类系统一旦发生事故就会造成人员和财产的巨大损失。因此,如何提高现代复杂系统的可靠性与安全性,是我们面临的又一技术难题和新的挑战。故障诊断技术正是伴随着这样的工程背景应运而生并发展起来的。故障诊断技术为提高复杂系统的可靠性开辟了一条新的途径。

1.1.1 故障诊断技术的国内外研究现状

故障诊断技术是 20 世纪 60 年代后期首先在美国出现的。最初的目的是用于对航天、核能、军事装备等进行早期异常检测。早在第二次世界大战中,美国运往远东的设备几乎有半数未经使用就失效了,由于故障而损失的飞机数量有上万架,是被击落的 2.5 倍。1961 年美国开始执行的阿波罗计划,因设备故障引起了很多严重问题,尖端计划的执行,对设备的安全性和可靠性问题提出了越来越高的要求。1967 年,由美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)创导,在美国海军研究室(Office of Naval Research, ONR)主持下,成立了美国机械故障预防小组(Mechanical Fault Prevention Group, MFPG)。该研究组织在工业技术发展方面,围绕着故障机理、检测、诊断和预测技术以及可靠性设计和材料耐久性评价等方面展开研究,为故障诊断技术的开展奠定了技术基础^[1]。1979 年美国三里岛核电站由于系统误判断和误操作,使反应堆芯严重损坏,放射性物质逸出,经济损失高达几十亿美元。特别是 1986 年 1 月,美国挑战者号航天飞机因火箭密封系统故障造成了失事悲剧。1998 年 8 月到 1999 年 5 月的短短的 10 个月间,美国的 3 种运载火箭“大力神”、“雅典娜”和“德尔他”共发生了 5 次发射失败,造成了 30 多亿美元的直接经济损失。残酷的现实使人们逐步认识到:现代化设备的故障先兆必须早期预报,防患于未然,否则会产生严重的后果。美国通过大力开展可靠性工程的研究,利用可靠性和故障率的概率形式把设备状态定量地描述出来,并把研究成果引到飞机、坦克、舰艇等军事装备的管理维修中,取得了良好的效果。随后英国以及欧洲其他国家也相继开展了此项工作,并取得了很多技术成果。丹麦 YK 公司对声学 and 振动的检测和监测技术,具有很丰富的经验,开发了很多性能优良、功能很强的诊断仪器,为世界所公认。瑞典 AGEMA 分析工作委员会,建立了全国性的专家库和失效分析网,协调全国的失效分析和故障预防研究工作。亚洲的日本在钢铁、化工、交通、电力等产业部门也积极开展故障诊断方面的研究工作,许多技术得到了成功的应用。实际上,故障诊断技术是人们在社会生产实践中付出了沉重的经济代价后的自然产物^[2,3]。

我国开始故障诊断技术的研究要比国外晚 10 年左右。早在 60 年代末就提出过不少带电试验的方法,但由于操作复杂,测量结果分散性大而未得到推广。1983 年国家经济委员会制定的《国营工业交通设备管理试行条例》中规定:“根据生产需要,逐步采用现代故障诊断和状

态监测技术,发展以状态维修为基础的预防性维修”。1987年,中国振动工程学会成立了故障诊断分会,随后西安交通大学、东北工学院等相继成立了故障诊断研究室,有很多科学工作者开始故障诊断技术的研究,并在此后的30年得到了迅猛的发展。各单位相继研制了不同类型的监测装置。主要有各省电力部门研制的电容性设备监测装置(主要监测介质损耗、电容值、三相不平衡电流)以及电力研究院所研制的各种类型局部放电监测系统。清华大学、西安交通大学等高校则开始了绝缘诊断技术的研究。1985年以后,国家先后将一些如“电力设备运行中局部放电数字化监测装置和相应的微机系统”、“大型汽轮发电机故障在线监测系统”等项目列入“七五”和“八五”科技攻关项目。随后,机械部、电力部也先后将如“大电机绝缘在线监测技术的研究”、“在线局部放电抗干扰”等项目列入重大科技项目,国内很多汽轮发电机组都装有以安全监视为目的的旋转机械状态监测系统,标志着我国电力设备在线监测技术进入全速发展阶段^[4]。

