



湖南大学出版社
图书出版基金资助项目

机械故障振动信号的 局部均值分解方法

程军圣 张亢 杨宇 著

湖南大学出版社



湖南大学出版社
图书出版基金资助项目

机械故障振动信号的 局部均值分解方法

程军圣 张亢 杨宇 著

湖南大学出版社

内 容 简 介

本书是在完成国家自然科学基金“局部均值分解(LMD)方法及其在机械故障诊断中的应用研究”(编号:50775068)的基础上完成的,其研究方法是目前国内外故障诊断研究的新方向。

本书介绍了新的信号处理方法——局部均值分解(Local mean decomposition, LMD)方法,对LMD方法的理论问题进行了研究和完善,并提出了一系列基于LMD的机械故障诊断方法。

本书可供大专院校教师、研究生和高年级学生阅读,还可供从事信号处理和机械故障诊断的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械故障振动信号的局部均值分解方法/程军圣,张亢,杨宇
著. —长沙:湖南大学出版社,2013.12

ISBN 978 - 7 - 5667 - 0587 - 7

I. ①机… II. ①程… ②张… ③杨… III. ①机械振动—振
动分析—信号分析 IV. ①TH113.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第308670号

机械故障振动信号的局部均值分解方法

JIXIE GUZHANG ZHENDONG XINHAO DE JUBU JUNZHI FENJIE
FANGFA

作 者:程军圣 张亢 杨宇 著

责任编辑:黄 旺 责任校对:全 健 责任印制:陈 燕

印 装:长沙利君漾印刷厂

开 本:787×1092 16开 印张:9.75 字数:226千

版 次:2013年12月第1版 印次:2013年12月第1次印刷

书 号:ISBN 978 - 7 - 5667 - 0587 - 7/TH·54

定 价:24.00元

出 版 人:雷 鸣

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山 邮 编:410082

电 话:0731-88822559(发行部),88821315(编辑室),88821006(出版部)

传 真:0731-88649312(发行部),88822264(总编室)

网 址:<http://www.hnupress.com>

电子邮箱:274398748@qq.com

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

前 言

局部均值分解(Local mean decomposition, LMD)是一种新型的信号处理方法,非常适合处理非线性、非平稳信号。该方法可以将一个复杂信号自适应地分解为若干个瞬时频率具有物理意义的 PF(Product function, PF)分量之和,每一个 PF 分量都与一定的物理过程相对应,然后将各个分量的瞬时频率和瞬时幅值组合便可以得到原始信号完整的时频分布。LMD 方法的创新点在于将一个单分量的调幅—调频信号看成是其本身的包络信号和一个纯调频信号的乘积,通过定义局部均值函数和包络估计函数,在对原始信号不断平滑的过程中获得瞬时频率具有物理意义的纯调频信号和相应的包络信号,然后将纯调频信号和包络信号相乘便可以得到一个 PF 分量,每个 PF 分量实际上是一个单分量的调幅—调频信号,这样使得 LMD 方法非常适合于处理非平稳和非线性信号,特别是多分量的调幅—调频信号。特别重要的是, LMD 方法是依据信号本身而进行的自适应分解,得到的每一个 PF 分量都具有一定的物理意义,反映了信号的内在本质,因此 LMD 方法是自适应的信号处理方法。

自 LMD 方法提出以来,就引起了众多学者的关注。作为一种新型的自适应信号处理方法,目前已经被广泛地应用于机械故障诊断、结构损伤检测、生物脑电波处理等领域。然而,目前国内还没有介绍 LMD 方法的著作问世,本书正是在这样的背景下完成的。

本书主要内容来源于国家自然科学基金项目“局部均值分解(LMD)方法及其在机械故障诊断中的应用研究”(编号:50775068)的研究成果,同时也参考了国内外相关领域有关 LMD 的学术论文。本书详细地研究了 LMD 方法,对其理论问题进行了研究和完善,并在此基础上,将 LMD 方法引入了机械故障诊断,提出了一系列的基于 LMD 的机械故障诊断方法。

本书以理论研究和实际应用为目的,研究了 LMD 方法的基本理论及其在机械故障诊断中的应用。全书共分 7 章。第 1 章研究了目前常用的几种非平稳信号分析方法的优劣及其局限性;第 2 章介绍了 LMD 方法的基本理论;第 3 章对 LMD 方法的理论问题进行了研究和改进;第 4 章结合旋转机械的故障机理,提出了基于 LMD 的瞬时频率谱和局部能量谱方法;第 5 章提出了基于 LMD 和谱峭度的包络分析方法,并将其应用于滚动轴承故障诊断;第 6 章将 LMD 方法与形态学相结合应用于旋转机械故障诊断;第 7 章提出了基于 LMD 的包络阶次谱方法并应用于齿轮和滚动轴承的故障诊断。

目次

第1章 绪论

1.1 旋转机械故障诊断技术的研究意义和现状	001
1.1.1 旋转机械故障诊断技术的研究意义	001
1.1.2 旋转机械故障诊断技术的研究现状	001
1.2 时频分析方法	004
1.2.1 传统时频分析方法	004
1.2.2 Hilbert-Huang 变换	007
1.3 局部均值分解方法	009

第2章 局部均值分解方法

2.1 引言	013
2.2 LMD 方法	014
2.2.1 乘积函数分量及其特点	014
2.2.2 LMD 算法	015
2.2.3 基于 LMD 的时频分析	020
2.2.4 LMD 方法的特点	022
2.3 与其他时频分析方法的比较	024
2.3.1 与传统时频分析方法的比较	024
2.3.2 与 HHT 方法的比较	025

第3章 LMD 方法的理论研究及其改进

3.1 引言	031
3.2 滑动平均步长的研究	031
3.2.1 滑动平均步长的影响	031
3.2.2 滑动平均步长的选取	035
3.2.3 实验方案	035
3.2.4 实验信号分析	036

