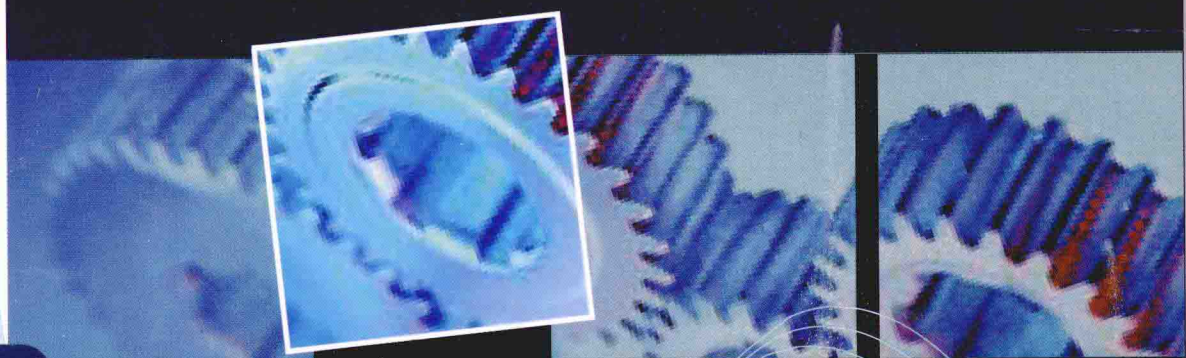


机械故障非平稳特征 提取方法及其应用

■ 田福庆 罗 荣 贾兰俊 魏军辉 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

机械故障非平稳特征提取 方法及其应用

田福庆 罗荣 贾兰俊 魏军辉 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书针对武器装备机械传动系统故障诊断问题,围绕非平稳背景下的故障特征提取技术,有的放矢地展开详细理论与应用研究,重点解决非平稳背景下武器装备微弱故障特征提取难题。本书详细阐述了第一代小波、第二代小波以及复解析小波等小波理论及这些理论衍生出来的故障诊断方法,介绍了这些方法在实际故障诊断中的应用现状及出现的问题,分析了这些问题出现的深层次原因。本书立足于非平稳特征提取的客观需要,对上述方法自身加以改进,力图克服这些方法在实际故障诊断中出现的问题,使之更加适合非平稳背景下的故障特征提取。本书通过大量数字仿真实验、实验信号分析以及工程应用案例,对本书的研究成果进行了验证与说明。

本书可供在机械、能源、武器装备等行业中从事机械设备状态监测、故障诊断的科技人员使用,也可作为高等院校机械工程、能源动力和信号处理等学科中从事与本领域研究相关的教师和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械故障非平稳特征提取方法及其应用/田福庆等编
著. —北京:国防工业出版社,2014.6
ISBN 978-7-118-09516-6

I. ①机... II. ①田... III. ①机械设备-故障诊断
IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 127508 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

※

开本 787×1092 1/16 印张 18½ 字数 439 千字

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 53.00 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

当今世界,新军事变革方兴未艾,大量高新技术不断涌入武器装备领域,极大地改变着战争形态,对武器装备的维修保障提出了越来越高的要求。我军装备目前大量采用的定期维修以及事后维修已经不能满足高强度、快节奏的现代战争需求。视情维修具有后勤规模小、经济可承受性好、自动化程度高、效率高以及避免灾难性事故、可实现自主保障等显著优势而拥有良好的应用前景。实现视情维修的前提是必须有相应的技术手段来保证能获得装备的真实运行状态,因此特征提取技术是视情维修的核心支持技术,也是目前故障诊断领域难点及研究热点。

机械传动系统是实现机械运动转化和功率传递的重要机构,在武器装备应用中相当广泛,其性能的好坏直接影响着武器装备的可靠性和安全性。机械传动系统同时也是交通运输、电力、石化等领域大型机组的“心脏”,故机械传动系统无论在国防现代化建设还是在国民经济发展中均发挥着极其重要作用。随着工业及科技水平的不断提高,机械传动系统正朝着大型化、高速化、精密化、自动化、智能化方向发展,其性能越来越完善的同时结构也越来越复杂,产生故障或失效的潜在可能性也越来越大,其运行安全性、可靠性问题也越来越突出。无论是实现运动转化还是功率传递,轴承和齿轮都是机械传动系统最关键,也是最易出现故障的部件。因此,对轴承和齿轮故障特征提取技术进行深入研究,对始终保持武器装备战备完好性、缩小保障规模、降低保障费用、提高武器装备保障效率和综合保障能力,有着重要的意义。

