

DIANJI ZHUANGTAI JIANCE YU GUZHANG ZHENDUAN

国家自然科学基金资助项目

电机状态监测与 故障诊断

DIANJI ZHUANGTAI JIANCE YU GUZHANG ZHENDUAN

马宏忠 著



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

本书从提高电机运行可靠性、降低维修费用的原则出发,本着理论性与实用性相结合的原则,全面系统地分析了电机状态监测与故障诊断的基本原理和实际应用知识。

全书分为3篇共16章,第1篇主要讨论了交流电机故障的分析方法。第2篇主要分析了电机状态监测与故障诊断的理论与方法,分别从状态监测与故障诊断中的数据采集、传感器、信号处理、诊断理论与方法、电机寿命预测等方面展开,其主要内容也适用于其他电气设备的状态监测与故障诊断。第3篇主要介绍了电机故障诊断的应用技术与实例,分别从温度与红外诊断技术、绝缘监测与诊断技术、振动监测与诊断技术、噪声监测与诊断技术、轴承监测与诊断技术等方面,对电机故障监测与诊断进行了论述。并且用大量的篇幅详细地介绍了电机状态监测与故障诊断的各种新技术、新方法,总体上反映了当前国内外电机故障诊断的技术水平,具有很好的实用价值。

本书适用于从事电机及其他电气设备状态监测故障诊断的工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生及教师作教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机状态监测与故障诊断/马宏忠著. —北京:
机械工业出版社, 2007. 6
ISBN 978 - 7 - 111 - 21327 - 7

I. 电… II. 马… III. ①电机 - 故障监测②电机 - 故障
诊断 IV. TM307

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 054902 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 林春泉

责任编辑: 林春泉 版式设计: 霍永明 责任校对: 姚培新
徐明煜

封面设计: 马精明 责任印制: 邓 博

北京京丰印刷厂印刷

2008 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·64.75 印张·2 插页·1779 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 21327 - 7

定价: 128.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

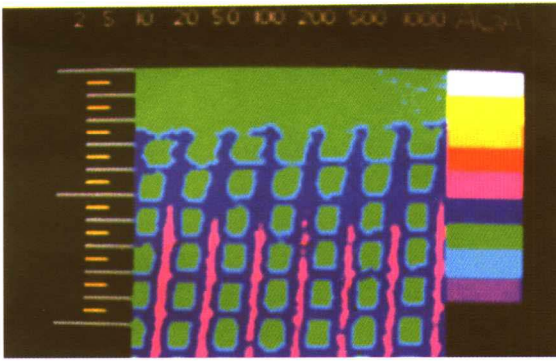


图10-4-5 良好定子铁心热像图

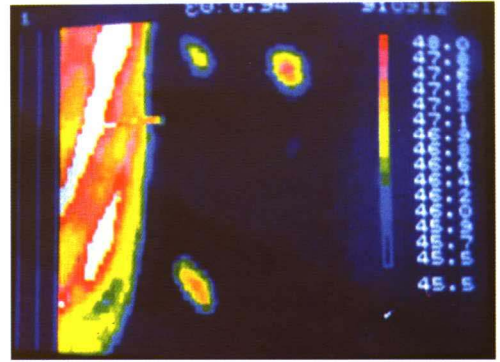
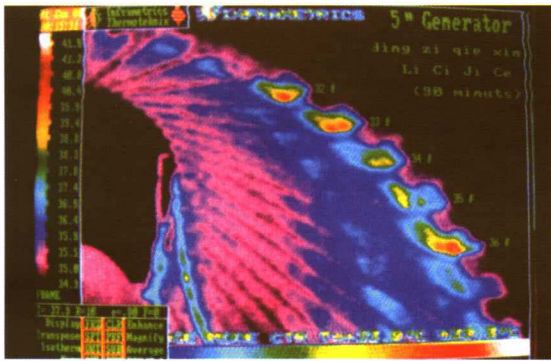
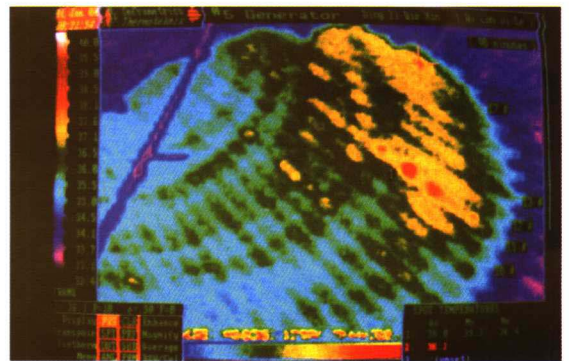


图10-4-6 有三处缺陷的定子铁心热像图
(三处过热区的温度值均接近或超标准规定的极限值)



a)



b)

图10-4-7 某厂5#发电机定子热像图
a)励磁机机侧左侧 b)汽轮机侧左侧

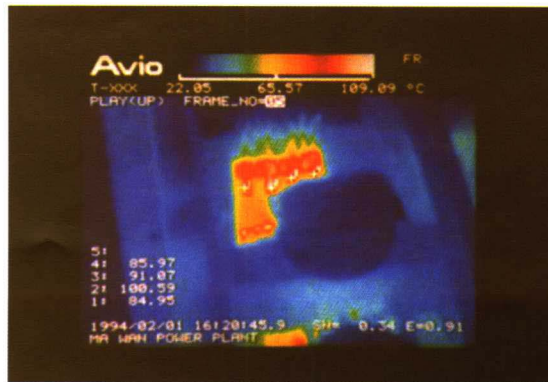


图10-4-8 200MW汽轮发电机电刷过热
(100.59° C)热像图

序

自19世纪初发明发电机和电动机以来，由于电能使用方便和电动机性能优良，电机技术得到了迅速发展。100多年来，电动机与发电机的发展相互促进，相继出现了很多形式的电机。特别是三相异步电动机的问世，将人们从繁重的体力劳动中逐步地解放出来，从而推进和完成了人类历史上第二次工业革命。

