

Intelligent Fault
Diagnosis Technology of
Equipments in Power Plant

发电设备 智能故障诊断技术

张 浩 彭道刚 夏 飞 钱玉良 徐春梅 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Intelligent Fault
Diagnosis Technology of
Equipments in Power Plant

发电设备 智能故障诊断技术

编著 张 浩 彭道刚 夏 飞 钱玉良 徐春梅



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

发电设备智能故障诊断技术是多学科交叉渗透的综合性研究课题。近年来,由于发电设备日益向大容量、高参数方向发展,系统复杂性、内部耦合度日益提高,使设备故障几率增大,严重影响了发电设备的可用率。而电力生产设备一旦发生故障,不仅会影响人们的生活,而且会影响工业生产。因此,加强发电设备的状态监测和故障诊断,对保障电力生产设备安全和稳定运行具有重要意义。本书首先介绍了发电设备智能故障诊断的意义及国内外发展研究现状,然后介绍了智能故障诊断的主要关键技术,如故障数据预处理与特征提取,汽轮发电机组轴心轨迹自动识别技术,基于神经网络、主元分析与神经网络集成、信息融合等多种智能故障诊断技术进行故障决策,最后针对几个实例介绍了故障诊断技术的应用。

本书可作为从事电力设备状态监测与故障诊断工作的科研人员和相关专业高校教师使用和参考,也可供自动化、电气、热动力与机械类相关专业研究生和高年级本科生作为研究和参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

发电设备智能故障诊断技术/张浩等编著. —北京:中国电力出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-5123-5538-5

I. ①发… II. ①张… III. ①发电设备—故障诊断—诊断技术 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第032723号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年4月第一版 2014年4月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 12印张 227千字

印数0001—2000册 定价 32.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

电力工业是国民经济可持续发展的先行行业，与工业生产、人们的生活息息相关。随着我国电力工业的迅速发展，越来越多的大型发电机组陆续投入运行。目前，我国已有约 60 台 1000MW 级超超临界燃煤发电机组投入运行，拟建和在建 1000MW 超超临界燃煤发电机组也数量巨大。

随着电力系统“厂网分开、竞价上网”改革的不断深入，提高发电机组的可靠性和降低维修成本是发电企业不断追求的目标。但是，由于大型发电设备频繁参与调峰，使得故障几率增大，严重影响了发电设备的可用率。而电力生产设备一旦发生故障，不仅会影响人们的生活，而且会影响工业生产。大型发电设备发生事故后，维修耗资巨大，给电厂和电网造成巨大的经济损失。我国长期以来普遍实行的检修体制是以事后维修、预防性计划检修为主的传统检修体制。虽然目前国内多数企业都提出要实现状态检修，但检修尚无成熟的模式，各企业都在探索中，并未实现全面的状态检修，只有部分企业实现了不同程度的局部状态检修。因此，加强发电设备的状态监测和故障诊断，以保障电力生产设备安全稳定运行就显得非常重要。

发电设备智能故障诊断技术是多学科交叉渗透的综合性研究课题，随着对发电设备故障诊断技术与方法研究的发展，很多国家逐步认识到其发展前景和巨大的经济效益。虽然国内外企业和研究机构在发电设备的状态监测与故障诊断等方面做了不少研究工作，不仅有了许多理论研究成果，而且有不少产品和技术在实际中得到了应用，但在发电设备的故障诊断、安全监测、状态评价、状态检修等方面仍存在不少理论与应用的难题，这在一定程度上制约了发电设备故障的早期预测和及时、准确的诊断分析。而且在现今科学技术水平下，发电设备的效率已经接近极限水平，很难再有更大提高。因此，为了进一步提高机组运行的经济性，希望通过利用先进的理论分析、状态监测与评价、故障诊断与预测维护等技术来进一步延长机组维修间隔，缩短维修时间。发电设备虽然具有系统复杂、故障率高的特点，但在状态监测的基础上，结合运行人员的经验对发电设备进行故障诊断，并根据诊断结果进行设备的状态检修，对提高机组可靠性和可用率、降低维修费用具有重要意义。

本书共分 7 章，第 1 章分析了发电设备智能故障诊断的意义及国内外发展研究现状，第 2 章介绍了发电设备故障数据预处理与特征提取，第 3 章介绍了汽轮发电

机组轴心轨迹自动识别技术,第4章介绍了基于神经网络的发电设备智能故障诊断,第5章介绍了主元分析与神经网络集成的发电设备智能故障诊断,第6章介绍了基于信息融合的发电设备智能集成故障诊断,第7章介绍了发电设备智能故障诊断系统应用研究。

本书由上海电力学院张浩教授、彭道刚教授、夏飞副教授、钱玉良博士和徐春梅博士编著,其中部分内容的编写工作在刻昌峰教授以及课题组成员李辉、于会群、孙宇贞和李芹等老师的帮助下完成。此外,在编著过程中,课题组指导的2008~2013级硕士研究生也参与了部分技术研究和资料收集与整理工作。全书撰写过程中,杨平教授提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢!

