

JIDIAN SHEBEI GUZHANG ZHENDUAN
JISHU JI YINGYONG

机电设备故障诊断 技术及应用

王 新 付子义 郑 征 编著



煤炭工业出版社

机电设备故障诊断技术及应用

王 新 付子义 郑 征 编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

TM07
51

图书在版编目 (CIP) 数据

机电设备故障诊断技术及应用 / 王新, 付子义, 郑征
编著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2014

ISBN 978-7-5020-4444-2

I. ①机… II. ①王… ②付… ③郑… III. ①机电设备—故障诊断 IV. ①TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 027521 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 19¹/₄

字数 456 千字 印数 1—1 500

2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 7276 定价 46.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书介绍了机电设备故障诊断的现状和发展趋势,信号采集与处理、信号分析等基本方法,讨论了机电设备常见故障的机理及基本诊断方法,进一步探讨了小波分析、信息融合、模糊神经网络、小波神经网络等先进方法。重点探讨了小波变换的频带能量泄漏及其影响、频带边界问题及其影响,研究了微弱信息特征提取、小波去噪、基本概率赋值获取、自适应滤波等新算法。最后,结合工程实际,介绍了几种常见机电设备的信号分析、故障特征提取及故障诊断等方法。

本书可作为高等院校控制科学与工程、电气工程及其相关专业的硕士研究生教材,以及电气类、自动化类专业的高年级本科生教材,也可供从事机电设备故障诊断的技术人员参考使用。

前 言

从20世纪60年代起,美国、日本、英国等发达国家开始进行机电设备的状态监测与故障诊断技术的研究。由于故障诊断技术能够产生巨大的经济效益,这使得故障诊断技术得到了迅速的发展,各种监测和故障诊断的工业化产品不断推出。我国在故障诊断技术方面的研究起步较晚,20世纪70年代末才接触机电设备故障诊断技术。近年来,故障诊断技术发展迅速,并在化工、冶金、电力等行业得到了较好的应用。目前,机电设备的现代化程度越来越高,安全措施也越来越完善,但是严重的生产事故仍时有发生,造成了十分严重的后果。国家及地方的安监部门对生产的安全隐患十分重视,加强了对关键机电设备的监管力度。机电设备的故障诊断和健康诊断顺应安全生产的需求,将越来越受到重视。

本书从机电设备的信号处理技术、信息特征提取方法、故障诊断技术等方面展开讨论,为进一步构建机电设备故障诊断系统奠定基础。

本书共分十一章。第一章介绍了机电设备故障诊断的现状和发展趋势;第二章介绍了机电设备故障诊断常用的传感器基本原理以及信号采集与预处理的基本方法;第三章讨论了快速傅里叶变换、幅域分析、时域分析、频域分析等方法;第四章介绍了小波分析和小波包分析等基本理论;第五章研究了小波分析的频带频率特性,讨论了小波变换的频带能量泄漏及其影响、频带边界问题及其影响以及克服这些影响的对策,研究了小波去噪方法、小波变换的频带能量泄漏对小波去噪结果的影响,进一步研究了克服其影响的对策;第六章介绍了信息融合的基本原理,研究了基于模糊集合的新型基本概率赋值获取方法,交-交变频器不对称运行工况下输出电流、电压的故障特征提取方法,基于多传感器信息融合的变频调速系统的故障诊断和健康诊断方法;第七章讨论了人工神经网络、模糊神经网络、小波神经网络等智能故障诊断方法的基本原理及应用;第八章介绍了齿轮、轴承等旋转机械常见故障的机理及诊断方法;第九章介绍了鼠笼式异步电动机转子断条故障诊断的机理,研究了基于自适应陷波器的转子断条故障诊断方法;第十章讨论了级联式交-直-交变频器故障诊断实例;第十一章介绍了LabVIEW软件及虚拟仪器实现方法。

作者进行的本项研究工作及本书的出版工作得到了河南省重点学科“控

制科学与工程”及“电气工程”项目、“国家自然科学基金项目（资助号：61340015）”“河南省科技攻关项目（资助号：142102210048）”“河南理工大学研究生教育教学改革基金项目（资助号：2013YJ03）”以及河南理工大学电气工程与自动化学院教育教学改革研究项目等资助。

本书由河南理工大学电气工程与自动化学院的王新、付子义和郑征共同撰写。在本书编写过程中，得到了河南理工大学电气工程与自动化学院的领导和同志们的大力支持和帮助，并提出了宝贵的意见，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中错误或不当之处在所难免，欢迎读者批评指正。