现在，发电机的容量越来越大，电压等级也越来越高。它的运行可靠性直接影响电网运行及向用户安全、经济地供电。发电机运行事故是当前我国发展电力工业方面存在的重要问题之一，一些恶性事故给国民经济带来了巨大的损失。

电动机的应用面广量大，使用环境各异，负载性质也不尽相同，电动机故障时有发生。电动机故障不仅仅影响了电机本身，有时可能对所驱动的负载造成很大的影响，如一台生产线上的关键电动机故障可能使整个生产线停工或产生大量废品。

因此，无论是发电机还是电动机，为了保证其可靠运行，应对电机故障进行分析，并对电机状态监测与故障诊断进行研究。

目前电力系统中电力设备大多仍采用的计划检修体制，存在着严重缺陷，如维修不足或维修过剩、盲目维修等，维修耗资巨大。特别是不必要的维修可能增加故障率，影响设备的性能或质量。一台电机本来是稳定的，一旦对其进行拆修，将是对稳定状态进行扰动，拆修本身很可能造成早期故障，特别是结构比较复杂的大型电机。因此，目前人们普遍认识到必须开展对电机进行状态检修的研究。

对电机进行状态检修的基础是对电机运行进行可靠的状态监测与准确的故障诊断，而故障诊断的基础又是对电机故障进行深入的机理分析，识别故障的早期征兆，对故障的性质、部位、故障程度、故障发展趋势等作出判断，甚至对电机的剩余寿命作出评估。根据状态监测与故障早期征兆诊断的结果，在电机性能下降到一定程度或故障将要发生之前主动实施维修。

目前关于电机状态监测与故障诊断的书还很少，因此迫切需要一部比较全面系统地分析电机状态监测与故障诊断的专著。《电机状态监测与故障诊断》一书的问世，在很大程度上弥补了这方面的不足。

本书有几点值得提出：

1. 第一篇基于高景德和王祥珩先生首创的多回路理论，系统地论述了交流电机绕组故障的分析方法。这是电机故障诊断的基础。

2. 比较系统地分析了电机状态监测的基本方法，详细分析了电机的故障诊断理论及寿命预测方法。

3. 全书重点在第三篇，第三篇分别从温度与红外、绝缘、振动、噪声等方面对电机故障监测与诊断进行专题研究。最后两章用大量的篇幅，分别对电动机和发电机状态监测与故

障诊断进行了系统性分析。总体上反映了当前国内外电机故障诊断的技术水平。

4. 全书取材广泛，既有当前电机故障诊断的新技术、新方法，特别是一些智能诊断技术，也介绍了一些简易诊断方法。因此，本书可以兼顾各种不同层次的读者要求。

5. 理论与实际相结合。全书既有严密的理论分析，仿真研究，又有实验证实，特别是大量的现场故障事例分析，使本书既保持相当高的理论水平，又具有很强的工程实用性。

相信本书的出版将有利于提高我国电机故障诊断的总体水平，大大推进我国电机状态监测与故障诊断技术的发展，并对我国电机状态检修起到很好的促进作用。

中国工程院院士
中科院电工研究所研究员

王元光 2007年11月

本书及相关研究工作得到下列基金资助：

江苏省应用基础研究基金资助项目：大型交流电机实时奇异信号检测与诊断方法的研究（BJ99009）

东南大学科学基金项目：交流电机故障的机理分析和诊断技术的研究

河海大学自然科学基金项目：电气奇异信号的检测与分析研究

教育部第二届高校青年教师奖资助项目：电力元件健康诊断（教人司[2001] 182号）

国家自然科学基金项目：大型异步电动机早期电气故障研究（50477010）

国家高新技术研究发展计划（863计划）项目子课题：发电与电气系统监控与软件研究（子课题编号：2006AA05010）

感谢上述研究基金的资助，谨以本书献给资助本书相关研究的上述基金资助单位！

前 言

在现实的各种生产与生活环境中，我们总是期望各种设备完好、正常并充分地发挥其效益，尤其是对于那些通常凭直观很难把握其状态的大型复杂机电设备。这些设备的故障轻则会造成巨大的经济损失，重则还会产生严重的、甚至灾难性的人员伤亡事故和社会影响。

近几十年来，因关键设备的故障而引起的灾难性事故时有发生，如1984年12月印度博帕尔农药厂发生的毒气泄漏事故，造成2000多人死亡，20多万人受害，成为世界工业史上空前的大事故；1986年4月26日，前苏联切尔诺贝利核电站大量放射性元素外泄事件，致使2000多人伤亡，数万人疏散，损失达30亿美元，污染波及周边各国；1982年国内某化肥厂合成氨压缩机组发生强烈振动，三次停机，损失达千万元以上；1985年山西某电厂的大型汽轮发电机组发生严重的断轴毁机事件，使发电机在40s内全部损坏，直接损失达1000万元以上。

由于严重的、灾难性的事故频发，状态监测与故障诊断已变得如此重要，人们不得不采取以“设备状态监测与故障诊断”为技术核心的防范措施，以提高设备运行的可靠性。

设备状态监测与故障诊断是20世纪70年代初兴起的一门新技术，它能在不影响设备运行的情况下，运用先进的技术手段，对设备状态参数进行在线监测与分析，判断设备的运行状态、质量优劣、可用程度、是否安全、有关异常和故障的原因及预测对将来的影响等，进而找出必要对策的技术。

