

JIXIE GUZHANG XINHAO
DE LIANGZI JISUAN FENXI
JI ZHINENG ZHENDUAN

机械故障信号的 量子计算分析及 智能诊断

张培林 李胜 吴定海 李兵 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内容简介

机械故障信号的 量子计算分析及智能诊断

张培林 李胜 吴定海 李兵 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以量子计算为主要分析手段,以齿轮和轴向柱塞泵的振动信号为主要研究对象,研究了量子计算在机械设备故障信号特征提取、故障诊断与特征选择中的应用方法,提出了量子门神经网络、量子限制波尔兹曼机网络、量子门遗传算法和量子偏最小二乘法等算法,建立了一套以量子计算为基础的特征提取、模式识别和特征选择的理论体系,提高了机械设备故障信号智能诊断的效率和精度。

本书适合从事量子计算及其算法、机械设备故障诊断研究的科研人员使用,也可供相关专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械故障信号的量子计算分析及智能诊断/张培林等

著. —北京:国防工业出版社,2015.7

ISBN 978-7-118-10359-3

I. ①机… II. ①张… III. ①机械—故障—信号

分析 IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 156730 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10 $\frac{3}{4}$ 字数 204 千字

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

机械设备的工作环境一般都是高速、高压、高温、大负载,这样恶劣的工作条件会使机械设备较容易产生故障。一旦机械设备产生故障,导致设备工作迟缓或停止,将直接降低工作效率,甚至发生事故,造成人员伤亡和经济损失。因此,对机械设备进行故障诊断,研究高效、快速的信号处理和模式识别方法,对降低事故发生率、减少维修保障费用具有重大的经济和社会意义。

机械设备在工作时会产生振动,振动信号不仅含有工作状态的全部信息,并且能在设备不解体的情况下进行采集和分析。通常,研究人员将振动信号作为主要的研究对象,采用时频分析技术、遗传算法理论和神经网络等方法,构建一套完整的、以经典计算为基础的信号处理和模式识别理论体系,并取得了丰硕的成果。但是,在实际操作中,振动信号往往具有非线性、非平稳性,特征提取较为困难。

经典计算是现有方法的运算基础,被广泛应用到计算设备中。经典计算在运算过程中,是对数据逐个计算和存储,需要多个处理器和存储器,限制了处理效率,增加了存储空间。同时,目前现有的并行计算是通过多个处理器同时处理同一任务的不同部分,并通过信息融合,得到最终解。因此,以经典计算为基础的算法需要解决并行运算和存储容量等问题,进一步提高计算效率和计算速度以适应在线状态监测的信号处理和模式识别需求。因此,需要研究一种新的计算方式和计算方法,以大幅度地提高机械设备在线信号处理和故障监测的效率和精度。

量子计算(Quantum Computation)是近十年来迅速发展起来的一种新的计算方式。它以量子力学理论为基础,结合了信息科学和量子力学,形成了一套完整、独立的理论体系,具有严格的系统性和理论性。量子计算的计算方式不同于经典计算的“非0即1”的计算方式,以量子叠加态的方式对事物的状态进行描述,并利用幺正变换进行逻辑运算,解决问题,具有并行运算、指数级存储容量和算法的指数加速等优点,提高了数据的处理效率。经过几十年的研究和发展,量子计算已经成为解决信号处理和模式识别问题的一个主要方法。目前已被广泛地应用于语音降噪、图像处理、生物医学、函数寻优等领域。但是,在机械设备的信号处理和模式识别领域,量子计算的研究和应用较少,没有建立较为合理的信号处理和故障诊断体系,需要进一步明确计算方法和步骤,尤其针对振动信号的量子计算分析理论。

本书以量子计算为主要分析手段,以齿轮和轴向柱塞泵的振动信号为主要研

究对象,研究了量子计算在机械设备故障信号特征提取、故障诊断与特征选择中的应用方法,提出了量子门神经网络、量子限制波尔兹曼机网络、量子门遗传算法和量子偏最小二乘法等算法,建立了一套以量子计算为基础的特征提取、模式识别和特征选择的理论体系,提高了机械设备故障信号智能诊断的效率和精度。