作者

2013年10月

目 次

第一章 绪论	1
第一节 故障诊断的基础知识	2
第二节 故障诊断技术的发展与应用	5
第二章 数据采集与预处理	14
第一节 信号的分类与描述	14
第二节 状态特征参量与测试	20
第三节 机电设备故障诊断的常用传感器	30
第四节 信号的采样和量化	50
第五节 数据采集的一般结构	54
第六节 数据预处理	65
第三章 信号分析与处理	68
第一节 泄漏与窗函数	68
第二节 快速傅里叶变换	75
第三节 信号的幅域分析	79
第四节 信号的时域分析	83
第五节 信号的频域分析	85
第六节 时间序列分析	88
第七节 短时傅里叶变换	90
第八节 其他分析处理方法	92
第四章 小波分析	97
第一节 引言	97
第二节 小波变换及其基本性质	98
第三节 多分辨分析与 Mallat 算法	100
第四节 小波的分类	103
第五节 小波包分析	109
第六节 MATLAB 小波变换函数	111
第五章 小波分析的改进方法及其应用	114
第一节 Mallat 算法的改进	114

第二节	小波分析的频带特性与信息特征提取方法	116
第三节	小波分析频带能量法的应用	132
第四节	小波去噪与新型阈值获取方法	136
第六章	信息融合原理及其在故障诊断中的应用	153
第一节	信息融合的基本原理	153
第二节	信息融合中证据冲突分析及改进方法	159
第三节	新型基本概率赋值获取方法	163
第四节	基于信息融合的故障诊断方法及其应用	167
第七章	混合智能故障诊断方法	177
第一节	人工神经网络及其应用	177
第二节	模糊神经网络	188
第三节	小波神经网络及其应用	191
第八章	旋转机械的振动监测与故障诊断	212
第一节	旋转机械常见故障及机理	212
第二节	齿轮常见故障及诊断	229
第三节	轴承常见故障及诊断	240
第四节	无损检测技术及其应用	252
第九章	鼠笼式异步电动机的断条故障诊断	258
第一节	转子断条故障诊断的机理及现状	258
第二节	基于自适应陷波器的电动机转子断条的故障诊断	261
第三节	基于 Hilbert - Huang 变换的转子断条故障诊断	265
第十章	级联式交-直-交变频器的故障诊断	271
第一节	交-直-交变频器概况	271
第二节	级联式变频器的工作原理	276
第三节	级联式变频器的开关管开路故障的分析与诊断	281
第十一章	虚拟仪器与 LabVIEW	285
第一节	虚拟仪器概述	285
第二节	LabVIEW 介绍	286
第三节	应用举例	293
参考文献		295

第一章 绪 论

设备故障是指“设备功能失常”，也就是设备不能达到预期的工作状态，无法满足应有的性能、功能。产生故障的原因通常是设备的构造处于不正常状态（劣化状态）。判断故障的准则是：在给定的工作状态下，设备的功能与约束条件不能满足正常运行或原设计期望的要求。

故障诊断技术是一门集数理统计、力学、计算机工程、信号处理、模式识别、人工智能等多学科于一体的、生命力旺盛的新兴学科。它是一种了解和掌握设备在使用过程中的工作状态，确定其整体或者局部是否正常，及时发现故障及其原因，预报故障发展趋势的技术。故障诊断的目的是保证可靠地、高效地发挥设备的应有功能，其最根本的任务是通过监测设备的信息来识别设备的工作状态。

预知维修作为一种科学的维修制度，它越来越受到国内外企业的推崇。为了达到预知维修的目的，确保设备的安全运行，提高其安全运转率，必须加强对设备的运行管理。通过在线监测设备的工况，及时发现异常情况，可以实现对设备故障的早期诊断和预防。

因此，故障诊断技术是维修制度改革的基础，维修制度改革又是故障诊断技术进一步发展的动力，这种相辅相成的关系对提高现代企业设备维修管理水平是至关重要的。

随着科学技术的发展，生产设备正朝着高度自动化和高度集成化的方向发展，设备自动化程度和生产效率提高的同时，设备的复杂程度也随之增高，设备各部分的关联程度越加密切。这样，带来了以下两方面的问题：

(1) 故障的危害程度增大。一旦某一部件发生故障，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的事故和人员伤亡，产生不良的社会影响。例如，20世纪80年代，对全国14个省45个矿务局112个矿井抽样调查，因矿井提升机发生故障引起停工停产，甚至造成人员伤亡的事故，共有126例，伤亡272人，经济损失达7000万元。