电机是当前应用最广泛的原动力和驱动装置，其数量之多、应用之广、地位之重要是其他任何设备都不能与之相比的。有时，在复杂生产线上的关键电机出现故障，受影响的不仅仅是电机本身，而是整个生产线。

20世纪80年代以来，设备状态监测与故障诊断技术逐步应用于大型电机。在1987年，P. J Tavner与J. Penman提出了电机状态监测的概念。

电机状态监测与故障诊断是指在线监测电机相关运行参数（如电压、电流、磁通、转速、温度、振动、噪声、局部放电等），并采用适当方法评估电机当前的运行状态；若处于故障状态，则进一步需要确定故障的类型、发生部位、严重程度及发展趋势。该项技术的出现引发了电机维修体制的一次革命，使传统的事后维修方式逐步转变为预知维修（状态维修）方式。状态监测与故障诊断系统可以向现场运行人员提供必要的信息，以合理安排、组织预防性维修，从而避免恶性事故的发生。

电机状态监测与故障诊断为电机维修工作提供了强大的技术支持，为实现电机预知维修提供了必要的前提条件和技术手段，使传统的预防维修上升到预知维修，为弥补和克服传统设备维修制度的不足创造了条件。

近20年来，电机状态监测与故障诊断技术得到了快速的发展。国内外广大科研工作者纷纷致力于电机状态监测与故障诊断这一课题的研究，取得了大量的研究成果，提出了各具特色的监测与诊断方法。特别是清华大学高景德、王祥珩先生在电机故障分析方面做出

了杰出的贡献。

本书是作者在长期从事电机及其他电气设备状态监测与故障诊断的科研和教学工作，并总结国内外近 20 年研究成果的基础上，结合河海大学电气设备状态监测故障诊断课题组多年的教学与研究成果整理而成的。书中核心部分已在河海大学本科生和研究生课程中讲授多轮。

全书分 3 篇共 16 章，第 1 篇主要讨论了交流电机故障的分析方法，其中包括第 2 章异步电机绕组故障的稳态分析方法，第 3 章异步电机绕组故障的暂态分析方法，第 4 章同步电机绕组故障的分析方法。第 2 篇是电机状态监测与故障诊断的理论及方法，其中包括第 5 章状态监测与故障诊断中的数据采集，第 6 章状态监测与故障诊断系统常用的传感器，第 7 章电机故障诊断中的信号处理技术，第 8 章诊断理论与智能诊断方法，第 9 章电机寿命预测技术。第 3 篇主要介绍了电机故障诊断应用技术与实例，其中包括第 10 章电机温度与红外诊断技术，第 11 章电机的绝缘监测与诊断，第 12 章电机振动的监测与诊断，第 13 章电机噪声的测量与诊断，第 14 章电机轴承的故障诊断，第 15 章电动机监测与诊断技术，第 16 章发电机故障诊断技术。第 3 篇是本书的重点，全篇用大量的篇幅详细地介绍了电机状态监测与故障诊断的各种新技术，总体反映了当前国内外电机故障诊断的技术水平。

本书在写作过程中得到了中国工程院顾国彪院士，东南大学胡虔生教授、胡敏强教授，清华大学王祥珩教授，河海大学鞠平教授、李训铭教授、尹延凯教授、王宏华教授、张利民高级工程师，西南交通大学吴广宁教授，华侨大学方瑞明博士，南京电力自动化设备总厂蒋金华教授级高级工程师，安徽省电力科学研究院王刘芳高级工程师等专家的大力支持，在此表示诚挚的感谢。本书在写作过程中还得到了研究生和博士生的大力协助，他们是黎华敏、丁媛媛、倪欣荣、朱统亮、黎腊红、徐树峰、陈奋、宋锦刚、姚华阳、纪卉、刘丽丽、李少白、王波、涂昊曦、王斌、李峥等，没有他们的帮助，本书很难及时完成，因此从某种意义上说他们也是本书的作者。

本书由清华大学王祥珩教授主审，他通读了全部书稿，并提出了很多宝贵意见。同时中国水力发电工程学会理事、教授级高级工程师刘徽博士也对全书进行了审阅，在工程应用方面提出了不少有意义的建议，使本书更具有实用性。本书的写作还得到了机械工业出版社林春泉老师的大力支持与帮助，在书稿的编辑加工过程中林春泉、徐明煜两位编辑做了大量细致的工作，提出了很多宝贵参考意见，在此对他们为本书所做出的贡献表示衷心感谢。

本书在写作过程中参考了大量的文献资料，对所引用的资料已尽可能地列写在书后的参考文献中，但其中难免有所遗漏，特别是一些资料经过反复引用已难以查实原始出处，在此特向被漏列参考文献的作者表示歉意，并向所有作者表示诚挚的感谢。

本书从构思、资料搜集与整理到正式写作，耗时六年多，由于电机状态监测与故障诊断技术发展很快，各种新的技术不断地出现，其间有关资料不断地更新；随着课题研究的深入，本课题组也有不少新的研究成果产生。尽管笔者试图使本书尽可能完美地呈现给读者，但由于能力与精力有限，书中内容仍有局限与欠缺之处，有待不断地充实与更新，衷心希望读者不吝赐教。