经过数十年的发展,故障诊断技术经历了从离线监测到在线监测、从计划维修和事后维修到预知维修、从人工诊断到自动诊断的发展过程,已经成为工业控制领域的研究热点,其应用不仅涉及军事、航天、核能等领域,还在钢铁、化工、交通、电力、机械制造等工矿企业广泛地展开。

故障诊断在理论研究方面也取得了丰硕成果。1993年成立技术过程的故障诊断与安全性技术委员会(International Federation of Automatic Control, IFAC)。从1991年起IFAC已每3年定期召开故障检测与诊断(Fault Detection and Diagnosis, FDD)方面的国际专题学术会议。在近几届的IFAC世界大会上,FDD方面的论文在不断上升。据统计,1999年7月在北京召开的第14届IFAC世界大会上,这方面的学术论文已达60余篇,目前国际上每年发表的有关FDD方面的论文与报告在数千篇以上。基于解析冗余的故障诊断技术公认为起源于1971年Beard发表的博士论文^[5]。1976年,Willsky在Automatica上发表了第一篇FDD方面的综述文章^[6]。Himmelblau于1978年出版了国际上第一本FDD方面的学术著作^[7]。随后报道的这方面的重要综述文章与著作参见文献^{[8]~文献[12]}。

20世纪80年代初,清华大学方崇智教授等致力于故障诊断技术的研究。1985年,叶银忠等在《信息与控制》上发表了国内第一篇FDD技术的综述文章^[13]。1994年周东华等在清华大学出版社出版了国内第一本动态系统FDD技术的学术专著^[14]。国内发表的这方面的综述文章及著作还有文献^{[15]~文献[18]}。中国自动化学会已于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,以协调国内该学科的发展。首届全国技术过程的故障诊断与安全性学术会议已于1999年5月在清华大学召开。近年来,故障诊断技术得到了飞速发展,一些新的理论与方法,如主元分析、小波变换、神经网络、模糊系统、定性推理等都已经得到了成功的应用^[19-28]。本书将对这些新理论、新方法、新技术在电气设备故障诊断中的应用作系统性的介绍。

1.1.2 故障诊断技术的经济效益

故障诊断技术在生产中的应用,减少了突发性停产的事故,降低了过剩维修发生的费用,提高了作业率,有比较显著的经济效益。

(1) 20世纪80年代英国曾对2000个国营工厂进行了调查和统计,采用设备诊断技术,每年节约维修费用3亿英镑,而用于诊断技术的费用为每年0.5亿英镑,即每年净获益2.5亿英镑。

(2) 美国某公司采用故障诊断技术后,每年可节约设备维修费用 22%~30%,与振动有关的故障减少 62%,主要设备的大修周期从 3 年延长到 7~8 年。

美国 Pekrul 发电厂在 IMEKO 第三届国际会议上报告了采用诊断技术的经济效益。该厂装机容量 1000MW,电费为 0.015 \$/(kW·h),年产值 1 亿美元,事故停产损失为 15 万美元每天,该厂共需监测 50 个部位,需投资 20 万美元。监测装置每年所需费用为 1.5 万美元。根据可靠性计算,整个系统每年可能有 14 次事故停机。在采用诊断技术后,有 50%的事故能被检查出来,其中的 50%是由诊断系统监测出来的,又有 20%是假报警,每次事故停车平均要花 3 天时间检修,则该系统每年能节约的费用是诊断成本的 36 倍。

(3) 日本的统计资料介绍,采用诊断技术后,事故率减少了 75%,维修费用降低了 25%~50%。新日铁八幡厂热轧车间在采用诊断技术的第 1 年,带钢卷机事故率降低了 60%。在采用设备故障诊断技术后,当年的效益约 8 亿日元。

以上这些实例^[29]说明,从设备维修方式改革的角度来看,诊断技术所带来的经济效益是非常显著的。故障诊断技术不仅能在运行维修中发挥作用,还能在设计、制造、安装调试阶段发挥重要作用。

