

国家自然科学基金项目资助
河南省杰出人才创新基金项目资助

全矢谱技术 及工程应用

◎ 韩捷 石来德 等著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国家自然科学基金项目资助

河南省杰出人才创新基金项目资助

全矢谱技术及工程应用

韩 捷 石来德 等著
赵淳生 审



机械工业出版社

本书详细介绍了全矢谱技术的概念、技术体系以及应用方法。主要内容包
括：转子基本回转特性与数据处理基础，典型旋转机械部件的故障物
理特性，平面全矢谱分析与方法，空间全矢谱分析与方法，基于非平稳信
号的全矢谱技术，基于全矢谱技术的智能诊断，设备远程状态监测与故障
诊断关键技术，基于全矢谱技术的产品开发与应用。

本书是作者长期从事设备故障诊断教学、科研及产品开发研究工作的
结晶。本书可作为机械、石油、化工、冶金、电力等行业的技术人员以及
相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

全矢谱技术及工程应用/韩捷等著. —北京：机械工业
出版社，2008.9

ISBN 978 - 7 - 111 - 24904 - 7

I. 全… II. 韩… III. 矢量 - 功率谱分析仪 IV. TM933.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 124787 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：蔡开颖 版式设计：张世琴 责任校对：姚培新

封面设计：王伟光 责任印制：邓 博

北京京丰印刷厂印刷

2008 年 9 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.75 印张 · 360 千字

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 24904 - 7

定价：32.00 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）88379713

封面无防伪标均为盗版

序

本书是作者进行全矢谱技术科学研究与工程实践的科研专著，凝聚了作者多年来从事该项技术的科研与技术开发经验。书中详细介绍了全矢谱技术的概念、技术体系以及应用方法，可作为机械、石油、化工、冶金、电力等行业的技术人员产品开发以及相关专业研究生教学的参考书。

我很赞成出版这本专著。一方面设备故障诊断技术经多年的探索，已经进入成熟应用阶段，工程实践中对于保障生产安全、提高生产效率和实施现代管理起到了积极的作用，应及时推广；另一方面，本书紧密结合生产实际，提出了基于多源信息融合、非常便于工程现场应用的全矢谱技术，并已渐成体系，实践应用效果较好，对于促进设备故障诊断技术的发展具有重要意义。

作者长期从事旋转机械故障诊断技术的教学、科研和技术开发。在旋转机械故障诊断领域做过很多很有意义的工作。本书集中反映了作者在国家自然科学基金项目“全矢谱技术体系构建及故障诊断基础研究”(50675209)、河南省杰出人才创新基金项目“同源信息融合空间域体系构建与系列产品研发”(0621000500)以及国家科学技术进步奖“矢谱分析技术及其在设备诊断工程中的应用”等方面的研究工作。

希望本书的出版能够在深入研究、广泛交流、大力推广应用全矢谱技术、促进学科建设和发展等方面起到积极的作用，为国家的安全生产和经济建设作出有益的贡献。

中国科学院院士

赵淳生

前言

在石油、化工、电力、冶金、交通等国民经济支柱行业，大型旋转机械起着举足轻重的作用，被称为关键设备或咽喉设备。一旦发生事故，将造成巨大损失。随着科学技术的进步与发展，设备的性能越来越好，功能越来越多，结构越来越复杂，自动化程度也越来越高；同时人们对设备安全、稳定、长周期、满负荷运行的要求也越来越迫切。如何预防故障，杜绝事故，延长设备运行周期，缩短维修时间，最大限度地发挥设备的生产潜力，提高经济效益和社会效益，是当前设备故障诊断面临的十分艰巨的任务。

新形势下对设备管理的更高要求，凸显了设备故障诊断技术在国民经济中的重要作用。实施设备故障诊断技术，首先对企业的安全生产和环境保护方面具有重要意义；其次对提高企业的生产效率和增加效益具有重要作用；另外对提升企业的设备现代化管理水平具有重大作用。这些观念的转变和艰巨任务，使设备现代化管理及机械故障诊断领域面临着新的机遇和挑战。

设备故障诊断是一种实用技术，其研究的终极目的是应用于国民经济中。目前的分析诊断方法层出不穷，但真正能够兼顾方法的实用性、稳定性、准确性、可靠性以及可推广性的并不多。本书旨在这些方面做出尝试。

本书是作者长期从事设备故障诊断教学、科研及产品开发研究工作的结晶。主要内容是在国家科学技术进步奖“矢谱分析技术及其在设备诊断工程中的应用”基础上，结合国家自然科学基金项目“全矢谱技术体系构建及故障诊断基础研究”（50675209）、河南省杰出人才创新基金项目“同源信息融合空间域体系构建与系列产品研发”（0621000500），以及其他的国家和省部相关全矢谱技术研究项目的研究应用成果。也包括所在科研团队的教师、博士生、硕士生的研究内容，应用部分也涉及合作公司的开发工作。本书旨在向读者介绍全矢谱分析技术及其实用方法，可作为研究生的教学、相关技术人员的产品开发以及现场工程技术人员的参考书。

本书包含了许多相关人员的心血。作者所在单位、国家自然科学基金委员会、河南省科技厅、河南省教育厅在项目立项、科技管理等方面，中华人民共和国科学技术部、中华人民共和国财政部、河南省国家大学科技园在项目的产业化方面，中国铝业总公司、吉林化学工业总公司、武汉钢铁集团及其他众多应用企业在项目的应用方面，均给予了作者科研团队很多的支持和鼓励。在此一并表示感谢。

感谢杨叔子院士、闻邦椿院士、屈梁生院士和赵淳生院士长期对全矢谱技术研究的关注、支持和鼓励。感谢他们分别在项目的理论研究、现场实验、规模推广和成果总结等方面所给予的具体指导。赵淳生院士还在百忙中亲自审阅了书稿，并为本书作序，在此表示深深的谢意！