3.3 纯调频信号判据的研究	038
3.3.1 概述	038
3.3.2 正交性判据	039
3.3.3 OC 判据的应用	040
3.4 LMD 方法中端点效应的处理	045
3.4.1 概述	045
3.4.2 LMD 端点效应的处理	046
3.4.3 应用	049
3.5 基于噪声辅助分析的总体局部均值分解方法	056
3.5.1 模态混淆产生的原因	056
3.5.2 LMD 方法分析白噪声信号	057
3.5.3 噪声辅助分析的总体局部均值分解方法	060
3.5.4 实验信号分析	061
3.6 基于有理样条函数插值的 LMD 方法	065
3.6.1 基于有理样条函数插值的 LMD 方法的原理	066
3.6.2 仿真信号分析	067
3.6.3 实验信号分析	069

第 4 章 基于 LMD 的瞬时频率谱和局部能量谱方法

4.1 引 言	074
4.2 基于 LMD 的瞬时频率谱方法及其齿轮故障诊断原理	074
4.3 在齿轮故障特征提取中的应用	077
4.3.1 实验信号分析	077
4.3.2 实际信号分析	079
4.4 基于 LMD 的局部能量谱方法及其齿轮故障诊断原理	082
4.5 在齿轮故障特征提取中的应用	083
4.5.1 实验信号分析	083
4.5.2 实际信号分析	086

第 5 章 基于 LMD 和谱峭度的包络分析方法

5.1 引 言	089
5.2 基于 LMD 和谱峭度的包络分析方法及轴承诊断原理	089
5.3 在滚动轴承故障诊断中的应用	092
5.3.1 仿真信号分析	092
5.3.2 实验信号分析	096

第 6 章 基于 LMD 和形态学的旋转机械故障诊断方法

6.1 引 言	104
---------------	-----

6.2 形态谱和形态谱熵原理	105
6.2.1 多尺度形态学理论	105
6.2.2 形态谱和形态谱熵	106
6.2.3 仿真信号分析	107
6.3 基于 LMD 的形态谱和形态谱熵及其在转子系统故障诊断中的应用	109
6.3.1 诊断原理	109
6.3.2 在转子系统故障诊断中的应用	109
6.4 基于 LMD 的形态学分形维数及其在滚动轴承故障诊断中的应用	118
6.4.1 诊断原理	118
6.4.2 形态学分形维数的估计	119
6.4.3 仿真信号分析	120
6.4.4 在滚动轴承故障诊断中的应用	122

第 7 章 基于 LMD 的包络阶次谱方法

7.1 引 言	125
7.2 基于 LMD 的包络阶次谱方法	126
7.2.1 计算阶次跟踪法	126
7.2.2 基于 LMD 的包络阶次谱	127
7.3 在旋转机械故障诊断中的应用	128
7.3.1 在滚动轴承故障诊断中的应用	128
7.3.2 在齿轮故障诊断中的应用	133

参考文献	136
------------	-----

第1章 绪论

1.1 旋转机械故障诊断技术的研究意义和现状

1.1.1 旋转机械故障诊断技术的研究意义

旋转机械是机械设备中的一个重要大类,同时也是现代工业生产中必不可少的重要组成部分,它们在电力、冶金、采矿、运载工具等国家支柱行业和关系到国家安危的军工行业中都有着广泛的应用,并且是这些行业内的关键性、决定性设备。然而,旋转机械设备,一方面由于所处的工作环境恶劣,并且通常是连续满负荷地运行,其零部件不可避免的会出现劣化;另一方面随着科学技术的进步,以及现代化生产规模的不断壮大,旋转机械设备正朝着大型化、复杂化、精密化的方向发展,且数量也在迅速增长,这些都决定了旋转机械设备发生故障的概率较高^[1]。而此类设备一旦发生故障,不但维修费用高,维修周期长,而且严重时会给企业、国家造成巨大的经济损失,甚至在某些高危领域还可能造成大量人员伤亡的灾难性后果^[2,3]。因此,在旋转机械设备的作用与数量迅猛发展的同时,其可靠性和安全性也是不容忽视的,研究旋转机械故障诊断技术是势在必行的,并且具有重要的经济意义与社会意义。

旋转机械故障诊断技术,本身并不是一门单一的基础学科,而是一项融合了多门基础学科如数学、力学、信号分析以及计算机理论等的综合性应用技术^[4]。近年来,随着这些基础学科的发展,旋转机械故障诊断技术取得了长足的进步,在保障生产安全、提高生产效率方面发挥着日益重要的作用。但是另一方面不能忽视的是由于旋转机械设备事故带来巨大经济损失以及造成重大人员伤亡的事件仍时有发生,这说明旋转机械故障诊断技术仍存在着诸多不足,还不能完全满足生产现场的实际需求。因此,研究旋转机械故障诊断的新技术、新方法,仍然是重要且紧迫的。

1.1.2 旋转机械故障诊断技术的研究现状

旋转机械故障诊断技术的研究内容一般来说主要包含故障机理研究和故障诊断方法研究两个方面。其中,旋转机械的故障机理研究通常是以转子动力学为基础,研究故障的

物理或数学模型,进行物理模拟或计算机仿真,其目的是了解故障的形成和发展过程,明确故障的动力学特征,从而掌握典型的故障信号,建立故障样板模式^[5]。因此可以说,故障机理是故障诊断技术的理论基础,在这方面已有许多学者做了大量的研究工作,得到了很多有益的结论^[6-10]。研究旋转机械故障诊断方法,即研究对旋转机械设备进行实际诊断的手段。目前,常用的旋转机械故障诊断方法有振动分析方法、噪声分析方法、温度检测方法、声发射检测方法、油液分析方法等。由于旋转机械设备运转时总是存在着振动,振动信号往往包含了丰富的设备状态信息,因此,基于振动信号的振动分析方法在旋转机械设备故障诊断领域得到了广泛的应用^[11,12],是一种重要的旋转机械故障诊断方法。振动分析方法的关键在于从测得的振动信号中提取故障特征,然而由于旋转机械振动信号具有非平稳、多调制、多分量的特点以及背景噪声的影响,往往很难直接从原始信号中提取出故障特征。因此,需要借助各种信号分析与处理手段对振动信号进行分析与处理,以便从中提取出故障特征,从而进行状态识别和故障诊断。

