




湖南大学出版社图书出版基金资助项目

局部特征尺度分解 方法及其应用

程军圣 郑近德 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

局部特征尺度分解 方法及其应用

程军圣 郑近德 杨宇 著

湖南大学出版社
·长沙·

内 容 简 介

本书提出了一种新的信号处理方法——局部特征尺度分解 (local characteristic-scale decomposition, LCD) 方法, 在对其理论进行研究和完善的基础上将该方法引入到机械故障诊断中。在理论研究方面, 重点解决了 LCD 方法均值曲线的选择与改进、模态混淆和 LCD 分量瞬时特征的估计等问题。在应用研究方面, 主要研究了基于 LCD 的机械故障振动信号的特征提取和模式识别问题, 同时将 LCD 方法与其他数学方法相结合应用于机械故障诊断, 提出了一系列基于 LCD 的机械故障诊断方法。

本书可供各大、中专院校教师, 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

局部特征尺度分解方法及其应用/程军圣, 郑近德, 杨宇著. —长沙: 湖南大学出版社, 2020. 3

ISBN 978-7-5667-1806-8

I. ①局… II. ①程… ②郑… ③杨… III. ①信号处理—数学方法
IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 248364 号

局部特征尺度分解方法及其应用

JUBU TEZHENG CHIDU FENJIE FANGFA JIQI YINGYONG

著 者: 程军圣 郑近德 杨 宇

责任编辑: 黄 旺 责任校对: 尚楠欣

印 装: 北京虎彩文化传播有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 9.75 字数: 263 千

版 次: 2020 年 3 月第 1 版 印次: 2020 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5667-1806-8

定 价: 30.00 元

出 版 人: 李文邦

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
图书凡有印装差错, 请与发行部联系

前 言

局部特征尺度分解(local characteristic-scale decomposition, LCD)方法是作者在对经验模态分解、局部均值分解等方法研究的基础上,提出的一种新的自适应信号分解方法。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内禀尺度分量(intrinsic scale component, ISC)之和,进一步便可以得到复杂信号完整的时频分布。LCD方法的创新点在于定义了一种新的瞬时频率具有物理意义的单分量信号——内禀尺度分量,并通过信号的局部特征尺度参数定义了一种新的均值曲线,基于该均值曲线实现复杂信号的自适应分解。与经验模态分解方法相比,LCD在计算速度、克服端点效应等方面有一定的优势。

自LCD方法提出以来,就引起了许多学者的关注,目前已经被广泛地应用于信号处理、机械故障诊断等领域。本书主要内容来源于国家自然科学基金项目“局部特征尺度分解(LCD)方法及其在机械故障诊断中的应用”(编号:51375152)的研究成果,同时也参考了国内外相关领域的学术论文。本书系统地研究了LCD方法,对其理论问题进行了研究和完善,并在此基础上,将LCD方法引入机械故障诊断,提出了一系列的基于LCD的机械故障诊断方法。

本书将理论研究、仿真验证和实际工程应用相结合,系统地研究了LCD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章对小波、希尔伯特-黄变换、局部均值分解等典型的时频分析方法进行了对比分析;第2章介绍了LCD方法的基本理论,并与EMD方法进行了对比;第3章对LCD方法的理论问题进行了研究和改进;第4章对LCD方法中的模态混叠问题进行了研究,并提出了解决方案;第5章研究了内禀尺度分量瞬时频率估计与解调方法;第6章提出了基于LCD和熵理论的旋转机械故障振动信号特征提取方法;第7章将LCD和模式识别方法相结合进行旋转机械智能故障诊断。