参加本书撰写的有韩捷、石来德、董辛旻、李凌均。其中第1、2、7章由韩捷、李凌均撰写，第3、4、5、6章由韩捷、石来德撰写，第8、9章由韩捷、董辛旻撰写。课题组孙俊杰副教授、郝伟博士、李志农博士后、陈宏博士以及雷文平、王丽雅、陈磊等老师，博士生王胜春等参与了部分工作。全书由韩捷、石来德统稿。

书中涉及的研究内容和成果是初步的，难免有缺点和错误，敬请读者给予指正。

目 录

序

作者简况

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义	1.1.1 研究背景	1.1.2 研究意义
1.2 国内外研究现状	1.2.1 国外研究现状	1.2.2 国内研究现状
1.3 研究内容和方法	1.3.1 研究内容	1.3.2 研究方法
1.4 研究创新点	1.4.1 理论创新	1.4.2 方法创新
1.5 研究结论	1.5.1 主要结论	1.5.2 研究展望

第二章 研究背景和意义

2.1 研究背景	2.1.1 研究背景	2.1.2 研究意义
2.2 国内外研究现状	2.2.1 国外研究现状	2.2.2 国内研究现状
2.3 研究内容和方法	2.3.1 研究内容	2.3.2 研究方法
2.4 研究创新点	2.4.1 理论创新	2.4.2 方法创新
2.5 研究结论	2.5.1 主要结论	2.5.2 研究展望

第三章 研究背景和意义

3.1 研究背景	3.1.1 研究背景	3.1.2 研究意义
3.2 国内外研究现状	3.2.1 国外研究现状	3.2.2 国内研究现状
3.3 研究内容和方法	3.3.1 研究内容	3.3.2 研究方法
3.4 研究创新点	3.4.1 理论创新	3.4.2 方法创新
3.5 研究结论	3.5.1 主要结论	3.5.2 研究展望

目 录

序

前言

第1章 引言 1

- 1.1 设备状态监测诊断技术的研究意义 1
- 1.2 旋转机械故障诊断技术的发展现状 2
 - 1.2.1 旋转机械故障诊断的研究方法评述 3
 - 1.2.2 旋转机械故障机理的研究现状 6
 - 1.2.3 同源信息融合分析技术的发展状况 7
 - 1.2.4 设备远程故障诊断技术的发展状况 8
- 1.3 全矢谱技术研究的目的与意义 9
 - 1.3.1 全矢谱技术的研究背景 9
 - 1.3.2 课题研究的目的和意义 10
- 1.4 本书的研究内容与结构安排 10
 - 1.4.1 本书的主要研究内容 10
 - 1.4.2 本书的结构安排 11
- 1.5 本章小结 13
- 参考文献 13

第2章 转子基本回转特性与数据

处理基础 18

- 2.1 转子的基本回转特性 18
 - 2.1.1 概述 18
 - 2.1.2 转子涡动轨迹的分析与计算 19
 - 2.1.3 转子的临界转速及其影响因素 22
 - 2.1.4 非线性振动的特征及识别方法 25
- 2.2 数字信号处理基础 27
 - 2.2.1 模拟信号的离散化 27
 - 2.2.2 离散傅里叶变换——DFT 33
 - 2.2.3 快速傅里叶变换——FFT 36
 - 2.2.4 快速复傅里叶变换 40
- 2.3 本章小结 41
- 参考文献 42

第3章 典型旋转机械部件的故障

物理特性 43

- 3.1 转子不对中故障的几何特性 43
 - 3.1.1 轴线平行位移不对中 43
 - 3.1.2 轴线角度位移不对中 45
 - 3.1.3 轴线综合位移不对中 48
- 3.2 转子不对中的运动学机理 48
 - 3.2.1 不对中条件下的啮合状态 48
 - 3.2.2 不对中状态下的瞬时啮合分析 49
 - 3.2.3 外壳质心的回转形态与轨迹 50
- 3.3 “锁定”状态下的不对中运动分析 51
- 3.4 工程诊断方法与应用实例 52
 - 3.4.1 工程诊断方法 52
 - 3.4.2 工程应用实例 52
 - 3.4.3 基于同源全信息空间领域诊断的提出 54
- 3.5 本章小结 54
- 参考文献 54

第4章 平面全矢谱分析与方法 56

- 4.1 旋转机械的动态检测现状 56
- 4.2 全矢谱技术基础 59
- 4.3 全矢谱数值计算方法 63
- 4.4 二维全矢功率谱的直接估计 64
 - 4.4.1 几种全矢功率谱的估计方法 65
 - 4.4.2 全矢功率谱的灵敏度分析 68
- 4.5 全矢细化谱分析与应用 70
 - 4.5.1 复调制细化分析 71
 - 4.5.2 基于复调制的全矢细化谱分析 72
 - 4.5.3 全矢细化谱的仿真算例 75
- 4.6 全矢倒频谱分析与应用 76
 - 4.6.1 倒频谱的定义 77
 - 4.6.2 倒频谱的数值计算方法 78
 - 4.6.3 全矢倒频谱及其数值计算方法 79
 - 4.6.4 全矢倒频谱分析的工程应用 79
- 4.7 瞬态过程的全矢谱分析 81