近几十年来,国内外许多学者在旋转机械故障振动信号分析与处理方面做了大量的研究工作,多种信号分析与处理方法被应用到了旋转机械故障特征的提取,取得了一系列有益的成果。目前,常用于旋转机械振动信号的信号处理方法可主要分为两类:一类是基于傅里叶变换的经典谱分析方法;另一类是时频分析方法。了解这些方法被成功应用的原因以及存在的不足之处,是进行后续研究的宝贵经验。本节将对基于傅里叶变换的经典谱分析方法及其在振动信号中的应用进行简述,而时频分析方法由于在旋转机械故障诊断中得到了极广泛的应用,因此将在下一节中单独论述。

1.1.2.1 基于傅里叶变换的经典谱分析方法

傅里叶变换自提出以来,由于其物理意义明确,具有成熟的快速算法,已被应用到了诸多学科领域,同样,在旋转机械故障诊断中,以傅里叶变换为基础的经典谱分析方法也发挥着重要的作用。其中,主要的有包络分析、细化谱分析、倒谱分析、全息谱分析、高阶谱分析等,它们都被成功地应用到了旋转机械故障诊断中。

包络分析的实质就是得到信号的幅值调制信息,然后通过傅里叶变换将其反映到频谱(即包络谱)上。由于旋转机械故障振动信号的故障特征往往包含在其幅值调制信息中,所以包络分析方法可以实现旋转机械的故障诊断。如 Randall R B 提出了高通绝对值解调方法,并应用于齿轮故障诊断^[13];McFadden P D 采用希尔伯特变化解调方法实现了齿轮和滚动轴承的故障诊断^[14];在国内唐德尧等提出了广义共振解调法提取了滚动轴承振动信号的故障特征^[15];丁康等将包络分析方法成功地应用到了汽车变速箱的故障诊断^[16],另外还分析了几种包络分析方法的局限性^[17,18]。细化谱即指通过重抽样与滤波技术获得分辨率与精度更高的频谱图,因此,在谱线成分复杂的实际旋转机械设备故障诊断中得到了较多的应用。如张中民等将共振解调细化谱应用于自行火炮变速箱的故障诊断^[19];时献江等将实调制细化算法与 Hilbert 变换算法结合,提出了一种新的细化包络算法,并应用于异步电机的故障诊断^[20];王志刚等则通过细化功率谱提取了某工厂轧机主传动减速机的轴承故障特征^[21]。信号的倒谱原理为对信号的功率谱取对数后再作逆傅里叶变换,其能够识别信号中包含的周期性成分,而旋转机械故障振动信号中含有故障信息的调制边频带通常具有周期性,因此可以用倒谱进行分析。如 Randall R B 和 M El

Badaoui 等分别对倒谱应用在齿轮箱的故障诊断中做了详细的研究^[22-24],其中 M El Bad-
aoui 还分析了信号信噪比对倒谱分析结果的影响^[25]。在国内也有多位学者研究了倒谱
技术在旋转机械故障诊断中的应用效果^[26-28]。由屈梁生院士提出的全息谱技术是针对
传统频谱分析中振动的幅值和相位相互分离、同一截面的水平和垂直方向振动相互独立
的缺点所发展起来的。它合并了水平与垂直方向振动信号的幅值谱和相位谱,不但反映
了两个方向振动的幅值信息,还反映了二者之间的相位关系,将信息融合的思想引入到了
机械故障诊断领域。全息谱提出后被大量应用于汽轮发电机、水轮机、风机等大型旋转机
械设备的故障诊断,并取得了很好的效果^[29-32]。另外,为提高全息谱的精度,一些学者在
其理论改进方面也做了研究,如文献[33-35]分别提出采用内插法、二分法、相位差法对频
谱进行校正以提高全息谱的精度;文献[36]则将阶次分析引入全息谱,使其能够分析设备
启停状态下的振动信号。另外还有与全息谱类似的基于信息融合思想的技术,如韩捷等
提出的全矢谱^[37]、本特利公司提出的全谱技术^[38]等,它们都在旋转机械故障诊断中得到
了应用。高阶谱是一种基于多维傅里叶变换的非线性和非高斯信号处理方法,分为高阶
矩谱和高阶累积量谱。后者由于具有消除高斯噪声、提供信号相位信息,以及方便处理加
性信号等优点而被广泛应用于实际信号分析。旋转机械发生故障时,其振动信号大多是
非高斯信号,且具有二次和高次相位耦合等非线性特性,另外,所包含的噪声一般近似服
从高斯分布,因此适合采用高阶累积量谱进行分析。目前,高阶累积量谱的理论已经相当
成熟,在旋转机械故障诊断领域也已得到了成功的运用。如文献[39-44]分别讨论了三阶
累积量谱在滚动轴承、齿轮和转子系统故障诊断中的应用;文献[45]将电动机振动信号的
双谱作为神经网络的输入特征用来识别内圈短路、轴裂纹、不平衡及其组合故障;文献
[46]将阶次分析与双谱结合提出了阶次双谱方法,并用于某柴油机的状态监测。在国内,
苏文斌和张桂才最早将高阶谱用于旋转机械故障诊断^[47,48],随后这方面的研究得到了广
泛的开展。如邵忍平等详细讨论了双谱、双相干谱和 1.5 维谱在齿轮系统故障特征提取
中的应用^[49];陶新民等提出了基于高阶统计特征实值阴性克隆选择算法的轴承故障智能
检测器^[50];严可国等将基于双谱的边际谱用于分析某大型汽轮机振动信号的非线性特
征^[51];李允公等利用双谱幅值谱及其工频切片提纯轴心轨迹^[52];熊军等则将高阶谱、倒
谱和信息熵理论结合,提出了高阶倒谱熵方法,并用于齿轮的故障诊断^[53]。