本书共有 10 章,主要分为特征提取、智能诊断和特征优化三大部分。第 1 章介绍了课题研究的背景和意义,回顾了机械故障信号处理和智能诊断技术的研究现状。第 2 章介绍了量子计算的基本理论和发展现状,总结了量子计算及其方法在机械故障信号处理和智能诊断领域的研究现状。第 3 章设计了齿轮箱和液压系统的故障振动信号采集系统,利用量子傅里叶变换方法,提取了振动信号的原始特征,构建了新的特征体系;第 4 章设计了渐近式权值小波降噪的降噪方法,提出了基于希尔伯特-黄和 AR 模型的特征提取方法;第 5 章为寻找最优分类器,在原始特征集的基础上,研究了量子神经网络,提出了通用量子门神经网络,对机械故障信号进行模式识别;第 6 章针对量子神经网络存在的问题,研究了限制波尔兹曼机网络,建立了量子限制波尔兹曼机网络,提出了基于量子门的量子限制波尔兹曼机网络,获得了最好的机械故障信号模式识别性能;第 7 章以提取的原始特征集为对象,为剔除冗余和无关特征,提出了基于量子遗传算法和基于通用量子门遗传算法的机械故障信号特征选择方法,既减少了特征维数,又保留了机械故障状态中的故障信息;第 8 章介绍了遗传偏最小二乘法,解决了数据间多重性问题,取得了较好的特征选择效果;第 9 章建立了量子偏最小二乘回归分析方法,提出了基于量子遗传偏最小二乘法的机械故障信号特征选择方法,进一步加强了数据间的独立性,使得算法特征选择能力达到最佳,满足了机械设备振动信号在线状态监测和模式识别的要求;第 10 章设计与实现了基于故障树分析法和基于支持向量机混合推理的液压系统故障诊断专家系统,实现了基于人机交互的诊断推理。

本书是作者长期从事机械故障信号处理与故障诊断研究的总结,书中的各项实例都是作者多年的科研成果。在撰写本书的过程中,查阅了大量的国内外文献,总结了国内外在量子计算及其算法、机械设备故障诊断领域的最新研究成果,在此,作者向参考文献的作者致以诚挚的敬意。

由于作者水平所限,书中难免有疏忽之处,敬请广大读者指正。

作者

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 机械故障信号处理和智能诊断技术	1
1.2 机械故障信号的特征提取方法研究现状	2
1.2.1 傅里叶变换	2
1.2.2 小波变换	3
1.2.3 希尔伯特-黄变换	4
1.2.4 AR 模型	5
1.3 机械故障信号特征选择方法研究现状	5
1.3.1 遗传算法	5
1.3.2 遗传偏最小二乘法	6
1.4 机械故障信号智能诊断的研究现状	7
1.4.1 专家系统	7
1.4.2 神经网络	8
1.4.3 支持向量机	8
1.4.4 限制波尔兹曼机网络	9
第 2 章 量子计算基础	11
2.1 引言	11
2.2 量子力学概念	11
2.2.1 量子态及其特性	11
2.2.2 希尔伯特空间及其运算	12
2.2.3 幺正变换	13
2.3 量子比特表示	13
2.3.1 二维直角坐标	13
2.3.2 三维 Bloch 球面坐标	14
2.4 量子寄存器	14
2.5 量子门	14
2.5.1 单量子比特门	15

2.5.2	双量子比特门	15
2.5.3	通用量子门	15
2.6	量子线路	16
2.7	量子计算的研究现状	16
2.7.1	量子计算研究概况	17
2.7.2	量子计算在振动信号处理和智能诊断中的应用现状	19
第3章	机械故障信号的量子傅里叶变换特征提取方法	21
3.1	引言	21
3.2	机械故障设备常见故障	21
3.2.1	齿轮常见故障	21
3.2.2	液压系统常见故障	22
3.3	机械故障信号的采集系统	26
3.3.1	齿轮振动试验台架	27
3.3.2	液压系统综合检测试验设备	28
3.4	量子傅里叶变换	31
3.4.1	基本原理	32
3.4.2	算法实现步骤	32
3.4.3	仿真信号分析	33
3.5	量子傅里叶变换在机械故障信号特征提取中的应用	35
3.5.1	齿轮故障信号分析	35
3.5.2	轴向柱塞泵故障信号分析	38
3.6	本章小结	41
第4章	基于希尔伯特-黄和 AR 模型的特征提取方法	43
4.1	渐近式权值小波变换的降噪方法	43
4.1.1	小波变换用于信号降噪的原理	43
4.1.2	渐近式权值小波降噪方法	44
4.1.3	仿真实验分析	45
4.1.4	基于渐近式权值小波的轴向柱塞泵振动信号降噪	46
4.2	基于希尔伯特-黄变换和 AR 模型的特征提取模型	50
4.2.1	希尔伯特-黄变换	50
4.2.2	AR 模型	53
4.2.3	基于希尔伯特-黄变换和 AR 模型的特征提取模型	53