4.8 全矢谱分析与传统分析方法的关系	83	6.3 全矢小波分析及其应用	115
4.8.1 全矢谱方法与传统谱分析 的关系	83	6.3.1 小波变换原理及算法	116
4.8.2 全矢谱分析对现行诊断经验和 规则的继承性	83	6.3.2 小波变换在振动信号处理 中的应用	118
4.9 全矢谱分析的工程应用实例	84	6.3.3 全矢小波分析技术	119
4.10 本章小结	86	6.4 全矢小波包分解	123
参考文献	87	6.4.1 小波包分解的定义	124
第5章 空间全矢谱分析与方法	88	6.4.2 小波包的空间分解	125
5.1 转子的空间振动概述	88	6.4.3 小波包分解算法	125
5.2 转子的空间进动及振动特征	89	6.4.4 全信息小波包分析技术	126
5.2.1 转子空间轴心轨迹	89	6.5 全矢谐波小波原理及其工程应用	129
5.2.2 轴心轨迹的投影	90	6.5.1 谐波小波包分析及其算法	129
5.2.3 坐标系 xyz 到 $x''y''z''$ 的变换	91	6.5.2 全矢谐波小波包分析及其算法	130
5.2.4 坐标系 $x''y''z''$ 到 $x'y'z'$ 的变换	91	6.5.3 全矢谐波小波包的工程应用	131
5.2.5 坐标变换总则	91	6.6 全矢最大熵谱及其应用	132
5.3 旋转机械空间域全矢谱及数值计算	93	6.6.1 时序模型与最大熵谱	132
5.3.1 夹角 φ_k 的计算	93	6.6.2 二维全矢最大熵谱估计	133
5.3.2 夹角 θ_k 的计算	93	6.6.3 三维空间全矢最大熵谱	134
5.3.3 空间矢谱的数值方法	93	6.6.4 全矢最大熵谱的工程应用	134
5.4 三维空间全矢功率谱	94	6.7 本章小结	135
5.5 三维全矢谱的工程应用	96	参考文献	136
5.6 本章小结	98	第7章 基于全矢谱技术的 智能诊断	138
参考文献	98	7.1 全矢谱-人工神经网络诊断方法 及其应用研究	138
第6章 基于非平稳信号的全矢谱技术	100	7.1.1 RBF 神经网络	138
6.1 全矢短时傅里叶变换及其应用	101	7.1.2 全矢谱-RBFN 诊断及 应用研究	140
6.1.1 短时傅里叶变换定义	102	7.2 全矢谱-模糊聚类诊断及 应用研究	144
6.1.2 短时傅里叶变换窗函数的选择	102	7.2.1 模糊 C 均值聚类分析	144
6.1.3 全矢短时傅里叶变换的 分析与计算	103	7.2.2 全矢谱-FCM 诊断及 应用研究	148
6.1.4 全矢短时傅里叶变换的 工程应用	105	7.3 全矢谱-支持向量机诊断及 应用研究	151
6.2 全矢 Wigner 分布及其应用	108	7.3.1 支持向量机及其算法	151
6.2.1 基于 Wigner-Ville 分布的非平稳 信号的分析	109	7.3.2 多分类支持向量机	155
6.2.2 全矢 Wigner-Ville 分布 及其算法	111	7.3.3 全矢谱-SVM 诊断及 应用研究	156
6.2.3 全矢 Wigner-Ville 分布的 应用实例	113	7.4 基于全矢谱-人工免疫的诊断方法 及其应用研究	157
		7.4.1 相关术语	158

7.4.2 人工免疫系统及其网络模型、 算法原理	159
7.4.3 aiNet 免疫网络	160
7.4.4 基于全矢谱-AIS 的诊断方法 及应用研究	165
7.5 基于全矢谱的故障诊断专家系统	169
7.5.1 专家系统的几个基本概念	169
7.5.2 专家系统的结构特性	170
7.5.3 设备故障诊断专家系统	178
7.5.4 故障诊断专家系统应用实例——二氧 化碳压缩机故障诊断系统	180
7.6 本章小节	187
参考文献	188

第8章 设备远程状态监测与故障

诊断关键技术

8.1 远程监测诊断系统的实现模式	190
8.1.1 基于视频会议的远程监测诊断	190
8.1.2 基于 Client/Server 的远程 监测诊断	191
8.1.3 基于 Browser/Server 的远程 监测诊断	192
8.2 Browser/Server 模式及其关键技术	193
8.2.1 Browser/Server 模式及其特点	193
8.2.2 Browser/Server 模式关键技术	194
8.3 系统软件平台与开发工具	199
8.3.1 系统软件平台	199
8.3.2 系统开发工具	201

8.4 设备远程诊断网络拓扑与构架	202
8.4.1 RMDN 的总体结构与网络拓扑	203
8.4.2 RMDN 的构建	204
8.4.3 RDC 的远程诊断中心	204
8.5 本章小结	204
参考文献	205

第9章 基于全矢谱技术的产品

开发与应用

9.1 eM3000 设备远程监控与运行 管理系统	207
9.1.1 远程网络服务系统 RNSS	207
9.1.2 智能数据采集系统 IDSS	208
9.1.3 在线监测预报系统 OMFS	209
9.1.4 信号分析处理系统 SAPS	210
9.1.5 故障诊断专家系统 FDES	211
9.2 PDES 设备状态检测与安全 评价系统	212
9.2.1 数据采集和管理系统 DSMS	213
9.2.2 运行与安全评价系统 RSAS	215
9.3 大型低速重载转炉应用实例	218
9.3.1 转炉基本概况	218
9.3.2 低速重载转炉的检测	219
9.3.3 转炉信号的变尺度预处理	220
9.3.4 远程监测诊断系统的 建立与实施	222
9.4 本章小结	224
参考文献	224