1.1.2.2 经典谱分析方法的局限性及其改进

基于傅里叶变换的经典谱分析方法,在旋转机械故障诊断领域得到了大量的应用,而
其缺陷也是明显的,那就是要求被分析的系统是线性的,被分析的信号是严格平稳的,否
则,谱分析结果将缺乏物理意义。然而,当旋转机械设备发生故障时,或处于启停状态,其
振动信号往往是非平稳的,当发生如油膜涡动、局部碰摩、基座松动等故障时,系统则具有
明显的非线性特征,这些都会影响到谱分析方法的准确性。因此,如果能够将非平稳、非
线性信号转换为平稳、线性信号,或者减小其非平稳、非线性特征,那么便可以对其进行较
精确的谱分析了。按照此思路有学者提出了一些有效的方法,其中主要有阶次跟踪、时域
同步平均、广义解调等。

阶次跟踪是指通过跟踪参考轴的转速对信号进行等角度增量采样的过程。它能够将
时域非平稳信号转换为角域平稳信号,进而可以进行谱分析。因此,阶次跟踪非常适合于

处理转速波动情况下的振动信号。目前,它已被广泛应用于旋转机械设备启停状态下的故障诊断^[54-56]。时域同步平均算法的实质是一梳状滤波器,对于旋转机械振动信号能从很大程度上滤掉与参考轴转频无关的信号分量,包括噪声和无关的周期信号,这实际上是降低了原信号的非平稳特征,因此,能够提高后续谱分析的准确度。目前,时域同步平均算法常被应用于振动信号的预处理^[57-60]。广义解调^[61]的基本思想是将瞬时频率曲线为倾斜或非线性的非平稳信号,转换为瞬时频率曲线为平行于时间轴或线性的平稳信号,以满足谱分析的要求。具体是先确定一个与原信号瞬时相位曲线近似的相位函数,然后利用该相位函数对原信号进行广义傅里叶变换,由此得到的解调函数的瞬时频率便是平行于时间轴或线性的。目前,该方法已在齿轮故障诊断中得到了应用^[62-64]。

综上所述,基于傅里叶变换的经典谱分析方法,在提取旋转机械振动信号的故障特征方面有其优势,但也存在着本质的缺陷。因此,如何发挥其优势,同时尽量减小缺陷带来的不利影响,将依然是旋转机械故障诊断学科研究的重点与热点。

1.2 时频分析方法

旋转机械设备产生的振动信号通常携带着大量的设备状态信息,从中提取这些状态信息的过程,实际上就是对振动信号进行分析与处理的过程。然而,旋转机械振动信号大多是非平稳、非线性的,对于这类信号主要考虑的应该是其局部特征,因此,以傅里叶变换这种全局变换为基础的传统频域分析方法显然是不合适的,而基于时频域联合分析的能够同时提供信号时频域局部信息的时频分析方法,不失为一种有效的分析手段。自从上世纪 40 年代 Gabor 首次提出时频域联合分析的概念以来,目前学者们已经提出了许多种时频分析方法。在所提出的时频分析方法中,绝大部分是以信号的局部变换为基础的,这种局部变换正是实现信号时频域联合分析的关键。根据局部变换是否满足叠加原理或线性原理,时频分析方法又可以分为线性变换方法和非线性变换方法两大类,常用的如短时傅里叶变换、小波变换属于线性变换方法;非线性变换中最重要的是二次型变换,其中的典型代表是 Cohen 类时频分布^[65]。由于这两类时频分析方法的理论和应用都已经相当成熟,因此在本文中姑且统称为传统时频分析方法。有别于传统的时频分析方法,近年来出现了一种称为 Hilbert-Huang 变换^[66,67]的新型时频分析方法。它是以信号的特征尺度参数为基础的,自提出后由于其具有自适应性、正交性、完备性等许多优点,尽管在理论上还不太完善,但仍然受到了广泛的青睐,显示出强大的生命力。以上各类时频分析方法,在旋转机械故障诊断中,特别是在故障特征提取方面都起着举足轻重的作用。下面将简述其中几种主要的时频分析方法,以及它们在旋转机械故障诊断中的应用情况。

1.2.1 传统时频分析方法

1.2.1.1 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换是一种最基本的时频分析方法,原理是将被分析信号与沿时间轴移动的窄窗函数相乘,然后对乘积结果进行傅里叶变换。这实际上是求取信号的“局部频谱”,从而达到提取信号时频域局部信息的目的。短时傅里叶变换方法直观、简单、高效,

分析结果无交叉项干扰,在旋转机械故障诊断中得到了较多应用。如 N Sawalhi 利用短时傅里叶变换得到振动信号的时频谱,然后计算谱峭度来提取滚动轴承故障特征^[68];刘文彬等采用基于短时傅里叶变换的瀑布图来识别转子系统的油膜涡动和油膜振荡故障^[69];何泽夏等将小波变换与短时傅里叶变换综合应用于某次液体火箭发动机故障实验信号的分析,取得了很好的时频分析效果^[70];文献[71]将全矢谱与短时傅里叶变换结合,提出了短时矢功率谱方法。研究表明,该方法可以对矢量信号的短时能量随频率、时间的变化过程作出分析,适合于对旋转机械设备的状态进行监控。

