

大型风力发电机组 状态监测与智能故障诊断

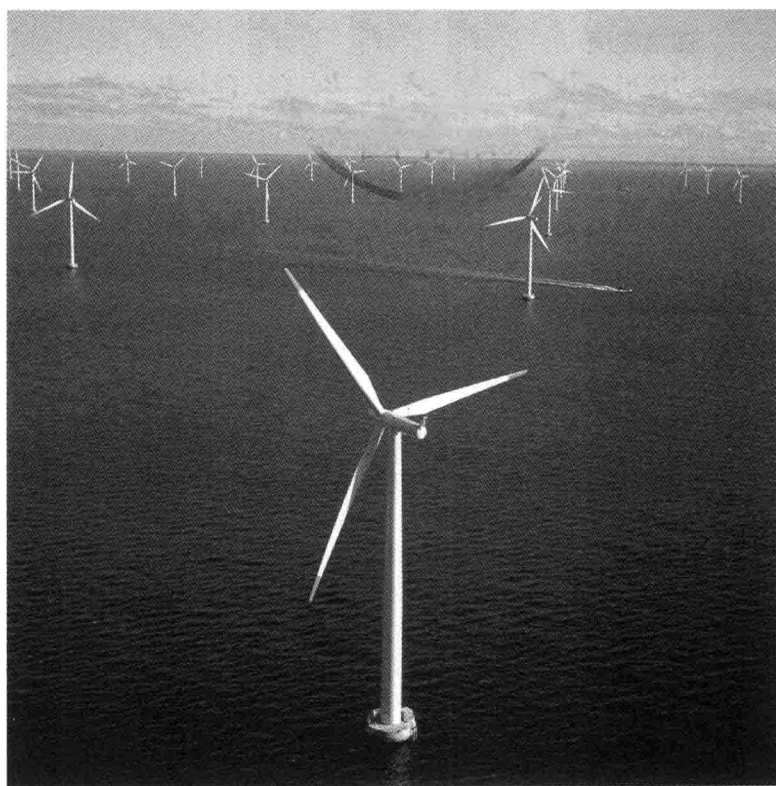
王致杰 徐余法 刘三明 孙霞 著



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

大型风力发电机组 状态监测与智能故障诊断

王致杰 徐余法 刘三明 孙 霞 著



上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了风电机组相关部件的监测与故障诊断技术,内容包括大型叶片、齿轮箱、主轴、制动系统、发电机、开关设备、互感器、升压变压器、变流器等故障在线监测系统的基本组成、故障树、故障诊断的新理论及新方法。提出了基于专家系统、模糊神经网络和小波分析三种推理模式集成的风力发电机组智能诊断策略;基于故障树和神经网络模型,建立了由框架和规则混合知识表示的智能故障诊断系统,利用模糊神经网络来建立风力发电机常见运行故障的专家诊断知识库;在诊断策略的决策层,利用小波分析、模糊神经网络和证据理论的融合,提高风力发电机故障的预测精度;利用基于神经网络的模糊综合评判,对风力发电机衬垫摩擦系数质量进行准确的综合评价;并利用小波神经网络对风力发电机的常见运行故障进行了趋势预测;提出了采用集成智能传感器容错控制方法来实现风电机组的容错控制;提出了风力发电机的一种综合安全控制策略。

本书可作为普通高等院校相关专业本科生和研究生的教材,也适合风力发电技术领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型风力发电机组状态监测与智能故障诊断/王致杰等著. —上海:上海交通大学出版社,2013

ISBN 978-7-313-09602-9

I. 大... II. 王... III. ①风力发电机—发电机组—设备状态监测 ②风力发电机—发电机组—故障诊断 IV. TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 074934 号

大型风力发电机组状态监测与智能故障诊断

王致杰 等著

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

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19 字数:468千字

2013年9月第1版 2013年9月第1次印刷

印数:1~2030

ISBN 978-7-313-09602-9/TM 定价:38.00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:021-54742979

前 言

本书主要介绍了大型风力发电机组的状态监测与智能故障诊断技术的研究成果,分析了风力发电机在线监测系统的基本特点、组成和工作原理,阐述了当前故障诊断领域的新理论和新方法,介绍了它们在风电设备故障诊断中的应用。

具体内容包括:提出了基于专家系统、模糊神经网络和小波分析三种推理模式集成的风力发电机组智能诊断策略;基于故障树和神经网络模型,建立了由框架和规则混合知识表示的智能故障诊断系统,利用模糊神经网络来建立风力发电机常见运行故障的专家诊断知识库。在诊断策略的决策层,利用小波分析、模糊神经网络和证据理论的融合,提高风力发电机故障的预测精度。利用基于神经网络的模糊综合评判,对风力发电机衬垫摩擦系数质量进行准确的综合评价。并利用小波神经网络对风力发电机的常见运行故障进行了趋势预测。提出了风力发电机的一种综合安全控制策略,对于保障风力发电机的安全运行具有重要的意义。

