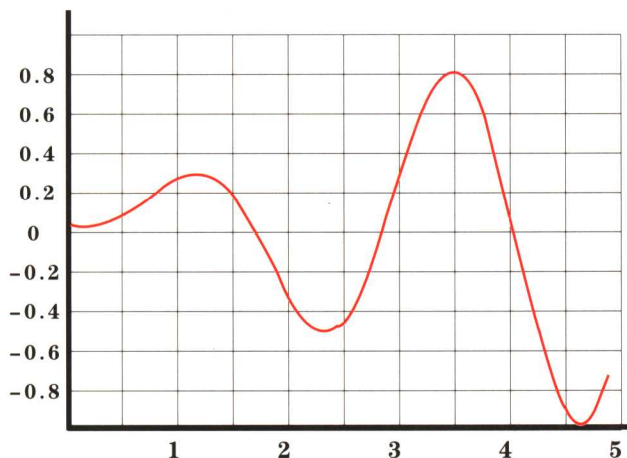




中国机械工程学会
机械工程师继续教育丛书

机械系统动力学分形特征 及故障诊断方法

徐玉秀 张剑 侯荣涛 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

中国机械工程学会
机械工程师继续教育丛书

机械系统动力学分形特征 及故障诊断方法

徐玉秀 张 剑 侯荣涛 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

机械系统动力学分形特征及故障诊断方法/徐玉秀
等著. —北京:国防工业出版社, 2006. 1

(机械工程师继续教育丛书)

ISBN 7-118-04129-7

I. 机... II. 徐... III. 机械工程—动力学
IV. TH113

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 100588 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 15¼ 268 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序

21 世纪前 20 年是我国经济社会发展的重要战略机遇期。在这样一个关键历史时期,制造业扮演着重要的角色。制造业作为国民经济和国家安全的物质主体和支柱产业,是科学技术的基本载体,是国民经济高速增长的发动机,是国家竞争力的重要体现。

针对制造业全球化挑战和制造科学与技术的发展趋势以及我国制造业存在的技术创新能力不强、制造技术基础薄弱、技术创新体系尚未形成的问题,我国制定了制造业必须依靠科技进步,开拓出一条资源消耗少、环境污染轻、技术含量高的制造业发展道路,从制造大国走向制造强国的发展目标。为实现这一目标,成为制造强国、接纳国际产业转移,需要大批高水平的科技人才,需要大批熟悉国际国内市场、具有现代管理知识和能力的企业家,需要大批能熟练掌握先进技术、工艺和技能的高级技能人才。为此,中国机械工程学会制定了制造业工程技术人员继续教育规划和继续教育科目指南,开展机械工程师技术资格认证并着手启动了机械工程师国际互认工作,得到了社会的认可和支持。

中国机械工程学会和教育部考试中心合作,成功地在全国开展了机械工程师综合素质和技能考试,现在又同国防工业出版社合作,组织编写了《中国机械工程学会机械工程师继续教育丛书》。本丛书主要是根据中国机械工程学会制定的《继续教育科目指南》以及《机械工程师水平资格考试大纲》(试行)的要求编写,结合相关领域的技术发展特点,突显“实用技术”,注重学习能力、协同能力、创新意识与能力和职业技能培养。以期更好的为广大工程技术人员服务。

中国机械工程学会副理事长兼秘书长



2005 年 2 月 1 日

前 言

设备故障诊断与监测技术是一门正在不断发展和完善的新技术,它具有保障生产正常进行,防止突发事件,节约维修费用等特点,在现代化大生产中发挥着重要的作用。随着信号处理技术的不断完善,设备故障诊断技术取得了很大的变化,新的时频分析方法的不断涌现,增加了对振动信号分析的准确性,奠定了对机械设备实施故障诊断的坚实基础。

非线性科学已逐渐被应用到机械设备的故障诊断技术之中,其中以分形理论、混沌理论在这一领域中的应用研究最为广泛,通过对时间序列的相空间重构,不仅可以利用小波理论对信号进行降噪处理,还可以计算出描述系统运动特征的分形维数,通过分形维数的变化来确定设备的运行状态是目前研究最为活跃的研究课题之一,但这一方法在实际应用中还有许多问题值得进行深入的研究讨论。