4.2.4 实例分析	54
4.3 本章小结	61
第5章 机械故障信号的量子神经网络分类方法研究	62
5.1 引言	62
5.2 量子 BP 神经网络	62
5.2.1 神经元模型	62
5.2.2 学习算法	63
5.3 量子 BP 神经网络的机械故障信号分类	64
5.3.1 齿轮故障信号分类	64
5.3.2 轴向柱塞泵故障信号分类	68
5.4 通用量子门的量子神经网络	71
5.4.1 神经元模型	71
5.4.2 算法描述	72
5.4.3 泛化性能分析	73
5.4.4 仿真结果对比	74
5.5 通用量子门量子神经网络的机械故障信号分类	76
5.5.1 齿轮故障信号分类	76
5.5.2 轴向柱塞泵故障信号分类	77
5.6 本章小结	79
第6章 机械故障信号的量子限制波尔兹曼机网络分类方法研究	81
6.1 引言	81
6.2 基于量子计算的限制波尔兹曼机网络(QRBM)	81
6.2.1 限制波尔兹曼机网络	82
6.2.2 QRBM 神经元模型	83
6.2.3 QRBM 的算法实现	84
6.2.4 网络参数的优化和更新	84
6.3 基于 QRBM 的机械故障信号分类方法	85
6.3.1 齿轮故障信号分类	85
6.3.2 轴向柱塞泵故障信号分类	87
6.4 基于量子门的量子限制波尔兹曼机网络	89
6.4.1 量子线路的搭建	89
6.4.2 学习算法	90

6.5	基于 QGRBM 的机械故障信号分类方法	91
6.5.1	齿轮故障信号分类	91
6.5.2	轴向柱塞泵故障信号分类	93
6.6	本章小结	95
第 7 章	量子遗传算法特征选择方法研究	96
7.1	引言	96
7.2	基于通用量子门的量子遗传算法(UQGN)	96
7.2.1	基本量子遗传算法	97
7.2.2	UQGA 的算法描述	98
7.2.3	收敛性证明	101
7.3	UQGA 在机械故障信号特征选择中的应用	102
7.3.1	UQGA 在齿轮故障信号特征选择中的应用	102
7.3.2	UQGA 在轴向柱塞泵故障信号特征选择中的应用	103
7.4	渐近式 Bloch 球面搜索的量子遗传算法	104
7.4.1	GABQGA 的基本原理	104
7.4.2	GABQGA 的算法描述	106
7.5	GABQGA 在机械故障信号特征选择中的应用	106
7.5.1	GABQGA 在齿轮故障信号特征选择中的应用	106
7.5.2	GABQGA 在轴向柱塞泵故障信号特征选择中的应用	108
7.6	本章小结	110
第 8 章	遗传偏最小二乘法特征选择方法研究	112
8.1	GAPLS 特征选择算法	112
8.1.1	遗传算法	112
8.1.2	偏最小二乘回归分析	114
8.1.3	GAPLS 算法	115
8.2	仿真实验	116
8.3	实例分析	118
8.3.1	基于 GAPLS 算法的轴向柱塞泵特征选择模型	118
8.3.2	基于 GAPLS 算法的手动换向阀特征选择模型	120
8.4	本章小结	123
第 9 章	量子遗传偏最小二乘特征选择方法研究	124
9.1	引言	124

