

电力设备 状态监测与故障诊断

王致杰 徐余法 刘三明 编著
商雨青 孙 霞 王成刚



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍电力变压器、发电机、高压开关、电容器、互感器、避雷器、电力电缆等设备的故障诊断、状态监测与维修技术。每一设备均包括:常见故障现象、故障原因、故障维护、故障树、故障诊断方法及设备的在线状态监测等部分。旨在帮助读者掌握电气设备设计、运行、维护中的关键技术,为培养电气设备的设计、生产、运行及维护等专门技术人才打下良好的专业技术基础。

这是一套关于电气工程学科的基本理论和应用技术的高等学校教材,主要作为普通高等学校电气工程及其自动化、自动化、电力系统自动化、电力系统运营管理、机电一体化等专业的本科生和研究生教材,也可供电力部门从事生产、管理、运行、维护、试验及其他工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力设备状态监测与故障诊断/王致杰,徐余法,刘三明等
编著. —上海:上海交通大学出版社,2012

ISBN 978-7-313-07826-1

I. 电... II. ①王... ②徐... ③刘... III. ①电力设备—故障诊断 ②电力设备—维修 IV. TM407

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 217765 号

电力设备状态监测与故障诊断

王致杰 徐余法 刘三明 等编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路951号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市文化印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:15.25 字数:360千字

2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷

印数:1~2030

ISBN 978-7-313-07826-1/TM 定价:25.00元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:0512-52219025

前 言

本书内容以电气设备常见故障的诊断、维修与状态监测技术为主,论述了设备的基本结构、常见故障的维修方法、诊断方法及具体的监测技术应用与实现。

传统的电力设备故障诊断常采用离线预防性试验方法,而实现设备预知性维修是我们一直追求的目标,其中对电力设备进行在线监测和故障诊断是实现这一目标的关键技术。电力设备是电力系统的核心,它担负着发电、输电、配电的任务。绝缘是电气设备最重要的部分,它决定了电气设备的技术经济性和运行可靠性,是保障电气系统可靠运行的重要指标。

本书主要研究了电力变压器、汽轮发电机、高压开关、电容器、互感器、避雷器、电力电缆等设备的常见故障诊断、状态监测与维修技术。每一设备都包括:常见故障现象、故障原因、故障维护、故障树、故障诊断及设备的在线状态检测等部分。旨在帮助读者掌握电气设备设计、运行与维护中的关键技术,为培养电气设备的设计、生产、运行及维护等专门技术人才打下良好的专业技术基础。

本书共分为12章,第1章绪论,介绍电气设备故障诊断技术的基本概念,论述发展在线监测技术的必要性。第2章故障诊断的新理论与新方法,主要介绍专家系统、人工神经网络、模糊理论、小波变换、信息融合等理论在故障诊断中的应用。第3章讨论电力设备状态检测系统的基本组成、各类传感器的性能特点及抗干扰技术。第4章为变压器常见故障的分析、在线监测与故障诊断。第5章是发电机与电动机的在线监测与故障诊断。第6章是高压断路器和GIS开关设备的在线监测与故障诊断。第7章为电容型设备和电力电容器的在线监测。第8章是避雷器的在线监测与故障诊断。第9章是电力电缆与互感器的故障诊断。第10章讲述远程故障诊断技术。第11章是电力设备事故与故障统计分析。第12章是智能电网技术。

其中,上海电机学院王致杰撰写了第4章、第5章、第6章、第8章、第11章;徐余法撰写了第1章;刘三明撰写了第2章、第3章;商雨青撰写了第7章;青岛理工大学王成刚撰写了第9章;山东科技大学泰安校区孙霞撰写了第10章、第12章。全书由王致杰统稿,梁森教授主审,中国矿业大学王崇林教授在编写过程中提供了许多参考资料和修改建议,在此表示感谢。

为便于自学,本书突出了基本理论、试验设计、故障诊断、维修方法、理论应用等基本内容,每章后附有思考题。

本书在编写过程中曾得到上海市自然科学基金会、上海市人才发展基金、国家电网公司山东电力公司、上海电气电站集团、上海电气输配电股份有限公司等单位的支持,在此一并致以诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处恳请读者批评指正。

作 者
2012年2月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 故障诊断技术产生的背景及意义	1
1.2 电力设备绝缘的预防性试验	2
1.3 电力设备在线监测及发展	2
1.4 电气设备故障诊断的发展	4
1.5 故障诊断的展望	5
1.6 研究内容	5
1.7 本章小结	5
思考题与讨论题	5
参考文献	6
第 2 章 故障诊断理论与方法	7
2.1 智能诊断技术	7
2.2 基于信息融合的故障诊断	10
2.3 容错控制技术	10
2.4 本章小结	11
思考题与讨论题	11
参考文献	11
第 3 章 状态监测系统	14
3.1 状态监测与故障诊断技术的概念	14
3.2 状态监测的任务	15
3.3 状态监测与故障诊断技术的方法	15
3.4 在线监测系统的设计	16
3.5 传感器	18
3.6 本章小结	25
思考题与讨论题	25
参考文献	26
第 4 章 电力变压器的监测与故障诊断	28
4.1 概述	28
4.2 油浸式电力变压器常见故障及诊断	31
4.3 常见故障的初步判断处理	36