本书主要内容的研究工作获得了国家自然科学基金重点项目(编号:61034004)、上海市优秀学科带头人计划项目(编号:09XD1401900)、上海市青年科技启明星计划项目(编号:10QA1402900)、上海市教育委员会科研创新重点项目(编号:12ZZ177)以及上海市部分地方院校能力建设专项计划项目(编号:13160500700)等资助。本书的编著工作还得到了上海自动化仪表股份有限公司、上海宝钢电厂、上海外高桥电厂、华能上海石洞口电厂等单位领导及专家的支持和帮助。此外,在编写本书过程中,编者参考和引用了国内外有关资料和文献。在此一并表示诚挚的谢意!

由于时间及作者水平有限,且本书理论与实践相结合,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2013年12月于上海

前言

1 概述	1
1.1 发电设备智能故障诊断的意义	1
1.2 国内外发展研究现状分析	2
2 发电设备故障数据预处理与特征提取	11
2.1 数据预处理与特征提取方法	11
2.2 嵌入式数据预处理与特征提取平台	13
2.3 基于 FFT 变换的发电设备数据预处理	16
2.4 基于小波变换的发电设备故障特征提取	23
3 汽轮发电机组轴心轨迹自动识别技术	31
3.1 轴心轨迹自动识别框架设计	31
3.2 基于一种粒子群模型的轴心轨迹提纯	34
3.3 基于不变矩的轴心轨迹特征提取	51
3.4 基于 BP 神经网络的特征识别	53
3.5 仿真实例研究	55
4 基于神经网络的发电设备智能故障诊断	58
4.1 神经网络的概述	58
4.2 基于 BP 神经网络的汽轮发电机组故障诊断	62
4.3 基于 RBF 神经网络的汽轮发电机组故障诊断	68
4.4 基于 CPN 神经网络的汽轮发电机组故障诊断	72
4.5 基于概率神经网络 (PNN) 的汽轮发电机组故障诊断	75
4.6 基于小波神经网络 (WNN) 的汽轮发电机组故障诊断	81
4.7 基于模糊神经网络 (FNN) 汽轮发电机组故障诊断	85
5 主元分析与神经网络集成的发电设备智能故障诊断	88
5.1 集成诊断系统框架	88

5.2	基于主元分析的特征向量降维	89
5.3	GA-PSO-RBF 神经网络	92
5.4	仿真测试研究	98
6	基于信息融合的发电设备智能集成故障诊断	102
6.1	信息融合的概述	103
6.2	基于 D-S 证据理论的汽轮机故障诊断	114
6.3	基于 BP-RBF 和 D-S 证据理论的汽轮机集成故障诊断	116
6.4	基于 PNN-RBF 和证据理论的集成故障诊断	119
6.5	基于 WNN-PNN 和证据理论的集成故障诊断	121
6.6	基于灰色理论-PNN 的汽轮发电机组集成故障诊断	123
6.7	基于模糊集-BP 和 D-S 证据理论凝汽器集成故障诊断	128
6.8	基于 BP-CPN 和 D-S 证据理论的凝汽器集成故障诊断	133
7	发电设备智能故障诊断系统应用研究	138
7.1	基于嵌入式 ARM 的远程数据采集系统	138
7.2	基于 LabVIEW 的汽轮发电机组振动运行监测与故障诊断系统	158
7.3	发电设备远程状态监测与智能故障诊断系统	169
	参考文献	180

概 述

1.1 发电设备智能故障诊断的意义

电力工业是国民经济可持续发展的先行行业，电力生产与工业生产、人们的生活息息相关。随着我国电力工业的迅速发展，越来越多的大型机组陆续投入运行，300MW 亚临界发电机组、600MW 超临界发电机组已非常成熟并广泛应用，1000MW 超超临界发电机组也得到了迅速发展。目前，我国已有 60 余台 1000MW 级超超临界燃煤发电机组投入运行，拟建和在建 1000MW 超超临界燃煤发电机组也数量巨大。截至 2012 年年底，全国发电装机容量已超过 11 亿 kW，其中煤电的装机容量超过 70%，且我国的能源结构决定了未来很长一段时间以煤为主的火电机组仍将占主导地位。