第1章 引言

1.1 设备状态监测诊断技术的研究意义

随着现代工业及科学技术的飞速发展,各种机械设备日趋大型化、高速化、重载化和复杂化,功能越来越完善,自动化程度越来越高。无论是相同机组的不同部分之间,还是不同机组之间,其联系比以往更为密切,在生产过程中形成一个统一的整体。企业先前作为最佳管理方案的设备管理(Plant Engineering, PE)正在不断进化为崭新的设备维修先进技术——企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP);作为最佳设备维修优化管理的维修管理系统(Computerized Maintenance Management System, CMMS)正在演化为企业资产管理系统(Enterprise Asset Management, EAM);作为企业资产的最佳管理方案,预知维修系统(Prediction Maintenance System, PMS)系统正在进化为设备资产管理系统(Plant Asset Management, PAM),如图 1-1 所示。设备诊断工程(Plant Diagnosis Engineering, PDE)技术,即包括机电装备运行状态和工况监测、故障诊断和预测、维修决策、优化操作、指导改进机器设计等在工业企业实施的全过程,作为 PAM 系统的重要组成部分,其重要性和有效性在现代信息技术(Information Technology, IT)时代被确认为实现设备现代化管理的重要环节,近年来在我国的发展方兴未艾。

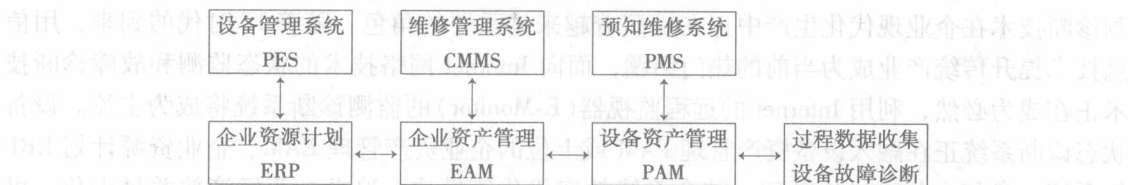


图 1-1 先进设备管理或维修技术及其与故障诊断的关系

设备监测诊断技术为现代化企业提供安全的生产环境。大型旋转机械,诸如汽轮机组、发电机组、鼓风机组及压缩机组等,均属大型复杂设备,同时也是石油、化工、机械、冶金、交通、发电等国民经济支柱行业的关键性咽喉设备。由于设备的设计、制造、安装、操作、运行、维护等环节涉及众多复杂因素,因而难免会出现故障,导致设备的功能降低或失效。由于这些旋转机械是现代化连续生产过程中的关键部分,因而一旦发生故障造成停机,将导致一系列的连锁反应。轻者造成连续生产中断,导致停工停产,带来巨大的经济损失,重者还会导致严重的灾难性事故,造成恶劣的社会影响,给企业的设备安全与经济安全乃至人员安全带来严重威胁。遗憾的是国内外因设备故障而引起的灾难性事故时有发生,比如:1986 年美国的“挑战者”号航天飞机空中爆炸事件;1986 年前苏联切尔诺贝利核电站放射性元素的大量泄漏事件;1991 年美国 300MW 发电机组联轴器断裂事件;1973 年德国 600MW 发电机联轴器变形事件;1992 年日本海南电厂的一台 600MW 超临界火力发电机组在进行超速实验时,因机组轴承失效和临界转速下降引起共振,造成机毁事件;1985 年我

国大同电厂汽轮发电机组 2 号机组联轴器螺栓断裂以及 1988 年秦岭电厂 200MW 汽轮发电机组 5 号机组主轴断裂事件等。事实上,从 20 世纪 70 年代起,仅由于油膜振荡、轴系扭振、摩擦振动等引起的重大事故就有 20 余起,其中大多是造成机毁、损失几千万元的恶性事故。大型灾难性事故不仅造成重大经济损失,而且造成机毁、人亡,同时也产生了极其恶劣的社会影响。因此,如何保证这些咽喉设备的长周期、满负荷、安全优质的运行,对于保障安全生产具有十分重要的工程意义。

设备监测诊断技术的实施可为企业带来巨大的潜在经济效益。经济效益最大化是企业生存之本。避免事故的发生在一定意义上,就是避免重大经济损失。如日本海南电厂事故中,直接经济损失 40~50 亿日元;山西大同电厂事故和秦岭电厂事故中,造成的直接经济损失超过 2 亿元。除了避免发生恶性事故外,设备诊断技术的意义还表现在降低事故的发生率,降低维修费用,避免过剩维修,减少维修成本,增加运行时间。根据美国国家统计局的材料,1980 年美国全年税收为 7500 亿美元,而全年设备维修费用达 2460 亿美元,其中约有 750 亿美元是由于采用不科学的维修方式、过剩维修和维修不足以及缺乏正确的设备故障诊断技术手段造成的。据日本统计,采用诊断技术以后,事故率减少 75%,维修费用降低 25%~50%。英国对 2000 个工厂的调查表明,采用设备诊断技术后的收益是其投资的 6 倍。英国 CEGB 公司下属的 550MW 和 600MW 发电机组因故障引起的停机,每年的发电损失可达 750 万英镑。我国铁路系统采用设备诊断技术后,1986 年与 1979 年相比,燃轴事故减少为原来的 1/14,相当于增加运输年收入 2 亿多元。我国冶金部每年维修费用高达 250 亿元人民币,采用设备状态监测与故障诊断技术可以节约维修费用 10%~30%。还有更多的例子可以说明,建立完备的监测与诊断体系具有极其重要的经济意义。

设备监测诊断技术是企业采用先进的设备管理手段进行现代化生产的重要标志。设备监测诊断技术在企业现代化生产中正在扮演着越来越重要的角色。随着 IT 时代的到来,用信息技术提升传统产业成为当前的热门话题,面向 Internet 网络技术的状态监测和故障诊断技术正在成为必然,利用 Internet 的远程监视器(E-Monitor)的监测诊断系统将成为主流。设备状态诊断系统正在融入设备资产管理 PAM 或上位的企业资产管理 EAM、企业资源计划 ERP 等系统,参与企业现代化管理,结合系统效率优化等模块,追求企业经济效益最大化。可见,基于先进网络技术的设备状态监测与故障诊断技术,无论对现代工业生产还是现代化设备管理均具有重要意义。