故障诊断技术发展到今天,已成为一门独立的跨学科的综合信息处理技术,它以可靠性理论、信息论、控制理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、工艺过程等)的特殊规律而逐步形成的一门新兴学科。

1.2 故障诊断技术的常用术语及基本内容

1.2.1 故障诊断技术的常用术语

故障(Fault):系统至少一个特性或参数出现较大偏差,超出了可接受的范围。此时系统的性能明显低于其正常水平,所以已难以完成其预期的功能。

严重故障(Serious Fault):在特定的操作条件下,由于故障使系统持续丧失了完成给定任务的能力。

系统故障(Systems Fault, SF):系统的构造处于不正常状态(劣化状态)。判断系统发生故障的准则是:在给定的工作条件下,系统的功能与约束的条件若不满足正常运行或原设计期望的要求,则可判断系统发生故障。

正常(Normal):设备具备其应有的功能,没有缺陷或缺陷严重程度仍处于容限范围内。

异常(Abnormal):缺陷有了进一步的发展,设备状态发生了变化,性能劣化,但仍能维持工作。

状态监测(State Monitoring, SM):系统在工作状态下,特征信号的检测、变换、分析处理以及显示记录,并输出诊断所需的或适用的信息,提供故障诊断的依据。

故障检测(Fault Detection, FD):确定系统是否发生了故障。

故障分离(Fault Isolation, FI):在故障检测之后,确定故障的种类,故障发生的部位。

故障辨识(Fault Identification, FI):在故障分离之后,确定故障的大小以及故障发生的时间。

故障诊断(Fault Diagnosis, FD):通常作为故障检测、分离和辨识的统称。显然,故障诊断的实质就是状态识别。

误报(False Alarm, FA):系统没有发生故障而报警。“误报率”是衡量故障诊断系统性能

的基本指标之一。

漏报(Missing Alarm, MA):系统发生了故障而没有报警。“漏报率”是衡量故障诊断系统性能的又一个基本指标。

安全性(Safety):系统不对人员、设备或环境造成损害的性能。它是故障诊断与容错控制实现的最终目标。

事后维修(Breakdown Maintenance, BM):等到设备无法正常工作时再进行维修。

预防维修(Preventive Maintenance, PM):预先制订计划,定期进行检修和更换。

状态维修(Status Maintenance, SM):根据设备状态来确定维修工作的内容和时间,制定维修方案。

状态估计(State Estimation, SE):在给定网络拓扑结构及元件参数的条件下,利用遥测信息估算系统运行状态。

强跟踪滤波器(Strong Tracking Filter, STF):与普通的滤波器相比,具有较强的关于模型不确定性的鲁棒性,极强的关于突变状态的跟踪能力,甚至在系统达到平稳状态时,仍保持对缓变状态与突变状态的跟踪能力。

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN):对人脑或自然神经网络若干基本特性的抽象和模拟。是由人工建立的以有向图为拓扑结构的动态系统,它通过对连续或断续的输入状态进行信息处理。

人工智能(Artificial Intelligence, AI):研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科学。人工智能是计算机科学的一个分支,它企图了解智能的实质,并生产出一种新的能以人类智能相似的方式作出反应的智能机器,该领域的研究包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。

专家系统(Expert Systems, ES):早期人工智能的一个重要分支,一般采用人工智能中的知识表示和知识推理技术来模拟通常由领域专家才能解决的复杂问题。一般来说,专家系统=知识库+推理机,因此专家系统也被称为基于知识的系统。一个专家系统必须具备3要素:领域专家级知识、模拟专家思维以及达到专家级的水平。

数字信号处理(Digital Signal Processing/Processor, DSP):进行数字信号处理的专用芯片,是伴随着微电子学、数字信号处理技术、计算机技术的发展而产生的新器件,可以快速地实现对信号的采集、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理,以得到符合人们需要的信号形式。

特征信号(Characteristic Signal, CS):指系统的某部分输出,而这部分输出是同系统功能与约束条件紧密相关的。特征信号必然包含了系统中相应的元素及有关状态的信息。因此,如何选取包含有关状态信息量最多的特征信号,成为机械设备诊断学中的重要内容之一。