然而,短时傅里叶变换也存在一些固有的缺陷:第一,作为一种线性变换,短时傅里叶变换不能直接描述信号能量的分布情况;第二,短时傅里叶变换受 Heisenberg 不确定原理的限制,时频分辨率较低;第三,短时傅里叶变换窗口的形状大小是固定不变的,缺乏自适应性,且认为窗口内的数据是平稳的。因此,短时傅里叶变换实际上还是一种平稳信号分析方法。这些都限制了其在旋转机械故障诊断中的应用。

1.2.1.2 Cohen 类时频分布

Cohen 类时频分布是一类重要的时频分析方法,定义为信号的局部自相关函数的傅里叶变换,其中局部自相关函数是通过对信号的自相关函数加窗得到的,而根据所加窗函数的不同,就可以得到不同性质的时频分布。这种定义物理意义是:反映了信号的能量密度在时频平面上的分布情况,这对于经常以振动信号能量的变化情况来表征设备运行状态的旋转机械故障诊断学科来说是一个优良的性质。因此,Cohen 类时频分布在旋转机械故障诊断中有着较广泛的应用。

Wigner 分布是 Cohen 类时频分布中最基本的分布,所有其他的 Cohen 类时频分布都是对 Wigner 分布加不同形式的窗函数得到的,而由于 Wigner 分布没有使用任何窗函数,因此理论上具有最高的频率分辨率。在所有应用于旋转机械故障诊断的 Cohen 类时频分布中,Wigner 分布占有很大的比重。如 N Baydar 等将基于 Wigner 分布的瞬时功率谱用于变载荷工况下斜齿轮局部故障的诊断^[72];W Bartelmus 等则通过采用 Wigner 分布分析某行星齿轮箱臂的振动信号来评估其健康状况^[73];文献[74]提出了一种基于 Wigner 分布的半倍转频跟踪方法。在国内,也开展了相关的研究工作。如高锦宏等将 Wigner 分布用于烟气轮机的故障诊断^[75];邹剑等采用 Wigner 分布比较了裂纹转子与无裂纹转子的时频特性,提出利用 Wigner 分布识别裂纹转子的方法^[76];沈国际等提出了一种基于 Wigner 分布的相位估计方法,并将其应用于齿轮箱振动信号的分析^[77];文献[78]采用 Wigner 分布分析内燃机瞬时转速信号,利用 Wigner 分布的交叉项放大了微弱的故障信息,成功诊断出内燃机的功率不平衡性故障。然而,Wigner 分布是一种二次型时频分布,对于任何一个多分量信号,二次型时频分布都存在交叉项。在大多数情况下,交叉项是不利于信号的精确分析的,需要抑制。前面提到 Cohen 类时频分布中的其他时频分布是对 Wigner 分布加不同形式的窗函数,而加窗函数的主要目的就是为了抑制交叉项。由于旋转机械振动信号通常是多分量信号,故 Cohen 类时频分布中的其他时频分布,也被一些学者用于旋转机械振动信号的分析。如田广等采用伪 Wigner 分布(Pseudo Wigner distribution, PWD)对某行星齿轮箱滚动轴承进行诊断,取得了较理想的诊断效果^[79];Baydar N 等利用平滑伪 Wigner 分布(Smoothed pseudo Wigner distribution, SP-

WD)对齿轮箱的声信号进行了分析,结果表明该方法能有效地应用于齿轮箱早期故障的诊断^[80];文献[81]首先利用 SPWD 得到某型号深沟球轴承内圈、外圈和滚动体故障的时频分布,然后计算时频分布图的灰度共生矩阵及其特征统计量作为人工免疫网络的训练量,训练后的网络能够识别出上述三种故障;文献[82]比较了谱图、SPWD、Choi-Williams 分布(Choi-Williams distribution,CWD)和锥形核分布(Cone-Shaped kernel distribution,CSD)四种 Cohen 类时频分布在齿轮故障诊断中的应用效果,结果表明用 CWD 更易于诊断出齿轮的局部损伤故障;熊良才等则根据最小信息熵原则优化 CWD 的参数,然后用优化的参数计算信号的 CWD,将该方法用于齿轮故障诊断,效果要优于未优化参数的 CWD^[83];文献[84]提出了定向 Choi-Williams 分布(Directional Choi-Williams distribution,DCWD),通过对仿真信号和转子实验信号的分析表明,DCWD 不但能抑制交叉项,还能消除谐波分量间的互干扰项;王成栋等采用 CSD 得到柴油机气阀 8 种状态下的缸盖表面振动信号的时频分布,并采用支持向量机分类,具有比较高的识别率^[85];文献[86]则综合应用 STFT 和 CSD 分析了转子系统摩擦振动的时频特性。还有的学者根据自己的需要来设计核函数(窗函数在模糊域中表示),如文献[87]提出了一种改进的指数核分布,并用于直升机的齿轮箱故障诊断;王胜春等提出了自适应径向抛物线核分布,该核函数克服了 1/0 核突然截断产生振荡的不足,也克服了径向高斯核过渡带较宽的问题,并将其应用到了滚动轴承的故障诊断^[88]。

Wigner 分布能够描述信号的能量分布情况,具有高的时频分辨率,但在分析多分量信号时,存在比较严重的交叉项干扰。其他的 Cohen 类时频分布,虽然对交叉项有不同程度的抑制效果,但同时也削弱了信号项,并降低了时频分辨率。这些都会影响到 Cohen 类时频分布对旋转机械振动信号的精确分析。