分形学是一门新学科、一种新理论。分形对事物的本质揭示具有独特性。一般情况下,分形是研究非线性问题的。它是处理自然界与工程界中不规则图形的强有力工具,目前它的应用已涉及各个领域。本书试图不以数学的严密性来阐述分形的理论,而是从工程的角度研究它的应用价值,并在此基础上给出分形理论在机械故障诊断中的应用及方法。

把分形理论应用于机械故障诊断领域,是近年来国际学术界的新动向。在传统的故障诊断方法中,各种测试技术、信号分析技术已经得到广泛的应用,但对于复杂的机械系统,一般都是非线性动力系统,它的故障诊断与状态监测在理论上和实践上往往产生较大偏差。从这种角度出发,使我们对传统的机械系统故障诊断和状态预测进行种种研究,并在此基础上取得了一些成果。

小波分析方法是目前发展最为迅速的一种时频分析方法,将小波分析应用于故障诊断是一项新的课题,我国的相关科技工作者做了大量的研究工作。针对具体设备,解决其故障诊断中存在的问题有着十分重要的意义。

分形理论在工程机械中的摩擦、磨损问题及粗糙表面特征、摩擦温升分布、磨损预测等方面的应用,国内外已有学者进行了研究讨论。工程机械摩擦副元

件的表面形貌对其摩擦、磨损、润滑等都有很大的影响,从而影响其工作性能。尽管针对表面粗糙度的形貌参数很多,但不能反映表面形貌特性的全部信息。本书通过试验分析研究,提出了在摩擦、磨损状态下,等离子弧淬火表面物理状态的表征方法及表面形貌参数的描述方法,等离子弧淬火表面摩擦、磨损机理的初步模型等。提出摩擦表面的等离子弧淬火条纹和网格的方向设计,将成为提高材料寿命、减少能源消耗的一种简单可行的方法。

随着科学技术的发展,更多和更复杂的机械设备的出现,将会进一步推动新研究理论、技术方法的出现。本书对此做了一些探索性的研究。

本书内容主要来源于辽宁省自然科学基金“基于广义分形的结构损伤与健康检测”和天津市科技创新基金“基于分形理论的复杂机械系统故障诊断应用研究”等的成果,同时参考了国内外相关学科领域有关分形的研究成果和专著。本书从系统状态的角度、从研究复杂系统的基点出发,探讨复杂机械系统故障诊断的理论、技术方法,并把复杂机械系统的变化状态用简单的数字——分形维数的变化来表征,既给出系统状态的量化指标,又减少系统状态表征的参数,从而使诊断输出的结果更加明显、直观。

全书共 12 章,包括了分形基本理论、小波理论、表面形貌参数的描述方法及电磁轴承控制系统设计与仿真等研究。第 1 章和第 2 章综述机械设备故障诊断的意义和方法,介绍了国内外故障诊断技术的研究现状;第 3 章介绍了分形、多重分形维数的概念;第 4 章和第 5 章介绍了小波、小波包分析理论及其算法,阈值及消噪方法及对汽轮发电机组进行故障诊断研究;第 6 章介绍了分形理论及小波分形技术对复杂机械故障诊断的综合应用,研究了基于小波分形技术的发电机组故障振动信号分析,发电机组转子故障分析,关联维数在汽车发动机故障诊断中的应用等;第 7 章阐述了多重分形维数的概念,对多重分形的分形维数特性进行了计算与分析,介绍了基于多重分形的广义分形维数的数值计算方法,给出故障敏感维数的定义及分形故障诊断的分类方法,并用标准函数对所给方法进行了验证;第 8 章分别利用故障诊断的三位法和广义分形特征、广义分形维数对旋转机械模型和汽轮发电机组的故障诊断进行了有效探索和分析,给出系统各状态的故障敏感维数及待诊断状态的故障诊断技术方法;第 9 章介绍了李雅普诺夫指数在复杂机械故障诊断中的应用研究,对实际工程中的复杂结构的状态进行了机械系统的混沌特性及其可预测性研究;第 10 章介绍了等离子弧淬火表面条纹方向对摩擦性能影响的研究;第 11 章介绍了电磁轴承控制系统设计与仿真研究;第 12 章介绍了电磁轴承控制的鲁棒稳定性研究。