Email: hhumhz@163.com

马宏忠

2007 年 11 月于南京

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 设备状态监测与故障诊断 1
 - 1.1.1 设备状态监测 1
 - 1.1.2 设备诊断技术 2
 - 1.1.3 设备状态维修 5
- 1.2 电机状态监测与故障诊断 7
 - 1.2.1 电机故障 7
 - 1.2.2 电机故障的分析方法 10
 - 1.2.3 电动机状态监测与故障诊断 13
 - 1.2.4 发电机状态监测与故障诊断 14

第 1 篇 交流电机故障的分析方法 17

第 2 章 异步电机绕组故障的稳态分析

方法 17

- 2.1 概述 17
- 2.2 多回路分析的回路电气参数计算 18
 - 2.2.1 单个线圈的安导、磁动势和绕组函数 18
 - 2.2.2 定子回路电感的计算 20
 - 2.2.3 转子回路电感的计算 22
 - 2.2.4 定转子间电感的计算 24
- 2.3 谐波对电感参数计算的影响 25
 - 2.3.1 在不同谐波时的电机绕组系数 25
 - 2.3.2 计入不同谐波时定子绕组的电感 25
 - 2.3.3 计入不同谐波时转子绕组的电感 26
 - 2.3.4 计入不同谐波时定转子绕组之间的互感 27
- 2.4 异步电动机多回路方程及稳态分析方法 28
 - 2.4.1 正常情况下的多回路方程 28
 - 2.4.2 定子绕组故障情况下的多回路方程 30
 - 2.4.3 转子故障情况下的多回路方程 31
 - 2.4.4 稳态电流计算 32
- 2.5 定子绕组匝间短路故障的仿真与

实验分析 34

- 2.5.1 仿真计算 35
 - 2.5.2 实测数据分析 35
 - 2.6 转子绕组故障的特征量分析 37
 - 2.6.1 定子电流中的转子绕组故障特征量 37
 - 2.6.2 故障特征电流分量的修正 38
 - 2.6.3 与转子绕组故障引起的气隙高次谐波磁场对应的定子电流分量 40
 - 2.6.4 定子电流中的高次边频带 40
 - 2.7 转子断条故障分析 41
 - 2.7.1 转子断条根数与转子各导条电流的关系 41
 - 2.7.2 转子断条根数与定子电流故障特征电流的关系 43
 - 2.7.3 转子断条与转子端环电流的关系 43
 - 2.7.4 转子断条位置与故障特征电流的关系 44
 - 2.7.5 转子断条位置与转子电流的关系 47
 - 2.7.6 实测数据分析 48
 - 2.8 转子端环断裂的分析 51
 - 2.8.1 一根端环断裂 52
 - 2.8.2 同一侧两根端环断裂 53
 - 2.8.3 转子异侧端环断裂 55
 - 2.8.4 同时存在断条和端环断裂故障 56
 - 2.9 转子绕组故障对电机转矩、转速的影响 56
 - 2.10 负载状态的影响 58
 - 2.10.1 负载转矩大小对故障特征量的影响 58
 - 2.10.2 转动惯量与故障特征量的关系 59
 - 2.10.3 负载转动惯量与电磁转矩及转速波动的关系 60
- 附录 2. A 计算故障特征电流的经验公式 61

附录 2. B Y90S-4 三相异步电动机 基本参数	62	第 2 篇 电机状态监测与故障诊断的 理论及方法	89
第 3 章 异步电机绕组故障的暂态分析 方法	63	第 5 章 状态监测与故障诊断中的数据 采集	89
3.1 概述	63	5.1 概述	89
3.2 电机内部故障的暂态分析模型	63	5.1.1 数据采集系统的基本功能	89
3.2.1 电机矩阵状态方程	63	5.1.2 典型的数据采集系统结构	90
3.2.2 异步电机的电磁转矩和转子运动 方程	64	5.2 模拟信号的数字化处理	94
3.2.3 转子故障后的方程	65	5.2.1 信号预处理	94
3.3 电机转子绕组故障与起动电流的 关系	65	5.2.2 采样	95
3.3.1 转子绕组故障对起动电流时域波形 的影响	65	5.2.3 频率混淆及其消除措施	97
3.3.2 转子绕组故障与起动电流中故障 特征量的关系	66	5.2.4 数据采集系统的控制结构 原理	98
3.3.3 起动电流中特定频率分量的 研究	68	5.2.5 孔径时间与数字化方式的 选择	102
3.4 转子绕组故障与电机起动时间、起动 转矩及转子电流的关系	68	5.3 数据采集系统的主要构件	104
3.4.1 转子绕组故障与电机起动时间的 关系	68	5.3.1 模拟多路转换器	104
3.4.2 转子绕组故障与电机起动转矩的 关系	69	5.3.2 检测信号的放大	108
3.4.3 转子绕组故障与电机转子起动 电流的关系	69	5.3.3 采样保持电路	116
3.5 阻抗中的谐波对电机故障暂态分析的 影响	71	5.3.4 A/D 转换器	117
3.5.1 阻抗中的谐波与电机起动电流、 转矩的关系	71	5.3.5 D/A 转换器	123
3.5.2 阻抗中的谐波与电机起动时间 的关系	72	5.4 采样数据的预处理	125
第 4 章 同步电机绕组故障的分析 方法	74	5.4.1 采样数据的标度变换	125
4.1 同步电机内部故障时的基本方程	74	5.4.2 测量通道非线性补偿	126
4.1.1 回路的选择	74	5.4.3 采样数据的数字滤波	129
4.1.2 回路的电压和磁链方程	75	5.4.4 剔除采样数据中的奇异项	132
4.1.3 同步电机的约束方程	78	5.4.5 去除或提取采样数据的 趋势项	133
4.2 内部故障时基本方程的求解	82	5.5 数据采集系统的抗干扰技术	134
4.2.1 同步电机回路参数的特点	82	5.5.1 数据采集系统中常见的干扰	135
4.2.2 内部故障时基本方程的求解	83	5.5.2 模拟信号输入通道的抗干扰	137
4.2.3 仿真分析	85	5.5.3 长线传输的抗干扰措施	141
附录 4. A 仿真电机参数	87	5.5.4 供电系统的抗干扰	146
		5.5.5 接地问题	148
		5.5.6 印制电路板及电路的抗干扰设计 措施	151
		5.5.7 数字电路的抗干扰措施	153
		5.5.8 数据采集软件的抗干扰	154
		5.6 虚拟仪器技术及其在数据采集中的 应用	158
		5.6.1 虚拟仪器的特点	158
		5.6.2 虚拟仪器总线技术	159
		5.6.3 虚拟仪器的构成	161