1.2.1.3 小波变换

小波变换与短时傅里叶变换一样属于加窗线性变换,但小波变换的窗函数,由于引入了尺度伸缩参数和时间平移参数,因此时频窗口是可变的。窗口可变使小波变换既能对非平稳信号中的短时高频成分进行定位,又可以对低频成分进行分析,具有“既能看到森林,又能见到树木”的多分辨特性。目前,小波变换已经被广泛地应用于非平稳、非线性信号的分析。

近年来,小波变换在旋转机械故障诊断学科中,也得到了快速的发展,其在故障特征提取、故障模式识别以及故障状态监测等方面都有比较广泛的应用。在故障特征提取方面,如 N G Nikolaou 利用小波包变换分解滚动轴承故障振动信号,并提出采用由各尺度波形的均值与标准差确定的硬阈值以及能量判据,来确定包含故障特征信息的尺度分量,最后对该尺度分量进行频谱分析以提取故障特征^[89];文献[90]根据滚动轴承局部故障振动模型的冲击响应函数构建新的小波基函数,并以此提出尺度一小波功率谱比较法和时间一小波能量谱自相关分析法,成功提取了局部损伤的滚动轴承故障特征信息;文献[91]综合采用了 Hilbert 变换和小波包变换提取齿轮箱的故障特征;秦毅等提出了基于小波脊线的解调方法提取旋转机械振动信号的故障特征^[92];王晓冬等根据多小波具有多个时频特征有所差异的基函数,可以匹配多个故障特征的特点,提出以峭度为优化目标,对多小波进行自适应构造来提取某型号电力机车滚动轴承的复合故障特征信息^[93]。在故障

模式识别方面,文献[94]综合应用离散小波变换和判定树算法对某斜齿轮的断齿、齿根裂纹、齿面磨损和正常4种状态进行识别;文献[95]采用遗传算法对 Daubechies 小波序数、分解层数和人工神经网络层数进行优化,然后将小波包系数的标准差作为特征量利用优化后的小波包变换和神经网络对齿轮正常、轻度磨损、中度磨损以及断齿故障进行识别;文献[96]将滚动轴承分成正常、外圈、内圈、滚动体局部故障以及外圈与滚动体、内圈与滚动体、内外圈与滚动体复合故障8类状态,然后以美尔倒谱系数为特征量采用离散小波变换和隐马尔科夫模型对8种状态进行识别,结果表明该方法有较高的识别率;文献[97]则采用连续小波变换对滚动轴承振动信号分解,然后以峭度、偏度和标准差等统计量作为特征量分别采用神经网络、支持向量机和自组织映射进行分类识别,并对结果进行了比较讨论。J Rafiee 等利用小波包变换分解齿轮振动信号,然后通过计算各尺度分量的自相关序列来判别齿轮的健康状况^[98];文献[99]采用连续小波变换分解滚动轴承故障振动信号,然后以各尺度分量的能量和峭度参数来选取合适的尺度分量,最后对选取的分量计算 Lempel-Ziv 复杂度系数来评估滚动轴承的故障程度;文献[100]对齿轮振动信号进行连续小波变换,然后通过分解结果的局部能量密度值来判别齿根裂纹故障的进展情况。

虽然小波变换自提出后,在非平稳信号分析领域得到了非常广泛的应用,并有许多成功的例子,但是在理论方面仍存在一些固有的缺陷,影响了其分析效果。其中主要体现在以下三方面:第一,小波变换的时频窗口虽是可调的,但仍然受到 Heisenberg 不确定原理的限制,并不能同时获得高的时域和频域分辨率,且有限的时宽还可能会导致能量泄漏的发生;第二,小波变换虽是一种多分辨分析方法,但多分辨的结构(即时频平面的结构)是由信号采样频率以及事先设定的分解尺度所确定的,而不是根据信号本身的特征确定的,因此,小波变换只是机械地将信号分配到已经确定好的时频结构中,无自适应性;第三,小波变换的实质是用一组小波基函数的线性组合来表示被分析的信号,但是小波基函数是在分析前按照某一原则构造或选择的,并在整个分析过程中是不变的,因此不可能很好地表示出信号的每一个局部特征,有时候这种表示的误差相当严重,直接影响到对信号的正确分析。

1.2.2 Hilbert-Huang 变换

Hilbert-Huang 变换(HHT)是由 N E Huang 提出的一种新型的时频分析方法,它包括经验模态分解和 Hilbert 变换两个过程。即首先由经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)将信号分解成有限个内禀模态函数(Intrinsic mode function, IMF)之和,然后利用 Hilbert 变换计算各个 IMF 分量的瞬时幅值和瞬时频率,从而可以得到原信号完整的时频分布。其中的关键步骤是 EMD 分解。一般情况下信号的局部极值点和零交叉点表征了信号的局部尺度特征,而 EMD 分解就是依据信号的局部极值点和零交叉点对信号进行分解。因此,EMD 分解充分考虑了信号本身的局部尺度特征,这样得到的每个 IMF 分量便自然地表示了原信号的一种尺度特征,包含了原信号真实的物理信息。进一步由各个 IMF 分量的瞬时幅值和瞬时频率组合成的时频谱,其结构也就完全是由原信号本身的尺度特征决定的,而不同于前述的传统时频分析方法的机械格型结构。因此, HHT 方法是一种真正意义上的自适应时频分析方法。