9.2	量子偏最小二乘法	125
9.2.1	基本理论	125
9.2.2	学习算法	127
9.2.3	交叉检验的有效性分析	129
9.2.4	量子线路	130
9.3	量子遗传偏最小二乘法(QGAPLS)	130
9.3.1	QGAPLS 的算法描述	131
9.3.2	仿真结果对比	133
9.4	QGAPLS 在机械故障信号特征选择中的应用	134
9.4.1	QGAPLS 在齿轮故障信号特征选择中的应用	134
9.4.2	QGAPLS 在轴向柱塞泵故障信号特征选择中的应用	135
9.5	机械设备在线状态监测的 QGRBM 优化策略	136
9.5.1	改进的量子遗传偏最小二乘法	136
9.5.2	齿轮箱在线状态监测的 QGRBM 优化策略	138
9.5.3	轴向柱塞泵在线状态监测的 QGRBM 优化策略	139
9.6	本章小结	141
第 10 章	液压系统故障诊断专家系统的设计与实现	142
10.1	液压故障诊断专家系统总体设计	142
10.2	专家系统知识库	144
10.2.1	知识的获取	144
10.2.2	知识的表示	144
10.2.3	基于故障树的专家系统知识库的建立	144
10.2.4	故障树知识库管理界面	148
10.2.5	支持向量机知识库的建立	148
10.3	诊断推理功能的设计与实现	149
10.3.1	基于故障树分析的诊断推理的实现	150
10.3.2	支持向量机诊断推理模块的设计实现	150
10.3.3	解释机制	152
10.3.4	Delphi 调用 Matlab 的编程实现技术	153
10.4	本章小结	154
参考文献		155

第1章 概 论

1.1 机械故障信号处理和智能诊断技术

机械设备故障诊断技术是 20 世纪六七十年代产生并发展起来的综合性边缘学科,是一种识别机械设备运行状态、研究机械设备运行状态的变化及其在诊断信息中反映的学科,其研究的内容包括:运行状态检测、运行发展趋势的预测和故障的识别诊断三个方面。作为状态检测,就是当机械设备处于运行状态下,对其代表性的状态参数经常性地或定期地监测和分析,以便弄清机械设备所处的工作状态。状态检测包括采用各种测量、分析和判断方法,结合机械设备的历史状况和运行条件,为机械设备的性能评价、合理使用、安全运行及故障诊断打下基础。而故障诊断的目的则是进一步确定故障的性质、程度、类别、部位、原因,乃至说明故障发展趋势及影响等,为预报、控制、调整、维修提供依据。总而言之,状态检测及故障诊断是在基本不拆卸情况下,通过掌握设备过去和现在的运行状态,判明机械设备运行状态的优劣、是否安全、有无异常以及预测机械设备将来的可能状态,从而确定必要对策的技术。

美国是最早研究故障诊断技术的国家。早在 1967 年,在美国宇航局和海军研究所的倡导和组织下,成立了美国机械故障预防小组(MFPG),其研究的内容涉及故障的定义、轴承故障、现场监测、油料光谱分析、故障预报系统、飞机燃气轮机的故障、故障预防设计等多个方面,美国的诊断技术在航空、航天、军事、核能等尖端部门处于世界领先水平。20 世纪 60 年代末,英国国际机器保健和状态检测协会首先开始了故障诊断方面的研究,1982 年创立了沃福森工业维修公司,开展有关的研究和咨询工作。欧洲其他国家在设备诊断技术方面也有很大发展,如芬兰开发出新型自动磨粒监测和诊断系统,并已经在船用柴油机的液压系统中使用。日本的诊断技术研究始于 20 世纪 70 年代中期,机械故障诊断技术在某些民用工业,如钢铁、化工、铁路等部门发展很快。日立公司推出了核反应堆诊断管理系统,三菱公司研制了铁路机车诊断系统。

我国在故障诊断技术方面起步比较晚,在 20 世纪 70 年代末期开始。广泛的研究则从 20 世纪 80 年代开始发展起来,我国的故障诊断技术主要应用于石化、冶金和电力行业,进入 90 年代后,这一技术迅速渗透到国民经济的各个主要领域,目前仅在电力系统装备的国产监测与诊断系统就已达百套。故障诊断技术经过 30 多年的研究与发展,已应用于飞机自动驾驶、人造卫星、航天飞机、核反应堆、矿山

机械、石油化工过程与设备、工程机械等很多领域。

齿轮箱是用来改变转速和传递动力的常用机械传动装置,由于其工作环境恶劣,容易受到损害和出现故障,同时,齿轮箱中的零部件如齿轮、轴、轴承等加工工艺复杂,装配精度要求高,又常常在高速度、重载荷下连续工作,导致故障率相对较高。因此,齿轮箱的故障诊断研究一直是学者们重点研究的课题之一。目前,针对齿轮箱的故障诊断方法主要有性能参数分析法、振动分析法、油液分析法、噪声分析法和声发射分析法等。