(2) 设备的成本和维修费用激剧增加。美、日两国企业生产设备的年平均维修费用分别占企业固定资产的4%~8.5%和2.6%~12%，而我国的比例为12%~25%。

因此，故障诊断技术越来越受到重视。面对当今竞争激烈的市场环境，如何有效地管理和使用先进的生产设备，提高设备的可靠性和有效性，减少设备的维修费用，降低企业的生产成本，充分发挥设备的工作效能，一直是国内外企业和设备故障诊断技术研究所面临的重大课题。

故障诊断技术的重要意义主要表现在以下3个方面：

(1) 从安全生产角度考虑，运用故障诊断技术可以快速、准确、及时地诊断是否出现故障，以及故障的类型、原因和部位，还能够发现设备的潜在危险，保证设备安全运行。

(2) 从经济效益和社会效益角度考虑，尽管设备的故障诊断系统需要一定的初始投资，但是对于大型设备来说，投资与一次设备故障的损失相比要小得多。同时，故障诊断

系统投入使用能够保证安全生产、提高生产效率和产品质量，从而降低生产成本和维修费用，给企业带来巨大的经济效益。例如，英国人 1984 年发表文章认为，对大型汽轮发电机组进行振动监视，获利与投资之比为 17:1。

(3) 从生产管理和维修管理角度考虑，运用故障诊断技术能积累原始资料、预测设备运行的趋势，为生产和维修决策提供强有力的支持。

第一节 故障诊断的基础知识

一、故障的分类

常见的故障有以下几种：①使设备或系统立即丧失功能的破坏性故障；②由于设计、制造、安装、维护、检修等与设备性能有关的参数不适当造成设备性能降低的故障；③设备在给定条件下工作时，由于操作不当引起的故障。

故障的分类有多种，从不同的角度观察故障，如从故障的性质、发展速度、起因、严重程度、影响后果等方面，可以有不同的分类方法。

1. 按故障的性质分类

(1) 人为故障：因操作失误造成的故障。

(2) 自然故障：因设备自身的原因发生的故障。

2. 按故障产生的原因分类

(1) 先天性故障：因设计、制造、安装不当等原因造成的设备固有缺陷引起的故障。

(2) 使用性故障：因维修、运行过程中使用不当产生的故障。

3. 按故障发展速度分类

(1) 突发性故障：发生前无明显可察觉征兆，突然发生的故障。它不能依靠事前监测等手段来预测。

(2) 渐进性故障：某些零件的技术指标逐渐恶化，发生与发展有一个渐变过程，最终超出允许范围而引起的故障。它可以通过事前监测等手段提前预测。

4. 按故障持续时间分类

(1) 间断性故障：故障发生后，在没有外界干涉的情况下可以自行恢复的故障。

(2) 持续性故障：故障发生后，只有在外界采取措施、更换劣化部件后才能恢复、达到原有功能的故障。

5. 按故障的程度分类

(1) 局部故障：设备部分性能指标下降，但未丧失全部功能的故障。

(2) 完全性故障：设备或部件完全丧失功能的故障。

6. 按故障造成的后果分类

(1) 轻微故障：设备略微偏离正常的规定指标，影响轻微的故障。

(2) 一般故障：设备个别部件劣化，部分功能丧失，造成运行质量下降，导致能耗增加、环境噪声增大等的故障。

(3) 严重故障：关键设备或关键部件劣化，整体功能丧失，造成停机或局部停产，甚至整个生产线完全停产或部分停产的故障。

(4) 恶性故障：设备遭受严重破坏，造成重大经济损失，甚至危及人身安全或造成严重污染的故障。

一般情况下，故障诊断是指对严重故障和恶性故障的诊断，而对轻微故障和一般故障的诊断则称为健康诊断。故障诊断主要是对设备的故障或运行质量显著下降的原因进行诊断，从而防止恶性故障的发生，同时为快速排除故障提供帮助；健康诊断主要是对设备的健康状况进行监测和诊断，判断系统是否出现运行质量下降或存在故障的隐患，将故障排除在萌芽状态，防患于未然。

二、状态监测与故障诊断技术

设备状态监测与故障诊断技术的实质是了解和掌握设备在运行过程中的状态，评价、预测设备的可靠性，早期发现故障，并对其原因、部位、危险程度等进行识别，预报故障的发展趋势，并针对具体情况做出决策。