由于机械传动系统日趋复杂并且各部件之间相互关联、紧密耦合,影响设备运行的不确定因素不断增多,非线性特征越来越明显,使得轴承和齿轮故障性质呈现为非平稳性、复杂性、多故障并发性以及微弱性等。这些均给正确提取其故障特征、准确识别其当前运行状态带来很大的困难。因此,基于平稳性假设的特征提取方法在工程应用中则表现出特征信息提取困难等局限性,不再适用,取而代之的是非平稳信号特征提取方法。国内外在基于非平稳信号分析方面所做的研究工作有很多,出现了各式各样的非平稳信号方法。小波变换因具有优良的时-频局部化性能,是分析非平稳信号的有力工具,已广泛用于机械故障特征提取领域,并取得了一些研究成果。但这些研究对小波变换自身的局限性认识还不够,对在故障诊断中应用的适用性研究还不足。而且,相关研究大量集中在非平稳信号分析技术的直接应用和变换结果的一般解释,对于变换结果的更深层次处理和信息挖掘的研究还不够深入。因此,基于小波变换的特征提取效果远非人们预想的那么明显。所以,如何改进现有的小波变换方法,并结合其他方法(如细化谱分析、包络解调谱分析等)对小波变换结果进行进一步分析,充分发挥各类方法的优点,有效地提取非平稳背景下的微弱故障特征,以提高武器装备机械故障检测与诊断能力,更好地服务装备保障,成

为当前迫切需要研究的问题。

本书针对第一代小波、第二代小波以及复解析小波等方法在实际故障诊断应用中出现的问题,从理论层次上,详细探讨了这些问题出现的深层原因,并对上述方法本身加以改进,力图克服这些方法在实际故障诊断中出现的问题,使之更加适合非平稳背景下的故障特征提取。本书通过大量数字仿真实验、实验信号分析实例以及工程应用案例,对本书的研究成果进行了阐述与验证。

本书以小波变换为理论基础,以非平稳背景下的故障特征提取为研究目标,努力使本书形成以下特色:

(1) 具有先进性。本书总结本领域的最新研究成果,深入研究了第一代小波、第二代小波以及复解析小波等信号处理方法,并对其在故障诊断中应用的缺陷进行改进,这些均反映了微弱信号检测与非平稳特征提取研究及应用中的新进展。

(2) 具有实用性。本书介绍了基于小波变换的信号处理技术在故障诊断中的原理与应用,并提出了一些较为实用的故障诊断方法,这些对科研人员和工程技术人员具有一定参考价值。

(3) 具有可读性。本书以基于小波变换的非平稳特征提取为主线,内容深入浅出,结构安排合理。既有基本原理,又有综合方法,工程背景明确,案例分析详实,便于加深读者对本书内容的理解。

本书共分6章。第1章是绪论,介绍了机械故障特征提取技术的发展以及研究现状、小波变换的发展以及在机械故障特征提取的应用现状。第2章阐述了滚动轴承与齿轮振动机理,并对它们的故障特征进行了详细分析。第3章介绍了卷积型小波(包)变换,并提出了零相位卷积型小波(包)变换分解算法以及一类改进的卷积型小波包变换。第4章介绍了正交小波的构造原理,详细地研究了基于无限冲击响应滤波器组的正交小波构造。第5章介绍了第二代小波(包)变换的基本原理和冗余第二代小波(包)变换,深入研究了冗余第二代小波(包)变换中的误差积累问题,并提出了一类改进的冗余第二代小波包变换。另外,还提出了基于改进的冗余第二代小波包变换自适应 Teager 能量谱早期故障诊断方法。第6章介绍了复解析小波的特性及其解调原理,对现有的 Morlet 小波与谐波小波进行改进,并研究了基于改进后的 Morlet 小波与谐波小波自适应最优包络解调方法。另外,还提出了一类改进的谐波小波包变换,并与峭度图结合,提出了基于改进的谐波小波包峭度图的故障诊断方法。

由于本书作者学识和水平有限,虽然尽力而为,但仍难免会有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正,并给予谅解。

作者

2014年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 非平稳信号特征提取方法研究现状	1
1.1.1 短时傅里叶变换	2
1.1.2 二次型时频分布	2
1.1.3 循环平稳信号分析	3
1.1.4 经验模式分解	3
1.2 小波变换发展历史及其在非平稳故障特征提取中的研究现状	4
1.2.1 小波变换发展历史	5
1.2.2 小波变换在非平稳故障特征提取中的研究现状	6
第 2 章 滚动轴承与齿轮振动机理与故障特征分析	8
2.1 引言	8
2.2 滚动轴承振动机理与故障特征分析	8
2.2.1 滚动轴承典型结构与相关频率计算	8
2.2.2 滚动轴承振动机理及类型	10
2.2.3 滚动轴承故障振动数学模型	11
2.2.4 滚动轴承故障振动信号特性分析	12
2.2.5 滚动轴承损伤故障的包络谱特征	13
2.3 齿轮振动机理与故障特征分析	14
2.3.1 齿轮系统振动产生机理	14
2.3.2 齿轮振动基本参数	15
2.3.3 齿轮动力学简要分析	16
2.3.4 齿轮故障振动模型与振动信号的调制	17
2.3.5 齿轮故障的包络谱特征	19
2.4 试验装置简介	19
第 3 章 卷积小波变换及其在非平稳特征提取中应用	21
3.1 引言	21
3.2 连续小波变换基本理论	22
3.2.1 连续小波变换内积型定义	22