随着工业现代化的发展,液压设备以其独特的优势在各行各业中得到广泛的应用。液压系统一旦发生故障,不仅导致设备受损,而且可能危及人身安全、造成环境污染,带来巨大的经济损失。因此,基于现代液压设备的可靠性及故障的及时排除,液压故障诊断技术与理论应运而生,它是建立在液压控制理论、信息理论和电子技术、传感器技术以及模式识别理论等基础上的一门综合性新学科。液压系统故障诊断技术的发展经历了几个代表性的阶段,具体如下:早期事后维修一定期预防维修一视情维修等。故障诊断的方法也经历了主观人工诊断、基于信号处理的诊断和智能故障诊断三个发展过程。液压系统故障诊断理论研究与应用虽然取得了一定的成绩,但是液压系统故障智能诊断的研究还处于起步阶段,需要进行许多方面的研究。

当前,机械设备故障信号处理和智能诊断技术主要集中在特征提取、模式识别和特征参数选择方法的研究。经过几十年的快速发展,各个方面的方法都得到了丰富和完善,建立了一套完整的以经典计算为基础的信号处理和智能诊断理论体系和实施方案。

1.2 机械故障信号的特征提取方法研究现状

特征提取广义上指的是一种变换,将处于高维空间的样本通过映射或变换的方式转换到低维空间,达到降维的目的。在机械设备振动信号处理中,常用的时频分析技术有傅里叶变换、小波变换、希尔伯特-黄变换和 AR 模型等。

1.2.1 傅里叶变换

傅里叶变换通过积分变换,利用其函数特性对信号进行分析,属于线性算子,变换形式和方法比较简单,具有良好的函数特性,被广泛应用于信号处理中。

邵忍平等人将傅里叶变换应用到齿轮故障诊断中,对齿轮的 4 种振动信号进行特征提取,获得了良好的效果。胥永刚等人对带通滤波后的信号做傅里叶变换,得到包络谱进而提取故障特征。L. Jiesi 等人在信号解调过程中,采用傅里叶变换,找到与故障特征信息最相关的特征,反映齿轮的工作状态。Z. Xiaojun 等人利用自适应的分形傅里叶变换滤波器对噪声进行抑制,提高信号特征的特性,通过自适应

方法决定滤波器的参数。

周岭等人对泵的内部流场进行模拟,进行了快速傅里叶变换分析,确定了产生压力脉动的原因以及参数之间的关系和影响,提高了可靠性。李胜等人针对水泵振动信号,采用短时傅里叶变换提取特征信息,与马尔可夫模型结合,建立了在线监测系统。Tanakz T. 等人采用高精度的傅里叶变换对飞行器中的隔膜泵进行特征提取,取得了不错的分类效果。J. S. Jarvis 等人采用傅里叶变换方法,对柱塞泵的压力脉冲特性进行分析,可以得到较为明显的特征值。

因此,傅里叶变换作为线性时频分析方法,能够清晰快速地处理信号,具有一定的时频分辨率,其灵活性和实用性较为突出,是一种有效的信号处理手段。但是,由于传统傅里叶变换是信号在频域的表示,使得时间分辨率为零,频域分辨率相同,且对非线性、非平稳信号具有不确定性,导致其应用范围有一定的局限性,影响了信号特征提取精确度,因此,需要一个新的研究角度。

1.2.2 小波变换

小波变换(Wavelet Transform, WT)是一种新的时频变换方法,它具有短时傅里叶变换局部化的特点,又克服了窗口大小不随频率变化的确定,采用一个随频率改变的“时间-频率”窗口进行信号处理。其主要特点就是对时间频率进行局部化分析,达到高频处时间细分,低频处频率细分,自适应地对时频信号进行分析,能有效地从信号中提取信息。

在齿轮故障诊断中,王江萍等人采集了齿轮传动系统在几种不同故障类型下的振动信号,从能量分布的角度,利用小波包对信号进一步量化、分解,有效地提取出齿轮故障信号特征。吴涛采用 db5 小波函数对齿轮箱振动信号进行分析,并准确地判断出齿轮裂纹故障。熊施园采用小波分析算法对 CAS5-20 变速箱信号进行分析,提取故障特征,明确故障位置,判断故障源。胥永刚等人提出了基于双树复小波包能量谱泄漏特性分析的故障诊断方法,选择出最佳分解层数和分量,有效地提取出齿轮故障信号的特征信息。