由此可见，设备状态监测与故障诊断技术包括识别设备状态和预测发展趋势两方面的内容。具体过程分为状态监测、分析诊断和治理预防 3 个基本环节，如图 1-1 所示。实际生产中，有时把对设备状态的初步识别也包括在“状态监测”中，只将识别异常后的精密诊断作为“分析诊断”的内容。

1. 状态监测

状态监测是在设备运行中，对特定的特征信号进行检测、变换、记录、分析处理并显示、记录，是对设备进行故障诊断的基础工作。检测的信号主要是机组或零部件在运行中的各种信息（振动、噪声、转速、温度、压力、流量等），通过传感器把这些信息转换为电信号或其他物理信号，送入信号处理系统中进行处理，以便得到能反映设备运行状态的特征参数，从而实现对设备运行状态的监测和下一步诊断工作。

由传感器所获取的信息需要记录下来，供分析和日后对比、查阅，这就需要进行数据采集和简单的处理、显示。大多数传感器输出的信号属于模拟信号，在磁带记录仪上记录时不需要进行数字转换，而输入计算机或进行分析处理时，需要转换为数字信号，这些是数据采集的主要工作。在这些信息和信号中，有些是有用的，能反映设备故障部位的症状，这种信息称为征兆或故障征兆；有些并不是诊断所需要的信号，因此，需要处理和排除。为了提取征兆信号，需要进行特征信号提取，这是由信号处理系统来完成的。

2. 分析诊断

分析诊断实际上包括两方面的内容，即信号分析处理和故障诊断。

信号分析处理的目的是把获得的信息通过一定的方法进行变换处理，从不同的角度提取最直观、最敏感、最有用的特征信息。分析处理可用专门的分析仪器或计算机进行，一般情况下要从多重分析域、多个角度来分析观察这些信息。分析处理方法的选择、处理过程的准确性以及表达的直观性都会对诊断结果产生较大影响。

故障诊断是在状态监测与信号分析处理的基础上进行的。进行故障诊断需要根据状态监测与信号分析处理所提供的能反映设备运行状态的征兆或特征参数的变化情况，有时还需要进一步与某些故障特征参数进行比较，以识别设备是运转正常还是存在故障。如果存在故障，要诊断故障的性质和程度、产生原因或发生部位，并预测设备的性能和故障的发展趋势。

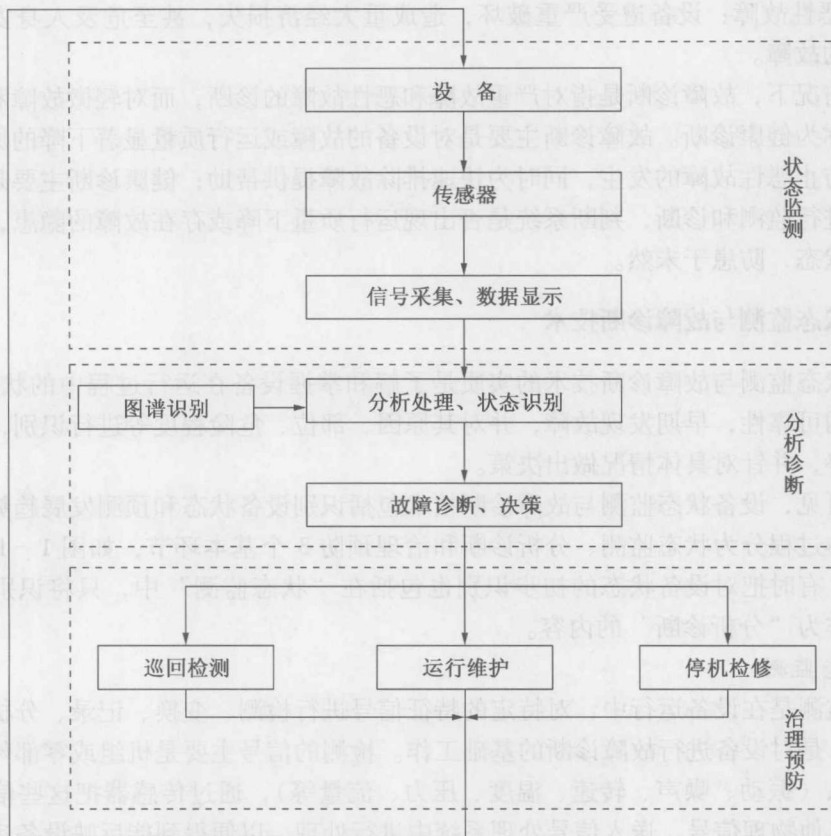


图 1-1 状态监测与故障诊断的 3 个环节

3. 治理预防

治理预防措施是在分析诊断出设备存在故障时，就其原因、部位和危险程度进行研究并采取治理措施和预防的办法，它通常包括调整、更换、检修、改善等方面的工作。如果经过分析认为设备在短时间内尚可继续维持运行，那就要对故障的发展加强监测，以保证设备运行的可靠性。