本书是在《复杂机械故障诊断的分形与小波方法》一书的基础上,对所研究的成果进行筛选、取舍后成稿的。

写作本书是试图为机械故障诊断领域的研究者、工程技术人员以及相关专业的研究生提供一本参考书。本书以应用为目的,阐述分形理论、小波理论在机械故障诊断中应用的各个方面,但由于在该领域研究的时间还很短,许多问题尚需进一步探讨,加之作者水平所限,疏漏和不当甚至错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

徐玉秀

2005年9月18日

内 容 简 介

本书从系统状态的角度、从研究复杂系统的基点出发,探讨复杂机械系统故障诊断的理论、技术方法,全书共 12 章,系统介绍了复杂机械系统故障诊断的研究方法、分形与分形维数、小波及小波包分析、基于小波理论的信号降噪研究、分形理论及小波分形技术的复杂机械故障诊断、基于多重分形的分形维数计算、基于广义分形特征的故障诊断、李雅谱诺夫指数在复杂机械故障诊断中的应用研究、等离子弧淬火表面条纹方向对摩擦性能影响的研究、电磁轴承控制系统设计与仿真研究、电磁轴承控制的鲁棒稳定性研究等内容。

该书可供机械故障诊断领域的研究者、工程技术人员以及相关专业的本科生、研究生参考使用,对该领域的工程技术人员也是一本非常实用的参考书。

目 录

第 1 章 机械故障诊断概述	1
1.1 机械故障诊断发展概述	1
1.1.1 设备故障诊断技术的发展过程	2
1.1.2 设备故障诊断技术的现状	3
1.1.3 设备故障诊断技术发展趋势	5
1.2 基于现代非线性理论的复杂机械故障诊断与预测	6
1.2.1 复杂机械系统中的非线性问题	6
1.2.2 基于现代非线性理论的复杂机械故障诊断研究的内容	6
1.2.3 基于现代非线性理论的复杂机械故障诊断研究的意义	7
第 2 章 复杂机械系统故障诊断的研究方法	9
2.1 机械设备故障诊断理论方法	10
2.1.1 统计识别方法	10
2.1.2 模糊识别方法	10
2.1.3 神经网络识别方法	10
2.1.4 故障树分析法	11
2.1.5 分形故障诊断方法	12
2.1.6 小波故障诊断方法	12
2.2 机械设备故障诊断的技术与方法	13
2.2.1 振动诊断技术	13
2.2.2 时序分析方法	13
2.2.3 最大熵谱方法	14
2.2.4 专家系统诊断方法	14
2.2.5 专家系统与神经网络集成的故障诊断方法	15
2.2.6 非线性系统动力学特征的故障诊断方法	16
第 3 章 分形与分形维数	18
3.1 分形原理概述	18
3.1.1 分形	18

3.1.2 分形空间·····	19
3.2 分维及其测量方法·····	20
3.2.1 长度测量及其维数的定义·····	20
3.2.2 几种分形维数概述·····	21
3.3 分形学的分类·····	27
3.4 分形学的应用领域·····	27
第4章 小波及小波包分析 ·····	29
4.1 概述·····	29
4.2 小波变换·····	29
4.2.1 连续小波变换·····	30
4.2.2 离散小波变换·····	31
4.3 多分辨分析·····	33
4.4 小波包分析·····	36
4.4.1 小波包的定义·····	37
4.4.2 小波包的性质·····	38
4.4.3 小波包的空间分解·····	38
4.4.4 小波包算法·····	40
4.5 小波应用领域概述·····	40
第5章 基于小波理论的信号降噪研究 ·····	42
5.1 噪声·····	42
5.2 工程上传统、常用的去噪方法·····	42
5.2.1 窄带滤波·····	43
5.2.2 相关滤波·····	43
5.2.3 相干滤波·····	43
5.3 小波降噪法·····	43
5.4 应用实例·····	44
5.4.1 Blocks 函数信号的降噪分析·····	44
5.4.2 sin 函数信号的降噪分析·····	49
5.4.3 信号类型与消噪方法·····	53
5.4.4 汽轮发电机组振动信号的降噪分析·····	54
5.5 基于小波理论的汽轮发电机组故障诊断研究·····	55
5.5.1 汽轮发电机组振动故障的典型特征·····	55
5.5.2 引起机组振动故障的原因·····	55
5.5.3 主要振动故障的典型特征·····	56