5.6.4 虚拟仪器在数据采集中的应用	163	7.1.2 周期信号与离散谱	217
5.6.5 虚拟仪器的发展方向	165	7.1.3 非周期信号的傅里叶变换	218
第6章 状态监测与故障诊断系统常用的传感器	166	7.1.4 各态历经随机信号及其统计特性	221
6.1 概述	166	7.2 信号的时域分析及时域平均法	222
6.1.1 传感器的分类	166	7.2.1 信号的时域分析	222
6.1.2 监测与诊断系统传感器的特性及选用要求	167	7.2.2 时域平均法及其应用	223
6.2 温度传感器	171	7.3 相关分析	223
6.2.1 热电偶温度传感器	171	7.3.1 自相关函数及其应用	223
6.2.2 热电阻温度传感器	174	7.3.2 互相关函数及其应用	225
6.2.3 半导体温度传感器	176	7.4 概率统计法	227
6.2.4 红外线传感器	177	7.5 信号的频域分析与功率谱密度	230
6.3 电量测传感器	178	7.5.1 傅里叶变换	230
6.3.1 电流型电流传感器	178	7.5.2 功率谱密度	230
6.3.2 高频电流传感器	181	7.6 倒频谱分析	232
6.3.3 磁敏电流传感器	183	7.6.1 倒频谱分析原理	232
6.4 振动传感器	185	7.6.2 倒频谱分析在工程中的应用	233
6.4.1 电涡流位移传感器	185	7.7 噪声最优抵消与干扰自适应抑制	235
6.4.2 压电式加速度传感器	190	7.7.1 噪声最优抵消及其在电机故障诊断中的应用	235
6.4.3 磁电式速度传感器	196	7.7.2 干扰自适应抑制	238
6.4.4 压电式内置积分电路速度传感器	198	7.8 频率细化分析	240
6.4.5 复合式振动传感器	198	7.8.1 频率细化	240
6.5 测磁传感器	199	7.8.2 基于复调制的细化方法	241
6.5.1 概述	199	7.8.3 相位补偿细化方法	242
6.5.2 磁敏电阻器	200	7.8.4 细化分析在工程中的应用	244
6.5.3 磁敏二极管	202	7.9 旋转电机瞬态信号分析与处理	244
6.5.4 磁敏晶体管	203	7.9.1 跟踪轴心轨迹	244
6.6 光纤传感器	203	7.9.2 波德 (Bode) 图	245
6.6.1 光纤传感器的分类及特性	203	7.9.3 极坐标图	245
6.6.2 光纤传感器的原理与应用	205	7.9.4 三维谱阵图	245
6.7 电气设备状态监测中其他常用传感器	207	7.10 全息谱分析法	246
6.7.1 气体敏感传感器	207	7.10.1 全息谱构成原理	246
6.7.2 耦合式传感器	211	7.10.2 三维全息谱在故障诊断中的应用	248
6.7.3 超声波传感器	212	7.11 小波变换	249
6.7.4 磁光效应传感器	213	7.11.1 短时傅里叶变换到小波变换	249
第7章 故障诊断中的信号处理技术	214	7.11.2 连续小波变换	252
7.1 信号的分类与描述	214	7.11.3 离散小波变换	253
7.1.1 信号的分类与基本描述	214	7.11.4 多分辨分析与小波包分析	254
		7.12 小波变换在故障诊断中的应用	256
		7.12.1 信号奇异性检测	256
		7.12.2 小波分析用于信号消噪	259