根据故障情况，治理预防措施有巡回监测、监护运行、立即停机检修 3 种。

发现故障、诊断故障并不是状态监测与故障诊断工作的全部目的，确定故障原因、采取合理的治理措施，在确保安全的前提下，将立即停机检修转化为采用状态监测与故障诊断技术后的维持运行，避免不必要的停机，延长设备运行周期，才是其真正目的。这也是这项技术能够迅速发展、推广的根本原因。

4. 设备状态监测与故障诊断的区别与联系

设备状态监测与故障诊断既有区别又有联系，在生产实际中，有时将二者统称为设备故障诊断。实际上，没有监测就没有诊断，诊断是目的，监测是手段；监测是诊断的基础和前提，诊断是监测的最终结果。

状态监测通常是通过监视和测量设备或部件运行的状态信息和特征参数（如振动、温度、压力等），并以此来判断其状态是否正常。例如，当特征参数小于允许值时便认为

是正常，否则为异常。还可以用超过允许值的多少来表示故障严重的程度，当它达到某一设定值时就应停机检修。这个过程的前半部分就是状态监测。有些情况下，监测结果不需要做进一步的分析和处理，仅以有限的几个指标就可以确定设备的状态，这就是以监测为主的简易诊断，也属于诊断的范围。通常情况下，当简易诊断发现设备或部件发生异常时，应转为精密诊断。此时，应该对异常状态进行多方面的分析，这种分析包括收集设备运行的历史资料、对简易诊断的结果进行审核，同时对设备的各种参数进一步监测，并对监测得到的特征信号在时域、频域、幅值域等方面进行全面分析，以便从特征信号中提取各种征兆，对设备做出综合判断。

通常所称的“故障诊断”不是简易诊断，而是指比较复杂的精密诊断。设备故障诊断不仅要检查出设备是否正常，还要对设备发生故障的部位、产生故障的原因、故障的性质和程度给出深入的分析和判断。这就不仅仅要求对状态监测和故障诊断理论有比较系统的了解，更重要的是对设备本身的结构、特性、动态过程、故障机理以及故障发生后的后续事件（包括维修与管理）有比较清楚的了解。从这一角度来看，故障诊断技术与状态监测系统又有比较大的区别，有着十分不同的专业倾向。

5. 故障诊断方法的分类

学者从不同角度提出了故障诊断的分类方法，如按诊断的对象分类、按诊断的目的和要求分类、按所采用的手段分类、按诊断方法的完善程度分类、按识别故障的模式分类等。表1-1列出了故障诊断的方法分类。

表1-1 故障诊断方法分类

分 类 依 据	分 类 内 容
诊断对象	①旋转机械故障；②往复机械故障；③机械零件故障；④工程结构故障；⑤电气设备故障
诊断目的和要求	①在线诊断和离线诊断；②定期诊断和连续诊断；③直接诊断和间接诊断；④常规诊断和特殊诊断
诊断手段	①振动诊断；②声学诊断；③温度诊断；④强度诊断；⑤污染诊断；⑥光学诊断；⑦电参数诊断；⑧压力诊断；⑨金相诊断
诊断方法的完善程度	①简易诊断；②精密诊断；③系统综合诊断
识别故障模式	①统计识别诊断；②函数识别诊断；③逻辑识别诊断；④模糊识别诊断；⑤灰色识别诊断；⑥神经网络识别诊断

第二节 故障诊断技术的发展与应用

一、故障诊断的发展与应用概况

1. 国外故障诊断发展概况

设备的故障诊断自有工业生产以来就已经存在，不同的时期故障诊断具有不同的特点。在19世纪，设备的技术水平和复杂程度都很低，这一时期主要采用事后维修方式；

进入 20 世纪后,设备的技术复杂程度有了提高,设备故障或事故对生产的影响显著增加,在这种情况下出现了定期预防维修方式,故障诊断技术处于孕育时期。在此以前,故障诊断主要依靠人工经验判断,缺乏自动监测技术。故障诊断技术真正作为一门学科,则是在 20 世纪 60 年代以后才发展起来的。