虽然我国电力工业得到了长足发展，但是当前全国电力需求增长仍然十分迅猛，电力供应短缺状况也时时出现。目前我国新建机组与发达国家新建机组的效率、可靠性、环保性能等基本持平，但是由于我国较多地区仍然出现供电紧张甚至严重缺电现象，使得许多发电机组长期处于超负荷运行状态，设备的安全性也随之下降，这就要求对发电机组及生产过程的各种参数进行实时状态监测、故障诊断和预测维护以保证电厂机组的正常运行和正常发电；此外，机组容量的增大使其结构和系统日趋复杂，如何保证这些机组能安全、可靠和经济高效运行，对国民经济的发展具有十分重要的意义。

随着电力系统“厂网分开、竞价上网”改革的不断深入，提高发电机组的可靠性和降低维修成本是发电企业不断追求的目标。但是，由于大型发电设备频繁参与调峰，使得故障几率增大，严重影响了发电设备的可用率。一旦电力生产设备发生故障，不仅会影响到人们的生活，同时也会影响工业生产，进而给企业和社会带来较大的直接和间接的经济损失。据统计，虽然近年来国产机组的等效可用率已有很程度的提高，但大型发电设备事故还屡有发生。在实际生产运行中，由于发电设备设计和制造质量问题、安装不当、运行部门人员误操作、监控不当、

维护管理不当、检修质量不良等原因导致发电设备发生事故的情况占有相当大的比例。如我国 1988 年 10 月,北仑电厂 1 号 600MW 东芝机组发生高压叶片断裂重大事故,直接经济损失人民币两千多万元;1990 年海口电厂发生机毁事故;1996 年 3 月,河南一台 50MW 机组发生断轴毁机恶性事故;2000 年,阜新电厂一台 200MW 机组发生断轴事故;2002 年哈尔滨第三热电厂一台 600MW 机组发生断轴事故等。因此,加强发电设备的状态监测和故障诊断,以保障电力生产设备安全稳定运行就显得非常重要。

大型发电设备发生事故后,维修耗资巨大,给电厂和电网造成巨大的经济损失。我国长期以来普遍实行的检修体制是以事后维修、预防性计划检修为主的传统检修体制。虽然目前国内多数企业都提出要实现状态检修,但检修尚无成熟的模式,各企业都在探索中,并未实现全面的状态检修,只有部分企业实现了不同程度的局部状态检修。

发电设备智能故障诊断技术是一门多学科交叉渗透的综合性研究课题,随着发电设备故障诊断技术与方法研究的发展,很多国家逐步认识到其发展前景和巨大的经济效益,开始了改变设备维修体制的准备工作。虽然国内外在电站设备的状态监测与故障诊断等方面做了不少研究工作,从开始到现在已经取得了较大的进展,不仅有了许多理论研究成果,也有不少产品和技术在实际中得到了一定程度的应用,但是这些产品和技术大多价格昂贵,有的技术也已经过时,而且受现场状态监测设备不够完善、现场领域专家不足,信息不能共享等诸多因素的影响,在电站设备的故障诊断、健康监测、状态评价、状态检修等方面尚存在不少理论与应用的难题,尤其对于发电设备的智能故障诊断与预测技术研究是个相当复杂的问题,这在一定程度上制约了发电设备故障的早期预测和及时、准确的诊断分析,增加了不必要的专门试验费用和停机损失。而且在现今科学技术水平下,电站设备的效率已经接近极限水平,很难再有更大提高。因而为了进一步提高机组运行的经济性,近年来人们把注意力更多放在提高设备可用性上,希望通过利用先进的理论分析、状态监测与评价、故障诊断与预测维护等技术来进一步延长机组维修间隔,缩短维修时间。发电设备虽然具有系统复杂、故障率高的特点,但在状态监测的基础上,结合运行人员的经验对发电设备进行故障诊断,并根据诊断结果进行设备的状态检修,对提高机组可靠性和可用率,降低维修费用具有重要意义。