综上所述,设备状态监测与故障诊断技术的意义是十分明显的。归纳起来,主要体现在:①提高了设备的现代化管理水平;②保证了产品质量,提高了设备的可靠性;③避免了重大事故的发生,减少了事故的危害性;④可以获得潜在的巨大经济效益。

1.2 旋转机械故障诊断技术的发展现状

设备故障诊断技术始于 19 世纪。最初是来源于实际工作中的经验型知识,其具体实施是依靠领域专家的耳听、手摸、眼看、鼻闻等感官知觉获得设备的健康状况。现代故障诊断技术诞生于 20 世纪 60 年代。随着信息论、系统论、控制论以及计算机技术等前沿科学技术和先进技术的引入,新理论、新技术、新方法不断涌现,使设备状态监测与故障诊断技术得到迅猛发展,并广泛应用于航空、航天、石油、化工、机械、冶金、交通、电力等工业生产

领域,目前已发展成为一门相对独立的新兴学科,在工业生产中发挥着重大作用。

设备故障诊断技术是伴随科学技术的整体进步而发展的。它是一门涉及现代动力学、信号采集、信息处理、人工智能、模式识别、集成电路、计算机、网络通信等技术的新兴学科。它从诞生开始就受到人们的极大关注,并由于其具有很强的实用性而越来越受到重视。各相关学科的发展,极大地促进了该学科的飞速发展。20世纪中叶以前,对设备所出现的各类非正常现象和故障的判断及识别,还主要依赖人的感官和经验,故障诊断知识的传递用的也是模糊性语言;从20世纪60年代始,随着传感器技术的不断进步和发展,人们研究了基于振动、噪声、压力、温度、流量等参数的各种检测方法,改进了检测仪器,逐步取代了人的感官并形成现代故障诊断技术;到了70年代,随着科学技术的进步,研制出大量的应用于设备故障诊断的仪器、仪表,已基本实现设备运行状态的监测和初步诊断;80年代,由于计算机技术的突飞猛进的发展,各种故障诊断仪器和系统逐渐实现数字化,各种大型在线监测与故障诊断系统相继诞生,在设备故障的识别诊断过程中起着更多的主导作用;90年代,人工智能技术的发展将设备诊断技术引向更加智能化,智能化的设备监测、诊断仪器、仪表和局域网系统,使得人为因素在诊断过程中的参与越来越少,大大地提高了设备故障诊断技术的实用性和可靠性,设备诊断技术在各个工业领域全面展开。近年来,伴随网络技术的发展,使得远程监测和诊断成为可能。设备状态监测与诊断真正成为企业设备资产管理的组成部分,并将 Internet 引入现代化工业生产。

1.2.1 旋转机械故障诊断的研究方法评述

设备故障诊断技术的研究已逐步走向成熟并正在引向深入。应用于设备故障诊断的理论和方法很多,各有技术特点和技术关键,并分别适用于不同的工程实践。这些方法与技术主要包括两部分:一是特征提取方法。二是模式分类方法。以下分别从两方面进行讨论。

1. 特征提取方法

特征提取是进行故障诊断的前提。若特征提取不正确或不全面,必然导致错误的分类以及误判和误诊。从故障诊断研究技术发展的进程知道,故障的特征提取一直都是设备故障诊断技术最重要、最关键、最基础和最困难的问题。其技术难题主要集中在两个方面:一方面,从机理研究获取故障特征;另一方面,借助现代信号处理理论、方法和手段,从信号的深加工中获取更多的信息。这些分析处理包括各种以信息处理为核心的常规信息处理技术、小波分析技术、时间序列分析、高阶统计量分析等。

(1) 设备故障机理 故障机理及故障征兆的研究是机械故障诊断技术的理论基础。根据研究对象及其表征的故障特性,建立相应的物理、数学模型一直是故障机理和故障征兆研究的有效手段。由于大型机械系统的复杂性和运动多样性,从设备的运行、检修中积累知识也成为设备故障机理研究的重要途径。故障机理及故障征兆的研究为故障诊断的实施提供了重要依据。John Shore 根据研究将旋转机械的典型故障分门归类,总结出四张故障征兆表,至今仍是现场工程技术人员进行设备故障诊断的重要依据。上海发电成套设备设计研究所和哈尔滨工业大学也归纳了许多汽轮发电机组典型故障,建立了上千条针对汽轮机组的诊断规则。旋转机械故障机理的研究是故障诊断领域的一大难题,已经成为故障诊断学科极具挑战意义的研究方向。

(2) 常规信号分析 常规信号分析技术在设备状态监测与故障诊断中具有重要作用。

常规信号分析技术是建立在 FFT(Fast Fourier Transform) 基础之上的。虽然可用于故障识别的机组动态信号有振动、噪声、温度、压力、流量等,但工程中最常利用的仍是振动信息。常规信号处理的目的是对信号进行深加工,提取能反映设备故障的特征量。目前常用信号分析技术主要包括时域分析(波形分析、相关分析、统计分析等)、频域分析(幅值谱、功率谱、细化谱、包络谱)、倒频域分析、时频分析(短时 Fourier 变换、Wigner 分布等)、瞬态分析(Bode 图、Nyquist 图、瀑布图、阶次图等)。这些方法已被广泛应用于设备故障诊断领域,已成为判断机组运行状态和故障类型的基本工具。

(3) 小波分析技术 小波分析技术(Wavelet Analysis Technology, WAT)在设备诊断领域产生了深远影响。以小波变换(Wavelet Transform)为代表的现代信号分析技术,为机械故障诊断中非平稳信号分析、弱信号提取、信号滤波等提供了有效途径。小波分析自 Morlet 提出始,经历了 A. Grossmam、Meyer、Mallat、Daubechies 等学者的研究工作,已经成功地应用于故障诊断。何正嘉、高强在故障早期识别,彭志科、何永勇等在碰摩(Rubbing)故障研究,邹剑、陈进等在转子裂纹诊断,Donoho 在降噪领域方面以及 Hamid Krim 和 Irvin C. Schick 在阈值降噪方法研究方面,均取得较好效果。特别是第二代小波变换技术引起了中外学者的普遍关注,何正嘉等将其应用于故障诊断,有效地提取了早期故障信息。