美国是最早开展设备状态监测与故障诊断工作的国家之一。1961 年开始执行阿波罗计划后,发生了一系列由设备故障酿成的悲剧,引起了美国军方和政府有关部门的重视。1967 年 4 月,在美国宇航局(NASA)的倡导下,由美国海军研究室(ONR)主持,召开了美国机械故障预防小组(MFPG)成立大会。会议的中心议题是组织问题和明确课题的含义,有组织地开发监测与诊断技术。1971 年 MFPG 划归为美国国家标准局(NBS)领导,下设故障机理研究组、监测诊断和预测技术组、可靠性设计组、材料耐久性评价组四个小组。

除 MFPG 外,美国机械工程师学会(ASME)领导下的锅炉压力容器检测中心(NB-BI)在应用声发射技术(AE)对静设备故障诊断方面也取得了重要成果。其他还有 Johns Mitchel 公司的超低温水泵和空压机监测技术, SPIRE 公司在军用机械轴与轴承方面的诊断技术等在国际上都处于领先地位。

在航空运输方面,美国在可靠性维修管理的基础上,大规模地对大型飞机进行状态监测,研制并应用了以计算机为基础的飞行器数据综合系统(AIDS),采集、记录、分析处理大量飞行中的信息来判断飞机各部位的故障并能发出排除故障的指令。这些技术在 B747 和 DC9 等巨型客机上的成功应用,大大提高了飞行的安全性。目前,美国的军用飞机也都装备了功能强大的状态监测与故障诊断系统。

英国以 R. A. Collacott 为首的机器保健中心于 20 世纪 60 年代末 70 年代初开始研究状态监测与故障诊断技术。1982 年曼彻斯特大学成立了沃福森工业维修公司(WIMU),主要从事状态监测与故障诊断的研究工作和教育培训工作。除此之外,在核电站、钢铁等行业也成立了相应的组织,开展这方面的研究工作。

设备状态监测与故障诊断技术在欧洲其他国家的广泛性虽然不如英美,但都在某一方面有特色或占有领先地位,如瑞典 SPM 仪器公司的轴承监测技术,丹麦 B&K 公司的传感器制造技术等。

如果说英、美各国在军事、航空等方面的状态监测与故障诊断技术占有领先地位的话,那么日本则在民用工业,如钢铁、化工、铁路等行业发展得较快,占有明显优势。日本的做法是密切注视世界各国动向,积极引进和消化最新技术,努力发展自己的诊断技术,特别注意研制本国的诊断仪器。日本开展诊断技术研究工作主要有两个层面:一是高等院校,比较有名的有东京大学、东京工业大学、京都大学、早稻田大学等,它们均发表了不少基础性的研究报告;另一个层面是一些企业,如三菱重工、东京芝浦电气、东京小野测器、国际机械振动公司(IMV)等,它们的研究工作是在企业内部以生产为中心开展的,具有较高的应用水平。

正是由于诊断技术能够产生的巨大经济效益,因此故障诊断技术得到了迅速发展,各种监测和故障诊断的商业化产品不断推出,如日本三菱公司的“旋转机械健康管理系统”、美国西屋公司的“可移动诊断中心”、美国中心发电部的“透平监视设备”和“试验设备监测”、美国 Scientific Atlanta 公司的 CHAMMP6000 监测系统、美国 Bently 公司的

7200、3300 及 3000 系列和 CSI 公司的系列监测仪器等设备状态监测和故障诊断设备等。

2. 国内故障诊断发展概况

我国对设备状态监测与故障诊断技术的认识和发展也经历了与国外同样的过程。1979 年以前,一些大专院校和科研单位结合教学和有关设备诊断技术的研究课题,逐渐开始进行机械设备状态监测与故障诊断技术的理论研究和小范围的工程实际应用研究,特别是随着 30 万吨合成氨等一批大型石化装置的引进,某些装置的机组频繁发生事故,促进了对这项技术研究的重视。

1979—1983 年,设备状态监测与故障诊断技术从初步认识进入到初步实践阶段,以学习英、美、日等国的先进技术和经验为主,对一些故障机理、诊断方法及简易监测诊断仪器进行研究和研制。同时利用一些国外监测诊断设备,在进行研究的同时直接应用于实际生产,取得了一些成就,为加快我国的设备状态监测与故障诊断技术开发研究工作争取了时间。

1983 年国家经委颁布的《国营工业交通企业设备管理试行条例》,有力地推动了我国设备状态监测与故障诊断技术的开发研究工作,一些部委成立专门的研究机构,如化工部振动检测中心、中国石化总公司设备状态检测中心、冶金部设备诊断研究室等。与此同时,一些高等院校、科研单位也成立了专门的研究室或研究所。这些都为我国设备状态监测与故障诊断技术的开发、研究、发展奠定了良好的组织基础,使我国的设备状态监测与故障诊断工作开始走向深入研究和蓬勃发展阶段。