5.6	基于小波理论的汽轮发电机组故障诊断	57
5.6.1	实例诊断分析	57
5.7	小波能量特征法在发电机组故障诊断中的应用研究	69
5.7.1	系统状态特征向量构造及分析	69
5.7.2	发电机组故障诊断分析	71
第6章	分形理论及小波分形技术的复杂机械故障诊断	73
6.1	基于分形理论的复杂机械故障诊断研究	73
6.1.1	研究背景	74
6.1.2	分形维数及应用	74
6.2	关联维数及其计算方法	75
6.2.1	相空间重构	75
6.2.2	关联维数计算	76
6.3	发电机组振动信号的关联维数计算及故障诊断研究	78
6.3.1	时频分析	78
6.3.2	时域信号关联维数计算与分析	79
6.4	基于小波分形技术的发电机组故障振动信号分析	81
6.4.1	小波分形技术原理	81
6.4.2	发电机组转子故障分析	82
6.5	关联维数在汽车发动机故障诊断中的应用	86
第7章	基于多重分形的分形维数计算	89
7.1	多重分形信息特征	89
7.1.1	多重分形的理论方法	89
7.1.2	广义维数算法概述	90
7.1.3	广义维数 D_q 的计算方法	92
7.2	广义分形维数算例分析	93
7.2.1	正弦波的广义维数及与采样长度的关系	93
7.2.2	带噪声正弦波信号的广义维数计算分析	96
第8章	基于广义分形特征的故障诊断	100
8.1	振动信号的多重分形维数分析	100
8.1.1	振动信号的敏感维数提取	101
8.1.2	振动信号的分形诊断分类原理	101
8.2	振动信号的广义分形维数诊断方法	102
8.3	基于多重分形特征的转子模型故障诊断	103
8.3.1	转子模型试验	104

8.3.2	分形维数的计算比较与分析	104
8.3.3	确定各分形维数及敏感维数	108
8.3.4	各样本的功率谱及维数分析	109
8.3.5	待检信号单一故障的分形维数诊断分析	111
8.3.6	待检信号复杂故障的分形维数诊断分析	112
8.3.7	待检信号耦合故障的分形维数诊断分析	114
8.4	基于广义分形特征的汽轮发电机组故障诊断	115
8.4.1	汽轮发电机组故障诊断方法概述	115
8.4.2	振动故障智能诊断方法的改进	116
8.4.3	汽轮发电机组故障诊断的分形方法	118
8.5	转子动力学分析与故障诊断方法	127
8.5.1	概述	127
8.5.2	振动分析的几种方法	128
8.5.3	旋转机械振动的基本特性	128
8.5.4	转子不平衡的诊断	128
8.5.5	故障机理	129
8.6	柔性转子单圆盘的动态分析	131
8.6.1	固有频率的计算	131
8.6.2	响应计算	133
8.6.3	柔性转子双圆盘的动态分析	134
8.6.4	柔性三圆盘转子的动态特性计算与不平衡故障诊断	136
8.6.5	基于振型的“三位法”故障诊断	140
8.6.6	基于连续体方法的转子动态特性计算与“三位法” 故障诊断	143
8.7	三圆盘转子系统的动态分析与计算	148
8.7.1	以简谐函数为振型函数的三圆盘转子系统固有 频率的计算	148
8.7.2	以静挠度方程为振型函数的三圆盘转子系统固有 频率计算	149
8.8	基于振动响应的“三位法”故障诊断	151
8.8.1	三圆盘系统的响应计算	151
8.8.2	1#圆盘受激振时的振动响应故障分析	153
8.8.3	2#圆盘激振时的振动响应故障分析	154
8.8.4	3#圆盘激振时的振动响应故障分析	155