(4) 时间序列分析 基于时间序列分析(Time Series Analysis, TSA)的现代谱估计在改进经典谱估计分辨率低和方差性能不好等方面发挥了重要作用。现代谱估计方法主要包括 AR-MA 谱分析、最大似然法、熵谱估计法、特征分解法等。ARMA 谱分析是一种建模方法,它是通过平稳线性信号建立自回归滑动平均模型来估计功率谱密度。常用的为 AR 模型,是 ARMA 模型舍弃滑动平均部分的自回归模型。熵谱估计包括著名的最大熵法(MEM)和最小交叉熵法。特征分解又称特征结构法或子空间法。现代谱估计方法在设备故障诊断中取得了良好的效果。

(5) 高阶统计量 高阶统计量(High-Order Statistics, HOS)在故障诊断中是处理非线性、非高斯信号的有力工具。当机械故障诊断中的实际信号不呈高斯分布时,高阶统计量分析及相应的高阶谱显示了其优越性。与功率谱相比高阶谱由于为复数,因而保留了相位信息,具有很强的抑制高斯噪声的能力,同时保留了系统的非线性信息。近年来在振动信号分析处理领域,取得了较好的工程分析效果。张桂才、史铁林、杨叔子利用高阶谱可以抑制高斯噪声的特性,成功地将齿轮正常、裂纹、断齿信号进行了分离。杨江天、陈家骥等在研究旋转机械振动信号的非线性特征基础上,将高阶谱分析引入故障诊断,提高了诊断准确性。李志农、丁启全等研究了具有不同裂纹深度和位置的高阶谱特性,对小裂纹状态和转子不发生剧烈振动时的隐蔽信号进行了早期诊断。

当然,还有许多故障诊断特征提取方法,如盲源分离(Blind Separation of Sources)、分形几何(Fractal Geometry)等。

2. 模式识别方法

故障诊断的实质问题是模式识别问题。从这个基本思想出发,作为诊断分类依据的许多诊断方法不断被提出。这些智能诊断方法主要集中在以知识处理为核心的模糊理论、灰色理论、人工神经网络、模式识别、数据挖掘等方面。

(1) 人工神经网络 人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)在设备故障诊断中得到非常广泛的应用。人工神经网络反映了人脑功能的基本特性,是人脑的某种抽象、简化与

模拟。其主要优点是具有联想、推测、记忆和自学习能力,能从样本中学习而获取知识,以弥补专家系统在知识获取等方面的不足。神经网络应用于设备故障诊断源于20世纪80年代末期,并随之涌现出一大批应用于设备故障诊断的成果。M. Chow 等对交流感应电机进行故障诊断, Dyuar 等对航天发动机进行诊断以及其他应用于大机组故障类型的识别与诊断。但是,神经网络的应用也有很大的局限性,一方面所学习的知识是“隐形”的,可移植性差;另一方面容易陷入局部极小点问题,也使其在实际工程应用中受到影响。

(2) 专家诊断系统 专家诊断系统(Expert Diagnosis System, EDS)是人工智能领域最为活跃的分支。故障诊断专家系统的能力和水平主要取决于它所拥有的知识的数量和质量,信息的模糊、遗漏、不完整也会对专家系统的诊断准确率产生极大的影响。许多学者对基于知识的专家系统进行了大量的研究,研制出一些具有实用价值的专家系统。例如美国西屋电子公司研制的汽轮机智能诊断系统(Turbin AID)、发动机智能诊断系统(Gen AID)和化工智能诊断系统(Chem AID)就分别具有3000、3600和3200条规则。故障诊断成为专家系统这种基于知识系统(Knowledge-Based System)的最成功的应用领域。如随后出现的航天飞机主发动机故障诊断专家系统,汽轮机发电机组故障诊断专家系统等。专家系统的缺陷在于它只是一个模式匹配系统,知识的识别、获取和有效表达成为影响专家系统的“瓶颈”问题。对于大型旋转机械,采用信息融合技术是改进专家系统诊断准确率的有效方法。

(3) 支持向量机 支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是在统计学习理论(Statistical Learning Theory, SLT)基础上发展起来的一种新的机器学习算法。它在解决小样本、非线性及高维模式识别中表现出许多独特的优势,并在多个领域取得了良好的应用。将支持向量机应用于设备故障诊断领域,为故障智能诊断增添了新的活力。目前这方面的研究已引起国内外学者的关注。不仅在SVM应用于故障诊断的理论上,同时在工程应用上也进行了探索。国外研究较早,已取得较多研究成果。国内李凌均提出了一种支持向量数据描述方法,并对机械设备运行状态进行评估,时文刚等研究了基于SVM的往复泵泵阀的诊断,胡寿松将SVM应用于歼击机的结构故障诊断等。SVM的缺陷与神经网络类似,即知识的可表达性和可解释性差。

(4) 数据挖掘技术 数据挖掘(Data Mining, DM)是从大量的、不完全的、有噪声的、模糊的、随机的实际数据中,提取隐含在其中的、事先未知但又潜在在有用信息或知识的高级处理过程。数据挖掘研究主要包括通用数据挖掘算法研究、用于分类的数据挖掘研究,以及在设备故障诊断中的应用研究。数据挖掘可以应用于模式识别,同时也可应用于特征提取。杨文献等将数据挖掘应用于汽油发动机的故障信息提取。高聚龙采用最大一致性因子改进粗糙集模型,得出基于最大一致性因子的特征提取方法。姜东等将数据挖掘应用于机组故障的特征提取、特征选择和特征分类的过程。数据挖掘目前的应用还非常有限,即使在特征提取方面,也仅仅实现了单一特征的挖掘。在模式识别方面尚需进行大量的研究工作。