1984 年 7 月在北京成立中国设备管理协会,1985 年 11 月在上海召开了设备诊断技术应用推广会议;1985 年 5 月在郑州成立中国机械设备诊断技术学会,1986 年 6 月在沈阳召开了第一届中国机械设备诊断技术学术年会暨国际学术会议。这些组织致力于广泛交流我国在该领域内各方面的技术成果,深入探讨设备状态监测与故障诊断在国内外的发展动向,有力地推动了这一学科的发展,使其有效地为我国的国民经济建设服务。

目前我国的设备状态监测与故障诊断技术水平同发达国家的差距已大大缩小,在一些方面,如计算机监测与故障诊断的软件开发等,完全可以满足生产实际的需要,达到同期世界先进水平。

目前,我国故障诊断技术在化工、冶金、电力、交通等行业应用较好。例如,哈尔滨工业大学研制的“微计算机机组状态监测及故障诊断系统 MMD-Ⅲ”,西安交通大学开发的“大型旋转机械设备监测及诊断系统”,东南大学研制的“MFD 系列型高速离心压缩机机组工况监测与故障诊断系统”,重庆大学汽车学院故障诊断研究室研制开发的“DAS 动态信号分析及故障诊断系统”,东北大学设备诊断工程中心研制的“轧钢机状态监测诊断系统”“风机工作状态监测诊断系统”等,为企业成功地解决了许多工程实际问题。

3. 故障诊断技术的发展阶段

故障诊断技术经过数十年的研究与发展,在众多领域得到了很好的应用。从故障诊断系统和装置的角度来看,其发展可概括为以下 4 个阶段:

(1) 以检测仪表为主体的监视诊断装置。该类诊断装置主要由传感器和指示仪表箱组成,装置本身没有分析功能,主要依靠人工经验判断。

(2) 检测仪表配备软、硬件分析系统或装置。该类诊断装置增加了频谱分析仪等分析装置,有时配备有计算机软件分析系统。它虽然有助于诊断的准确性,但不能连续地自

动分析和判断, 诊断决策仍需依赖于领域专家。

(3) 计算机辅助监测诊断系统。该类诊断装置主要由传感器、接口装置和计算机组成, 通过对被测对象的实时监测, 根据专家系统自动诊断, 从而提高了诊断的速度, 在一定程度上可以实现无人值守, 有利于预防突发性故障, 是故障诊断技术的主要发展方向。

(4) 人工智能诊断系统。随着神经网络等人工智能技术的应用, 出现了人工智能诊断系统, 它使计算机能够模拟人的学习行为, 通过长期对被测对象的监测和自学习, 增强对设备工况的预测能力, 提高决策的准确性。这将使故障诊断技术达到一个新境界。

二、故障诊断的主要内容及环节

故障诊断技术的环节和流程如图 1-2 所示, 它包括 4 个环节: ①被监测设备的机理研究; ②选择和检测能够反映设备状态特征的信号, 并且采用适当的信号处理方法对测量的信号进行处理及分析; ③提取反映各类故障的特征向量; ④根据特征向量, 运用智能诊断方法进行决策, 判断设备的工作状况。

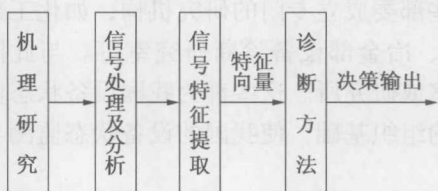


图 1-2 故障诊断技术的环节和流程

故障诊断技术的主要研究内容可分为故障机理研究和故障诊断方法研究两大类。

三、故障机理

故障机理研究的目的是了解故障形成和发展的过程, 掌握故障的内在本质及特征。其研究方法是依赖于相关的基础学科, 建立恰当的物理或数学模型, 求出模型的解析解或近似解, 从中总结出规律。下面以交-交变频调速设备的故障诊断为例做一说明。交-交变频调速设备由交-交变频调速系统、大型电动机和机械传动装置三大部分组成, 所以从这 3 方面做一阐述。

1. 电动机的故障机理研究

电动机是工业中十分重要的驱动设备, 它的故障诊断一直很受重视。电动机最常见的早期故障从故障部位上可分为定子部分、转子部分和轴承部分的故障, 其中轴承故障在后面介绍。