3.2.2	连续小波变换卷积型定义	24
3.2.3	小波变换自适应时频特性	25
3.3	内积型离散小波变换基本理论	26
3.3.1	离散小波变换定义及其重构	26
3.3.2	多分辨率分析定义与二尺度方程	29
3.3.3	正交多分辨率分析	31
3.3.4	内积型离散小波变换及其快速实现算法	33
3.3.5	内积型小波包变换及其快速实现算法	37
3.4	卷积型离散小波变换基本理论及其应用	41
3.4.1	卷积型离散小波变换及其快速算法	43
3.4.2	卷积型离散小波变换频率窗口特性与无显式小波幅频响应计算	47
3.4.3	零相位卷积型离散小波变换分解算法	50
3.4.4	仿真信号分解效果比较	52
3.4.5	实际故障信号分解效果比较	61
3.5	卷积型小波包变换及其应用	63
3.5.1	卷积型小波包变换分解算法	64
3.5.2	卷积型小波包变换频率窗口特性	66
3.5.3	零相位卷积型小波包变换分解算法	68
3.5.4	两类小波包变换微弱冲击特征提取能力比较	69
3.6	卷积型小波包变换在轴承故障定量识别中的应用	72
3.6.1	能量算子解调法基本理论	73
3.6.2	冲击脉冲法简介	76
3.6.3	滚动轴承故障诊断与定量识别方法	77
3.6.4	实验信号分析	78
3.6.5	工程应用实例	82
3.7	改进的卷积型小波包变换及其应用	84
3.7.1	卷积型小波包变换中频带错位原因分析及其消除算法	85
3.7.2	卷积型小波包频带重叠缺陷消除算法	88
3.7.3	仿真信号分析	90
3.7.4	应用实例	93
第4章	基于功率对称 IIR 滤波器的正交小波构造及其应用	97
4.1	引言	97
4.2	常用的模拟低通滤波器及其特性分析	98
4.3	共轭正交滤波器组及正交小波构造	104
4.3.1	共轭正交滤波器组基本理论	104
4.3.2	正交小波构造	106

4.4	基于功率对称的 IIR 滤波器的正交小波构造	109
4.4.1	Butterworth 共轭正交滤波器组设计及 Butterworth 小波构造	109
4.4.2	Chebyshev I 型共轭正交滤波器组设计及 Chebyshev I 型 小波构造	112
4.4.3	Chebyshev II 型共轭正交滤波器组设计及 Chebyshev II 型 小波构造	117
4.4.4	椭圆共轭正交滤波器组设计及椭圆小波构造	121
4.4.5	仿真信号分析	127
4.5	基于功率对称 IIR 滤波器组的小波在微弱故障特征提取中的应用	134
4.5.1	基于 Shannon 信息熵的小波包最佳分解	135
4.5.2	小波包频带能量监测技术	136
4.5.3	一种机械故障特征提取方法的提出	136
4.5.4	实验信号分析实例	137
4.5.5	工程应用实例	141
第 5 章	第二代小波变换及其在非平稳特征提取中的应用	145
5.1	引言	145
5.2	第一代小波变换在故障诊断中应用的局限性	146
5.3	提升方法基本原理	147
5.3.1	第一代离散小波变换分解与重构的多相矩阵表示	147
5.3.2	Laurent 多项式及其欧几里得分解算法	149
5.3.3	多相矩阵因子分解与小波提升原理	150
5.4	基于插值细分的第二代小波变换基本理论	151
5.4.1	基于插值细分原理的第二代小波变换基本步骤	151
5.4.2	第二代小波变换多相表示及其等效滤波器	153
5.4.3	预测器与更新器系数的计算方法	154
5.4.4	第二代小波等效滤波器特性分析	158
5.4.5	第二代小波尺度函数与小波函数	160
5.4.6	第二代小波变换在特征提取中存在的问题	162
5.4.7	第二代小波包变换及其在特征提取中存在的问题	164
5.5	冗余第二代小波变换及其改进	166
5.5.1	冗余第二代小波变换及其特性分析	167
5.5.2	改进的冗余第二代小波变换	172
5.5.3	改进的冗余第二代小波变换对信号的处理效果	178
5.6	改进的冗余第二代小波包变换及其在故障特征提取中的应用	181
5.6.1	冗余第二代小波包变换	182
5.6.2	冗余第二代小波包变换在故障特征提取中存在的问题及 消除算法	183