4.4	基于故障树的故障诊断	37
4.5	基于 DGA 的变压器故障机理与诊断	41
4.6	变压器油中溶解气体(DGA)的在线监测与诊断	51
4.7	变压器局部放电在线监测技术	61
4.8	神经网络故障诊断技术	65
4.9	基于小波网络的变压器故障诊断	68
4.10	变压器寿命预测	74
4.11	本章小结	75
	思考题与讨论题	76
	参考文献	76
第 5 章	发电机的监测与故障诊断	78
5.1	研究的背景及意义	78
5.2	故障及其产生的原因分析	83
5.3	电机常见故障判别法	84
5.4	常见故障及检修	86
5.5	基于故障树的发电机故障诊断	90
5.6	故障现象及分析	95
5.7	发电机的日常维护与保养	98
5.8	大型发电机故障放电在线监测的重要性	99
5.9	发电机智能故障诊断	103
5.10	本章小结	105
	思考题与讨论题	105
	参考文献	106
第 6 章	GIS 和高压开关设备的监测与故障诊断	108
6.1	高压真空断路器常见故障	108
6.2	封闭式组合电器 GIS	110
6.3	GIS 绝缘故障的诊断	111
6.4	GIS 绝缘故障的监测	112
6.5	高压断路器的在线监测和故障诊断	116
6.6	2009 年全国高压断路器可靠性分析	121
6.7	本章小结	125
	思考题与讨论题	125
	参考文献	126
第 7 章	电容型设备的在线监测与诊断	127
7.1	概述	127
7.2	电力电容器的在线监测与故障诊断	127

7.3 介质损耗角正切的监测	130
7.4 介质损耗角正切的异频监测	132
7.5 本章小结	132
思考题与讨论题	133
参考文献	133
第8章 避雷器的在线监测与故障诊断	135
8.1 避雷器的故障特点	135
8.2 避雷器常见故障及处理	135
8.3 避雷器的预防性试验	140
8.4 避雷器的在线监测	142
8.5 光电技术在避雷器泄漏电流在线监测中的应用	146
8.6 避雷器的故障树	147
8.7 本章小结	148
思考题与讨论题	148
参考文献	149
第9章 电力电缆与互感器的故障诊断	150
9.1 电力电缆概述	150
9.2 电力电缆的常见故障	156
9.3 高压电缆故障检测方法	157
9.4 互感器的常见故障	161
9.5 互感器故障与故障统计分析	162
9.6 并联电抗器事故与故障统计分析	166
9.7 2009年全国输电线可靠性分析	168
9.8 本章小结	170
思考题与讨论题	170
参考文献	170
第10章 远程故障诊断技术	172
10.1 远程故障诊断技术概述	172
10.2 远程故障诊断系统通信方案	172
10.3 远程故障诊断系统的总体结构	173
10.4 基于专家系统的远程故障诊断系统	174
10.5 基于综合型神经网络专家系统的远程故障诊断系统	176
10.6 远程故障诊断系统应用实例	178
10.7 本章小结	178
思考题与讨论题	179
参考文献	179

第 11 章 电力设备事故与故障统计分析	180
11.1 概述	180
11.2 变压器事故统计分析	181
11.3 变压器故障和缺陷统计	194
11.4 变压器跳闸、非计划停运情况统计	199
11.5 2008 年全国电力变压器等输变电设备可靠性分析	202
11.6 2009 年全国电力变压器等输变电设施可靠性分析	206
11.7 本章小结	211
思考题与讨论题	211
参考文献	211
第 12 章 智能电网	212
12.1 概述	212
12.2 智能电网发展面临的新形势	212
12.3 国家电网发展规划指导思想、基本原则和发展目标	214
12.4 国家电网发展规划重点	218
12.5 保障措施	220
12.6 本章小结	221
思考题与讨论题	221
参考文献	222
附录	223
附录 A 2004 年度国家电网公司系统 110kV 及以上电压等级变压器 在运情况一览表	223
附录 B 2004 年度国家电网公司系统 110kV 及以上电压等级互感器 在运情况一览表	225
附录 C 2004 年度国家电网公司系统 330kV 和 500kV 油浸式并联电抗器 在运情况一览表	227
附录 D 华东电力公司企业技术标准大型变压器及其附件制造质量监造大纲	228

第 1 章 绪 论

1.1 故障诊断技术产生的背景及意义

现代化工业生产中,提高效率、降低成本是企业追求的目标。但同时对设备的安全性及可靠性提出了越来越高的要求,因为一旦设备和系统发生故障,就可能引起“链式反应”,导致整个生产系统不能正常运行,从而造成巨大的经济损失,严重的设备故障还会造成灾难性事故和人员伤亡,产生不良社会影响。故障诊断技术能给企业带来巨大的经济效益,其经济意义集中体现在降低维修费用和减少突发故障两个基本方面。