1.2 国内外发展研究现状分析

随着现代科学技术及电力工业的迅速发展,现代电力生产设备日趋大型化、复杂化和自动化,功能越来越强、结构也越来越复杂,因发电设备故障而造成的

损失也将会大大增加。近年来,因发电关键设备故障而引起的灾难性事故时有发生。典型事故如2003年8月14日,美国、加拿大发生大面积停电事故,受停电影响的人口约5000万,地域约24 000平方公里,停电持续时间为29小时,经济损失达60亿美元。又如2012年7月30日和7月31日接连发生在印度北部的两次大停电事故,该事故使得印度超过22个邦受到影响,超过6亿人的日常生活受到影响,占印度总人口的一半左右。突如其来的断电导致印度交通陷入混乱,全国超过300列火车停运,首都新德里的地铁也全部停运,造成旅客大量滞留,公路交通出现大面积拥堵,一些矿工被困井下,银行系统陷入瘫痪,一度给印度的金融交易带来障碍。该事故也是历史上最大规模的停电。危机专家承认,“一次大停电,即使是数秒钟,也不亚于一场大地震带来的破坏”。这些严重或灾难性事件的不断发生,迫使人们在发电设备故障诊断方面进行了大量的研究。

1.2.1 发电设备状态监测与故障诊断系统发展现状分析

美国是开展设备故障诊断技术研究最早的国家之一,至今已有数十年的历史。美国从事电站故障诊断系统研究的公司较多,主要有西屋公司、Bently公司、Radial公司、IRD公司等。西屋公司从1976年开始电站故障诊断研究,1980年开发了一个小型的电机诊断系统;1981年着手开展基于人工智能的电站故障诊断系统的研究,并于1984年应用于现场,后来逐步发展成大型电站在线监测诊断系统,并建立沃伦多故障运行中心(DOC),通过DOC可对分布在全国各地多个电站进行远程诊断。Bently电力公司在转子动力学研究领域较有优势,对旋转机械故障机理的研究较为透彻,于1987开发了火电厂机械设备诊断用的专家系统SCOPE;在1992年,该公司开发了用于旋转机械故障诊断的工程师辅助系统(EA),EA通过状态监测参数实现对质量不平衡、转子弯曲、轴裂纹、不对中、油膜失稳、碰摩、热弯曲等几种常见机械故障的诊断。Radial公司在1987年开发了汽轮发电机组振动诊断的专家系统Turbomac。IRD公司在故障预防性维修技术方面处于国际领先地位,近年来实现了Mpulse联网机械状态监测系统及Pmpower旋转机械振动诊断系统,并在美国10多个电站得到了应用。

在欧洲也有不少公司从事故障诊断技术研究及产品开发与应用。瑞士ABB公司在1971年从BBC公司引入一个计算机辅助数据采集系统(CADA),大力研究振动观察(Vibro-View)系统,并开发了故障诊断软件系统。英国在1971年成立了机械保健中心(Mechanical Health Monitoring Center),促进了各类机械设备性能检测和维修水平的提高。法国电气研究与发展部在1978年研制了在线振动监测系统,20世纪90年代初提出了建立监测和诊断工作站的设想;2006年成功研制了可监视所有核反应堆中关键性设备的专家系统。德国西门子公司的Siemens/KML系统,能对汽轮发电机及辅助设备进行全面的监测,具有振动分析、运行状态分

析、寿命估计、热力分析和效率分析的功能,对机组轴系、汽轮机叶片、滑动轴承、主推轴承、主控制阀、机架、排气与冷凝部件、发电机冷却系统、导体和绝缘、励磁系统等进行故障识别与诊断。该系统将汽轮发电机及相关部件综合起来进行分析和诊断;它代表了汽轮发电机组监测与诊断技术领域的先进水平和发展趋势。该系统已经开始现场应用,并取得了可观的经济效益。丹麦的 B&K 公司在 20 世纪 90 年代推出了新一代状态监测与故障诊断系统——B&K3450 型 COM-PASS 系统,该系统具有广泛的故障诊断功能,除了能检测和记录机器的异常情况外,还能进行故障隔离和分析故障的部位、性质与程度等。丹麦 ROVSING 公司所开发的 OPENpredictor 状态和性能监测系统可以对工厂设备机械的功能性健康状况进行评估、自动故障诊断和故障预测,并以文本形式给出其诊断结果。OPENpredictor 系统具有国际领先水平,该系统在丹麦皇家空军 Skrydstrup 基地 F-16 发动机、丹麦 Skaerbaek 发电厂、北部荷兰地区的海域 BPNE 的 P15-D 平台等上得到了成功的应用。

在亚洲,韩国开发了核电厂性能评价专家诊断系统 ESPED 和模糊专家系统 FDS 系统。日本东芝电气公司与东京电力公司于 1987 年合作开发的大功率汽轮机轴系振动诊断系统,采用计算机在线快速处理振动信号的解析技术与评价判断技术,通过设定一个偏离轴系正常值的极限值作为诊断的起始点进行故障诊断。日本三菱重工首先研制成功了机械状态监测系统(MHMS),并在多台核电站和商业热电站使用,后来又研究了对诊断规则的知识表达,采用模糊逻辑分析确定置信因素的振动诊断专家系统。日立公司开发的汽轮机寿命诊断装置 HIDIC-08E 等。