本书共分为16章:第1章绪论,介绍了课题研究的背景意义及研究思路;第2章介绍了风力发电机组的工作原理;第3章分析了风力发电机组的常见故障、产生原因及维修方法;第4章研究了闸瓦温升与摩擦系数对安全制动的影晌,建立了基于神经网络的风力发电机衬垫摩擦系数质量模糊综合评判,风力发电机制动系统卡缸故障的诊断策略研究;第5章介绍了基于故障树的风力发电机运行故障智能诊断;第6章分析了双馈风电变流器的控制与故障诊断;第7章分析了大型风电机组发电机的故障诊断;第8章对齿轮箱振动特性进行了分析与研究;第9章是基于小波神经网络的风力发电机故障趋势预测;第10章是风力发电机组合式故障诊断策略与系统结构;第11章是基于容错控制的风力发电机运行可靠性研究;第12章为风力发电机综合安全控制系统;第13章是风力发电机组的状态监测(SCADA系统);第14章是1.25 MW风力发电机组控制与故障诊断;第15章为基于无线网络的海上风电机组远程监测;第16章为课题研究的结论;书中涉及的一些标准和条例由于篇幅所限,没有一一列出,感兴趣的读者可以查中华人民共和国能源行业标准:海上双馈风力发电机变流器、海上永磁风力发电机变流器、海上风力发电机组主控制系统技术规范。

其中,上海电机学院的王致杰教授撰写了第3,4,5,6,7,8,12,14章;徐余法教授撰写了第1,2章;刘三明教授撰写了第9、10、11章;刘三明老师撰写了第13章;山东科技大学泰安校区孙霞老师撰写了第15,16章。

本书在编写过程中得到上海市自然科学基金(09ZR1420600)、上海市教委科研创新重点资助项目(12ZZ197)、上海市教委创新基金(08Y189)、国家自然科学基金(60801048)、上海市区科委创新基金(2010MH35/2010MH54)、上海市科委基地建设项目(08DZ2210503)、国家电网公司山东电力公司、上海电气电站集团、上海电气风电设备有限公司、上海电气输配电股份有限公司、上海寰昇新能源科技有限公司、上海合时智能科技有限公司等单位的支持,在此一

并致以诚挚的感谢。研究生栾林林、肖华桥、周圆、林成瑛、席攀、魏丹、刘娇娇、张卫、杨明莉、丁国栋、王鸿、王扬同学完成了文字的录入编辑工作,感谢他们的辛勤工作。

由于作者水平有限,书中存在的不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2013年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题的背景及意义	1
1.2 风电机组故障情况分析	2
1.3 具体部件故障分析	5
1.4 国内外研究现状及分析	7
1.5 研究思路.....	10
1.6 本章小结.....	11
第 2 章 风力发电机组的工作原理	12
2.1 风力发电机组的基本组成.....	12
2.2 并网型风力发电机的组成结构.....	13
2.3 风力发电机组的主要参数及其种类.....	18
2.4 风力发电控制技术.....	21
2.5 风力发电机传动系统的数学模型.....	22
2.6 双馈风力发电机的数学模型.....	23
2.7 直接驱动永磁同步电机.....	29
2.8 本章小结.....	32
第 3 章 风力发电机组的常见故障	34
3.1 概述.....	34
3.2 风电机组故障的分类.....	34
3.3 风力发电机组主要部件故障分析.....	36
3.4 风力发电机常见故障及维护.....	46
3.5 基于振动特性分析的故障诊断方法.....	48
3.6 故障诊断的标准.....	50
3.7 实例分析.....	51
3.8 本章小结.....	52
第 4 章 基于模糊神经网络的制动系统故障诊断	53
4.1 引言.....	53
4.2 闸瓦温升与摩擦系数对安全制动的影	53
4.3 基于神经网络的风力发电机衬垫摩擦系数质量模糊综合评判.....	58