在国外,各种重大事故也时有发生。例如,1998年8月到1999年6月短短的10个月间,美国的3种运载火箭:“大力神”、“雅典娜”、“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,迫使美国宇航局下令停止了所有的商业发射计划,美国的航天计划受到了沉重的打击。在工业上,1971年美国的三里岛300MW机组损坏,1972年日本关西电力公司海南电站3号机断轴,1973年西德600MW机组联轴器变形等重大事故,都造成了重大经济损失^[1-6]。2003年8月发生的北美电力系统大停电,波及美国8个洲和加拿大1个省,估计美国的总损失达40亿~100亿美元,而加拿大8月份的国内总产值下降了0.7%。

在国内电力行业中,1985年大同电厂,1988年秦岭电厂,1999年阜新电厂各有一台200MW机组发生毁机故障,损失都在亿元以上,严重影响地区电网的供电。

因此,现代化工业生产对机电设备,乃至一个零件的工作可靠性,都提出了极高的要求。世界各国也都普遍开展了对大型重要设备的状态监测和故障诊断工作,取得了明显的经济效益。据报道,英国CEGB公司下属的550MW和660MW发电厂因机组故障每年损失750万英镑。采用故障诊断技术后,对机组振动故障原因的五次正确分析,就取得直接经济效益293万英镑^[1-5]。为确保各种机电设备的安全运行,提高其可靠性和安全运转率,必须加强设备的运行管理,进行在线工况监测,及时发现异常情况,加强对故障的早期诊断和预防。

目前电力系统正朝着高电压、大容量的方向发展,高压电力设备是保证电力系统运行可靠性的基础,不论是大型关键电力设备(发电机、变压器、断路器等),还是小型电力设备(避雷器、绝缘子等),在运行中,由于受到电、热、机械力、环境等各种因素的作用,绝缘材料逐渐劣化,一旦发生故障必将引起局部甚至全部地区的停电,造成巨大的直接与间接经济损失和社会影响。大量资料表明,70%左右的电力设备故障是由绝缘性能劣化引起的。

高压电力设备主要由金属材料和绝缘材料构成。为了确保电力设备的质量,在制造过程中,要经过型式试验、例行试验和出厂试验;而在运行时,电力设备要进行交接试验和预防性试验。以便及时掌握电力设备绝缘状况,保证电力设备的正常运行。

1.2 电力设备绝缘的预防性试验

对电气设备进行绝缘监督的主要手段,采用定期进行绝缘预防性试验,即根据电力部所颁发的《电力设备预防性试验规程》,对不同设备所规定的项目和相应的试验周期,定期在停电状态下进行绝缘性能的检查性试验。可及时发现缺陷,减少事故的发生。预防性试验可分为非破坏性试验和破坏性试验两大类:

(1)非破坏性试验。又称绝缘特性试验。主要试验包括绝缘电阻测量、泄露电流测量、介质损耗角正切测量、油中气体含量检测等项目,用于判断设备绝缘状态。由于采用较低电压试验,因此不会损伤设备绝缘。

(2)破坏性试验。又称绝缘耐压试验。它主要指交流耐压和直流耐压试验。试验时在设备绝缘上施加较高的试验电压,考验绝缘对此电压的耐受能力。试验时可能会给绝缘造成一定的损伤。

根据《电力设备预防性试验规程》,给出了常见的电力设备预防性试验主要项目见表 1-1。

表 1-1 现行电力设备预防性试验主要项目

	发电机	电力 变压器	电力电缆	高压套管	断路器	
					充 SF ₆	充油
绝缘电阻测量	☆	☆	☆	☆	☆	☆
直流泄漏电流测量	☆	☆	☆	×	☆	☆
介质损耗角正切值测量	△	☆	☆	☆	△	☆
绝缘油试验	☆	☆	☆	○	×	☆
微量水分测定	×	☆	×	○	☆	×
油中溶解气体色谱分析	×	☆	×	○	×	×
局部放电试验	×	×	×	○	×	×
直流耐压试验	☆	×	☆	×	×	×
交流耐压试验	△	△	×	△	△	☆

注:“☆”表示正常试验项目,“×”表示不进行该项试验,“△”表示大修后进行,“○”表示必要时进行。

预防性试验效果明显是一种评估电力设备绝缘状况简便有效的方法。根据运行经验及试验研究确立起来的这些预防性试验项目,确保了电力设备的安全运行。

1.3 电力设备在线监测及发展

国际上在早期采用的是事后维修(BREAKDOWN MAINTENANCE)。美国在 20 世纪 40 年代、日本在 20 世纪 50 年代曾经改用定期维修,它虽对提高设备可靠性起了一定作用,但存在如下缺点:

(1)需停电进行试验,而不少重要电力设备,轻易不能停止运行。

(2) 停电后设备状态(如电压、温度)与运行中不符,影响测量和判断。

(3) 由于是定期检查而不是实时连续监测,绝缘仍可能在试验间隔期内发生故障。

(4) 由于是定期检修,没有充分考虑设备实际状态如何,以致出现了过多不必要的停机及维修,造成了人力及物力的大量浪费,甚至因拆卸、组装过多而出现过早损坏。

美国通用电气公司等 在 20 世纪 50 年代,已经提出从以时间为基准的维修方式发展到以状态为基准的维修方式,即状态维修(CONDITION BASED MAINTENANCE),它是在在线监测和故障诊断为基础的。其基本原理是利用计算机和传感器对运行中的电力设备绝缘状况进行在线状态监测,及时取得能反映绝缘状况变化的信息,在进行分析处理后,根据其数值的大小及变化趋势,可对绝缘的状况作出判断,从而发现早期潜伏的故障,并根据诊断结论安排必要的维修。状态维修主要优点如下:

- (1) 可有效地使用设备,提高设备利用率。
- (2) 降低备件的库存量以及更换部件与维修所需费用。
- (3) 有目标地进行维修,可提高维修水平,使设备运行更安全可靠。
- (4) 可系统地对设备制造部门反馈设备的质量信息,用以提高产品的可靠性。

由于绝大多数故障事前都有先兆,表现为电气、物理、化学等特性有少量渐进的变化,电力设备在线监测技术与故障诊断技术的特点就是可以对电力设备在运行状态下进行连续实时监测与判断,它可以大大提高试验的真实性与灵敏度,及时发现绝缘缺陷。同时在线监测可以积累大量的数据,将设备的当前数据和历史数据相结合,用各种智能算法进行及时、全面的综合分析判断,就可以发现和捕捉早期缺陷,确保安全运行,从而减小由于预防性试验间隔所带来的误差。

电力设备的在线监测系统,通常由传感器、信号采集系统、分析诊断系统组成。常用的传感器有电磁传感器、振动传感器、超声传感器、温度传感器、气敏传感器等。信号采集系统是将传感器得到的模拟量转换成数字量传输到计算机进行处理。分析诊断系统利用模糊诊断技术、小波分析技术、神经网络技术等智能算法对所采集信号进行综合处理,得到当前电力设备的绝缘状态,并根据需要进行绝缘诊断和寿命评估。

离线和在线试验是相辅相成的。如在线监测中发现事故隐患,为真正确定故障,可在离线状态下进行更详细的检查。电力设备故障诊断过程的流程示意图如图 1-1 所示。

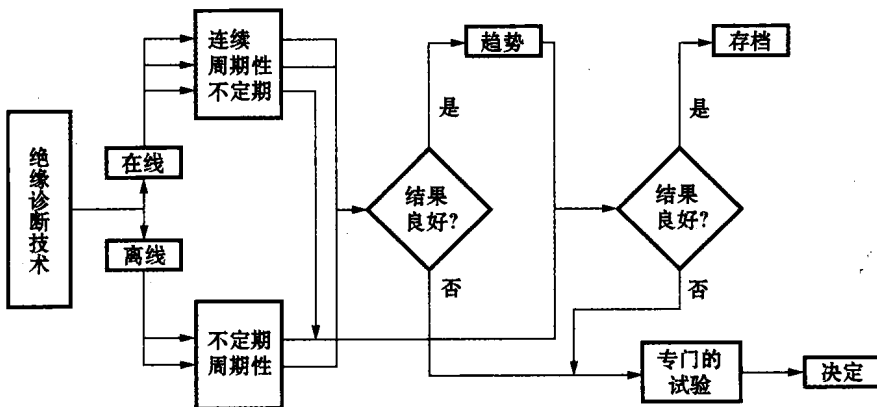


图 1-1 电气设备监测诊断过程流程图

随着电力设备在线监测与故障诊断技术的研究进展,状态检修制将会逐步取代定期检修制,必将大大提高电力设备的运行可靠性。

1.4 电气设备故障诊断的发展

据国外报道,电气设备在“服役”期内,其故障发生率和运行时间、方式之间有着宏观规律。将设备故障率和使用寿命的关系绘制成曲线,其形状为两边高,中间低,形成浴盆状,称为设备故障发生的“浴盆”曲线,见图 1-2。

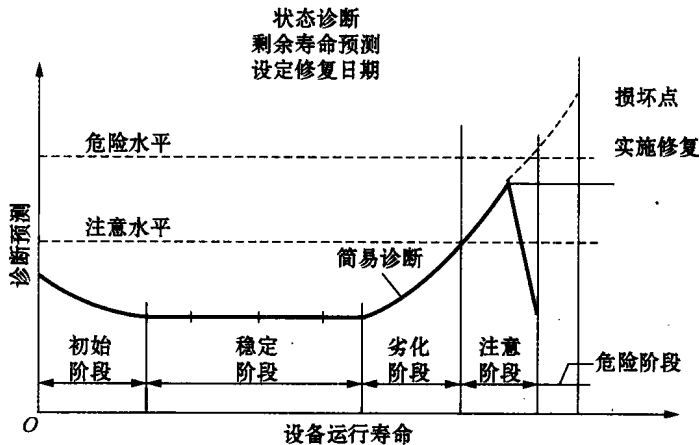


图 1-2 设备故障率与使用时间的关系

从图 1-2 可见,在电力设备的整个“服役”期内,设备故障率分为初期故障率、稳定期故障率、劣化期故障率。对于发电机、变压器等大型电气设备,投运初期,由于各部件磨合不善,一些制造、安装和调试过程中遗留的问题逐渐暴露。同时,操作和维护也有一个适应期,所以故障率略高。发电机通过 168 小时试运行,变压器经过 30 天至半年后,随着对暴露问题的处理及运行人员对设备性能的逐步熟悉和掌握,设备故障率会逐渐降低,设备运行进入稳定期。该期间一般约 15~20 年。在设备“服役”后期,由于绝缘老化现象明显,泄漏电流增加,绝缘电阻下降,油中溶解气体组分变化,局部放电增加等原因,故障率会明显增加^[5]。