在大型汽轮发电机组故障诊断系统中,加拿大安大略水电局开发的 GEMS 系统(Generator Expert Monitoring System)较具有代表性。GEMS 是一套现场就地使用的系统,数据处理与计算分析工作均是在发电厂现场的计算机上完成的,它不仅能进行故障诊断,还可以发现传感器的错误,而且其软件设计灵活性大,可适用在电厂不同型号的发电机。

此外,飞利浦公司开发的状态检测系统 PR3000,申克公司研制的状态检测系统 VIBROCOM4000、VIBROCOM5000、CSI 公司设计的 3130 及 IIR 公司开发出的 6600 机械保护和诊断系统。还有北美能源可靠性咨询数据系统(NERC-GADS)数据库,能够比较准确地对设备性能或潜在故障的趋势进行分析和预测,并为电厂的运行监测和状态检修提供可靠的技术依据。

国外故障诊断技术的研究与应用经几十年的实践已取得了良好的经济效益。如日本实施故障诊断后,事故率减小 75%,维修费用降低了 25%~50%;英国经过调查表明采用故障诊断技术每年可节约维修费用 3 亿英镑(故障诊断系统的成本是 0.5 亿英镑),收益为投入的 6 倍。所以,故障诊断系统的应用不仅产生了良好

的经济效益,更重要的是对提高机组的设备可靠性发挥了积极的作用。

我国在发电设备状态监测与故障诊断方面起步比较晚,主要经历了三个阶段:第一阶段是在 20 世纪 80 年代以前,电力生产中只有简单的读数仪表,主要是靠工人的经验,凭眼看、手摸、耳听等监视设备的运行状态是否正常,然后技术人员依据值班记录来分析设备运行的规律。从 20 世纪 70 年代后期开始,随着改革开放的进程,开始引进一些检测仪表,并在吸收和消化国外先进技术的基础上,开始研究故障机理、诊断方法以及简便的监测与诊断仪器,并开始应用。这对当时我国的故障诊断技术水平的提高起到了促进的作用。但当时引进的监测仪表本身并无分析功能,故障的诊断还是主要依赖于人的经验。第二阶段是在 20 世纪 80 年代中期到 90 年代末,这个时期在引进国外检测仪表的同时也引进相应的软硬件分析装置,分析装置主要是频谱分析仪,也有部分分析功能是用计算机来实现完成的,这对提高故障诊断的准确性非常有益。这个时期是我国故障诊断技术研究和系统研制快速发展的时期。我国故障诊断领域的研究人员在总结经验的基础上,探索新的诊断理论和方法,开发研制出在线监测与故障诊断装置,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”、东北大学设备诊断工程中心成功研制的“轧钢机状态监测诊断系统”和“风机工作状态监测诊断系统”、华中理工大学开发的 HZ-1 型汽轮发电机组在线振动监测与故障诊断专家系统、由清华大学、华中理工大学、哈尔滨工业大学和哈尔滨电工仪表所联合研制的 200MW、300MW 汽轮发电机组工况监测与故障诊断专家系统、清华大学和山东电力科学研究所合作开发的大型汽轮发电机组远程在线振动监测分析与诊断网络系统、南京汽轮电机厂开发了以微机为核心的多功能振动分析系统等。多数高校建立了自己的故障诊断工程中心,如西安交通大学、华中科技大学、清华大学、上海交通大学、东北大学、哈尔滨工业大学、东南大学等。第三阶段是在进入 21 世纪以来至今,故障诊断技术进入了一个相对平稳的发展时期,主要是着手解决故障理论与实践运用中所遇到的问题。如生产条件下信号的实时采集和全方位测试、小样本的信号处理、动态系统的适用模型及参数估计、系统知识的获取与机器的自学习、远程监测与综合诊断、状态评价、寿命预测等,也取得了一些成果。

此外,国内一些高科技企业也瞄准了这一技术并推出了各自的产品,如深圳阿尔斯通创为实技术发展有限公司生产的 S8000 汽轮发电机组在线状态监测和分析系统、北京松源艾普科技有限公司的 MMS6000 旋转机械振动监测和故障诊断系统、北京英华达电力电子工程科技有限公司生产的 EN9000 大型旋转机械振动监测保护诊断系统、北京华科同安监控技术有限公司研制的 TN8000 机组振动在线监测分析故障诊断系统、郑州恩普特设备诊断工程有限公司生产的 eM3000 设备远程监