信息融合(Information Fusion, IF):一个实时的连续的过程,多层次、多方面地对多源信息进行探测、联想、估计以及组合处理,使该信息系统由此获得比它的各组成部分的子集所构成的系统更优越的性能。

1.2.2 故障诊断技术的基本内容

1. 设备故障

故障诊断是根据系统或设备运行状态,通过使用先进的方法和技术手段,对运行状态参数进行监测和分析,判断设备是否存在异常或故障、故障的部位和原因以及故障的劣化趋势等,以确定合

理的检修时间和方案。对于所有设备在整个投入运行期限内,故障发生的次数和使用时间之间是有着宏观规律的,图 1-1 所示为设备故障率-使用寿命关系曲线,该曲线可分为以下 3 个阶段。

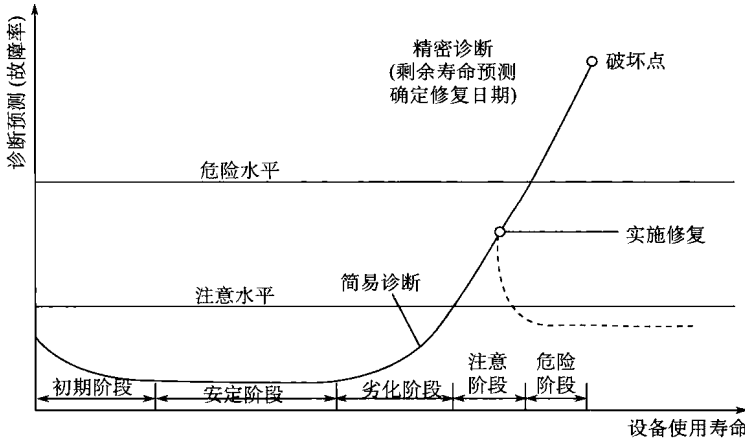


图 1-1 设备故障率-使用寿命关系曲线

(1) 初期阶段:故障率较高。原因有:①设备刚刚投运时,必然会暴露出制造、安装和调试中遗留的问题;②相关人员对设备的操作和维护还需要有一个适应和熟悉的过程。

(2) 稳定期:制造、安装和调试中遗留的问题得到解决,故障率很低,一般是突发性故障。

(3) 劣化期:设备逐渐老化,故障率开始上升。

通过故障诊断,可根据设备状态作出相应的维修方案和采取相应的措施,以排除故障隐患,延长设备的使用寿命。

故障诊断技术的主要任务之一是设备维修,它经历了事后维修、预防维修和状态维修 3 种方式,并取得了很大成效,故障诊断技术的产生和应用,使设备维修体制由传统的事后维修和预防维修方式逐步变为状态维修(或预知维修),从而减少了事故停机损失,提高了设备运行的可靠性,降低了维修费用。

2. 故障诊断技术研究内容

故障诊断技术主要由以下 3 部分组成。

(1) 故障诊断机理的研究:即故障诊断物理过程的研究。如对设备的电气绝缘、部件断裂、轴承磨损、绕组变形等机理的研究。

(2) 故障诊断信息学的研究:主要研究故障信号的采集、选择、处理和分析过程。单传感器采集设备运行中的信号(如振动、转速),多传感器信息融合处理,信号的时域和频域分析,状态和故障的识别与评价。

(3) 诊断逻辑和数学原理方面的研究:主要通过逻辑方法、模型方法、信号分析方法、推论方法及人工智能方法等,根据可观测的设备故障表征来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等。

在实现故障诊断的过程中,需要应用以下 4 项技术。

(1) 检测技术:准确采集反映设备状态的信号和参数。

(2) 信号处理技术:将现场采集到的各种信号,经过各种变换,把反映设备状态的特征信

息提取出来。

(3) 识别技术:根据掌握的故障征兆信息和状态参数,判断故障并找出原因。

(4) 预测技术:对已识别出来的故障进行预测,预测故障的发展趋势和设备的剩余寿命。

目前,由于故障诊断具体应用领域和应用对象的不同,形成了各种各样的方法和技术。按照诊断对象、检测手段、诊断方法原理划分,也可将故障诊断技术简单地分为传统的诊断方法、数学诊断方法以及智能诊断方法等。对于各种划分都有其依据和合理性,只是从不同的角度考虑问题。