在本书的撰写过程中,参阅和引用了国内外相关领域的资料和成果,同时本书的出版得到了湖南大学出版社图书出版基金的资助,在此一并表示感谢。

作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者
2019年5月

目 次

第 1 章 绪 论	1
1.1 旋转机械故障诊断技术研究的意义	1
1.2 时频分析方法	1
1.2.1 小波变换	2
1.2.2 希尔伯特-黄变换	3
1.2.3 局部均值分解	4
1.3 主要研究内容	5
第 2 章 局部特征尺度分解(LCD)方法	8
2.1 引言	8
2.2 经验模态分解	9
2.3 LCD 方法	10
2.3.1 ISC 定义	10
2.3.2 LCD 过程	11
2.4 LCD 与 EMD 比较分析	12
第 3 章 基于均值曲线改进的 LCD 方法及理论	18
3.1 引言	18
3.2 基于分段多项式的改进局部特征尺度分解(ILCD)	19
3.2.1 ILCD 过程	19
3.2.2 EMD、LCD 与 ILCD 对比分析	20
3.2.3 ILCD 在转子碰摩故障诊断中的应用	22
3.3 广义经验模态分解(GEMD)	25
3.3.1 均值曲线的选择	25
3.3.2 GIMF 分量的定义	26
3.3.3 GEMD 方法	28
3.3.4 仿真分析	28
3.3.5 GIMF 判断依据及 GEMD 分解能力研究	31
第 4 章 LCD 模态混叠解决方法	33
4.1 引 言	33
4.2 模态混叠与基于噪声辅助的数据分析方法	33
4.3 完备总体平均局部特征尺度分解方法	35
4.3.1 CELCD 方法	35
4.3.2 CEEMDAN 与 CELCD 比较分析	37

4.3.3	CELCD 在转子碰摩故障诊断中的应用	42
4.4	部分集成局部特征尺度分解方法	45
4.4.1	集成局部特征尺度分解(ELCD)	45
4.4.2	PELCD 算法	46
4.4.3	仿真与实测信号分析	46
4.5	基于伪极值点假设的经验模态分解	52
4.5.1	基于伪极值点假设的经验模态分解(PEMD)	52
4.5.2	仿真分析	54
4.5.3	应用分析	56
4.6	部分集成经验模态分解	59
4.6.1	PEEMD 方法	60
4.6.2	仿真分析	60
4.6.3	应用实例	65
第 5 章	内禀尺度分量瞬时频率估计与解调方法研究	67
5.1	引言	67
5.2	瞬时频率估计方法	67
5.2.1	希尔伯特变换与标准希尔伯特变换	68
5.2.2	能量算子解调	69
5.2.3	经验包络法(EE)	70
5.2.4	直接正交法(DQ)	72
5.2.5	归一化正交(NQ)	72
5.2.6	仿真信号对比分析	73
5.3	基于 LCD 的经验包络解调在机械故障诊断中的应用	76
5.3.1	滚动轴承试验数据分析	77
5.3.2	齿轮试验数据分析	80
5.4	基于 GEMD 与归一化正交解调方法在故障诊断中的应用	81
5.4.1	改进的经验调幅调频分解(IEAD)	81
5.4.2	仿真信号分析	82
5.4.3	试验信号分析	85
第 6 章	基于 LCD 和熵理论的旋转机械故障振动信号特征提取方法	89
6.1	引言	89
6.2	熵与复杂性理论	89
6.3	样本熵与多尺度熵	91
6.3.1	样本熵的定义	91
6.3.2	参数的选取	92
6.3.3	多尺度熵	92
6.3.4	基于多尺度熵的滚动轴承故障诊断	93
6.3.5	多尺度熵在转子故障诊断中的应用	95
6.4	模糊熵与多尺度模糊熵	97