7.12.3 信号和噪声的分离技术	262	处理	320
7.12.4 特征提取	263	8.8.5 推理诊断方法	323
第8章 诊断理论与智能诊断方法	264	8.8.6 故障诊断专家系统	326
8.1 故障形态与故障机理	264	8.8.7 电力设备故障诊断专家系统的 应用实例之一：发电机绝缘故 障模糊专家系统	329
8.1.1 设备故障率时段及应采取的 措施	264	8.8.8 电力设备故障诊断专家系统的 应用实例之二：汽轮发电机在 线诊断专家系统	332
8.1.2 设备故障机理	266	8.9 人工神经网络在故障诊断中的 应用	334
8.2 利用人体感官诊断设备故障	270	8.9.1 人工神经网络基础	335
8.2.1 人体感官检测特性	270	8.9.2 故障诊断典型神经网络	339
8.2.2 人体感官异常诊断	276	8.9.3 基于人工神经网络的电机故障 诊断方法	345
8.3 基于逻辑的诊断与基于统计的 诊断	278	8.9.4 应用实例之一：基于BP神经 网络模型的电机故障诊断 专家系统	347
8.3.1 基于逻辑的诊断	278	8.9.5 应用实例之二：基于人工神经 网络的发电机转子绕组匝间 短路故障诊断	350
8.3.2 基于统计的诊断	281	8.10 其他人工智能技术在故障诊断中 的应用	351
8.4 基于模糊的诊断技术	281	8.10.1 基于模糊神经网络的电机故障 诊断方法	351
8.4.1 模糊数学基础	282	8.10.2 基于遗传算法的电机故障诊断 方法	352
8.4.2 模糊故障的诊断方法	283	第9章 电机寿命预测技术	354
8.5 基于样板的诊断	283	9.1 概述	354
8.5.1 阈值诊断	283	9.1.1 基本概念	354
8.5.2 频率特性诊断	284	9.1.2 国内外电力设备寿命评估技术的 研究动态	355
8.5.3 指纹诊断	284	9.2 电气设备寿命评估的方法及理论	356
8.6 故障诊断中的参数辨识法	286	9.2.1 寿命评估方法简介	356
8.6.1 基于数学模型的故障诊断	286	9.2.2 基于异常现象信息的故障诊断与 故障预测	357
8.6.2 故障诊断中的参数辨识法	287	9.3 旋转电机寿命预测	359
8.6.3 最小二乘参数辨识法	288	9.3.1 电机主要部件时效老化的原因与 预测方法	359
8.6.4 利用参数辨识法诊断笼型异步 电动机转子断条故障	289	9.3.2 定子绕组寿命预测——马尔可夫 概率模型法	361
8.6.5 最小二乘的递推算法	291	9.3.3 转子及部件寿命预测	363
8.6.6 应用实例：异步电机定转子参数的 辨识	292	9.4 电机寿命预测实例分析	367
8.7 故障诊断中的模式识别方法	296	9.4.1 预测大电机绝缘寿命的方法	367
8.7.1 模式识别的基本概念	296		
8.7.2 故障诊断与模式识别	298		
8.7.3 贝叶斯决策判据	300		
8.7.4 从参数模型求特征	302		
8.7.5 用K-L变换提取特征	304		
8.7.6 模式识别在电机故障诊断中的 应用	305		
8.8 专家系统及其在电机故障诊断中的 应用	310		
8.8.1 人工智能诊断技术	310		
8.8.2 专家系统(ES)及其结构	311		
8.8.3 知识与知识表示	317		
8.8.4 专家系统中不确定性知识的表示和			

9.4.2 三相异步电动机绝缘可靠性 寿命预测	370	11.2.2 电气设备绝缘的特征量	419
第3篇 电机故障诊断应用技术与 实例	375	11.2.3 电机绝缘诊断内容与诊断 项目	420
第10章 电机温度与红外诊断 技术	375	11.2.4 电机绕组绝缘的有关判定 标准	422
10.1 红外测温与红外诊断基础	375	11.3 电机绝缘测试(离线试验)	431
10.1.1 红外基础知识	375	11.3.1 大型电机定子绕组绝缘诊断性 试验纵览	431
10.1.2 红外测温与红外诊断的技术 特点	377	11.3.2 电机绝缘电阻与极化指数	433
10.2 红外诊断常用的基本仪器	379	11.3.3 工频交流耐压试验	441
10.2.1 红外诊断仪器简介	379	11.3.4 直流泄漏和直流耐压试验	442
10.2.2 红外辐射测温仪	381	11.3.5 介质损耗角正切 $\tan\delta$ 及 其增量 $\Delta\tan\delta$	445
10.2.3 红外射线扫描仪	385	11.3.6 高压电机定子绕组超低频耐压 试验	448
10.2.4 红外热电视	387	11.3.7 匝间绝缘的检查方法和耐压 试验	450
10.2.5 红外热像仪	389	11.3.8 绝缘电阻过低的诊断	454
10.3 红外诊断技术	394	11.4 局部放电及其离线诊断	456
10.3.1 红外检测的要求	394	11.4.1 电机局部放电产生的机理与 特征	456
10.3.2 红外诊断技术	395	11.4.2 电机局部放电特性分析	464
10.4 电机故障红外诊断	397	11.4.3 电机局部放电的测量与 试验	466
10.4.1 发电机定子线棒接头故障的红外 诊断	398	11.4.4 电机局部放电的诊断	477
10.4.2 定子铁心故障的红外诊断	401	11.5 电机局部放电的在线监测与诊断	480
10.4.3 电刷和集电环故障的红外 诊断	403	11.5.1 发电机局部放电在线监测 技术	480
10.4.4 电动机故障红外诊断	404	11.5.2 在线测试与传统测试方法的 联系	485
10.4.5 应用实例之一:应用红外诊断 技术诊断发电机缺陷	404	11.5.3 干扰信号特性及在线诊断的 降噪声技术	487
10.4.6 应用实例之二:大型电动机 转子温度红外监控系统	405	11.5.4 测试数据分析以及对策	489
10.4.7 应用实例之三:大中型电动机 转子温度的测量	408	11.5.5 诊断实例	491
第11章 电机绝缘监测与诊断	411	11.5.6 发电机局部放电在线监测 系统	494
11.1 电机的绝缘结构	411	附录 11.A GB 50150—2006《电气装置 安装工程 电气设备交接试验 标准》(电机部分)	501
11.1.1 低压电机的绝缘结构	411	第12章 电机振动的监测与诊断	510
11.1.2 高压电机的绝缘结构	412	12.1 振动及其分析基础	510
11.1.3 Y2系列异步电动机的绝缘 结构	413	12.1.1 振动与故障的关系	510
11.1.4 大电机定子绕组绝缘新技术: 用圆形电缆取代矩形线棒	415	12.1.2 振动的基本知识	511
11.2 电机绝缘老化的诊断内容与判定 标准	417	12.1.3 振动的分类	513
11.2.1 电机绝缘老化	417		