5.6.3	仿真实验	186
5.6.4	实例验证	188
5.7	基于改进的冗余第二代小波包变换自适应 Teager 能量谱早期故障 诊断方法研究	194
5.7.1	Teager 能量算子与 Teager 能量谱	196
5.7.2	频带幅值熵与共振带的自适应提取	196
5.7.3	基于改进的冗余第二代小波包变换自适应 Teager 能量谱早期 故障诊断方法	199
5.7.4	仿真信号分析	200
5.7.5	实验信号分析	203
5.7.6	工程应用实例	209
第 6 章	复解析小波及其在非平稳故障特征提取中的应用	212
6.1	引言	212
6.2	复解析小波基本理论	213
6.2.1	复解析小波定义及性质	213
6.2.2	复解析小波包络解调基本原理	214
6.3	Morlet 小波变换及复平移 Morlet 小波滤波器组	215
6.3.1	Morlet 小波的定义及其性质	215
6.3.2	Morlet 小波时频特性	216
6.3.3	Morlet 小波变换及其快速实现算法	219
6.3.4	复平移 Morlet 小波滤波器组	221
6.4	Morlet 小波改进及其在非平稳特征提取中应用	222
6.4.1	改进的 Morlet 小波及其特性	223
6.4.2	改进的 Morlet 小波在非平稳特征提取中应用	224
6.5	复平移改进的 Morlet 小波自适应最优包络解调及其应用	230
6.5.1	一种新的带宽参数优化方法	231
6.5.2	复平移改进的 Morlet 小波自适应最优包络解调方法	234
6.5.3	仿真验证	236
6.5.4	实验信号分析	239
6.5.5	工程应用实例	241
6.6	谐波小波概念	243
6.6.1	二进谐波小波概念及其性质	244
6.6.2	广义谐波小波定义及其变换	246
6.7	改进的谐波小波及其应用	248
6.7.1	改进的谐波小波提出及其特性分析	248
6.7.2	改进的谐波小波变换实现	252

6.7.3	仿真实验及分析	253
6.7.4	应用实例及分析	254
6.8	基于遗传算法与改进的谐波小波自适应最优包络解调方法及其应用	256
6.8.1	遗传算法概述	257
6.8.2	基于改进的谐波小波与遗传算法自适应最优包络解调方法	259
6.8.3	应用实例	260
6.9	改进的谐波小波包峭度图及其在非平稳故障特征提取中应用	264
6.9.1	通常谐波小波包变换及其实现	265
6.9.2	改进谐波小波包变换及其实现	266
6.9.3	谱峭度理论基础	270
6.9.4	改进的谐波小波包峭度图	272
6.9.5	实验数据分析实例	273
6.9.6	工程应用实例	276
参考文献		279

第1章 绪 论

1.1 非平稳信号特征提取方法研究现状

机械故障诊断的过程可以概括为信号获取、特征提取和诊断决策三个步骤,其中最关键也是最困难的问题之一就是特征提取,从某种意义上说,特征提取是当前机械故障诊断研究中的瓶颈问题。信号处理方法作为故障特征提取的重要手段,在机械故障诊断中发挥了重大作用。传统的特征提取方法主要采用基于平稳或近似平稳的各种经典信号处理方法,主要包括信号时域统计量分析、频谱分析、功率谱分析、相关分析、相干分析、传递函数分析、细化谱分析、包络解调谱分析、倒谱分析、平稳时间序列分析等。由于机械设备日趋复杂并且各部件之间相互关联、紧密耦合,影响设备运行的不确定因素不断增多,非线性特征越来越明显,使得其故障性质主要表现在下列方面。

1. 振动信号非平稳性

机械设备在出现故障,如裂纹、断裂、剥落、摩擦、松动、爬行、冲击、喘振、旋转失速、油膜涡动及振荡等时,可看作一个复杂的非线性系统,表现出的动态行为复杂多变,使得采集的信号频率、统计特性(包括时域统计特性和频域统计特性)均随时间不断变化,具有明显的非平稳特征。

2. 复杂性

由于各零部件之间相互联系、紧密耦合,致使故障原因与故障征兆之间表现出极其错综复杂的关系,即同一种故障征兆往往对应着几种故障原因(多因一果),同一种故障原因又会引起多种故障征兆(一因多果),这种原因与征兆之间不明确的对应关系,使得故障诊断具有极大的复杂性。