8.9 基于分形的转子故障诊断分析	157
8.9.1 对转子试验台动态特性的分析	157
8.9.2 对转子试验台故障特性的分析	158
8.10 转子试验台的广义维数计算及故障诊断分析	159
第9章 李雅普诺夫指数在复杂机械故障诊断中的应用研究	163
9.1 研究背景	163
9.1.1 复杂机械系统中的非线性问题	163
9.1.2 复杂机械系统中的混沌	164
9.2 理论基础	164
9.2.1 混沌的特征描述	166
9.2.2 混沌时间序列的判别方法	166
9.2.3 李雅普诺夫指数	167
9.2.4 李雅普诺夫指数的数值计算方法	169
9.2.5 庞加莱(Poincare)映射	172
9.3 复杂机械故障状态下的实例计算及分析	172
9.3.1 汽轮发电机组故障状态的李雅普诺夫指数特征值 计算分析	172
9.3.2 汽车发动机气缸状态的李雅普诺夫指数计算分析	177
9.4 复杂机械设备状态的可预测性研究	180
9.4.1 基于混沌的复杂机械系统状态预测思想	181
9.4.2 基于李雅普诺夫指数的复杂机械系统状态可 预测性研究	182
9.4.3 混沌预测的理论基础	183
9.4.4 一维李雅普诺夫指数混沌预测模式	184
9.4.5 发电机组故障信号预测	187
9.5 基于柯熵的复杂机械系统状态最大可预测时间研究	189
9.5.1 柯尔莫哥洛夫熵 K	189
9.5.2 混沌系统最大可预测时间	190
9.5.3 时间序列的柯尔莫哥洛夫熵近似 K_2	190
9.5.4 汽车发动机运动状态最大可预测时间估计	191
第10章 等离子弧淬火表面条纹方向对摩擦性能影响的研究	194
10.1 表面分析方法	194
10.2 等离子弧淬火表面条纹方向试验结果与分析	194
10.2.1 滑动速度对摩擦系数的影响	194

10.2.2 接触应力对摩擦系数的影响·····	196
10.3 抗磨性能评定·····	197
10.4 摩擦和磨损表面形貌的分析·····	198
10.4.1 摩擦系数模型初探·····	198
10.4.2 淬火条纹方向润滑机理分析·····	200
10.5 等离子弧淬火表面网格方向对摩擦性能的影响·····	202
10.5.1 90—X 系列摩擦系数的变化·····	204
10.5.2 70—X 系列摩擦系数的变化·····	205
10.5.3 45—X 系列摩擦系数的变化·····	205
10.6 接触应力的影响·····	206
10.6.1 90—X 系列摩擦系数的变化·····	206
10.6.2 70—X 系列摩擦系数的变化·····	208
10.6.3 45—X 系列摩擦系数的变化·····	210
10.7 滑动距离对摩擦、磨损的影响·····	211
10.7.1 摩擦系数测试结果与分析·····	211
10.7.2 抗磨性能评定·····	212
第 11 章 电磁轴承控制系统设计与仿真研究 ·····	215
11.1 引言·····	215
11.2 电磁轴承的结构与控制系统设计·····	215
11.2.1 电磁轴承的结构设计·····	215
11.2.2 电磁轴承的控制系统设计与仿真·····	216
11.3 电磁轴承虚拟控制系统设计·····	219
第 12 章 电磁轴承控制的鲁棒稳定性研究 ·····	222
12.1 电磁轴承的控制的鲁棒性及控制器设计·····	222
12.1.1 电磁轴承的控制的鲁棒性及控制器设计·····	222
12.1.2 系统仿真研究·····	223
12.2 考虑系统不确定性的控制鲁棒稳定性研究·····	224
12.2.1 考虑电磁轴承不确定项的鲁棒控制器·····	225
12.2.2 考虑不确定项电磁轴承鲁棒控制器的系统仿真研究·····	226
参考文献 ·····	228