12.1.4 旋转机械的状态特征参量	516	12.5 电机扭转振动(扭振)的监测与 诊断	617
12.2 电机振动故障机理	518	12.5.1 发电机组的扭振	617
12.2.1 概述	518	12.5.2 大型电动机的扭振	619
12.2.2 定子异常产生的电磁振动	519	12.5.3 轴系扭振的危害	623
12.2.3 转子绕组故障引起的电磁 振动	521	12.5.4 扭振的测量	624
12.2.4 气隙不均匀和电磁谐振引起的 电磁振动	524	12.5.5 扭振诊断系统实例之一: 轧钢机 扭振诊断	626
12.2.5 发电机转子中心位置偏移引起的 振动增大	526	12.5.6 扭振诊断系统实例之二: 汽轮发 电机组扭振监测与远程诊断	627
12.2.6 发电机不对称负载引起的电磁 振动	527	第13章 电机噪声的测量与诊断	630
12.2.7 转子不平衡产生的机械振动 故障机理	527	13.1 噪声及其评测	630
12.2.8 不对中的故障机理与诊断	531	13.1.1 噪声的基本概念	630
12.2.9 油膜轴承的故障机理与 诊断	534	13.1.2 噪声的类型	631
12.2.10 转轴裂纹的故障机理与 诊断	543	13.1.3 噪声的频谱	632
12.2.11 转子动静碰磨故障的诊断	546	13.1.4 噪声的评价	633
12.2.12 引起旋转电机振动的其他 因素	548	13.2 电机的噪声	636
12.2.13 旋转机械振动原因分析与振动 机理识别表	550	13.2.1 电磁噪声	636
12.3 电机振动监测	572	13.2.2 机械噪声	639
12.3.1 概述	572	13.2.3 空气动力噪声的产生与控制	641
12.3.2 振动的常用测试设备	573	13.3 负载对电机噪声的影响	642
12.3.3 电机振动测定的一般要求	580	13.3.1 负载对电机系统模态特性的 影响	642
12.3.4 振动检测	587	13.3.2 负载对电机电磁噪声的 影响	643
12.3.5 旋转机械振动相位检测	594	13.3.3 负载对电机噪声影响的实验及 分析	645
12.3.6 轴心轨迹与轴心位置的测量	596	13.4 常用噪声测量仪器	646
12.3.7 旋转机械轴向位移测量	598	13.5 电机噪声的测量方法	651
12.4 基于振动异常的电机故障诊断	599	13.5.1 测量项目与测量时电机的状态 要求	651
12.4.1 基于振动的电机故障诊断的 思路	599	13.5.2 电机噪声的工程测定方法	652
12.4.2 电机振动故障诊断的程序与 内容	601	13.5.3 噪声测量结果的计算	655
12.4.3 电机轴承振动的诊断	604	13.5.4 电机噪声限值	658
12.4.4 电厂风机电动机的振动诊断及 处理	607	13.6 电机噪声测试新技术	658
12.4.5 立式电动机振动的诊断	610	13.6.1 声强法测试旋转电机噪声	658
12.4.6 同步电动机振动的诊断	611	13.6.2 用精密声级计测量电机 噪声	660
12.4.7 基于定子振动特征的转子绕组 短路故障识别	613	13.6.3 基于神经网络的车用电动机噪声 性能在线检测技术	664
		13.7 电机噪声诊断技术	666
		13.7.1 电动机噪声的简易诊断	667
		13.7.2 噪声的听诊	668
		13.7.3 基于仪器进行电机噪声诊断	670

13.7.4	电机噪声故障诊断中噪声信号处理方法	671	15.3	电动机故障简易诊断技术	723
13.7.5	噪声信号的声源检测与故障诊断	674	15.3.1	电动机的故障检测诊断方法	724
第14章 电机轴承的故障诊断		676	15.3.2	电动机定子绕组故障诊断	730
14.1	概述	676	15.3.3	转子绕组故障及转子不平衡故障诊断	737
14.1.1	滚动轴承典型结构及振动参数	676	15.3.4	起动困难故障诊断	739
14.1.2	滚动轴承故障的主要形式与原因	677	15.3.5	电动机转速偏低及带负载能力差的诊断	741
14.1.3	滚动轴承故障诊断技术	680	15.3.6	从电动机电流异常诊断电动机故障	744
14.2	滚动轴承的振动机理与信号特征	682	15.3.7	电动机过热故障的检测与诊断	745
14.2.1	正常轴承的振动信号特征	682	15.3.8	电动机振动和响声异常故障的诊断	746
14.2.2	故障轴承振动信号特点	683	15.3.9	绕线转子异步电动机故障诊断	748
14.3	滚动轴承的振动测量与诊断技术	685	15.3.10	同步电动机故障诊断	751
14.3.1	滚动轴承故障信号的测量与分析	685	15.4	定子绕组故障的精密诊断	754
14.3.2	滚动轴承的简易诊断	685	15.4.1	定子绕组故障精密诊断技术概述	754
14.3.3	滚动轴承损伤的特征频率	688	15.4.2	基于不平衡电流的模糊诊断方法	756
14.4	电机轴承的诊断新技术与实例分析	691	15.4.3	基于定子电流相位的诊断方法	759
14.4.1	异步电机轴承故障检测技术	691	15.4.4	基于定子负序视在阻抗的诊断方法	764
14.4.2	基于小波变换及经验模式分解的电机轴承早期故障诊断	694	15.4.5	基于相关分析的诊断方法	771
14.4.3	电动机滚动轴承的故障诊断实例	698	15.4.6	基于瞬时功率分解算法的诊断方法	774
第15章 电动机的监测与诊断技术		702	15.4.7	定子绕组匝间短路在线监测方法	780
15.1	电动机基本结构原理	702	15.4.8	定子绕组在线温度监测方法	783
15.1.1	异步电动机的结构与分类	702	15.5	转子绕组故障精密诊断	786
15.1.2	三相异步电动机的性能与技术参数	705	15.5.1	概述	786
15.2	电动机故障	709	15.5.2	基于起动电流的时变频谱的诊断方法	788
15.2.1	电动机故障类型与常见异常现象分析	709	15.5.3	利用起动电流中的特定频率分量进行诊断	791
15.2.2	高压电动机故障发生情况	713	15.5.4	利用失电残余电压进行诊断	792
15.2.3	电动机发生故障的原因分析	716	15.5.5	基于定子电流 Hilbert 变换解调处理的诊断方法	797
15.2.4	电动机定子绕组的故障	718			
15.2.5	异步电动机转子绕组故障	720			
15.2.6	定子铁心故障	723			