3. 多故障并发性

由于旋转机械日趋复杂,所以不可避免地存在多故障耦合的现象。通过有效方法把各个故障的特征都提取出来,并有效识别其故障类型是目前旋转机械故障诊断的关键与难点。

4. 微弱性

故障特征的微弱性表现在两个方面:一是故障特征信号本身微弱,如设备早期故障的特征信号;二是故障特征信号被强背景、邻近部件和传递环节的干扰信号所淹没,信噪比低。

上述这些使得故障特征信息的提取、分析和处理都相当困难。基于平稳性假设的信号处理方法,无法同时兼顾信号在时域和频域中的全貌和局部化特征,在工程应用中则表现出非平稳故障特征提取困难等局限性,不再适用,取而代之的是非平稳信号处理方法。对于非平稳故障特征的提取,一般首先是利用非平稳信号处理手段对信号进行时间-

频率或时间-尺度分解,然后再采用经典的信号方法(如细化谱分析、包络解调谱分析等)对分解的信号作进一步分析,通过两类信号处理方法的结合,充分发挥各类方法的优点,提取出对故障非常敏感的特征量,从而提高故障诊断的准确率^[1]。

至今为止,人们已经提出了多种应用于非平稳特征提取的非平稳信号处理方法,其中最具有代表性的有短时傅里叶变换、二次型时频分布、循环平稳信号分析、经验模式分解以及小波变换等。下面予以简要介绍。

1.1.1 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transformation, STFT)将非平稳信号假定为分段平稳,通过用一固定的滑动窗沿时间轴将信号截取为短的信号片段,前后信号片段之间的数据可以部分重叠。然后,对每一个信号片段进行傅里叶变换,就得到了任意时刻的频谱。将每个时刻的频谱按时间顺序排列得到信号的时频特性。STFT 突出了信号的局部特征,在机械故障诊断领域得到了一定的应用。Wang W.J.利用 STFT 得到的时频分布图诊断齿轮故障取得了较好效果;国内外的一些学者利用 STFT 得到的时频分布图估计旋转机械的瞬时转速;何正嘉利用 STFT 得到的时频分布图对大型电铲提升系统进行故障诊断,取得了电铲提升系统中的不确定摩擦特征;丁夏完等人根据自适应 STFT 得到的时频分布图诊断滚动轴承故障。

STFT 的结果可以粗略地反映信号中的频率成分如何随时间而变。窗函数的长短决定了时间精度。但在 STFT 变换过程中,一旦窗函数类型和长度选定就不再变化,因此其时间分辨率与频率分辨率在时频面内所有局部区域均是相同的,这就是 STFT 的固定时频分辨率局限性。另外,STFT 的实际应用中存在最佳窗长选择的难点。窗长决定了时间分辨率,窗长越短,时间分辨率越高,而频率分辨率越低;反之亦然。同一信号的 STFT 谱的清晰度会因窗长的不同变化很大;不同信号在同一窗长下的 STFT 谱的清晰度也有很大差别。以上两点,限制了 STFT 在工程上的应用。

1.1.2 二次型时频分布

最早问世的二次型时频分布是由量子物理学家 Wigner 于 1932 年在量子力学中提出的,1948 年 Ville 将其作为一种信号分析工具引入到信号处理领域,后人称这种分布为 Wigner-Ville 时频分布。随后,一些学者根据不同的应用需要,针对原始 Wigner-Ville 时频分布的缺点,提出了各种改进形式的时频分布。1966 年, Cohen 通过研究发现各种改进形式的时频分布完全可以用一个统一的形式表示。在这种统一表示里,通过对 Wigner-Ville 分布加不同的核函数可以得到不同的改进形式的时频分布。这种统一分布习惯上被称作 Cohen 类时频分布。Cohen 类时频分布是 Wigner-Ville 分布的一种滤波形式,其时频分布性能取决于核函数。因此,如何设计性能优异的核函数成为时频分布理论研究的一个重要内容。

Wigner-Ville 时频分布虽然具有非常高的时频分辨率,但因其是双线性变换,用于多分量信号分析时存在严重的交叉干扰项,这些干扰项会造成信号的时频分布特征模糊。因此,当二次时频分布用于振动信号分析时,如何避免交叉干扰项对分析结果的影响,众多学者提出了多种解决办法。Meng Q.F.等人采用对分析信号进行带通预滤波处理仅保