控与运行管理系统等。据调研,这几家企业的产品占据了国内大部分发电机组振动状态监测与故障诊断系统。

1.2.2 发电设备智能故障诊断方法研究现状分析

随着科学技术的发展,故障诊断理论也得到了较快的发展。到目前为止,故障诊断理论与技术发展中比较成熟并得到应用的诊断方法比较多,主要有时域分析、频谱分析、时频分析、模糊诊断、模糊聚类、故障树、灰色理论、专家系统、神经网络、支持向量机、可靠性理论、免疫理论、粗糙集诊断理论、模拟退火与演化算法、多源信息融合技术等。下面对部分典型的设备故障诊断方法简要叙述如下。

1. 频谱分析

发电设备运行状况及故障的特征会在设备振动信号的频谱图中得到反映,而且不同的运行状况或者不同的故障,振动的频谱也呈现不同的特征,所以据此可对设备进行故障诊断,这种诊断分析方法就是频谱分析诊断方法。它是以傅里叶变换为基础的信息处理技术来观测信号能量随频率变化的规律,进而进行诊断的,且在多数已开发发电设备状态监测与故障诊断系统中得到广泛的应用。

2. 时频分析

时频分析方法是在要求不仅观测信号特征与频率的关系,同时还要观测信号特征与时间的关系的基础上发展起来的,主要的特点是同时提供信号的时域与频域的局部细化信息,这对分析非平稳信号非常有用,而旋转机械的振动信号往往包含大量的非平稳成分,所以采用时频分析方法对汽轮发电机组的轴系振动信号进行研究有着重大的意义。时频分析方法主要技术有短时傅里叶变换、Winger-Ville 分布、小波变换、Hilbert-Huang 变换等。这几种变换均可同时在时域、频域中表达信号,其中短时傅里叶变换时频窗窗口固定不变,时频分辨率保持不变;Winger-Ville 分布有着很好的时频分辨率,但对多分量信号会产生交叉干扰项;小波变换时频窗窗口面积不变,但其形状可变,有着良好的时频分辨率;Hilbert-Huang 变换能自适应地进行时频分解,且有良好的时频分辨率,但是易产生模态混叠问题。

在故障诊断领域,小波变换的应用是最广泛的,主要是因为小波变换可提供多分辨率分析。如赵纪元等提出了基于小波变换与自回归谱分析方法;林京等提出了基于 Morlet 连续小波变换的信号消噪方法,并应用于故障特征提取中,取得了一定的成效;范立莉等利用包络分析与小波变换对轴承进行故障诊断,并在汽轮发电机组故障诊断中得到了一定的应用。

3. 模糊数学

模糊数学是用精确的数学方法处理无法用经典数学来描述的模糊事物,它能

有效地处理不确定性问题。在发电设备故障诊断中,故障与故障源之间的关系往往是不确定的,且存在模糊诊断术语,因此模糊数学方法比较适合应用在发电设备的故障诊断中。模糊方法处理问题有模糊诊断和模糊聚类分析两种。模糊诊断方法是将某类故障所对应的所有故障征兆构成一个征兆空间,并把引起该故障的所有原因构成一个故障原因空间,而故障原因必然会与征兆空间中的某些征兆相对应;若把故障原因看做征兆空间的模糊子集,那么故障诊断的问题就是确定征兆空间的某个征兆以多大的程度隶属于哪个模糊子集的问题;用隶属度来表述这种隶属程度的大小,求出最大的隶属度值,即得到了诊断结果;模糊聚类分析方法是把测试样本和所有的标准故障样本一起作为分类样本,然后确定模糊相似矩阵,再根据聚类分析原则,得到模糊等价矩阵,最后选取不同的截集得到不同的分类结果,由分类结果确定故障。这两种方法在发电设备的故障诊断中都有一定的应用。

4. 灰色理论

灰色理论是我国著名学者邓聚龙教授于1982年首先提出了一个重要理论。灰色系统是指系统的部分信息已知、部分信息未知的系统。灰色系统理论是一种研究少数据、贫信息、不确定性问题的新方法。灰色关联度是灰色系统理论的重要组成部分,它主要是用灰色系统模型对系统发展态势的相互关系进行分析,所采用的分析方法即是灰色关联度分析法。该方法实质上是将无限空间问题用有限数列取代,其基本思路是根据曲线间的相似程度来判断关联程度。对参考序列和比较序列的曲线或几何关系进行比较,若两曲线形状相似,则其关联度较大。基于灰色理论的故障诊断主要是计算测试样本与标准模式样本之间的灰色关联度的大小,然后根据灰色关联度的大小进行故障诊断。灰色理论在处理不确定问题上有其独到之处,它为在贫信息情况下求解问题开创了新的途径,而在汽轮发电机组的故障诊断过程中,需要处理大量不完备的信息,所以灰色理论在汽轮发电机组的故障诊断中都有一定的应用。