第 1 章 机械故障诊断概述

1.1 机械故障诊断发展概述

随着现代工业及科学技术的迅速发展,生产设备日趋大型化、高速化、自动化和智能化,特别是计算机技术的发展,现代设备的结构越来越复杂,自动化系统的规模越来越大,设备系统的元素间相互关联,紧密耦合,影响系统运行的因素量增加,使其产生故障或失效的潜在可能性越来越大,以至于传统的故障诊断技术正面临着挑战。现代化工业生产,一旦因故障停机,损失巨大。近年来,因关键设备故障而引起的灾难性事故时有发生,例如:1984 年 12 月,位于印度博帕尔市的美国碳化物公司农药厂,发生毒气泄漏事件,造成 2000 多人死亡,20 多万人受害,成为世界工业史上最大的恶性事故;1986 年 1 月 28 日美国航天飞机“挑战者”号的空中爆炸事件,导致 7 名宇航员全部遇难,损失总计达 12 亿美元;1984 年 4 月 27 日,苏联切尔诺贝利核电站的大量放射性元素外泄事件,约 2000 人死亡,几万居民撤离,损失达 30 亿美元,并且污染波及周边各国;1999 年发生在全世界的多起交通和核泄漏事故,造成大量人员死亡,经济损失不计其数。我国机械设备也发生过类似事故,如 1985 年大同电厂和 1988 年秦岭电厂的 200MW 汽轮发电机组的严重断轴毁机事件。

随着工业生产和科学技术的发展,机械设备的可靠性、可用性、可维修性与安全性的问题日益突出,从而促进了人们对机械设备故障机理及诊断技术的研究。特别是,近些年来,对复杂机械设备状态监测、故障诊断和预报问题越来越受到重视。

利用振动信号对设备进行诊断,是设备故障诊断中最有效、最常用的方法之一。机械设备和结构系统在运行过程中的振动及其特征信息是反映系统整体及其变化规律的主要信号。通过各种动态测试仪器拾取、记录和分析动态信号,是进行系统状态监测和故障诊断的主要途径。传统的基于快速傅里叶变换(FFT)的频谱分析方法是振动信号处理中最重要的途径,尤其是近代各种谱分析软件和谱分析仪的推出,使频谱分析方法得到了更为广泛的应用。但是,傅里叶分析方法存在着严重的不足,它只适于分析平稳信号,而不适于分析非平稳信号,这一缺陷限制了它在设备故障诊断领域中的应用。

对突变信号和非平稳信号的分析已成为工程技术中的一种需求。因此,寻求一种新的变换方法,使它既能够保持傅里叶分析的优点,又能够弥补傅里叶分析的不足,已经成为应用数学家和工程技术人员共同努力的前沿课题。

时频分析技术在机械故障诊断领域内的应用是在 20 世纪 90 年代兴起的,尽管这一方法对非平稳机械信号分析具有一定的潜在优势,但还远没有成为机械故障诊断的主流,一些科研人员正在逐渐扩大其应用领域。

小波分析作为一种新兴的理论,是数学发展史上的重要成果,它无论是对数学还是对工程应用都产生了深远影响,已广泛应用于理论数学、应用数学、信号处理、语音识别和处理、自动控制、图像处理、天体物理、分形等领域。小波分析比傅里叶分析优越之处体现在对复杂、非平稳信号的处理上,从原则上讲,即其具有局部化特性,可以聚焦到分析对象的任意细节,是对传统傅里叶分析的挑战。

复杂的机械系统(如汽车发动机)是一个多层次系统,各层次子系统之间不仅在结构和功能上存在差异,而且子系统之间存在着非常复杂的耦合关系。在影响这些关系的一些因素中,有些因素的变化具有不确定性,导致系统输出的复杂性变化。另外,从机械系统的时间演化角度来看,也可视为是一个复杂的非线性动力系统。对于一个非线性复杂机械系统的状态(或故障)进行长期预测,存在着“初始条件敏感性问题”,即相同的一种复杂机械系统(如汽车发动机),其初始工作条件(状态)存在微小差异,工作一定时期后,其工作状态和性能可能发生较大的差异。