由于预防性试验大多是离线进行的,试验时需停机、停电,造成较大的经济损失。而一些重要设备轻易不能停运,致使定期试验无法按照计划进行;即使可停运待检设备,也往往因为运行中与停运后的设备状态差异,不同程度地影响到试验结果的准确性。另一方面,对于正常的设备,若按计划采用定期检测和维修,又造成不必要的人力和物力的极大浪费。甚至可能因检查维修,造成维修过度,即造成“维修干扰”。同时,定期检测和维修,不是连续和实时监测,无法避免设备在两次试验间隔期可能发生的故障。

采取对潜伏性故障的早期进行连续监测,与离线检测相结合,应用现代分析、信息融合等技术,进行综合诊断,预测设备可能发生的故障部位、程度和趋势,以期做到预知维修和有效维修,对电力设备的安全运行起到重要的保障作用^[6,7]。

1.5 故障诊断的展望

在 20 世纪 60 年代至 70 年代,一些工业发达国家即开始故障诊断技术的研究。因受到当时工业技术水平的限制,加之电力设备潜伏性故障初期发展速度慢,征兆信号微弱,生产运行环境中又存在许多电磁干扰,能够监测的特征量与设备状态不完全吻合,可变因素和影响因素太多等原因,使故障诊断技术的发展和應用受到阻碍。到 20 世纪 80 年代至 90 年代,传感技术、计算机技术和光纤等高新技术的发展和應用,使电力设备的故障诊断技术得到迅速发展。加拿大、日本、德国、美国等陆续研制了油中溶解气体在线监测系统,这些技术得到了国际大电网会议的系统总结^[8]。

近年来,随着光电技术的发展,加拿大、美国等国家相继研制出不同类型的在线监测装置,更加促进了设备的故障诊断技术的实施和有效发展。

早在 20 世纪 60 年代,我国已认识到电气设备故障诊断技术的重要性,在 70 年代,就进行过一些带电试验的研究和應用,但由于当时技术不完善,测量结果分散性大,加上操作复杂和误报等原因,使该技术没有得到大力推广。随着大容量、高电压等级电气设备的迅速增加,一些设备的故障率偏高,使故障诊断技术的开发更加迫切。为发展故障诊断技术,电力主管部门多次召开全国电力设备绝缘带电测试和故障诊断技术研讨会,研究如何发展和推广故障诊断技术。可以说,我国电气设备的故障诊断技术和国际上几乎处于相同水平^[9]。

1.6 研究内容

本书详细分析了电力变压器、汽轮发电机、高压开关、电容器、互感器、避雷器、电力电缆等设备的常见故障,给出了其故障诊断方法、状态监测与维修技术。每一设备都包括:常见故障现象、原因与维护、故障树、故障诊断方法及设备的在线状态监测等部分。旨在帮助读者掌握电气设备的运行、诊断和维护中的关键技术。

1.7 本章小结

阐述了开展状态监测与故障诊断研究的目的是意义,综述了电力设备故障诊断技术方面的研究成果和国内外最新发展方向,指出了目前存在的一些问题和本书的主要工作内容。

思考题与讨论题

- (1) 电气设备故障诊断的意义是什么?
- (2) 什么是预防性维修与状态维修?
- (3) 在线监测技术的发展趋势是什么?
- (4) 为什么说在线监测技术将成为绝缘监测中一个重要环节?
- (5) 哪些问题是发展在线监测技术的关键?
- (6) 电力设备绝缘故障诊断过程的流程是什么?