4.4	风力发电机制动系统卡缸故障的诊断策略研究·····	63
4.5	本章小结·····	76
第5章	基于故障树的风力发电机组运行故障智能诊断 ·····	78
5.1	引言·····	78
5.2	模糊神经网络知识表示·····	78
5.3	风力发电机常见运行故障的故障树·····	79
5.4	风力发电机的故障分析·····	80
5.5	面向故障树的基于框架与规则的混合知识表示·····	84
5.6	基于框架与规则的风力发电机故障诊断系统的知识表示·····	85
5.7	基于模糊神经网络的提升机故障诊断系统知识表示·····	99
5.8	风电机组智能故障诊断系统的推理机制·····	109
5.9	本章小结·····	111
第6章	双馈风电机组变流器控制与故障诊断研究 ·····	112
6.1	研究意义·····	112
6.2	双馈风电变流器的开路故障诊断与系统重构·····	113
6.3	变流器可靠性增强设计·····	126
6.4	本章小结·····	131
第7章	大型风力发电机的故障诊断研究 ·····	132
7.1	风力发电机转子故障特性分析·····	132
7.2	故障诊断实验研究·····	136
7.3	基于小波包能量分析的电动机故障诊断·····	139
7.4	基于转子振动信号的诊断分析·····	145
7.5	风力发电机转子系统常见故障分析·····	151
7.6	本章小结·····	154
第8章	风电机组齿轮箱与轴系传动系统故障诊断 ·····	155
8.1	概述·····	155
8.2	风电机组齿轮箱振动产生机理和主要故障形式·····	155
8.3	风电机组齿轮箱齿轮传动系统的振动分析计算·····	162
8.4	基于 ADAMS 的齿轮箱模型动力学仿真和振动分析·····	166
8.5	风电机组齿轮箱的故障诊断·····	173
8.6	大型风电机组传动系统轴系故障分析·····	182
8.7	本章小结·····	184
第9章	基于小波神经网络的风力发电机组故障趋势预测 ·····	185
9.1	引言·····	185

9.2	故障预测方法的选用	185
9.3	小波神经网络的构造	186
9.4	小波基波选择的标准	188
9.5	基于小波网络预测模型的建立	188
9.6	故障预测实例	189
9.7	本章小结	190
第 10 章	风力发电机组式故障诊断策略与系统结构	191
10.1	引言	191
10.2	基于组合故障诊断策略的研究	191
10.3	系统的基本设计思想	192
10.4	系统的基本组成	192
10.5	风力发电机智能故障诊断系统总体构成与应用	199
10.6	本章小结	202
第 11 章	基于容错控制的风力发电机组运行可靠性研究	203
11.1	引言	203
11.2	风力发电机控制系统的特点	204
11.3	风力发电机组速度传感器故障主动容错控制的实现	207
11.4	应用实例	210
11.5	基于动态硬件冗余的制动系统执行器失效的容错控制	212
11.6	实验	213
11.7	本章小结	214
第 12 章	风力发电机组综合安全控制系统	215
12.1	引言	215
12.2	综合安全控制系统结构与实现方法	216
12.3	风力发电机在线式监控与诊断系统信号获取策略	218
12.4	风力发电机故障诊断仿真系统	218
12.5	本章小结	220
第 13 章	风力发电机组的状态监测(SCADA 系统)	221
13.1	SCADA 系统概述	221
13.2	Mita SCADA 系统	223
13.3	W2000 SCADA 系统	232
13.4	本章小结	239
第 14 章	1.25 MW 风力发电机组控制与故障诊断	240
14.1	1.25 MW 风力发电机组控制系统	240

14.2	风力发电机组的故障排除·····	242
14.3	风力发电机组的故障处理·····	249
14.4	本章小结·····	262
第 15 章	海上风电机组的远程监测与故障诊断 ·····	263
15.1	海上风力发电技术·····	263
15.2	海上风电场并网的特点·····	264
15.3	海上风力发电远程监测系统·····	267
15.4	海上风力发电机组的故障诊断·····	273
15.5	海上风力发电机组故障分析·····	278
15.6	本章小结·····	287
第 16 章	结论 ·····	288
16.1	本书所做的工作及得出的主要结论·····	288
16.2	本书的主要创新点·····	289
16.3	研究展望·····	289
参考文献	·····	291

第 1 章 绪 论

1.1 课题的背景及意义

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,由于设备结构日趋复杂,功能越来越完善,自动化程度越来越高,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。如何及时发现故障和预测故障并保证设备安全、高效、可靠地运转,故障诊断技术为提高设备运行的安全性和可靠性提供了一条有效的途径。主要研究背景如下:

(1) 随着全球能源紧缺,风力发电作为一种清洁能源在国内外得到了快速的发展。目前,国内在建的、已投入运行的风电场已近 30 个,国家制定的 2020 年风力发电的装机规划目标是 2000~3000 万 kW,我国近期主要在大量装备兆瓦级风力机组,目前已经有了 1.5~2 MW 的风力机组,海上风电发展的方向是 3~7 MW 的风机,以满足我国海上风力发电的需要。但是兆瓦级风机是近年才出现的,对兆瓦级风机的故障分析和诊断目前才刚刚起步。随着我国的风力发电事业的发展,对兆瓦级风力机组的故障分析和诊断将会有很大的市场需求。

(2) 风力发电系统在实际安装运行中已出现了大量的故障,影响了风力发电机的运行,据统计,国内某电力公司的三百多台风电机组,由于各种故障实际能够运行的风机只有三分之一,而国外很多风电公司在风场的风电机组安装运行初期,也出现了大量的故障,严重影响了设备的运行效率。