分形与混沌理论是现代非线性科学的重要理论基础,也是目前研究非常活跃的理论,它特别适合于研究各种“复杂现象”。当前对于分形与混沌虽然还不能给出一个圆满的定义,但它所蕴含的意义已被逐步认识,而且不断地扩大。分维数、李雅普洛夫指数、信息熵是描述复杂系统混沌现象的重要特征参数。显然复杂机械系统的状态变化,通过特征参数可以给出其量化的描述,从而对机械系统给出状态评价,实现其故障诊断。

1.1.1 设备故障诊断技术的发展过程

设备诊断技术一直与设备维修紧密联系,因此,与维修的发展阶段相对应,机械设备故障诊断技术的发展可分为以下几个阶段。

(1) 事后维修阶段。在 19 世纪工业化初期,当时机器设备本身技术水平和复杂程度都很低,当设备在运行当中突然发生了故障,才被迫停机修理。在这种情况下,机械设备的某些运行参数使用余量已经用尽,因此导致了故障的发生。这一阶段的维修称为事后维修(Breakdown Maintenance)。故障诊断的目的就是迅速找到故障发生的部位,为机器的迅速修复提供依据。故障诊断是通过对所

备的解体分析并借助以往的经验以及一些简单的仪器来进行的。

(2) 预防维修阶段。进入 20 世纪后,随着大生产的发展,机器设备本身的技术复杂程度也有所提高,设备故障或事故产生的影响显著增加,从而出现了定期预防维修方式(Preventive Maintenance)。这一维修阶段的维修策略是以机械设备的可靠性为出发点,制定出最佳的维修周期。维修的主要种类有视情况检查、预防维修及预防性更换。预防维修立足于故障隐患消除在发生之前,也就不可避免地形成了一定程度的过剩维修。这时故障诊断的目的在于为合理的维修周期的制定提供依据,并在定期维修前检查突发性故障。这一阶段的诊断手段主要是一些简单的状态监测仪,多设有一定运行参数的报警值,能够对突发故障进行预测。

(3) 状态监测阶段。从 20 世纪 60 年代起,随着计算机技术、信号处理技术等的发展,设备诊断技术出现了更科学的按设备状态维修的方式。这一阶段以状态监测为中心,维修策略是定期地对设备的状态进行监测,依据监测的结果决定是否对设备进行维修。从而避免了预防维修中的过剩维修,大大降低了维修成本,这种维修也称为预测性维修(Predictive Maintenance)。诊断的手段是以信号采集与处理为中心,多层次、多角度地利用各种信息对设备运行状态进行评估。

(4) 智能管理阶段。进入 80 年代以后,人工智能技术和专家系统、神经网络技术的发展和在工程设计中的应用,使设备维修达到了智能化的程度。虽然这一阶段发展的历史并不长,但已有的研究成果表明,设备智能诊断具有十分广泛的应用前景。

近 30 年来,设备故障诊断技术不断吸取现代科学技术发展的新成果,从理论到实际应用都有了迅速的发展,已成为集数学、物理、力学、化学、电子技术、计算机技术、信号处理、人工智能等各种现代科学技术于一体的新兴交叉学科。其研究的内容主要反映在以下几个方面:

- ① 故障机理的研究;
- ② 故障信号处理技术的研究;
- ③ 人工智能专家系统与神经网络的研究;
- ④ 故障诊断装置的开发与研究。

1.1.2 设备故障诊断技术的现状

设备故障诊断技术是 20 世纪 60 年代初,由于军工、航天的需要发展起来的一门新技术,最早开展这方面研究的是美国。1965 年快速傅里叶算法的出现为故障诊断技术奠定了技术基础。70 年代末期,电子测量技术和频谱分析技术被应用到机械故障诊断领域中,国外大型旋转机械的状态监测与故障诊断技术开