参考文献

- [1] 电力部电力科学研究院. 1984~1986年110千伏以上等级变压器事故统计分析[C]. 1987. 7.
- [2] 中国电力科学研究院. 2004年度110KV及以上互感器事故统计分析[C]. 2004.
- [3] 电力设备在线红外温度连续监控系统[J]. 电力设备, 2003(6).
- [4] 操敦奎. 变压器油色谱分析与故障诊断[M]. 中国电力出版社, 2010.
- [5] DL/T 574-2010 变压器分接开关运行维修导则[C]. 中国电力出版社, 2010.
- [6] 傅电波. 高电压设备远程绝缘在线监测研究[J]. 湖南电力, 2002(2).
- [7] 薛延华. 变电站绝缘子污秽在线监测系统的设计与应用研究[D]. 西安理工大学. 2004.
- [8] 潘志文, 崔桂梅. 电力电容器的电容值测量及失效分析[J]. 物理测试, 2011(6).
- [9] 徐大可. 变电站电气设备在线监测综述[J]. 变压器, 2002, S1.
- [10] 吴宏琅, 郑小晴. 浅议高压电气设备在线监测技术[J]. 福建电力与电工, 2005, 21(01).
- [11] 鲁丽娟. 数字化变电站的状态检修技术及其发展[J]. 广东输电与变电技术. 2006, 10(06).
- [12] 王楠. 电容型设备绝缘在线监测与故障诊断的研究[D]. 华北电力大学(河北), 2004年.
- [13] 李华, 董明, 严璋. 对正确开展状态检测及状态维修的建议[J]. 电力设备. 2004, 11(05).
- [14] 李平康, 吕玲, 杜秀霞, 等. 火电机组旋转机械振动监测与故障诊断技术现状及发展[J]. 中国电力. 2001(11).
- [15] 陆颂元, 汪江, 刘晓锋. 关于我国发电设备状态检修实施模式的探讨[J]. 汽轮机技术, 2004, 06.
- [16] 金昌斌. 汽轮发电机组的监测和检修技术[J]. 燃气轮机技术. 2004, 03.
- [17] 张敬芬. 基于振动的设备故障和结构裂纹智能诊断研究[D]. 大连理工大学. 2003.
- [18] 张文斌, 唐贵基, 王维珍. 大型汽轮机动静碰摩故障的分析和处理[J]. 东方电气评论. 2004, (4).
- [19] 陈敏红, 谢蓉, 周宇阳, 王晓放. 基于图形组态的汽轮机振动与故障设置仿真建模[J]. 燃气轮机技术. 2004, (1).
- [20] L. Y, Z. Y. Development AND Trend of Insulation Diagnosis in China. Proc. of the Asian Conference of Electrical Insulation Diagnosis'99[C]. Nov. 18-23, 1999, Cheongju, Korea: 10-15.
- [21] Working Grop 33/15. 08. Dielectric Diagnosis of Electrical Equipment for AC Application and Its Effects on Insulation Coordination. GIGRE, 1990.
- [22] 朱大奇, 于盛林. 基于知识的故障诊断方法综述[J]. 安徽工业大学学报, 2002, 19(3).
- [23] 陆春月, 王俊元. 机械故障诊断的现状与发展趋势[J]. 机械管理开发, 2004, 6(81).
- [24] 温步瀛, 林济群, 林礼清, 等. 发电机电气故障智能诊断机理分析[J]. 水电能源科学, 2002, 1220(4).
- [25] J. Timmis, A. N. w. Hone, T. Stibor, E. Clark, Theoretical advances in artificial immune systems, Theoretical Science (2008).
- [26] 黄席樾, 张著洪, 何伟江, 等. 现代智能算法理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [27] 孟祥萍, 潘莹, 耿卫星, 等. 混沌免疫遗传算法在电力系统故障诊断中的应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 81-84.
- [28] 禹柳飞. 基于免疫原理的旋转机组故障诊断方法研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28(12), 193-195.
- [29] Chenglin Wen, Xiaobin Xu. Random Sets in Data Fusion new framework for multiple target tracking[R]. 2006 Proceeding of ISSCAA, Harbin, 2006.

第 2 章 故障诊断理论与方法

2.1 智能诊断技术

2.1.1 专家系统

专家系统(Expert System, ES)是发展最早、比较成熟的一种人工智能技术。通常认为,专家系统是一个具有大量专门知识与经验的程序系统,是研究用解决某专门问题的专家知识建立人机系统的方法和技术,专家知识包括整个具体专业领域的知识和对领域内问题的理解及解决这些问题的技能。它根据某个领域专家提供的知识和经验进行推理和判断,模拟专家的决策过程,以解决那些需要专家决策的复杂问题。

虽然专家系统能够有效地模拟故障诊断专家完成故障诊断的过程,在很多领域中得到了广泛的应用,取得了不少成果,并且显示出了相当出色的工作能力,在某些方面甚至超过了人类专家的工作水平,但是在实际应用中仍存在一些缺陷:

(1) 完备知识库的获取是形成故障诊断专家系统的瓶颈。如果建立的知识库不完善,就可能导致专家系统推理混乱并得出错误的结论,而知识获取及验证其完备性是比较困难的,这在很大程度上限制了故障诊断专家系统的发展。

(2) 专家系统推理方法比较简单,推理能力弱,控制策略不够灵活。它在推理时要搜索、匹配知识库内一定规则集才能得出结论,否则容易出现匹配冲突、组合爆炸以及无穷递归等问题。所以,当系统比较大时,完成诊断的速度非常慢,效率低。一般实用的故障诊断专家系统通常只有 100~300 条规则。

(3) 知识维护困难。现有的专家系统知识库中的知识大都是依靠知识工程师人为输入,在知识库里往往只是简单地堆放在一起。当被诊断对象的结构或配置发生变化时,专家系统的知识库要进行相应的修改,然而增加或修改规则后很有可能造成不完整或不一致的知识库,为此必须对知识库进行再次校验,校验的难度比较大,所以大型专家系统维护困难。