(3) 该研究方向符合国家和上海市关于加强清洁能源研究开发的中长期规划,也是风电领域影响电网安全运行的关键技术之一。

风力发电行业的快速增长导致了风力发电机组的运行维护费用同时持续增长,对于陆上型风力发电机组,运行维护成本占每 kW·h 电价格的 10%~15%,对于离岸型风力发电机组,其比例接近 25%~30%。如丹麦 Horns Rev 海上风电场完工于 2002 年,试运行不到两年,80 台风力发电机组的机舱不得不运到岸上做大调整。统计表明,在其一年半合同运行期中总计出勤维护约 75000 次,即每台机组每天维护 2 次。降低机组的运行维护成本有两种途径:一是提高风力发电机组的质量,二是采用有效的在线状态监测系统和合理的故障诊断方法。影响风力发电机组质量的因素包括设计、制造、安装等多个方面,需要不断的反馈和改进。而风力发电机组的正常使用寿命为 20 年,因此,只有在机组漫长的运行使用期内实时监测运行状态,及时分析状态参数,准确判断故障隐患,合理安排维护方案,才能保证风力发电机组长期稳定、可靠的运行。

目前全世界风电机组中双馈型风力发电机组占 85%以上,根据国内外不同研究机构的统计数据表明,双馈机组故障主要集中在齿轮箱、叶片、发电机、电气系统、偏航系统、传动链、控

制系统等关键部件。这些关键部件约占整个风力发电机组总成本的 80%~90%，它们发生故障以后，造成风力发电机组停机维修时间为 1~8 天。对于电气系统、控制系统、偏航系统等部分，其故障多为电气或软件方面的故障，可以通过远程控制、现场人工维修、更换零件等方式迅速处理，不会造成长时间的停机。而叶片由于裸露在空中，其故障难以监测、诊断和预测，一旦产生故障，往往只有通过重新吊装更换叶片来排除。双馈机组中的主轴及主轴轴承、齿轮箱、高速轴和发电机组成了传动链系统，它们通过旋转运动，把风轮吸收的风能进行传递并转化为电能，由于风速的不断变化，上述旋转部件不断受到变化的冲击载荷作用，容易出现故障，导致机组停机，产生高额的维修费用，造成巨大的经济损失。

借鉴其他行业机电设备故障诊断的经验：风电行业研究工作者普遍认为风力发电机组的运行状态是可监测的、故障是可诊断的、隐患是可预测的，尤其对当前主流的双馈机组旋转部件的故障分析和诊断，在机组的运行和维护中显得尤为重要，是维持机组 20 年稳定可靠运行的技术保证和有效手段。

1.2 风电机组故障情况分析

无论是哪种类型的风力发电机组，都架设在 70 m 以上的空中，其工作环境恶劣，机组的受力情况也非常复杂。由于风力发电机组的桨叶的转速是随着环境风况的变化而变化的，对于风电场所在的区域，其风况变换一般比较多样，工作风速约 2~30 m/s，对于沿海区域和海上风机，当台风来临时，最高风速能够达到 50 m/s 以上。在风力发电机组工作过程中，其受到的风速也是不断变化的，当阵风袭来时，风轮和桨叶会受到短暂而频繁的冲击载荷，这个时变载荷会传递给传动链上的每个部件，并且通过各个部件的刚性连接，给每个部件的工作寿命造成极大的影响。

风力发电机组在运行过程中，由于不断受到变化的冲击载荷作用，尤其是风能吸收部件叶片和轮毂，以及与轮毂刚性连接驱动链上的部件——主轴、齿轮箱、高速轴和发电机，容易出现故障，造成机组停机。对此，国内外许多研究机构和组织都进行过长期的追踪和统计。通过对这些数据的分析，不仅可以找出最容易产生故障的部件，更是为了发现哪些部件的故障会造成风力发电机组的长时间停机运行，严重影响机组的发电量，导致重大的经济损失。下面给出了近年来国内外风力发电机组在运行过程中所出现各类故障情况的分析。

1.2.1 西班牙 EHN 公司数据

近十年里，西班牙纳瓦拉能源水电集团(EHN)公司负责运行和维护的风电机组超过 2 700 台，它们分别安装在 EHN 或第三方所有 69 个风电场。EHN 公司 2001~2003 年主要部件的故障统计如表 1-1 所示。

表 1-1 西班牙 EHN 公司风力发电机组故障统计表

单位：%

	2001	2002	2003
齿轮箱	48	56	60
发电机	21	27	29
叶片	31	17	11

1.2.2 KTH 学院 RCAM 研究数据

瑞典皇家理工学院(KTH)的可靠性评估管理中心(RACM)对瑞典、芬兰、德国共 2151 台风力发电机组的故障情况进行了统计,结果如表 1-2 所示,数据的来源遵循下面三个原则:

- (1) 数据是可比较的。
- (2) 数据来自相同或者相近的时间范围内。
- (3) 数据是可靠的。

表 1-2 KTH 学院风力发电机组故障统计表

	瑞 典	芬 兰	德 国
平均故障/(次数/年)	0.402(1997~2005 年)	1.38(2000~2005 年)	2.38(2004~2005 年)
平均停机/(小时/年)	52	237	149
平均停机(小时/故障)	170	172	62.6
故障最频繁的部件	1. 电气系统	1. 液压系统	1. 电气系统
	2. 传感器	2. 叶片/变桨	2. 控制系统
	3. 叶片/变桨	3. 齿轮箱	3. 液压传感器
造成停机故障最多的部件	1. 齿轮箱	1. 齿轮箱	1. 发电机
	2. 控制系统	2. 叶片/变桨	2. 齿轮箱
	3. 驱动链	3. 液压系统	3. 驱动链
造成最长停机时间故障的部件	1. 驱动链	1. 齿轮箱	1. 发电机
	2. 偏航系统	2. 桨叶/变桨	2. 齿轮箱
	3. 齿轮箱	3. 结构	3. 驱动链

从表 1-2 可以看出:故障集中发生在电气系统、叶片/变桨系统、控制系统、齿轮箱、传感器、液压系统、齿轮箱等,造成停机时间最多的部件依次是齿轮箱、发电机、驱动链、控制系统、叶片/变桨系统等,单次故障造成最长停机时间的部件分别是齿轮箱、驱动链、发电机等。这表明,电气系统、控制系统、传感器、液压系统等虽然故障频繁,但是容易处理,不会产生长时间的停机维护,经济损害低;而齿轮箱、驱动链、发电机故障频率不是最高,但是一旦发生,产生的后果严重,会造成机组长时间的停机维护,带来严重的经济损失。

1.2.3 荷兰 DOWEC 研究项目

荷兰海上风能研究项目 DOWEC,2003 年对 80 台海上风机的故障情况进行统计得出:

- (1) 造成海上风力发电机组故障停机最多的部件依次是——叶片、发电机、齿轮箱。
- (2) 造成海上风力发电机组故障损失最严重的部件依次是——叶片、发电机、齿轮箱。

1.2.4 印度研究机构数据

印度 Cholamandalam MS Risk Services Limited 的一项对 2005~2006 年印度保险业统计的风力发电机组故障研究指出,导致风力发电机组出现停机危险的原因如表 1-3 所示。

表 1-3 印度部分风力发电机组故障统计表

序号	原因	序号	原因	序号	原因
1	转子叶片损坏	6	齿轮箱损坏	11	频繁停机
2	转子轴承损坏	7	雷电	12	制造缺陷
3	主轴轴承损坏	8	电气缺陷	13	机组飞车
4	发电机轴承损坏	9	电网故障/跳闸	14	润滑油污染
5	主轴故障	10	振动	15	变压器故障

1.2.5 我国研究机构数据

在国家发改委能源研究所与中国可再生能源学会风能专业委员会组织的调研中发现,各整机制造企业的产品在运行和试制过程中均出现过质量问题,典型问题及原因见表 1-4。

表 1-4 我国部分风力发电机组故障统计表

问题	原因	解决措施
齿轮箱齿断裂	设计缺陷	召回更改
齿轮箱漏油	设计不合理	改进设计
齿轮箱行星轮松动	生产工艺不合理	加固
主轴断裂	材料中含氢量过高	加强供应方管理
叶尖液压缸漏油	缸体加工精度不高	选购国外产品
偏航减速器变形	装配工艺缺陷	更改工艺
电器元件损坏	常见故障	更换
雷电将塔顶柜、塔底柜击穿	防雷设计方案不完善	更换防雷器
机架出现焊缝裂纹	设计不合理、焊接质量不到位	对机架重新设计

华北电力大学一个研究组(《大型风电机组故障模式统计分析及故障诊断》杨明明 2009 年硕士论文)对某风场 2006 年 25 台 GE1.5 MW 机组 3 个月里不同故障引起的累计停机时间进行统计,得出电气子系统故障发生次数虽然较多,但修复容易,导致系统停机时间较少,而发电机维护、齿轮箱和变桨系统故障引起的累计停机时间较多,传动系统尤其是齿轮箱发生故障是导致系统发电量损失的最主要原因。齿轮箱是系统较容易发生故障的部件,一旦发生故障维修时间相对较长,是系统发电量损失的主要来源。

从上述国内外统计数据可以得知,大型兆瓦级风力发电机组的故障主要集中在齿轮箱、发电机、低速轴、高速轴、叶片、电气系统、偏航系统、控制系统等关键部件。这些关键部件约占整个风力发电机组总成本的 80%~90%,发生故障以后,造成风力发电机组停机维修的时间为 1~8 天。由于海上风电场多建于近海区域或者滩涂,交通不便,加上风力发电机组处于高空,对风力发电机组的维护非常困难。对于电气系统、控制系统等电子电气设备的维护相对简单容易,其部件体积不大,可由工程师带上配件手动更换,在很短的时间内能够迅速排除故障。但是对于齿轮箱、轴系等传动链系统设备的故障难以现场检修,往往需要吊装到地面进行故障