留感兴趣的单一频率成分来分析转子振动信号,取得了良好效果。但是这种方法对频率波动复杂的信号难以取得好的效果。另外,国内外的一些学者基于待分析信号的特点,设计了各种抑制交叉项良好的核函数,用于各类旋转机械零部件故障振动信号的时频分析,这些时频分析方法较好地反映了故障信号的时频特征。但是核函数的加入,在抑制交叉干扰项的同时,也降低了信号的时频分辨率。因此,当待分析信号的频率成分复杂且接近时,很难设计出一个核函数在满足抑制交叉干扰项的同时,又能保持分析所需的时频分辨率。虽然二次型时频分布在故障诊断领域的应用取得了一定的效果,但由于其对多分量信号分析以生俱来的缺陷,而现实故障诊断领域的非平稳故障信号往往频率成分非常复杂,当二次型时频分布应用到这些信号的时频分析时,分析效果一般都不太理想。交叉干扰项问题严重限制了二次型时频分布在故障诊断领域的广泛应用。近几年,随着其他各种新兴非平稳信号处理技术的出现,人们对二次型时频分布的研究热情逐步让位于这些新的非平稳信号处理技术。

1.1.3 循环平稳信号分析

循环平稳信号指的是一类特殊的非平稳时间序列,它们的信号特性表现为周期性平稳,即其统计特征函数随时间呈周期性或者多周期(各周期互质)的变化。循环平稳信号广泛存在于雷达、通信、遥感、机械等系统中。例如机械系统中滚动轴承、齿轮等以及一些往复机械产生的振动信号均可以认为是循环平稳信号,对这些信号进行循环平稳分析,可以有效地提取出淹没在高斯噪声中的周期性成分,较好地抑制噪声干扰。因此,从20世纪90年代后期开始,国内外一些学者开始深入研究机械故障诊断领域中的循环平稳信号分析方法。例如:L.Bouillaut等人^[2]研究了二阶循环平稳信号分析方法在齿轮故障诊断中的应用,取得了较好的效果。文献[3-9]以滚动轴承为研究对象,研究二阶循环平稳信号分析方法在轴承早期故障特征提取中的应用,并基于二阶循环平稳信号分析模型提出了各种不同的轴承故障特征提取方法,研究结果均表明循环平稳信号分析方法能提取出故障轴承振动信号中隐含的故障周期特征。文献[10-12]以内燃机、齿轮和滚动轴承三种旋转机械为研究对象,通过研究把旋转机械划分为简单循环平稳、多循环平稳和准循环平稳机械三大类,初步形成了旋转机械循环平稳信号模型,并在基础上提出了如何利用循环平稳信号处理手段来区分轴承和齿轮故障特征。另外,一些学者针对噪声和干扰信号对轴承、齿轮的循环平稳解调分析的影响,尝试把小波分析方法引入到轴承、齿轮的循环平稳分析中,取得了初步的效果^[10]。

尽管循环平稳信号分析在机械故障诊断领域的应用取得了不少成绩,但是还有一些关键问题需要深入研究。例如:如何对算法进行改进、减少计算量,提高分析速度;在非高斯、非平稳噪声环境中如何提高轴承、齿轮的循环平稳解调分析方法的鲁棒性等。

1.1.4 经验模式分解

经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法是由美国宇航局的Norden E Huang等学者于1998年提出的,该方法被认为是近年来对以傅里叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破。通过该方法可以以自适应基的形式,将原时间信

号中的高频波动和低频波动分解到不同的内模函数中。由于 EMD 方法是自适应的信号处理方法,对稳态信号和非平稳信号都能进行分析,因此,自从该方法诞生以来就得到众多领域学者的广泛关注。目前,该方法已用于地球物理学、生物医学、图像处理、故障诊断等领域的研究,并取得了较好的效果。

利用该方法进行故障诊断是目前机械故障诊断领域一个比较热门的课题。如重庆大学的钟佑明等人将该方法用到了磨床主轴振动信号的分析^[13];湖南大学的于德介教授等开始把该方法用于齿轮和轴承的故障诊断^[14];大连理工大学的马孝江教授和他的学生们对经验模态分解在故障诊断领域的应用也展开了研究^[15,16]。

文献[17-19]研究了 EMD 方法在轴承故障诊断中的应用,通过对原始信号进行 EMD 分解后得到的单个内模函数或多个内模函数的组合信号进一步采用解调分析、AR 谱分析或其他经典信号分析方法来提取故障特征,成功地提取出了轴承故障特征信息。

由于 EMD 方法是新近提出的信号分析方法,其理论并不完备,缺少严密的数学基础支持,而且其应用还存在一些重要问题需要解决或改进。这些问题主要包括包络线和均值曲线的拟合问题、零均值问题、端点效应问题、内模函数筛选标准问题和模态混叠问题等。这些问题的存在使得有时经 EMD 分解得到的内模函数缺乏相应的物理含义,严重制约了其特征提取的效果。