针对液压泵出口故障检测信号信噪比低、难以进行故障特征提取的特点,北京航空航天大学的王少萍等人采用小波分析进行消噪处理,利用具有紧支结构的小波函数进行分解和重构消除检测信号中的干扰成分,有效提取故障特征。燕山大学的姜万录等人提出了一种基于小波簇的带通滤波和包络解调新方法。通过合理地选择小波参数,用多个单 Morlet 小波组成的小波簇可构成具有零相移、平顶通带及快速衰减过度带特性的带通滤波器,用于提取振动信号的高频成分,结果表明该方法是有用的。东南大学的罗守华等人利用小波包分析的方法,对液压系统故障时的振动信号进行分析,从中提取相应的故障特征频段信号,计算出该特征频段的能量谱大小,实验结果表明,该方法用来解决液压系统的泄漏故障是可行的。西安交通大学的胡桥等人采用提升策略构造基于冲击故障信号特征的双正交小波,借

助提升小波包变换提取信号的敏感频带特征,从而通过对敏感频带中的小波包系数进行包络解调分析检测出故障特征频率。

小波变换是一种比傅里叶变换方法更加简单有效的信号处理手段,特别是小波变换的离散数字算法,因此,小波变换被成功地应用到各个领域,如语音合成、图像识别、数据压缩、医学诊断等。

1.2.3 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换(HHT)是一种新的具有自适应的时频分析方法,根据信号的局部时变特征进行自适应的时频分解,消除了人为的因素,克服了传统的方法用谐波分量来表示非平稳、非线性信号的缺陷,并可得到极高的时频分辨率,具有良好的时频聚集性。HHT的特点是通过信号的EMD分解,使非平稳信号平稳化,从而使希尔伯特变换后的瞬时频率具有物理意义。每个EMD分解出的IMF都是单组分的,相当于序列的每一点只有一个瞬时频率,无其他频率组分的叠加。瞬时频率是通过IMF进行希尔伯特变换得到,同时求得振幅,最后求得振幅-频率-时间的分布,准确反映系统的固有特性。应该指出的是,基于EMD的时频分析方法既适合于非线性、非平稳信号分析,也适合于线性、平稳信号分析,并且对于线性、平稳信号的分析也比其他时频分析方法能更好地反映了信号的物理意义。

湖南大学的程军圣采用HHT变换方法对旋转机械故障进行模式识别,尤其是对其非平稳信号,得到了不错的效果。华北电力大学的胡爱军在对旋转机械的振动信号进行分析时,利用EMD方法,得到了与故障信息对应的特征值。第二炮兵工程学院的江四厚等人针对高压齿轮泵壳体的振动信号,采用希尔伯特-黄变换方法提取信号的特征,并通过能量分布的棒图对比说明该方法的有效性,为有效地进行齿轮泵的故障模式识别奠定了基础。张亮采用希尔伯特-黄变换与中心有限差分相结合的方法,对齿轮箱典型故障信号的瞬时频率进行估计。雷亚国等人提出了一种基于总体平均经验模式分解和敏感IMF的改进HHT方法,通过仿真实验及转子早期碰磨故障诊断的工程实例验证了方法的有效性。耶晓东将HHT应用于轴承内外圈的故障诊断中,所求出的轴承故障信息特征具有有效性。孙海亮等人提出了一种改进相邻系数方法和非抽烟多小波变换融合的降噪方法,使用HHT做时频分析后,应用于行星减速器的早期故障诊断中,实验结果表明该方法可准确地提取微弱故障特征。张耀针对齿轮箱振动信号的非线性和非平稳特性,提出了一种基于EMD分解和自相关函数结合的方法,运用希尔伯特-黄变换根据信号特征自适应的分解,有效地提取故障特征频率,通过分析希尔伯特谱图和边际谱图实现齿轮的故障诊断。