3. 状态监测与故障诊断

要实现有效而灵敏的故障诊断,就必须对反映设备或系统工作状态的信息进行全面监测和分析,实时掌握设备运行状态,即进行状态监测。

状态监测是通过监测结果与设定阈值之间的对比,仅对设备运行状态作出正常、异常或故障的判断,而对故障的性质、严重程度等无法进行更加深入的诊断。状态监测与故障诊断构成了设备诊断的两个阶段,状态监测是故障诊断的基础,故障诊断是状态监测的深化和提升,二者紧密相连。

故障诊断包括脱离状态监测而进行的离线故障诊断。通常,离线故障诊断是在传统的预防维修方式下开展的预防性试验基础上进行的,用于诊断故障的参数和信息主要是各种预防性试验项目的结果,以及一些不需采用特殊检测手段即可获得故障信息。长期以来,我国许多行业一直实行设备预防维修制度,形成了一系列针对不同对象的预防性试验项目和方法,在一定程度上比较有效地保障了设备的正常工作和安全运行,提高了设备的使用率和可靠性。同时也积累和建立了大量的以预防性试验结果为基础的诊断经验和判定标准。尽管离线故障诊断也不断地应用一些最新的方法和技术,但终究摆脱不了因“离线”带来的局限性,包括非直接性和非实时性。在线故障诊断,在设备运行过程中,对设备运行状态进行实时监测,及时发现设备出现异常的微小变化,以提高整个系统运行的可靠性。

1.3 数据驱动故障诊断的方法与分类

故障诊断技术是对系统异常状态的检测、识别以及预测等各种技术的总称。按照概念可将故障诊断过程分为3个主要步骤:第1步是检测设备状态的特征信号;第2步是从所检测到的特征信号中提取征兆;第3步是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。评价一个故障诊断系统的好坏,主要是看它对故障的灵敏度、对干扰和噪声等一系列不确定因素的鲁棒性、系统的误报率和漏报率以及故障定位和辨识估计的准确性等。

故障诊断技术在系统以及过程运行中的重要性,吸引了工程领域和学术领域等众多专家越来越多的关注,因此得到了迅速的发展,致使各种故障诊断的方法层出不穷,而对这些方法的分类也在不断地变换。最早 Frank 教授将故障诊断的方法分为基于解析模型的方法、基于信号处理的方法以及基于知识的方法3大类^[30];后来, Venkatasubramanian 将故障诊断的方法分为基于定量模型的方法、基于定性模型的方法以及基于过程历史数据的方法^[31-33];最近周东华教授根据诊断故障时所利用的信息的性质对故障诊断的方法进行了重新分类,将其从整体上划分为定性分析的方法和定量分析的方法。其中,定性分析包括专家系统方法、图论法等,此类方法特别适合于难以建立数学模型的系统。定量分析的方法又分为基于解析模型