针对以上问题,一些学者对原始分解方法提出了不少改进方法。例如:学者盖强等受积分中值定理启发探索了极值域均值模式分解 EEMD 经验筛法^[20, 21],并提出了波形匹配预测法的边界处理算法;针对端点效应问题,文献[22]和文献[23]分别提出了神经网络预测和 AR 模型预测方法来抑制端点效应。这两种方法虽然在一定程度上可以减小端点效应,但均存在一定的应用局限性,并不完善。针对模态混叠问题,文献[24]和文献[25]分别提出了集合平均、小波滤波和周期信号插入等方法来消除模态混叠现象。然而,当原始信号信噪比较低时,以上三种模态混叠消除方法效果不理想,分解后得到的内模函数中往往仍然存在严重的模态混叠现象,严重干扰了微弱故障特征的提取。总之,经验模式分解方法在机械故障领域得到了大量应用,但 EMD 算法的应用中存在的以上问题制约了该方法的进一步推广。

1.2 小波变换发展历史及其在非平稳故障特征提取中的研究现状

小波变换是近年来新兴起来并得到迅速发展的非平稳信号处理技术,被认为是非平稳信号分析方法上的重大突破。经过半个世纪以来数学家、物理学家、地理学家的共同努力,小波变换已发展成为一个新兴的、系统并且完备的理论,被认为是继傅里叶分析以来一个新的里程碑。

小波变换吸取了傅里叶变换中的三角基函数与短时傅里叶变换中的时移窗函数的特点,形成了不胜枚举的振荡而又衰减的基函数,小波变换的基本思想即是用一个基函数,通过平移和伸缩构成的小波函数系去表示或逼近信号或函数。小波变换通过变尺度滑动窗沿时间轴对信号分段截取后进行分析,不仅可以实现信号在不同时刻、不同频率的合理分离,在时域和频域都具有描述信号局部特征的能力,而且具有自适应时频特性,变

换结果不存在交叉项。因此,小波变换克服了短时傅里叶变换固定时频分辨率的缺陷,避免了二次型时频分布中交叉项对分解结果的影响,也不存在经验模态分解理论基础不完善的问题。故众多的非平稳信号分析方法中,小波变换的应用最为广泛。基于此,本书将主要研究基于小波变换的非平稳故障特征提取方法。

1.2.1 小波变换发展历史

任何理论的提出和发现都有一个漫长的准备过程,小波分析也不例外。小波变换的思想来源于伸缩和平移方法,可追溯到1910年数学家 Haar 提出的小波规范正交基以及1938年 Littlewood-Paley 提出的二进频率分组和对傅里叶变换的相位变化本质上不影响函数的 L-P 理论。小波变换理论自出现以来,深受科学家和工程技术人员的重视,其理论日臻完善,应用领域不断扩大。小波变换被认为是非平稳信号分析方法上的重大突破。

1984年, J. Morlet 在分析地震数据的局部性时首先引进了小波概念。之后, A. Grossman 对 Morlet 提出的伸缩、平移小波概念的可行性进行了研究,开创了小波分析的先河。

1986年,法国著名数学家 Meyer 从理论上对小波作了一系列研究,通过二进伸缩与平移构造了 $L^2(R)$ 的规范正交基,实现了信号在时频空间同时局部化的正交分解,同年, Lemarie 和 Battle 分别提出了具有指数衰减性质的小波函数,从而掀起了小波研究热潮。1988年, I. Daubechies 构造了具有紧支特性的正交小波基,从而给数字信号的小波分解提供了更实际、更具体的数字滤波器,为小波的工程应用奠定重要基础,这是小波分析发展历史上一个里程碑式的进展。同年,由于受到 Burt 和 Adelson 在计算机视觉方面有关工作的启发,法国数学家 Mallat 将计算机视觉领域内的多分辨率分析思想引入到小波分析中,提出了小波多分辨分析的理论框架,从而成功地统一了在此之前 Stromberg、Meyer、Battle 和 Lemarie 等提出的多种小波函数构造方法,为正交小波基的构造提供了一般途径。同时他还研究了小波变换的离散化问题,提出了著名的 Mallat 算法,显著地减少了计算量,其小波变换中的地位如同 FFT 在傅里叶变换中的地位,使小波分析具有明显的工程应用价值^[26,27]。

Daubechies 与 Mallat 对小波分析的卓越贡献,使其迅速在信号奇异点检测、压缩与降噪等领域得以广泛应用。此外,小波良好的时域与频域局部化能力使其在机械轴承、齿轮零部件故障特征频率的分离及各种微弱故障特征信息提取方面发挥巨大作用,并成功解决大量工程实际问题。