与传统信号处理方法相比,希尔伯特-黄变换摆脱了线性和平稳性的束缚,适用于处理非线性、非平稳信号,能够自适应地产生“基”,对于突变信号具有很高的精度。

1.2.4 AR 模型

AR (Auto Regression) 模型是目前时序方法中研究最多、应用最广的参数模型。它不仅可以观测数据间的线性相关性,而且能从多方面研究系统的有关性能。

湖南大学的程军圣等人采用 AR 模型对滚动轴承、齿轮以及转子的各个 IMF 分量建立模型,以模型主要的自回归参数和残差的方差作为特征向量建立 Mahalanobis 距离判别函数,实验结果分析表明,该方法能有效地应用于滚动轴承的故障诊断。于德介对转子故障信号建立 AR 模型,取得了良好的效果。郑州大学的张晨罡采用经验模态分解与 AR 模型相结合的方法对滚动轴承故障进行振动信号特征提取,通过实例应用分析,提取的特征具有有效性和实用性,为滚动轴承的故障诊断提供了一种可靠有效的方法。

哈尔滨工程大学的孟令金对船舶运动极短期预报问题采用了 AR 模型,通过该方法预报未来几秒或十几秒内的舰船运动姿态,取得了较好的效果。天津大学的黄国龙对时间序列 ARMA、MA 和 AR 模型的机理研究,解决了 AR 建模中线性方程组无解情况下的参数估计问题,并成功应用于机械设备运行过程的状态预测。

张和平等人对电液集成液压控制系统建立 AR 模型,取得了很好的效果。燕山大学的高英杰研究了液压 AGC 系统的 AR 模型辨识方法及 AR 谱分析方法,结果表明该模型可以进行液压 AGC 系统的故障诊断和预报,且丰富简单、实用。

AR 模型是研究平稳随机过程有理谱的典型方法,具有较好的谱估计及优良的分辨率,但是参数估计较为繁琐。

1.3 机械故障信号特征选择方法研究现状

特征选择是剔除原始特征集中的冗余和无关特征的一种策略,该策略能够使得保留下的特征与故障信息最密切,进而提高智能诊断的效率。目前,常用的特征选择方法有遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、遗传偏最小二乘法 (Genetic Algorithm Partial Least Square, GAPLS) 等方法。

1.3.1 遗传算法

遗传算法是模拟生物进化策略和自然选择的一种计算模型,具有良好的全局寻优能力和自适应搜索方向调整策略,被广泛地用于信号处理、组合优化、控制工程等领域。

在齿轮故障诊断中,侯高雁等人针对形态学结构元素尺寸的选择,利用遗传算法优化形态学结构中的元素,自适应地寻找最优解,得到了较好的形态学结构模型。华北电力大学的刘迎在风电机组齿轮箱故障诊断中,利用遗传算法对最小二乘支持向量机中的参数进行选择,使得模式识别的精度和速度得以提升。

B. Samanta 等人在使用人工神经网络和支持向量机时,采用遗传算法对参数进行优化,同时也对齿轮箱的数据量进行约减,使得算法的性能更加优异。A. Hajnaeb 等人利用人工神经网络对不同状态的齿轮箱故障进行诊断,并对人工神经网络中的内部参数进行选择,提高了模式识别的效率。

在液压系统故障诊断中,曹斌等人针对液压泵信号的非线性和小样本问题,采用遗传算法实现了支持向量机核函数惩罚因子的自动优化选择,通过实验验证了算法的优越性。万俊盛等人将遗传算法应用于神经网络中,使得神经网络跳出局部极小值,利用液压齿轮泵进行实验验证。王涛等人为克服核主元分析中参数设置的盲目性和寻优效率低的问题,采用遗传算法进行参数寻优,并应用于齿轮泵的模式识别中。A. Azadeh 等人对离心泵进行故障诊断,采用遗传算法减少原始数据量和优化模型参数,取得了相当不错的分类效果。

通过对遗传算法的描述和应用,遗传算法具有很好的特征选择能力,尤其是在特征参数约减和优化算法参数方面具有很好的效果,但是,遗传算法存在的缺陷有,在寻优过程中易陷入局部极小值,计算量较大,其主要原因是算法参数更新策略和算法运算方式的问题。

1.3.2 遗传偏最小二乘法

遗传偏最小二乘法是将遗传算法和偏最小二乘法相结合的一种算法,它不仅具有遗传算法的全局优化能力,同时,也具有解决样本间多重共线性问题的能力,具有较好的特征选择能力及模型优化效果。因此,被广泛地运用到生物医学、物理化学、光学等领域,主要用于解决非线性问题。