(4) 知识台阶窄。专家系统的工作范围很窄,只能对专家领域内的问题以专家级的水平去解决,但对专家知识领域以外的问题则无能为力。即专家系统没有联想、记忆、类比等形象思维能力,更致命的问题是,系统本身无法判断自己是否工作在专家领域知识范围内。

(5) 一般专家系统不具备学习能力,一旦发生知识库没有包括的新的故障诊断情况,专家系统将发生诊断错误或得不到结果。

(6) 实用性差。由于上面的这些严重缺陷,使得一些专家系统很难进入广泛实用阶段,同时,由于推理速度慢,导致一般的传统专家系统难以适应在线工作要求,只能在离线非实时条件下工作。

2.1.2 人工神经网络

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)是对人脑神经系统的数学模拟,是一种模拟人类神经系统传输处理过程的人工智能技术^[7,8,19]。其最大的特点是:具有自组织和自学习能力;一定的泛化能力;较强的容错能力;并行处理和分布式存储信息。神经网络故障诊断问题可以看成模式识别,通过一系列过程参数进行测量,然后用神经网络从测量空间影射到故障空间,实现故障诊断。可见,神经网络之所以适合于故障诊断,有以下三个原因:

(1) 训练过的神经网络能存储有关过程的知识,能直接从定量的、历史故障信息中学习,可以根据对象的正常历史数据训练网络,然后将此信息与当前测量数据进行比较,以确定故障。

(2) 神经网络具有滤除噪声及在有噪声情况下得出正确结论的能力,可以训练神经网络来识别故障信息,使其能在噪声环境中有效地工作,这种滤除噪声的能力使得人工神经网络适合在线故障检测和诊断。学习完成后,如果系统结构发生变化,则需增加新的样本重新学习。

(3) 神经网络具有分辨故障原因及故障类型的能力。

神经网络在故障诊断中的应用,主要在故障检测和故障类型识别两个方面。用人工神经网络技术对复杂系统的故障进行自动诊断,并通过数据分析与处理来改善整个系统的性能,可以较好地克服专家系统的缺点。人工神经网络在故障诊断应用中存在的问题主要有以下几个方面:

* ANN 在使用之前需要大量的、有代表性的样本供其学习。

* 对运行人员来讲,ANN 的工作过程是一个黑箱。因此,尽管 ANN 具有一定的容错能力(当存在自动装置不正常动作时,仍能给出正确的结果),但是它不能提供信息帮助工作人员推断不正常动作的装置。

* ANN 学习完成之后,具有较好的内推结果,但外推时则误差可能较大,特别是当系统非线性较强或具有病态特性时误差更为严重。

* 如何设计适用于大型复杂系统的 ANN 故障诊断系统仍然是一个有待于进一步研究的问题。

ANN 一直是一个比较活跃的研究领域,在研究开发智能故障诊断系统时,应对上述问题给予充分的考虑。

2.1.3 模糊理论与模糊诊断系统

模糊理论(Fuzzy Theory, FT)是将经典集合理论模糊化,并引入语言变量和近似推理的模糊逻辑,具有完整的推理体系的智能技术。

目前主要有两种处理不确定性的方法,即基于概率理论的方法和基于模糊理论的方法。基于概率理论的方法,着重应用于统计机制、数据分析等人的感知与推理不起主要作用的场合;而模糊理论则擅长模拟人类思维中的近似推理过程,主要应用于人类经验知识起重要作用的场合。根据分析可以看出,基于模糊理论的方法比较适用于故障诊断问题。

模糊理论与专家系统相结合构成的诊断系统,虽然可以增强处理不确定性的能力,在一定程度上提高诊断的准确度,但由于一般的模糊诊断系统采用了与专家系统相似的结构,所以它不能完全消除专家系统所固有的缺点。主要表现在:

(1) 模糊诊断系统在推理时也要搜索知识库内一定的规则集才能得出结论,所以当系统比较大时,完成诊断的速度比较慢,效率比较低。

(2) 当系统的结构发生变化时,模糊诊断系统的知识库或相关规则的模糊度也要进行相应的修改,即模糊诊断系统也存在维护的问题。

(3) 模糊诊断系统也不具备学习能力。

另外,基于模糊理论的故障诊断还具有下列局限性:

(1) 模糊诊断方法利用模糊集合率中的隶属函数和模糊关系矩阵的概念来解决故障与征兆间的不确定性关系,进而实现故障的早期预报和精确诊断。这种方法计算简单,应用方便,结论明确直观。但却不能进行趋势分析。

(2) 构造隶属函数是实现模糊诊断的前提,由于隶属函数可由隶属曲线表示,是人为构造出来的,会有一定的主观因素。

(3) 对特征元素也就是特征参数的选择有一定的要求,如果参数选择不合理,诊断精度会下降,甚至诊断失效。

(4) 如果在征兆与故障的关系中含有未知因素,隶属函数无法构造出来,这时该方法将失效。

2.1.4 小波分析理论

小波分析(Wavelet Analysis, WA)是当前应用数学中一个迅速发展的新领域,这一创新概念由法国工程师J. Morlet于1984年首先提出。基于小波变换的故障诊断方法不需要对象的数学模型,且对输入信号的要求较低,计算量也不大,可以进行在线实时故障监测,灵敏度高,克服噪声能力强,是一种很有前途的故障诊断方法。小波变换通过多重分辨率来分析信号在时域和频域的局部特性,确定信号的突变点。在故障诊断中,通过小波变换的模极大值监测信号的突变点,判断某个设备参数是否发生跳变。