的方法和基于数据驱动的方法,具体的分类如图 1-2 所示^[34]。定量分析包括状态估计方法、机器学习方法、多元统计分析方法、信号处理方法和信息融合类方法等。

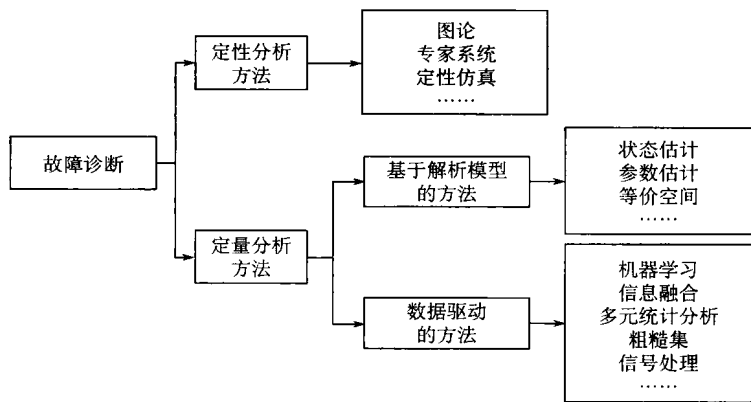


图 1-2 故障方法分类

1.3.1 定性分析的方法

定性分析的方法,不需要对象的精确数学模型,近年来得到了迅速发展。

1. 图论方法

图论方法主要包括符号有向图(Signed Directed Graph,SDG)方法和故障树(Fault Tree)方法,是基于图论的故障诊断方法中两种主要的方法。将符号有向图方法用于过程故障诊断是由 Iri 等首先提出的^[35],它的基本思想是:首先将系统变量用节点来表示,然后将原因节点和结果节点连线,用来表示系统变量之间的因果关系。基于故障树的故障诊断方法最早由 Caceres 等提出,它的基本思想是从系统的故障状态出发,逐步地进行推理分析,最终确定故障发生的原因、影响的程度以及发生的概率等,是一种由结果到原因的特殊的逻辑分析过程^[36,37]。基于图论的故障诊断方法具有建模简单、结果易于理解以及应用范围广等特点,但是一般只适用于比较简单的系统,应用于复杂系统时搜索的过程则变得非常复杂,并且诊断正确率也比较低,甚至无法给出有效的故障诊断结果。

2. 专家系统方法

专家系统是指利用研究领域专家的专业知识进行推理去解决专业的高难度的实际问题的智能系统。专家系统主要由知识库、推理机、综合数据库、人机接口及解释模块等部分构成。基于专家系统的故障诊断实时性是衡量专家系统的一个重要指标,提高系统实时性的研究主要集中于两个方面:一个是对表示知识的方法进行改造,使系统具有表达知识的能力;另一个是建立时态推理的诊断模型,用模糊数学来描述时态知识的不精确性,从而把时态信息用于故障诊断^[38-40]。专家系统的弱点之一就是自学习能力差,为了解决这方面的问题,现在有不少专家系统采用与神经网络结合的策略,该方法把神经网络、基于规则推理机和基于事件推理机结合起来。模糊专家系统在专家知识的表示中引入了模糊隶属度的概念,并利用模糊逻辑进行推理,能够很好地处理专家知识中的不确定性。但是,这类方法也存在许多的不足。例如,当规则比较多时推理的过程中存在着匹配冲突和组合爆炸等问题。

3. 模糊逻辑方法

模糊故障诊断有两种基本方法:一种是先建立征兆与故障类型之间的因果关系矩阵,再通过某种模糊合成算子建立故障与征兆的模糊关系方程,这是基于模糊关系及合成算法的诊断方法;另一种是先建立故障与征兆的模糊规则库,再进行模糊逻辑推理的诊断过程,这是一种基于模糊知识技术的诊断方法。在故障诊断中,利用模糊推理的故障诊断方法^[41-43]主要有: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;基于模糊逻辑的残差评价方法;基于模糊模式识别的故障诊断方法等。模糊方法适用于测量值较少且无法获得精确模型的系统。但是,模糊诊断知识获取困难,尤其是故障与征兆的模糊关系较难确定,且系统的诊断能力依赖模糊知识库,学习能力差,容易发生漏诊或误诊。

1.3.2 基于解析模型的方法

基于解析模型的故障诊断方法可以分为状态估计方法、参数估计方法和等价空间方法等^[44-47]。

1. 状态估计法

状态估计法的基本思想是利用观测器/滤波器对系统的状态进行估计并构成残差序列,然后采取一定的措施增强残差序列中所包含的故障信息,抑制模型误差等非故障信息,通过对残差序列的统计检验把故障从中检测出来。由于实际中很难获得系统的精确数学模型,所以现阶段对于状态估计方法的研究主要集中于提高检测系统对于建模误差、扰动、噪声等未知输入的鲁棒性及系统对早期故障的灵敏度^[48,49]。近年来出现的新的基于状态估计的故障诊断方法主要有:连续有限记忆观测器方法,具有无振荡和有限记忆的特点,可以实现对未知输入的解耦,可以把等价空间方法扩展到连续域;自适应观测器方法,用一个检测观测器检测故障的发生,利用自适应观测器诊断故障,鲁棒性强,且可以给出突变增益故障或缓变故障的估计值。以上这些方法都是针对线性系统的,对于非线性系统的研究成果还比较少。