1) 定子部分故障

定子部分的故障主要是定子绕组故障, 是由绝缘破坏而引起的各种表现形式的故障, 如内部放电、匝间短路、相间短路和单相对地短路等, 其中匝间短路和相间短路是最常见和最危险的故障。定子绕组故障可以通过三相电流之间的相位差来判断, 仿真结果表明, 转子绕组故障或电动机发生偏心故障及三相电压不对称时, 基本上不会影响三相电流之间的对称关系, 说明可以选取三相电流之间的相位差作为判别定子绕组故障的特征参量。

2) 转子部分故障

鼠笼式异步电动机频繁起动和过载运行, 会使转子承受极大的应力, 在这种应力的长期作用下, 转子的导条和端环容易产生疲劳, 并逐渐发生断裂或开焊, 引起转子故障。通过分析定子电流的 $(1-2s)f_1$ 分量的幅值 (s 为转差率, f_1 为基频), 以及它与基频电流幅值的差值大小, 可以推断出转子断条的估计数。国内一些单位已研制出了通过测量定子电流来检测异步电动机断条故障的仪器。又如通过对电流频谱中反映气隙偏心的特征频谱

的检测,能确定电动机是否存在气隙偏心,再根据检测特征频率分量幅值大小和变化情况,就可以确定转子在气隙中的动态位移值。转子不对中故障可以通过监测转子径向振动的2倍频分量来判断,不对中越严重,2倍频分量所占的比例越大。

2. 机械传动装置的故障机理研究

机械传动装置的故障诊断主要是通过监测设备的振动信号和运行噪声来完成的,下面主要介绍齿轮和轴承的故障诊断研究概况。

齿轮因制造误差、装配不当或在不适当的条件下使用会发生损伤。常见的损伤大约有4类:齿的断裂、齿的磨损、齿面疲劳和齿面塑性变形。不同类型故障的振动频率分布、振幅变化规律等均不相同。

滚动轴承是机械传动装置中最常见和最易损坏的部件之一。轴承故障主要是因负载过重、润滑不良和异物进入等原因,引起的轴承磨损、疲劳剥落、腐蚀、塑性变形、碎裂和胶合等故障。在工作过程中,滚动轴承的振动通常分为两类:①与轴承弹性有关的振动;②与轴承滚动表面的状况(如波纹、伤痕等)有关的振动。前者与轴承的异常状态无关,而后者与轴承的异常状态有关。因此,通过对轴承振动信号的监测,可以判断轴承是否存在故障及故障的类型。轴承出现故障后会引引起机械设备振动加剧,不同故障类型对应不同的振动信号特征频率。滚动轴承也可以通过监测运行噪声进行故障诊断。另外,有学者通过分析早期轴承故障引起的振动与电动机电流、频率之间的关系,研究了电流监测在轴承故障检测中的有效性,解释了轴承故障模式及与轴承物理结构有关的特定轴承频率,讨论了轴承故障对定子电流谱图的影响,求出了有关的频率分量。

3. 变频调速系统的故障机理研究

交-交变频调速系统一般都具有较完善的保护功能和自检功能。一方面,对于一些显而易见的故障,如短路、过电流、过电压、电源严重不对称等,由于故障的机理比较简单,故障的判断比较容易,调速系统通常能起到故障的诊断和保护功能。另一方面,调速系统的自检功能可以实现对系统核心元器件的监测,诊断元器件损坏的“硬”故障。然而,对于元器件的参数漂移、老化、工作不可靠等“软”故障,其特征往往不十分明显,却能够影响调速系统的性能,并且可能逐渐会导致严重故障的发生。对这类故障的诊断十分困难,通常需要对调速系统的控制原理和方法、信号的变化规律有深入的了解,这也是调速系统故障诊断的难点和关键。

四、故障诊断方法

故障诊断方法通常分为基于解析模型的诊断方法、基于信号分析与处理的诊断方法和基于知识的诊断方法三大类。

(一) 基于解析模型的故障诊断方法

基于解析模型的故障诊断方法是最早的一种故障诊断方法,其主要思想是根据组成系统的元件与元件之间的连接,建立待诊断系统模型,这种模型通常用一阶逻辑语句来描述。根据系统的逻辑模型以及系统的输入,能够通过逻辑推理推导出系统在正常情况下的预期行为。观测到的系统实际行为与系统预期行为有差异,说明系统存在故障,利用逻辑推理也能够确定引发故障的元件集合。该方法主要包括基于状态估计的故障诊断方法、基于参数估计的故障诊断方法和基于一致性检验的故障诊断方法。