(5) 隐 Markov 模型 隐 Markov 模型(Hidden Markov Model, HMM)是一种具有较强的时间序列建模能力的信号模式处理工具。特别适合于对非平稳、重复出现性不佳的信号的分析处理。对于大型旋转机械,由于机组在升降速过程中一些平稳过程不易得到的故障征兆会充分地表露出来,因此, HMM 是一种具有针对性的处理机组升降速过程振动信号的建模和识别工具。童进详细研究了基于 HMM 的旋转机械升降速过程的故障诊断。李志农研究了基于时序盲辨识的 HMM 状态识别方法。将隐 Markov 模型应用于大型旋转机械已形成一个极具

挑战性的研究方向。

当然,还有许多故障诊断模式识别方法,如模糊集合(Fuzzy Set)理论、粗糙集(Rough Set)理论、故障树(State Relation)方法、遗传算法(Genetic Algorithm)等和证据理论(Evidence Theory)等。

综上所述,设备故障诊断技术是众多知识的联合应用,是个系统工程。总体上讲,从机理研究获取故障特征仍然是步履艰难,是极具挑战性的技术难题;而对信号进行深加工,特别是进行多信息融合技术的研究,是重要的前沿性研究课题;而在应用层面,加强设备远程故障诊断技术的研究与相关产品开发是当务之急。以下就上述三方面问题进行详细评述。

1.2.2 旋转机械故障机理的研究现状

设备故障诊断机理研究的目的是为了掌握故障的形成和发展过程,了解设备故障的内在本质及其特性,建立合理的故障诊断模式。其研究是根据不同对象,建立相应的数学模型,探索研究对象的故障物理特性,为设备故障状态监测与故障诊断提供理论依据。故障机理的研究实际上也是转子或部件动力学的反问题研究,属于机械故障诊断领域最关键、最基础性的研究。

伴随设备故障诊断技术的诞生,人们对故障机理及其物理特性的探索与研究从来没有停止过。Shore 于 1968 年对旋转机械的典型故障及其原因进行了全面的描述,把典型故障归纳为 9 类 37 种。高金吉院士于 1993 年对高速旋转机械的故障机理及识别特征进行了研究,提出一次原因及主导频率的分类方法,总结了 10 类 58 种故障的识别特征。近年来,各种故障机理研究在科技人员的不断探索中取得了令人瞩目的进展。

转子裂纹(Cracked Rotor)是旋转机械最为严重的故障之一,许多学者对转子的横向裂纹进行了建模和研究。Darpe A K 等研究了具有轴向激励的裂纹转子的响应,曾复对裂纹非线性振动机理进行了探讨和实验研究,郭丹、何永勇等研究了具有横向裂纹的转子耦合振动现象。这些研究得出一些初步的故障机理结论,但距离工程实施尚有较大差距。

旋转机械的支承松动(Pedestal Looseness)和碰摩故障是比较有代表性的、具有分数谐波特征的一类故障。对造成系统分数谐波特征的非线性动力模型和非线性机理研究也取得了较大进展。王洋、高金吉等对支承系统的故障机理进行了研究,褚福磊、方泽南等分析了支承松动故障的混沌特性,Beaty R. F. 研究了径向摩擦(Radial Rubbing)故障的转子响应,戈志华、高金吉等研究了旋转机械碰摩机理,卢文秀探讨了机组碰摩的动力学特征。

对某些典型的旋转机械,比如离心压缩机,由于其特定的工作条件,会形成喘振(Surge)、旋转失速(Rotary Stall)等特定故障。对这些故障虽然也进行了大量的研究工作,但由于其动力模型涉及太多的设备和工艺因素,其机理研究大多停留在对具体现象的解释上。项春等对离心式压缩机旋转失速故障机理进行了研究,根据 Day I. J. 等的试验模型,王洋、夏松波等对离心空压机的旋转失速故障特征进行了研究。王志标等对压缩机喘振机理进行了阐述,戴冀给出了喘振点的计算模型。目前已经可以制定很好的防喘振策略。

转子系统的油膜涡动(Oil Whip)和油膜振荡(Oil Whirl)是与滑动轴承联系密切,对旋转机械危害较大的一类故障。这类故障机理的研究往往将转子力学系统和润滑理论相结合,近年来,除了在简化条件下对半频机理特征进行证明外,很多文献对于该类故障的非线性表现乃至其混沌机理进行了研究。李建国研究了油膜涡动的振动特性及其失稳控制,韩海清等对

油膜失稳特性进行了实验分析。

转子密封系统(Seal System)也会引起动力失稳。高速旋转机械的叶轮及密封装置,由于密封压力差及转速较高等问题,转子与定子小间隙处容易产生激振力,而导致转子运行失稳,有非常强的非线性特性。陈予恕、丁千研究了转子—密封系统亚共振失稳机理和稳定性,何立东、夏松波等探讨了转子—密封系统的动力学特性。

不平衡(Unbalance)、不对中(Misalignment)类故障,是旋转机械故障的最重要的表现形式,在旋转机械故障中占80%。目前对转子不平衡类故障的机理认识已比较充分,现场治理措施也较成熟。不对中类故障机理的研究经历了比较漫长的阶段,Xu M.进行了理论和实验探讨,韩捷、石来德针对齿式联接不对中故障从几何和运动学角度研究了其故障机理。但在研究的系统化以及对各种形式的联轴器扩展上仍有很多需要深入研究的工作。

在旋转机械零部件方面,对于齿轮故障机理的研究较多,但由于齿轮具有太多形式的损伤和故障,其机理研究往往是以聚类方式进行,更为详细的研究还有较大差距。滚动轴承由于其结构的复杂性,故障机理研究较少。