小波变换的故障诊断方法,主要是利用小波变换具有良好的时频局部化特性和对信号自适应变焦、多分辨率分析的能力,将信号在不同尺度上展开,提取不同频带上的特征,同时保留信号在各个尺度的时频特性。小波变换在故障诊断中的具体应用表现在以下几个方面:

- (1) 利用小波变换检测信号的突变。
- (2) 利用观测信号频率结构的变化进行故障诊断。
- (3) 利用脉冲响应函数的小波变换进行故障诊断。
- (4) 利用小波变换去噪声提取系统波形特征。
- (5) 利用小波网络进行故障诊断。

虽然小波分析在信号处理方面得到了广泛的应用,但从总体上说,小波变换理论和小波变换在故障诊断中的应用还处于起步阶段,主要存在以下问题^[2]:

(1) 由于小波变换及小波网络中的小波基的选择没有统一标准,选择不同的小波会得出不同的结论,在实际应用中往往根据经验来选择小波,带有一定的主观性。

(2) 如何根据信号的特征选择尺度、平移量,用最少的变化后的数据反映信号的特征,以减少运算量;如果选择不当,将会增加运算量,降低推理速度,影响效率。

(3) 小波网络的新模型基于学习算法也是当前研究的热点,近年来有人提出多层结构小波网络和局域连接型的小波网络。由于神经网络的研究正在向计算智能、生物智能方向发展,

小波网络的研究也在不断吸收如混沌、进化等其他交叉学科的研究成果。正因为小波网络还在发展中,所以许多问题还有待于深入研究。

(4) 小波网络的收敛性、鲁棒性、计算复杂度等还有待于深入研究,小波网络在故障诊断中的硬件实现也是需要进一步探讨和解决的问题。

2.2 基于信息融合的故障诊断

基于信息融合的故障综合诊断也是当前故障诊断技术发展中的一个重要方面,已引起国内外学者的高度重视。国外于 20 世纪 70 年代开始对信息融合进行研究,由于信息融合本身所具有的良好稳定性、广阔的时空覆盖区域、很高的测量维数和良好的目标空间分辨率以及较强的故障容错与系统重构能力等潜在特点,所以该问题一经提出,就引起了各国的高度重视。1984 年,美国国防部(DOD)成立了数据融合专家小组(Data Fusion Suband, DFS)。1988 年,美国国防部把它列为 90 年代重点研究开发的二十项关键技术之一。

近年来,信息融合技术逐步渗入到故障诊断领域,并获得一些有效的进展。刘三明教授运用人工神经网络方法研究了大型风力发电机制动闸的状态监测与寿命预测问题,杭州电子科技大学的文成林教授研究了多尺度算法与信息融合理论在故障诊断中的应用^[16],徐晓滨博士研究了一种基于多源异类信息统一表示的多传感器数据融合方法^[18];国防科技大学的邱静博士研究了柔性加工系统多传感器与方法的模糊融合监测模型与方法^[4]。

在旋转机械的故障诊断中,利用神经网络、模糊理论等信息融合技术对提升机进行状态监测和故障诊断^[24];利用灰色理论和神经网络来预测矿井扇风机主轴振动的变化规律^[5]。由此可见,当前故障诊断中信息融合的研究主要集中在决策层和特征层,其研究仍然是基础性的,需要进行更深入和广泛的研究。

2.3 容错控制技术

容错控制(Fault Tolerant Control, FTC)是指当控制系统中某些部件(如传感器失效,执行器损坏)发生故障后,系统仍能保证稳定。它可以使一个动态系统适应其环境的变化,允许其中的一个或几个较关键部件发生故障或失效。其目标是:当系统的某些部件发生故障或失效时,在适当降低某些性能指标的前提下,整个控制系统仍然能够保持稳定。目前的设计方法主要有硬件冗余和软件冗余方法。

硬件冗余方法是通过主要部件以及容易发生故障的部件甚至整个控制器设置备份,以达到提高系统的容错性能的目的。它包括静态的“硬件冗余”和动态的“硬件冗余”,该技术已经成为提高工程可靠性技术的一种基本方法。其优点是简单、快速、可靠。缺点是投资增加,设备体积庞大。软件冗余是指利用系统中不同部件在功能上的冗余性,一个部件的部分或者全部功能可由别的部件的功能来代替,通过估计,实现故障容错。其优点是性能好、功能强、成本低和容易实现。它包括主动容错控制和被动容错控制两种设计方法。而作为主动容错控制的一种最重要方法:控制率的重组与重构设计方法已成为当前容错控制领域的热点研究方向之一。在被控对象发生变动时,实时调整控制器的结构与参数,才有可能达到最优的控制效果。