从20世纪90年代开始,小波分析进入了蓬勃发展的阶段,取得了许多重要成果。例如:1990年,崔锦泰和王建中建立了基于样条函数的正交小波函数^[28];1992年, Coifman 和 Wickerhauser 提出了小波包的概念及算法,它推广了 Mallat 算法,构造了一种更精细的分解方法,这标志着小波分析的系统理论框架得到了初步建立^[29];1992年, Cohen、Daubechies 和 Feavean 提出了具有紧支性、对称性的双正交小波基函数的构造方法^[30];1994年, Mallat 提出时频原子的概念,给出了匹配追踪算法^[31]; Swelden 提出了提升小波变换(即二代小波变换)^[32, 33],使得小波的构造更为灵活,并导致了整型小波变换的出现^[34]; Goodman 和 Lebrun 等提出了多小波理论; Candes 和 Donoho 等提出了脊小

波理论、曲小波和楔小波(wedgelet); 剑桥大学 Kingsbury 等学者于 1998 年提出了双树复小波变换。

进入 21 世纪, 小波研究继续向深广方面发展。C.K. Chui 等人对框架波(framelet)理论进行了系统的研究; I.W.Selesnick 也提出了双密度双树离散小波变换和高密度离散小波变换。综上所述, 小波变换诞生三十多年来, 深受科学家和工程技术人员的高度重视, 其理论日臻完善, 其算法得到了突飞猛进的发展, 已从二带扩展到多带小波、从一维扩展到多维、从一个小波基扩展到多个小波基函数。与此同时, 小波变换在许多领域, 比如图像处理、量子力学、地球物理学、语音识别、数值分析、故障诊断等, 获得十分广泛的应用, 均取得了丰硕的研究成果。下面简要介绍小波变换在非平稳故障特征提取中的应用状况。

1.2.2 小波变换在非平稳故障特征提取中的研究现状

小波变换作为最有效的非平稳信号处理技术之一, 在机械故障诊断领域获得了广泛深入的应用。学者何正嘉等人在文献[35]中总结简述了小波技术的理论研究及其在旋转机械、往复机械、齿轮、轴承、疲劳损伤等方面的应用中所取得的成就与进展。彭志科等人在文献[36]中对小波分析理论在特征提取与故障诊断领域的应用现状进行了总结, 重点介绍了小波变换在微弱信号的消噪与提取、非平稳故障特征提取、故障信号的时频分析、振动信号压缩以及系统和参数辨识等方面的应用。

小波变换在机械故障诊断领域中主要应用模式大致可以分为以下两种:

(1) 将小波变换用于滤波, 提高信噪比。具体的滤波方法又可以细分为三大类: 基于小波(包)变换的线性滤波; 基于小波(包)阈值收缩的非线性滤波; 信号匹配追踪分解。

(2) 根据小波变换结果中极大值点的位置, 确定信号发生的时刻或空间位置, 从而推断故障发生的周期或部位。

在这些应用模式中, 将小波变换用于线性滤波占的比重最大。广泛应用的小波(包)分解算法、连续小波变换算法实质均是一种特殊的滤波器组分解线性滤波算法。虽然基于小波(包)阈值收缩的非线性滤波、信号匹配追踪分解在故障诊断领域也有大量的应用, 但是分析这些算法的实质可知, 在低信噪比条件下, 它们的应用效果并不好, 因此它们并不适合于微弱故障特征提取, 其应用局限性较大。

随着小波变换在故障诊断领域的深入应用, 一些学者逐渐认识到小波变换方法在故障诊断应用中的局限性。例如:

(1) 经典的 Mallat 算法用于故障特征提取存在频率折叠、信号失真等局限性。

(2) 为了更好地分离出微弱故障特征, 往往要求实际滤波器频率特性尽量接近理想滤波器, 常用的 db 系列小波滤波器一般不能满足此要求, 以致小波的特征提取效果还不如常规滤波器。

(3) 冗余第二代小波(包)对信号分解存在严重的误差积累问题, 以致分解后信号的总能量远远大于原始信号总能量。

(4) Morlet 小波是左右两边严格对称的振荡衰减信号, 其能够有效匹配的故障冲击响应特征波形是很有限的。虽然相对于其他常用的小波基函数而言, Morlet 小波波形与轴承、齿轮等零部件故障响应信号特征波形相似度较高, 但其匹配度仍然有待进一步提高。

(5) 谐波小波拥有完美的“盒形”谱，所以其拥有极强的频带分离能力，但其对信号分解会在时域内产生 Gibbs 现象，平滑掉部分故障冲击特征。

(6) 尽管小波变换有较强的时频局域化能量，能将信号分离到不同的频带，有利于故障特征提取，但为了充分挖掘故障特征，其存在从分解后的子带中提取故障调制频带(比如共振带)的难题。

本书正是针对小波变换在机械故障诊断中出现的上述缺陷，有的放矢地展开详细的理论与应用研究，分析这些缺陷出现的深层次原因，并对此进行了改进，以期使小波变换的非平稳故障特征提取效果有所改善，在机械故障诊断中的应用水平有所提高。