欧阳爱国等人采用遗传偏最小二乘法筛选苹果可溶性固形物的光谱特征,建立了相对应的校正模型,提高了模型的预测能力。周竹等人为了快速检测马铃薯干物质含量的精度,采用遗传偏最小二乘法将特征数量减少到了 27 个,并建立了多元线性回归模型,实验证明,遗传偏最小二乘法是一种有效的特征选择方法。郭志明等人采用遗传算法最小二乘支持向量回归对近红外谱建立回归预测模型,实验证明,该模型具有较强的泛化能力和预测效果。Yaoze F. 等人在近红外光谱检测中,利用遗传偏最小二乘法对高光谱成像的特征维数进行降低,利用了较少的样本数量,得到了较好的回归模型。

在机械设备故障信号的特征选择方面,Tang J. 等人采集了球磨机振动信号,利用遗传偏最小二乘法对特征进行选择,建立操作参数和特征间的回归模型。李胜等人利用遗传偏最小二乘法对轴向柱塞泵的原始特征集进行了特征选择,更精确地找到最优解集,增强了特征信息的准确性和故障相关性。

虽然采用偏最小二乘法建立了回归模型,但是,在实际操作中,适应度函数和参数更新策略没有较大的改变,使得算法收敛速度达不到理想状态,并且也会出现陷入局部最优解的情况。这些情况对振动信号的特征选择是十分不利的,影响智

能诊断的精度和效率。

综上所述,关于信号处理与智能诊断技术的研究已经取得了很多成就,并且进行了广泛地应用。但是,由于科学技术地不断进步,使得信号处理方法与故障诊断技术也在不断发展,与时俱进,新技术、新方法的出现给机械设备振动信号的分析与智能诊断技术注入了新的活力。

1.4 机械故障信号智能诊断的研究现状

随着机器学习方法的不断发展,智能模式识别算法逐渐增多,越来越智能化,应用范围进一步扩大,目前,在机械设备故障诊断领域中,主要有专家系统、神经网络、支持向量机和限制波尔兹曼机网络等理论。

1.4.1 专家系统

机械设备初期的故障诊断主要是采用主观诊断法,即维修工程师凭借个人的实践经验,利用感官(看、闻、问、听、摸)或简单诊断仪器(压力表等),对机械设备的故障进行诊断,判别故障的部位及原因。经过长期的摸索和积累,总结出了一些实用的诊断方法,如方框图法、分析检测法、拆检元件法等。还总结出了可以将故障机理知识用图形或表格等形式直观且定性地表达的故障诊断方法,如鱼刺图分析法、逻辑链分析法、区段划分法等。这些诊断法的优点是方便、快捷、实用,但这类故障诊断方法也有其局限性,它要求诊断人员必须熟悉机械设备结构和工作原理,具备丰富的经验知识,并具有故障信息分析判断能力。因此,主观诊断法只能对简单机械设备故障进行定性判断和决策,对于复杂机械设备,仅靠个别专家的经验与知识是无法对故障进行准确定位与判断的。这类事后诊断方法需要频繁地拆卸与装配,降低了设备寿命和利用率,提高了维修成本。

故障诊断专家系统是研究最多、应用最广的一类智能诊断技术,它适合于难以建立数学模型的机械设备。它能够以人类专家的水平完成机械设备故障诊断的任务。故障诊断专家系统一般由知识库、推理机制、决策机制组成。专家系统因获取知识困难,推理简单,无自学习能力而存在局限性。因此,单一依靠专家系统的故障诊断难以满足实时性、灵活性等要求。专家故障诊断技术与其他诊断技术的结合是故障诊断领域的一个发展方向。东南大学的姜华研究了基于 WEB 的液压系统故障诊断专家系统,采用正向推理及深度优先的搜索方式,并将该系统运用到摊铺机液压系统的故障诊断中,收到了很好的效果。燕山大学的董敏等以板带轧机液压 AGC 系统为研究对象,根据专家系统基本原理,结合古典信号处理方法、模糊理论、神经网络理论,建立了系统故障诊断系统的结构形式和学习算法。利用模糊诊断理论进行模糊推理,利用神经网络对模糊推理模型进行训练以提高诊断的准确率,并可对未知的知识进行学习和补充。