HHT 方法自提出后便引起了许多学者的关注,被应用到了流体力学^[101,102]、结构力学^[103-106]、地球物理学^[107,108]、通信工程^[109-111]、电气工程^[112]和生物医学工程^[113-116]等多个学科。最近十年 HHT 方法在旋转机械故障诊断领域同样得到了广泛的应用,主要体现在单独使用 HHT 方法,以及将 HHT 方法与其他方法相结合来进行故障诊断两个方面。由于 HHT 方法本身是一种分析非平稳、非线性信号的强有力工具,因此在许多情况下,只使用 HHT 方法便能够提取故障特征信息。如文献^[117]直接对滚动轴承振动信号的各个 IMF 分量进行频谱分析得到了内、外圈局部故障的特征频率;S J Loutridis 通过计算齿轮振动信号各 IMF 分量的瞬时能量密度来判断齿轮齿根裂纹的严重程度^[118,119];A Parey 等建立了直齿轮副的动力学模型,基于此模型的仿真分析表明 IMF 分量的峭度因子与峰值因子能够表征齿轮局部故障的程度,可以实现故障的早期诊断,并通过进一步对实际信号的分析验证了该结论^[120];T R Babu 等采用 HHT 方法检测转子裂纹并跟踪其进展状况,与快速傅里叶变换和连续小波变换的对比,表明了 HHT 方法在检测转子极微小裂纹时的敏感性^[121];文献^[122]提出了基于 EMD 的轴心轨迹提纯方法,并将其应用于某离心压缩机的故障监测。在国内,于德介、程军圣、杨宇等人对 HHT 方法在旋转机械故障诊断中的应用做了系统的研究,提出了基于 HHT 的时频熵、频率族分离、局部 Hilbert 能量谱、特征能量等一系列故障诊断方法^[123,124];文献^[125]和^[126]采用 HHT 方法分析了转子系统几种典型故障的振动信号,结果表明基于 HHT 方法的时频分析能够识别转子系统的早期故障;文献^[127]采用 EMD 方法成功地提取了某二氧化碳压缩机的次谐波类故障特征信息;冯志鹏等采用基于 HHT 的时频谱对某水轮机启动过程的非平稳压力脉动信号进行了分析,得出了其时变规律^[128]。另外有些学者将 HHT 方法与其他方法进行了结合,其主要目的是为了对信号进行预处理和对故障进行分类与识别。如 Z K Peng 等提出先对信号进行小波包分解,得到一系列窄带信号,然后再对窄带信号进行 EMD 分解,这样确保得到的 IMF 分量为单一分量信号,采用该方法对转子系统的碰摩故障以及滚动轴承的内、外圈局部故障进行了分析,其效果要优于原 EMD 方法^[129,130];为了达到同样的目的,杨文献提出先设计一自适应带通滤波器对信号进行滤波,然后再进行 EMD 分解^[131];康海英等将阶次分析与 EMD 方法相结合,提出了基于 EMD 的阶次包络谱方法应用于变转速滚动轴承的故障诊断^[132];汤宝平等提出在 EMD 分解前分别采用奇异值分解降噪和形态滤波消除信号噪声成分,通过对滚动轴承故障振动信号的分析,表明该方法能提高 EMD 方法的精确度^[133]。在故障分类与识别方面,文献^[134]提出采用 EMD 对转子振动信号进行分解,并将得到的 IMF 分量组成初始特征向量矩阵,然后对该矩阵进行奇异值分解得到矩阵的奇异值,最后通过奇异值熵的大小来判断转子系统的故障类型;文献^[135]以同样的方法求取奇异值,并将其作为故障特征向量通过模糊 C 均值聚类算法对滚动轴承的故障类型进行识别;文献^[136]对 IMF 分量的瞬时幅值和瞬时频率建立 AR 模型,以模型的自回归参数和残差的方差作为特征向量建立 Mahalanobis 距离判别函数来识别滚动轴承的故障类型;文献^[137]将 EMD 与分形维数结合,采用 EMD 对转子系统振动信号降噪,然后通过计算降噪后信号的分形维数来区分转子系统的故障类型。另外,EMD 方法还与各种类型的神经网络、支持向量机等分类算法相结合,在故障模式识别中得到了大量的应用^[138-142]。HHT 方法自提出后的短时间内,其理论与应用

都得到了迅猛的发展,然而作为一种较新的时频分析方法,仍存在一些问题需要解决,如 EMD 方法中的过包络、欠包络^[143]、端点效应^[144]和模态混淆^[145]等问题。另外,在利用 Hilbert 变换计算瞬时幅值和瞬时频率时的边缘效应以及产生无法解释的负频率问题^[146,147]。对此,虽然有学者提出了一些改进方法,但改进的效果一般,只对某一个或几个特定的信号较理想,也就是说并未从根本上解决 HHT 方法的这些缺陷,仍然需要作进一步的研究。

1.3 局部均值分解方法

故障特征提取是旋转机械故障诊断学科中的关键与核心内容,直接关系到故障早期诊断和状态实时监控的可能性。通过前面对旋转机械故障诊断方法研究现状的综述可以知道,从旋转机械设备的振动信号中提取故障特征信息是最直接也是最有效的一条途径,然而故障振动信号具有的非平稳、非线性特征以及噪声的干扰为故障特征的提取设置了很大的障碍,要移除这些障碍就必须找到一种合适的信号处理方法。就目前国内外常用于故障特征提取的各种信号处理方法来说,虽然都具有一定的效果,但在针对非平稳、非线性信号的适用性方面以及方法本身的理论方面,仍存在着不同程度的局限性。

基于傅里叶变换的经典谱分析方法是傅里叶变换,而其应用在旋转机械故障诊断中的最大局限性也是来自于傅里叶变换,这表现在:一方面,应用傅里叶变换的条件是被分析的信号或数据必须是严格平稳的,被分析的系统必须是线性的,而旋转机械故障振动信号恰恰是非平稳的,发生故障时系统也通常呈现出非线性特征;另一方面,傅里叶变换只能提供信号在频域的信息,不能同时兼顾信号在时域和频域中的全貌和局部化特征,而这些局部化特征恰恰是机械故障的表现。