故障诊断的目的是为设备维修提供理论依据。目前设备故障机理的研究虽然取得了很大进展,在工程实践中也发挥了巨大作用,但离设备现代化管理的要求还相差甚远。一方面每类故障包含较多结构形式,例如不对中类故障包含齿式联轴器、摩擦片式联轴器等多种结构形式。而齿式联轴器的不对中故障又包括平行位移不对中、角度位移不对中和综合位移不对中等类型。由于诊断出故障种类、程度、位置等具有同等重要的意义,因此,不能回避的问题是为什么这种故障的发生会伴随某种特定信息特征,或者产生这种故障的机理和物理特性是什么。正确回答这些问题将有利于更加明确诊断和处理特殊情况,而且深入研究的故障机理特征还可为信息处理提出新的要求和研究课题,这对于设备故障诊断显然具有十分重要的指导意义。据统计,不对中故障占总故障量的60%,显然,不对中故障机理和故障物理特性的研究在旋转机械故障机理研究中占有举足轻重的地位。

1.2.3 同源信息融合分析技术的发展状况

在故障诊断领域,随着现代化机械系统复杂程度的大幅度提高,对其进行监测时,往往存在信号信噪比低和诊断的可信度低等问题,靠单一传感器采集信息已明显不能满足要求,因而采用数据融合技术对多信息资源进行综合处理,为解决这些问题提供了一种有效的方法。

信息融合(Information Fusion)是指利用计算机技术对按时序获得的多源观测信息在一定准则下加以自动分析、综合,用以完成所需决策和估计任务而进行的信息处理过程。信息融合技术是一种自动化信息综合处理技术,它充分利用多渠道数据的互补性,通过对多种来源信息的综合提取知识,从而解决复杂的问题。随着信息融合技术的发展,它在众多领域受到了广泛的重视。

信息融合可分为三层融合结构,即数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合是指首先将全部的观测数据融合,然后从融合的数据中提取特征信息进行判断识别;特征层融合是指从每种观测数据中提取有代表性的特征,将这些特征融合成单一的特征向量,然后运用模式识别的方法进行处理;决策层融合是指在每个传感器对目标做出识别后,将多个传感器的识别结果进行融合。三个层次反应了研究对象信息的分级转换关系,由数据层到决策

层,信息的抽象程度不断增加,同时对象的信息损失也不断增加。信息融合的方法主要有:加权平均法、统计决策法、卡尔曼滤波法、贝叶斯估计法、神经网络法、D-S 证据推理法、模糊逻辑法、专家系统法等。大多数的融合问题都是针对同一层次上的信息形式开展研究的。

同源信息融合(Same Source Information Fusion, SSIF)技术是信息融合的一个特例,它的特殊性在于其传感器类型一致,只是布置的位置不同。大型旋转机械是一个复杂的动态系统,其监测诊断信息源是一个具有共同时空参考系的多源信息(振动、压力、流量、温度等)处理系统。为了保证特征融合数据的准确性、可靠性和完备性,采用同源多振动传感器融合方法,可以获得与单源信息具有相同形式但质量更高的信息,对旋转机械故障诊断具有更现实的意义。另外,由于大型旋转机械的信息多采用同步整周期采集,完全可以满足在数据层进行同源信息融合在时间与空间上均是校准对齐的要求。

同源信息融合技术在设备故障诊断中的应用研究已取得较大成效。许多研究是依据旋转机械的回转特性而展开的。Bently 提出了基于转子同截面双向信息融合的全频谱(Full Spectrum)分析方法。全频谱采用正、负半谱以正、反进动分量表达转子回转各谐波轨迹的特性,较好地反映了各谐波轨迹的强度和进动状况,并在旋转机械的故障诊断中获得成功应用。屈梁生院士提出了旋转机械信息分析的全息谱(Holospectrum)方法。全息谱采用更加直观的表现方式,以各谐波下转子的进动轨迹方式展现转子的回转特性,包含了丰富的振动强度、相位、进动等信息。全息谱在旋转机械故障诊断、现场动平衡等应用方面取得极大的成功。由于融合了多个信息源的信息,这些分析方法可以统称为全信息分析(Full Information Analysis, FIA)方法。

同源信息融合技术的研究成果促进了设备状态监测和故障诊断的发展,但在实际工程应用中尚受到一定的局限性。首先,目前研究局限于线性范围内,图谱限于谐波回转轨迹和其分解量的直接表达,这一方面使得回转能量等分析方法无法进行,另一方面也极大影响了谱图的分辨率;其次,研究仅限于频域分析范围内,对向频域分析以外的领域拓展尚未进行,尚未构建针对旋转机械的全信息分析体系;再者,研究只是针对转子截面或多截面信息展开,尚未涉及立体空间领域;最后,尚未建立一套具有兼快速性、稳健性和容错性于一体的融合算法,尚未建立起全信息分析与常规分析之间的桥梁。这些问题的解决对于丰富基于同源信息融合的全信息分析理论,加强在旋转机械故障诊断领域的应用具有重要意义。

1.2.4 设备远程故障诊断技术的发展状况

基于 Internet 远程故障诊断技术(Internet Remote Fault Diagnosis, IRFD)是设备故障诊断技术与计算机网络技术相结合的产物。IRFD 以 Internet 网络为向外辐射的物质载体,使异地间的状态监测与故障诊断成为可能,同时也使设备故障诊断技术成为企业现代化管理(PAM、EAM、ERP)的重要组成部分。

基于 Internet 远程故障诊断的研究工作始于医学领域。开放的远程医疗系统包括远程诊断(Remote Diagnosis)、专家会诊(Consultation of Specialists)、信息检索服务(Information Server)、在线检查(Online Examination)和远程学习(Remote Study)等部分。1994 年美国俄克拉荷马州的远程医疗系统投入使用。国内上海医科大学在上海地区率先建立了一个类似的远程医疗系统。