李铜桥等应用灰色系统理论的关联度分析法,对汽轮机磨削加工时表面烧蚀状态和运行中轴承的工作状态进行了影响因素分析,给出了不同状态下的关联系数和关联指标,并成功诊断出故障。由于传统的关联度计算方法是对各样本采取平权处理,客观性较差,这不符合某些样本更为重要的实际情况。针对这种不足,韩冬红等运用相邻指标比较法对各样本的实际情况分别赋权,提出了加权灰色关联度计算方法。徐春梅等把改进的灰色关联度方法运用到汽轮发电机组的故障诊断中,并取得了理想的诊断结果。此外,也有学者将灰色理论与其他算法(如神经网络、粗糙集、D-S理论等)融合用于故障诊断研究中,并取得了较好效果。

5. 专家系统

专家系统是以专家知识为基础,运用计算机模拟人类专家的知识和推理方法,并使之成为具有领域专家水平的、能够解决本领域内复杂问题的人工智能程序。专家系统是最早用于汽轮发电机组故障诊断的策略之一。研究者根据汽轮发电机组设计人员与现场工作人员中长期的实践经验和该领域大量的专家知识,设计出一种模拟人类思维方式的智能计算机程序,并使之能够解决汽轮发电机组中许多复杂的故障诊断问题的自动化软件系统,它为工作人员判断和解决发电设备中出现的故障问题提供了一种可靠的手段。

虽然基于专家系统的发电设备故障诊断系统取得了一定的成果,但是专家系统本身固有的局限性在很大程度上制约了它的发展和应用。主要有以下几点原因:①知识获取的瓶颈问题。因为专家系统知识的建立需要将该领域的专家总结并归纳得出的符号知识存储到计算机,而这种方法必然造成知识的形成效率低,且有些知识难以表达成符号知识。②推理能力弱。专家系统的推理规则简单、策略不够灵活,容易出现“无穷递进”、“匹配冲突”及“组合爆炸”等问题。③诊断系统的数据维护性差。建立一个发电设备故障诊断专家系统的周期非常长,数据量大且效率低,使得数据的维护变得困难。④诊断系统的诊断能力脆弱。基于专家系统的故障诊断是基于知识而建立的,若所建立的知识库的规则是不完备的,则必然导致诊断结果的不准确。⑤实时性差。专家系统的诊断推理机制决定了其难以满足在线监测的实时性的要求。

6. 神经网络

神经网络是模仿人的大脑的活动而建立的一种数学模型结构,神经网络采用并行结构、分布式存储和并行处理方法,具有高度的自适应性、优良的自学习能力和容错性等特点,且可以克服人工智能故障诊断专家系统中的组合爆炸等问题。神经网络在故障诊断中主要有三个方面的应用:一是从模式识别角度把神经网络作为分类器;二是从预测角度把神经网络作为动态预测模型进行故障诊断;三是从知识角度建立基于神经网络的诊断专家系统。

神经网络的类型有很多,其中BP算法(即误差反向传递算法)是最为常用也是最为成熟的网络,代劲松等把BP神经网络应用到汽轮发电机组的振动故障诊断中;为了提高BP网络的训练收敛速度和避免局部最优,陈仓等首先采用附加动量法修正更新权值,然后针对不变的学习速率在训练过程中可能一开始效果好、后来不合适的情况,采用自适应学习率算法自动调整学习率,并应用到汽轮发电机组的故障诊断中,诊断结果表明,改进后的BP算法提高了误差的收敛速度;魏本征等提出了遗传神经网络算法和模型,用遗传算法优化作为神经网络的学习算法,对神经网络的权系数和阈值进行编码并形成染色体,然后模拟自然界的进化过程

得到代表问题最优解的染色体,再经过反编码获取优化的网络权系数和阈值,并应用在汽轮机发电机组的故障诊断中;RBF神经网络因其更加可靠的泛化能力和较小的插值误差也在故障诊断方面得到了应用,Guang Yang等提出了基于遗传算法和模糊RBF神经网络的故障诊断方法,用RBF得到模糊隶属函数,再用遗传算法训练模糊RBF神经网络,并在电力系统复杂机械系统中得到了成功的应用。