传统时频分析方法通过局部变换能同时获得信号在时域和频域的信息,能够描述信号在时频域的局部化特征,因此它是适合于分析旋转机械故障振动信号的,但是理论上的局限性又限制了其分析的准确度,这主要体现在三个方面:首先,这种局部变换是通过信号加窗函数实现的,从而会受到 Heisenberg 不确定原理的限制,不可能同时获得较高的时间和频率分辨率;其次,由于传统时频分析方法仍旧是基于傅里叶变换的,因此要求窗函数内的信号必须是基本平稳的,而这对于旋转机械故障振动信号来说是很难达到的;最后,在传统时频分析方法中,时频分布的结构是在分析前就已经确定了,并且不是依据信号本身的特征确定的,也就是说传统时频分析方法不具有自适应性,这在某些情况下会影响到旋转机械故障信号本质特征的正确表达,从而影响到故障的正确诊断。

HHT 方法是一种有别于传统时频分析方法的新型时频分析方法。它是以信号的特征尺度参数为基础的,具有真正意义上的自适应性。近年来,在旋转机械故障诊断中得到了越来越多的应用,但是在完善 HHT 方法的理论和消除 HHT 方法的缺陷方面还需要做进一步的研究。在理论研究方面主要包括 EMD 滤波特性的研究,EMD 快速算法的研究,IMF 分量“筛分”终止的判据研究,采样频率对 HHT 分析结果的影响研究等;在消除缺陷方面主要包括 EMD 中的过包络、欠包络、端点效应、模态混淆以及 Hilbert 变换中的边缘效应、无法解释的负频率等问题。以上这些问题直接影响到了 HHT 方法在包括旋

转机械故障诊断在内的许多工程实践当中的应用。

旋转机械故障诊断的水平很大程度上取决于信号处理技术的水平,通过上面的总结可以知道,目前常应用于旋转机械故障诊断的信号处理方法,还不能很好地满足旋转机械故障诊断技术的实际需求。因此,为了提高现有的旋转机械故障诊断水平,探索和研究新的更加合适的信号处理方法,是迫切的也是有意义的。2005 年,Jonathan S. Smith 提出了一种新的自适应时频分析方法——局部均值分解(Local mean decomposition, LMD),并将该方法应用到了脑电图(EEG)信号的分析,结果表明其时频分析的效果要优于传统时频分析方法和 HHT 方法^[148]。LMD 方法是基于信号的局部特征尺度参数的,其基本原理为:首先求出信号 $x(t)$ 所有相邻局部极值点间的局部均值线段和局部幅值线段,并分别对其进行平滑处理得到局部均值函数 $m_{11}(t)$ 和包络估计函数 $a_{11}(t)$ 。然后,将局部均值函数 $m_{11}(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中分离出来,得到 $h_{11}(t)=x(t)-m_{11}(t)$ 。再用 $h_{11}(t)$ 除以包络估计函数 $a_{11}(t)$ 以对 $h_{11}(t)$ 进行幅值解调,得到 $s_{11}(t)=h_{11}(t)/a_{11}(t)$ 。理想的 $s_{11}(t)$ 是一个纯调频信号,即它的包络估计函数 $a_{12}(t)$ 满足 $a_{12}(t)=1$ 。如果 $s_{11}(t)$ 不满足该条件,则将 $s_{11}(t)$ 作为原始数据重复以上迭代过程,直到得到一个纯调频信号 $s_{1n}(t)$,即 $s_{1n}(t)$ 满足 $-1\leq s_{1n}(t)\leq 1$,它的包络估计函数 $a_{1(n+1)}(t)$ 满足 $a_{1(n+1)}(t)=1$ 。把迭代过程中产生的所有包络估计函数相乘,就可以得到相应的包络信号 $a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n a_{1q}(t)$ 。最后将包络信号 $a_1(t)$ 和纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 相乘便可以得到原始信号的第一个乘积函数(Product function, PF)分量 $PF_1(t)=a_1(t)s_{1n}(t)$,它包含了原始信号中最高的频率成分,其瞬时幅值就是包络信号 $a_1(t)$,其瞬时频率 $f_1(t)$ 则可由纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 求出。将 $PF_1(t)$ 从原始信号 $x(t)$ 中分离出来,得到一个新的信号 $u_1(t)$,将 $u_1(t)$ 作为原始数据重复以上步骤,循环 k 次,直到 $u_k(t)$ 为一个单调函数为止。这样便可以将 $x(t)$ 分解为 k 个 PF 分量和一个单调函数 $u_k(t)$ 之和,即 $x(t)=\sum_{p=1}^k PE_p(t)+u_k(t)$ 。将所有 PF 分量的瞬时幅值和瞬时频率组合便可以得到原始信号 $x(t)$ 完整的时频分布 $D(t,f)$ 。

由上述的基本原理可以知道 LMD 方法是依据信号本身而进行的自适应分解,得到的每一个 PF 分量都具有一定的物理意义,反映了信号的内在本质,这样进一步获得的时频分布也必然能够准确地表现出原信号的真实特征。另外,在 LMD 方法中,每一个 PF 分量都是由一个包络信号和一个纯调频信号相乘得到的。因此,PF 分量实际上就是一个单分量的调幅—调频信号,幅值调制信息和频率调制信息分别包含在包络信号和纯调频信号之中,能够很方便地实现解调,由此可以看出 LMD 方法是非常适合处理非平稳和非线性信号的,特别是多分量的调幅—调频信号。除此之外,LMD 方法作为一种时频分析方法,在理论方面与传统时频分析方法和 HHT 方法相比,主要具有如下优点:

(1)与传统时频分析方法比较。

①LMD 方法具有自适应性,体现在:首先,LMD 方法是始终依据信号本身的信息进行分解的;其次,LMD 方法时频分布的结构完全是由信号本身的局部特征尺度决定的;最后,LMD 方法能够实现自适应的多分辨率分析。