诊断、维修或者更换,所以会导致长达数天的停机运行,这需要极大的人力和物力,单次维护的成本可能会超过百万人民币。根据欧洲研究机构分析结果得知,风力发电机组的维护费用在发电中占有比较高的比重,对于陆上风场是 10%~15%,对于海上风场是 25%~30%。

因此,必须在风力发电机组运行过程中实时监控各传动链部件的运行状态,根据监测数据和状态类型,及时诊断部件存在的隐患,预测将来何时会出现何种故障,及时采取处理措施,防止造成严重损失,提高风力发电机组运行可靠性、使用效率和使用寿命。正如前面国内外数据统计表明,齿轮箱、驱动链(高速轴和低速轴)、发电机是风力发电机组中风力发电机组运行和维护中的关键部件,一旦发生故障容易造成机组长时间停机维修。

对于不同的部件,其产生故障的原因和对应故障的表现形式各不相同,下面将对这些关键部件进行具体讨论,分析其故障规律。

1.3 具体部件故障分析

通过分析风力发电机组的内部结构和实际运行情况,总结齿轮箱、叶片和轴系等关键部件的故障原因与现象。

1.3.1 齿轮箱故障原因与现象

从风力发电机组齿轮箱目前发生的故障来看,齿轮箱故障主要原因有:当齿轮箱由于安装或使用不当,产生输入/输出轴不对中、与联轴器发生错位,在齿轮箱的工作过程中会造成输入/输出轴承的磨损;齿轮箱内部润滑不良,造成齿面磨损,或者是输入输出轴承润滑不良,造成轴承过早磨损;如果大气温度过低,润滑脂没有得到适当的加热而形成凝固,会影响润滑脂到达需要润滑的表面,造成表面磨损;在高温环境下,如果润滑脂散热不好,经常过热,也会使润滑脂提前失效,损坏机械表面;上述因素都会影响齿轮箱的正常工作,影响功率传递,产生噪声,造成齿面严重磨损或者断裂,轴承内外圈或滚珠损坏,缩短齿轮箱的工作寿命,严重地迫使风力发电机组产生停机故障。具体的齿轮箱故障原因与现象如表 1-5 所示。

表 1-5 齿轮箱故障原因与现象分析表

原因	不对中	润滑不良	温度低,润滑不够	润滑散热不好	滤芯堵塞,油位传感器污染
现象	轴承磨损	轴承磨损	齿面磨损	齿面裂损	润滑剂失效

1.3.2 叶片故障原因与现象

叶片是风力发电机组的风能吸收装置,也是能量转化器,它通过自身的旋转把风能转化为机械能,带动轮毂的转动,进而把机械能传递给机舱里的传动链系统。由于叶片长期暴露在高空,它的外形也因海拔高度导致叶片最容易受到雷电击中,有研究表明大约 20%的叶片损坏来自于大自然的雷击影响。在风电场里,空中的风速是不断变换的,风速范围从 0~30 m/s,在沿海或者山区,最大风速甚至能够超过 50 m/s,因此叶片主要受到不断变化的冲击力破坏,因此叶片的设计不当也会对叶片的寿命和使用产生决定性的影响。还有空气中的盐分对叶片表面材料的腐蚀。冲击力会造成叶片刚性的下降,形成应力损伤和结构疲劳,气体腐蚀会造成叶片表面材料的抗疲劳能力下降和表面裂纹,具体的叶片故障原因和现象如表 1-6 所示。

表 1-6 叶片故障原因与现象分析表

原因	雷电	设计制造缺陷	应力过大	气体腐蚀	受力不均	冲击过大
现象	烧伤	折断、振动过大	疲劳/破裂	疲劳/裂纹	疲劳/破裂	噪声过大

1.3.3 轴系故障原因与现象

轴系包括低速轴和高速轴。低速轴把轮毂的机械能传递给齿轮箱，齿轮箱带动高速轴旋转，拖动发电机转子运动，发出电能。低速轴/高速轴通过轴承、联轴器与其他部件连接。如果低速轴/高速轴在连接处轴线不对中，产生偏差，当低速轴/高速轴运转时，会产生很大的扭力，使联轴器和低速轴/高速轴都发生形变，形变过大进而会引起轴承的受力疲劳甚至断裂。具体的轴系故障原因主要有力矩过大或不对中(见表 1-7)。