2. 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量序列的统计特性来进行故障检测、分离及估计。1984年 Iserman 对基于参数估计的故障诊断方法作出了完整的描述^[50]。周东华等提出了一种强跟踪滤波器理论^[51],利用强跟踪滤波器来估计模型参数,具有较好的关于模型不确定性的鲁棒性及极强的关于突变状态的跟踪能力,可以有效地应用于一类非线性系统的在线故障诊断^[52]。文献[53]将参数估计和观测器方法相结合,首先构造故障检测观测器,快速检测故障并进行故障预分离。文献[54]将参数估计和等价空间方法相结合,首先利用连续时间的等价空间方法快速检测故障,再根据等价残差估计某个线性参数的变化,从而回避了参数估计算法对持续激励的要求。对于存在慢时变参数的系统,使等价方程的系数对估计出的参数变化值具有自适应能力,可以提高故障检测的性能。

3. 等价空间方法

等价空间方法的基本思想就是利用系统的输入输出的实际测量值检验系统数学模型的等价性(即一致性)以检测和分离故障^[55,56]。主要方法有:①基于约束优化的等价方程方法,基

本思想是用滑动平均等价方程产生残差,将残差的鲁棒性和灵敏度以及故障分离的要求转化为最小化平方代价函数;②广义残差产生器方案,通过利用等价系统的输入、输出描述构造等价方程,产生基本残差,用动态加权阵变换基本残差,增加设计的自由度,满足故障检测和分离的要求;③具有方向性的残差序列,基于系统的动态输入输出模型,用动态等价方程产生具有方向性残差的方法;④基于近似扰动解耦的等价空间方法。由于参数估计法要求找出模型参数和物理参数之间的对应关系,因此常将参数估计法和状态估计法以及等价空间法分别结合起来使用。

1.3.3 基于数据驱动的方法

数据驱动的方法不需要对象的准确模型,因此适用性强。这类方法利用信号模型,直接分析可测信号,提取诸如方差、幅值、频率等特征,从而检测故障的发生。其特点是从整体上研究信号的行为和特征,从而分离出故障模式,实现故障诊断。

1. 机器学习

基于机器学习的故障诊断方法的主要思想就是利用系统在正常和各种故障下的历史数据对机器学习方法进行训练,之后再利用机器学习方法完成对系统的故障诊断。机器学习是研究如何使用机器来模拟人类学习活动的—门学科^[57]。机器学习的基本结构如图 1-3 所示。

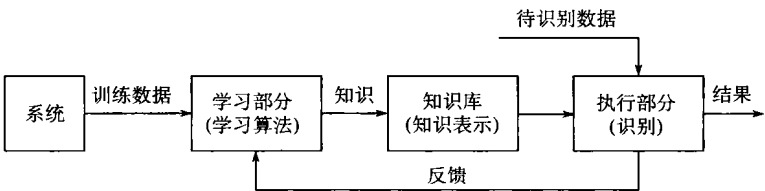


图 1-3 机器学习的基本结构

根据有无经验知识,可以将机器学习方法分为监督学习、非监督学习和强化学习 3 类。监督学习的方法是比较重要的机器学习方法,很多经典的学习方法都属于这一类,例如 k NN、决策树、支持向量机、人工神经网络以及贝叶斯网络等;目前,基于机器学习方法的故障诊断有:模糊神经网络与粗糙集、小波变换和最小二乘加权融合的算法;利用神经网络和支持向量机结合的故障分类;依据主元分析提取故障的统计特征,利用支持向量机进行故障检测和辨识等^[58,59]。基于机器学习的故障诊断方法以故障诊断正确率为学习目标,并且适用范围广。但是机器学习算法需要过程故障情况下的样本数据,且精度与样本的完备性和代表性有很大关系,因此难以用于那些无法获得大量故障数据的工业过程。