国内外的研究者针对单一神经网络模型由于自身原因不能取得满意的诊断结果的情况,提出了用其他方法与神经网络相结合形成新型的故障诊断网络,如概率神经网络、模糊神经网络、小波神经网络、灰色神经网络、结合遗传算法的神经网络等。此外,神经网络与其他方法形成复合诊断方法,如神经网络与D-S证据理论、小波分析与神经网络、蚁群算法与神经网络等。

7. 支持向量机

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是建立在统计学习理论和结构风险最小化原理的一种新型机器学习方法。SVM分类方法是从线性可分的最优分类面提出的,当样本线性不可分时,巧妙地利用了核函数将输入空间的样本映射到高维线性可分的特征空间中,进而得到线性不可分样本的最优分类函数。SVM不仅能够尽量提高学习机的推广能力,即使由有限数据集获得的判别函数,其对独立的测试集也能得到较小的误差,而且SVM是一个凸二次优化问题,能够保证找到极值解,即全局最优解。SVM具有简洁的数学形式,能进行直观的几何解释,具有出色的学习性能和推广能力,学习速度快,有利于快速诊断,所以受到了越来越多的关注。与神经网络相比,SVM具有更强的泛化能力,较好地解决了小样本学习分类问题,能够在有限特征信息情况下,最大限度地发掘样本数据中隐含的分类知识,解决神经网络无法避免的局部极值问题及维数灾难问题。

Achmad Widodo等对支持向量机在机械的状态监测和故障诊断中应用做了比较全面的综述;王翔等采用支持向量机处理多分类问题的“一对多”方法,对燃气轮机进行故障诊断;周建萍等采用最小二乘法实现了SVM的分类算法;肖志勇等提出了把改进的经验模态分解与最小二乘支持向量机相结合对汽轮机故障进行快速精确的分类;彭文季等提出把粗糙集和支持向量机应用于水电机组故障诊断中;彭文季等又取机组振动信号的时域振幅特征和频域特征作为特征向量,分别训练最小二乘支持向量机使其能够反映特征向量与故障类型的映射关系,作为初步诊断网络;把测试样本输入到局部诊断网络得到初步诊断结果,然后采用信息融合技术达到故障诊断的目的,并取得了成功。

8. 多源信息融合技术

多源信息融合又称为多传感器融合,这一概念于20世纪70年代提出,主要是指利用计算机进行多源信息处理,从而得到可综合利用信息的理论和方法。多源

信息融合技术最初是应用在军事领域,随着信息融合技术的发展,该类技术已经逐渐推广应用到民用领域,如工业过程监视、图像融合、金融决策、工业机器人、目标识别、气象预报、故障诊断等。

在故障诊断领域,信息融合技术的应用研究受到国内外学者的关注。Sharkey A. J. C. 等对柴油机分别提取气缸压力、噪声与振动信号的特征信息,并对三类特征信息以神经网络为融合中心进行融合,进行柴油机故障诊断;Essawy M. A. 等采用频域分析和小波分析方法对多传感器信号进行特征提取,对特征向量进行聚类分析,并把聚类结果输入到 BP 网络进行故障诊断;张晓丹等提出了一种基于模糊逻辑和专家系统的融合评估模型,并通过仿真验证该模型优于传统的专家系统故障诊断模型;贾智伟等为了避免决策的主观性和模糊性,提出了一种新型的决策及融合方法,该方法首先求出各传感器所作决策的可能性分布,再运用模糊综合函数进行融合故障诊断;杨永旭等引入隶属度函数对传感器的数据进行模糊化处理,采用模糊综合评判原理把融合问题转化为模糊综合评判过程,且该方法计算量小、融合精度高;赵鹏等把 D-S 证据理论应用到发动机转子故障诊断中;王奉涛等采用神经网络构造基本概率分配,采用 D-S 理论进行决策诊断,并以旋转机械的故障为例验证了该诊断方法的有效性;董冠良等对凝汽器故障采用粗糙集进行初步诊断形成证据体,然后采用 D-S 理论进行决策诊断;凌六一等对多传感器信号分别采用小波变换提取故障特征向量,经 BP 网络进行初步诊断获取彼此独立的多个证据,再用 D-S 理论进行融合决策诊断,并应用于汽轮机的机械故障诊断;李月等针对传统的 D-S 理论在处理高冲突证据融合问题的局限性,提出了一种基于模糊成员函数和证据平均距离的证据调整方法,在该方法中,模糊成员函数充分考虑了专家知识对基本概率分配的影响,证据的平均距离对证据的调整可降低冲突证据的可信度;改进的方法能在一定的程度上提高诊断系统的性能。