表 1-7 轴系故障原因与现象分析表

原因	力矩过大	不对中
现象	疲劳/断裂	疲劳/断裂

由于故障的随机性、模糊性和不确定性，每种故障的发生都有其复杂的原因，即通常故障可能通过多种类型的故障特征信号反映，一种特征同时表征多种故障的发生；各种故障的发生不是绝对互斥的事件，两种或多种故障之间常存在必然联系，可能先后或同时发生。所以故障诊断可归结为基于多源故障特征信息的分类决策问题，而决策的水平则取决于诊断系统所能获得的信息量和对信息的利用程度。所以故障诊断就与传感器及其信号采集、故障信号特征识别与提取、故障决策的整个诊断过程中的不确定性信息处理密切相关。

传感器自身的不确定性首先可以通过提高传感器的灵敏度和精度得以有效弥补，而后再经滤波等预处理过程以降低信号采集的不确定性(指降噪和减少失真)。特征提取是有针对性地从多源信息中提取出表征故障的特征量，即故障特征信号。传感器采集的信息很多，包括设备噪声、振动、表面温度、运行中的过程变量和各种参数等。从这些信息中可提取出各种故障特征，如统计信息(噪声频率变化)、描述性信息(如振动过大、声音异常)、逻辑性信息(温度高 1、温度低 0)和专家信息(产生式规则“If condition, Then result”)等等。而这些信息从本质上常表现出模糊、不精确、随机等不确定性，它们是从不同侧面、不同程度和层次上反映了设备运行的现状。可见，如果能合理描述上述各种故障所具有的特征，并能加以充分利用，则必然可以提高诊断决策精度和可靠性。但是到目前为止，多数故障诊断技术(基于信号处理的传统方法、人工智能的方法等)仍是基于单一参数或特征进行的，而由于模型或环境的不确定性，或对含有不确定性的信息进行简单的确定化处理，都有可能导导致诊断决策模糊不清，甚至出现错误。

多源信息融合理论就是要将各种途径、任意空间和时间上获取的多源信息作为一个整体进行综合处理，以得到一个比单源信息更优的结果。它涉及信息处理、模式识别和推理决策等三大过程。在一个故障诊断系统中，当然希望在不增加传感器个数的情况下获得尽可能多的信息，因此信息融合技术的这一优点正好能满足故障诊断系统的需求。故障诊断实际上可以被看做是信息融合中基于模式分类的决策问题，所以故障特征信号表示及决策中的各种不确定性，都可以用信息融合理论框架下的各类不确定性理论或方法加以分析、描述和推理，其中

包括概率论、证据理论,以及人工智能中的模糊数学、粗糙集理论、人工神经网络和条件事件代数等。

然而在大型设备的故障诊断系统中,包含具有多类不确定性的故障特征信息,并且故障类型多样,特征和故障类型之间的对应关系复杂,单靠某种理论或某种方法很难实现在复杂环境下准确、及时地对设备进行故障诊断。

信息融合理论是当前研究的热点之一,利用它不仅能如实地描述诸如故障诊断等复杂系统中各种故障特征和故障之间的映射关系,而且还能对系统中多种信息进行统一表示和度量,从而满足分析复杂系统的需要。

本课题基于信息融合理论,以风力发电机组旋转系统为对象,拟开展典型旋转机械类系统多源故障特征信息分析与决策问题研究。因风力发电机组的叶片、主齿轮箱和发电机组成的旋转系统是能量转化的核心设备,故障高发于齿轮箱和发电机组,表征系统中各类故障的特征信息常表现出模糊、随机、不精确等不确定性。而目前对旋转设备的故障诊断多数是基于单个参数或单种类型特征进行的,但由于模型或者环境的不确定性、对含有不确定性信息的确定化处理,常会导致诊断决策模糊不清甚至错误。

为此,课题拟利用基于专家系统、模糊理论和人工神经网络三种推理模式集成的综合诊断策略来实现对多种故障特征信息的合理分类、统一描述和度量;在此基础上,利用证据理论这一典型的多源信息决策理论解决基于多源故障特征信息(即推理的证据)的分类决策问题。本课题的研究具有重要的理论意义和较广泛的工程应用前景。

1.4 国内外研究现状及分析

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。英国 CEGB 公司下属的 550 MW 和 660 MW 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 5 次正确分析,就取得直接经济效益 293 万英镑^[1~5]。目前,国内外对基于信息融合技术的兆瓦级风力发电机组故障诊断研究得较少。为确保风力发电设备的安全运行,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。故障诊断技术自 20 世纪 70 年代开展以来,已历经了一个从简单信号测量到人工智能,再到人机协作的发展过程,快速发展的传统故障诊断技术已在工程应用中发挥了重要作用。虽然传统故障诊断技术对于比较简单的设备和单一故障,常能够发挥其独特作用,但是对于大型复杂设备的多故障交互工况环境,却显得力不从心,而此时若采用智能故障诊断理论或方法便是一种合理而有效的选择。本小节将以旋转机械系统故障诊断为例,对传统和智能故障诊断中的主要方法予以分析和归纳,并以此为基础,再对本课题理论支持和研究思路进一步给予详细的论述。