2. 多元统计分析

基于多元统计分析的故障诊断方法主要是利用过程中多个变量之间的相关性完成对过程的故障诊断。常见的多变量统计方法主要有主元分析(Principal Component Analysis, PCA)、指定元(Designated Component Analysis, DCA)等。文成林教授等提出了相对主元分析(Relative PCA, RPCA)方法^[60],针对 PCA 忽略了量纲对系统带来的影响,从而导致选取出的主元不具有代表性的问题,通过引入相对变换,建立 RPCA 模型对系统进行监控;针对传统的 PCA 没有考虑到观测数据的多尺度效应这个问题,文献^[61]提出了多尺度 PCA (Multiscale

PCA, MPCA)方法;针对 PCA 的模型均是假设过程数据为独立同分布的问题,文献[62]提出应有效地考虑过程变量的时序相关性,将 PCA 和时间序列的模型相结合,提出了一种动态主元分析(Dynamic PCA, DPCA)方法;文献[63]和文献[64]将基于数据的统计建模与系统的运行经验相结合,提出了 DCA 方法,从而对基于多元统计分析的故障诊断结果能更好地进行分析和解释。此外,还有自适应主元分析、多块主元分析、非线性主元分析等一些改进的 PCA 方法,使 PCA 得到了一定的发展。

3. 小波变换方法

小波分析是一种时-频分析方法,具有多分辨分析的特性,近年来被广泛应用于信号处理中。小波变换的故障诊断机理包括两个方面:一是利用信号的奇异性进行故障诊断;二是利用信号频率结构的变化进行故障诊断^[65-67]。目前基于小波变换进行故障诊断的方法有以下 3 种。①对观测信号的奇异性进行故障诊断。动态系统的故障通常会导致系统的观测信号发生变化,若直接利用连续小波变换检测观测信号的奇异点就可以检测出系统故障。②对观测信号频率结构的变化进行故障诊断。振动系统的故障通常会导致系统观测信号的频率发生变化。若利用离散正交小波变换分析观测信号的频率结构随时间的变化情况,就可以检测系统的故障。③利用脉冲响应函数的小波变换进行故障诊断。

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神经网络等故障诊断方法。小波网络是一直连续的非线性映射,相当于用小波基函数作为节点激活函数的神经网络,它结合了小波分析与神经网络的特点。文献[68]利用小波网络来辨识非线性对象,然后,利用信号在小波变换的多尺度所表现的不同特点来检测出突变的故障信号。

4. 神经网络的方法

神经网络具有处理复杂多模式及进行联想、推理和记忆功能等特点。神经网络方法由于具有模拟任何连续非线性函数的能力和从样本学习的能力,非常适合应用于故障诊断系统,因此在故障诊断中得到了广泛的应用,将神经网络应用于过程监测系统已成为一个非常活跃的研究领域^[69,70]。用神经网络进行控制系统故障诊断,主要有以下两种方式。①离线诊断。它的学习过程和使用过程是分开的。当控制系统出现故障时,把故障信息或现象输入神经网络,经过自组织、自学习,输出合理的解决办法。②在线诊断。将神经网络与控制系统直接相连,让其自动获得故障信息及现象,然后由神经网络内部自组织、自学习,使学习过程和使用过程合二为一。

由于定性知识具有表达不确定、不准确知识的能力,所以近年来在应用神经网络解决故障诊断问题时,有一个明确趋势就是希望能够在神经网络的框架下集成定性知识。为此,模糊神经网络成为研究的一个热点。

5. 信息融合的方法

信息融合技术通过充分利用多个信息源,对多源的信息加以分析和综合,从而获得比单源的信息更为可靠的结论。小波-神经网络信息融合故障诊断方法,利用小波函数进行小波变换,提取其特征成分,最后利用神经网络的信息融合能力进行融合推理,最终输出诊断结果。基于神经网络技术的控制系统传感器信息融合故障诊断,借助神经网络的非线性拟合能力,信息融合诊断策略按照一定的规则从一次和二次数据的融合信息中分离出故障。D-S 证据理论