15.5.6	基于小波分析的诊断方法	799	绕组匝间短路故障诊断	878
15.5.7	基于电磁转矩小波变换的 诊断方法	803	16.4 定子绕组接地	880
15.5.8	基于定子单相瞬时功率信号 频谱的诊断方法	808	16.4.1 定子绕组接地故障	880
15.5.9	基于最小二乘支持矢量机的 诊断方法	810	16.4.2 实例分析: 国产 600MW 发电机 定子绕组接地故障	881
15.5.10	基于随机共振理论的诊断 方法	817	16.4.3 发电机定子绕组接地故障诊断 方法探讨	884
15.6	电动机故障诊断新技术	821	16.4.4 发电机定子绕组单相接地故障的 定位方法	888
15.6.1	基于 Petri 网的电动机故障 诊断方法	821	16.5 定子绕组导线的断股	892
15.6.2	电动机故障的逻辑诊断 方法	825	16.5.1 定子绕组故障及原因分析	892
15.6.3	基于混沌神经网络动态联想 记忆的诊断方法	829	16.5.2 断股故障征兆与诊断	897
15.6.4	多传感器数据融合方法故障 诊断	832	16.5.3 基于电阻差别的断股分析	899
15.6.5	转子断条与定子绕组匝间短路 双重故障诊断	835	16.5.4 防止导线断股措施	899
第 16 章	发电机故障诊断技术	842	16.6 定子绕组漏水故障	900
16.1	发电机故障及其诊断技术概况	842	16.6.1 漏水部位及原因分析	900
16.1.1	发电机故障的有关统计及 分析	842	16.6.2 漏水部位的查找诊断	901
16.1.2	发电机故障诊断的意义	849	16.6.3 近期发生的发电机定子漏水原因 及对策	904
16.1.3	同步发电机故障分类	850	16.7 转子绕组接地故障	906
16.1.4	发电机故障的机理、征兆和诊断 方法	852	16.7.1 转子接地故障的类型与引起 原因	907
16.1.5	同步发电机故障诊断的研究 概况	855	16.7.2 转子绕组接地故障的检查和 试验	910
16.1.6	本章主要内容	857	16.7.3 三个典型实例分析	914
16.2	定子绕组短路故障	858	16.7.4 发电机转子接地故障监测 系统	925
16.2.1	定子绕组短路故障原因	858	16.8 转子绕组匝间短路(一): 故障 分析与诊断方法	927
16.2.2	定子绕组短路故障发生的时间与 位置	866	16.8.1 发电机匝间短路的原因与 分类	927
16.2.3	防止定子绕组短路的对策	867	16.8.2 发电机转子绕组匝间短路 故障机理	929
16.2.4	采用表面电位法查找定子端部 绝缘缺陷	870	16.8.3 故障检测方法	936
16.3	定子绕组匝间短路	872	16.8.4 不拔护环诊断大型汽轮发电机 转子绕组匝间短路位置	945
16.3.1	发电机匝间短路内部故障计算 方法	873	16.8.5 典型实例检查分析	952
16.3.2	定子绕组匝间短路对发电机定、 转子径向振动特性的影响	873	16.8.6 气隙探测线圈法与 RSO 法检测 实例波形分析与比较	957
16.3.3	基于混沌神经网络的发电机定子 绕组匝间短路故障诊断	878	16.8.7 转子匝间短路对发电机定、转子 振动特性的影响	962
			16.8.8 转子匝间短路时励磁电流谐波 特性	965
			16.9 转子绕组匝间短路(二): 监测与	

诊断新技术	968	技术	992
16.9.1 基于行波法的诊断技术	968	16.9.6 基于探测线圈与小波分析的在线 监测技术	998
16.9.2 基于励磁电流相对变化率的诊断 技术	974	16.10 轴电压的检测与诊断	1000
16.9.3 人工神经网络在转子绕组匝间 短路中的应用	979	16.10.1 轴电压的产生机理	1001
16.9.4 遗传规划法在转子绕组匝间短路 诊断中的应用	986	16.10.2 轴电压的防护	1003
16.9.5 基于定子线圈探测的故障识别		16.10.3 轴电压的测量	1005
		16.10.4 轴电压的在线检测	1007
		参考文献	1008