1) 传统的方法

用于旋转机械系统故障诊断的传统方法以信号处理为基础,而其中的频域方法,就是利用频谱中微弱的特征信号来定位和识别故障。频域方法的研究目前已日趋成熟,并已成为实际诊断系统的主要方法之一^[1]。而具有代表性的时域方法就是基于数学模型的诊断方法^[1~3],该方法以建立目标系统完好条件下的精确模型即参考模型为基础,再将实际系统的估计或者

监测状态输出和参考模型输出作为依据进行故障诊断。这种方法的准确性和实用性虽然有依赖于传感器数据和模型精确性的不利因素,但与频域方法相比却有较小的计算负荷。若时频方法与频域中时间的尺度变换相结合,就能在特定的时间窗下提高频率分辨率,从而能有效地增强故障特征的识别性能,该方面的研究主要使用小波分析的方法^[4]。

传统诊断方法多是基于单参数、单特征的,而面对日趋复杂的设备或多重故障的情况,使用这些方法常难以给出较为准确的诊断结果。比如现在研究较多的电流特征分析(MCSA)方法^[5~6],其依据是电机的一些故障如转子断条、轴承故障等能够在定子电流中产生特殊的频率分量,诊断的方法就是确定定子电流频谱中是否存在故障特征频率分量,但是某些频率可以表示不同故障,或者不同的故障会在某频段上产生相互抵消的效果,或者频段的幅值太小难以被检测到,这就会导致不准确甚至错误的诊断结果。当用其他单参数方法,如振动和温度等情况时也存在同样的问题,所以单参数的诊断方法存在固有的局限性^[6]。

基于模糊理论和可能性理论的方法由于设备运行状态的多变性与随机性,各故障状态间的界限往往不清晰,而且对某些特征信号的描述也存在着不确定性,故障与特征的关系往往也是模糊的,因此模糊理论就被引入故障诊断领域^[7~10]。目前用于智能故障诊断的模糊技术主要有两种^[7],一种技术是基于模糊关系及逻辑运算的诊断方法,其基本思想是首先建立故障特征与故障类型之间的因果关系矩阵 R ,再建立故障与特征的模糊关系方程,即 $F=S \cdot R$, F 为模糊故障矢量, S 为模糊特征矢量,“ \cdot ”为模糊合成算子;另一种技术是基于模糊理论的知识处理诊断方法,它是将模糊集划分成不同水平的子集,以此来诊断故障可能属于哪个子集。文献^[8]采用第一种方法实现了对发电机电气故障的诊断;文献^[9~10]采用第二种方法建立了电机定子电流与定子绕组故障的模糊规则库,通过模糊推理实现对定子绕组故障的在线诊断。

另外,可能性理论是 Zadeh 在其模糊集理论的基础上提出的另一种不确定性推理的方法^[11],它借助可能性测度和必要性测度两个模糊度量来处理信息的不完全性。由于其具有较好的理论基础,计算复杂性也比较适中,因而有望在不确定性信息处理中得到广泛应用。文献^[12]针对柴油机的磨损故障,建立了能够处理润滑油光谱分析数据的可能性线性模型,进而利用模糊线性规划方法对磨损状态进行识别,得到了比以往方法更好的效果。文献^[13]将可能性理论应用于模糊专家系统中,用可能性分布来表示不确定和模糊知识,使得在智能系统中进行模糊推理时,得到比概率方法更好的结果。

模糊语言变量接近自然语言,知识的表示可读性强,模糊推理逻辑严密,类似人类思维过程,易于解释。但是,由于模糊语言变量利用模糊隶属度表示,而如何实现语言变量与隶属度之间的转化,是目前理论和应用上的一个难点^[7]。该方法只能对具有模糊性的特征信号进行分析,也仅是一种基于单一故障特征的诊断方法,诊断中的不确定性依然存在。尽管如此,将模糊理论引入故障诊断领域已是一种符合事物本质的必然趋势^[7~10]。

2) 专家系统的方法

基于专家系统的诊断方法是根据被诊断系统的专家以往的经验,将其归纳成规则,并通过经验规则推理来进行故障诊断^[7],在宏观功能上模拟人的知识推理能力。它是以逻辑推理为基础,通过知识获取、知识表示、推理机设计等来解决实际问题,其知识处理所模拟的是人的逻辑思维机制。基于专家系统的诊断方法具有诊断过程简单和快速等优点。但由于该方法主要应用的是反演推理,因而不是一种能确保唯一性的推理方法,存在着如何有效获取知识的瓶颈。并且复杂系统所观测到的症状与所对应故障之间的联系是相当复杂的,所以由专家经验