6.4.1	模糊熵算法	97
6.4.2	多尺度模糊熵	98
6.4.3	参数的选取与性质	99
6.4.4	滚动轴承故障诊断的多尺度模糊熵分析方法	101
6.5	排列熵与多尺度排列熵	107
6.5.1	排列熵算法	108
6.5.2	PE 参数的选取及对结果的影响	108
6.5.3	多尺度排列熵定义	110
6.5.4	多尺度排列熵在滚动轴承故障诊断中的应用	110
6.5.5	基于 LCD 和排列熵的滚动轴承故障诊断	112
第 7 章	基于 LCD 和模式识别的旋转机械智能故障诊断方法	116
7.1	引言	116
7.2	基于变量预测模型的模式识别方法	117
7.3	基于 LCD、奇异值分解和 VPMCD 的机械故障诊断方法	118
7.3.1	基于 LCD、SVD 和 VPMCD 的滚动轴承故障诊断方法	118
7.3.2	基于 LCD、SVD 和 VPMCD 的齿轮故障诊断方法	119
7.4	基于 PELCD、拉普拉斯分值和 VPMCD 的滚动轴承故障诊断模型	120
7.4.1	部分集成局部特征尺度分解方法	121
7.4.2	特征量的提取、选择与识别	124
7.4.3	基于 PELCD、LS 和 VPMCD 的滚动轴承故障诊断模型	127
7.5	基于 MFE、LS 和 VPMCD 的滚动轴承故障诊断	130
	参考文献	137

第 1 章 绪 论

1.1 旋转机械故障诊断技术研究的意义

如今,许多旋转机械设备如压缩机、发电机、风机和汽轮机等在冶金、电力和化工等现代工业部门中扮演着重要的角色,甚至是某些部门生产流程的关键或核心设备。然而,由于许多旋转机械设备工作的环境比较恶劣,而且通常连续满负载运行,其零部件不可避免地出现磨损,一旦这些机械设备出现故障,轻则可能会导致设备损坏,无法运转,严重的甚至会导致机器毁坏和人员伤亡,造成巨大的经济损失。因此,对旋转机械设备状态监测和故障诊断技术进行研究,以保障大型机械设备的安全高效运行,不仅能够避免巨额的经济损失和灾难性事故的发生,给企业和工业部门的安全生产方面带来经济效益,而且在国民经济和现代社会的发展中也具有重要的理论意义和实际意义^[1-3]。

机械设备状态监测和故障诊断是一门新兴的交叉学科,它综合了机械、数学、力学、计算机等学科的理论 and 知识。机械故障诊断技术的研究可以分为两个方面:机械故障机理的研究和机械故障诊断方法的研究。机械故障机理的研究主要是以可靠性和故障物理为理论基础,研究故障的物理或数学模型,并依据模型对故障进行模拟或仿真以了解故障的成因及发展趋势,明确故障的动力学行为特征,从而进一步掌握典型的故障信号,提取故障征兆和建立故障样板模式。因此,研究的故障机理是研究故障诊断方法的理论基础,也是获得准确和可靠诊断结果的重要保证^[1]。近年来,许多相关学者在机械故障机理方面做了大量的研究工作,并取得了许多有意义的成果^[4-12]。

相比机械故障机理的研究,近年来,机械故障诊断方法的研究在理论上取得了快速的发展,国内外许多学者在故障诊断方法的研究上取得了丰硕的研究成果。然而,目前机械故障诊断技术和方法尚未能很好地满足故障诊断现场应用的实际需求,仍具有很大的研究潜力和空间,因此,探索和研究新的机械故障诊断方法和技术以及系统仍是机械学科研究的重点和热点。

1.2 时频分析方法

常用的机械故障诊断方法主要包括:油液分析、扭振分析、噪声分析、声发射分析和振动分析等^[13]。其中,振动分析法因诊断速度快、结论可靠、故障定位准确以及可实现在线监测等在机械故障诊断领域中得到了广泛的应用。基于振动分析的旋转机械故障诊断方法一般可分为三个步骤:(1) 机械振动信号的采集;(2) 振动信号的处理与故障特征提取;(3) 故障模式的识别与诊断^[14]。上述机械故障诊断的步骤中最关键的是振动信号的处理和故障特征提取。由于旋转机械的复杂性,当机械运行或发生故障时,其振动信号一般是非线性和非平稳的多分量信号,传统的基于傅里叶分析的方法只能处理线性和平稳信号,因此,对处理非线性和非平稳

的机械振动信号,傅里叶分析方法不免有一定的局限^[15,16]。为了从非平稳信号中提取故障特征,国内外很多专家学者进行了大量的研究,取得了很多有益的研究成果。近年来,时频分析的方法,如短时傅里叶变换^[17,18]、Wigner-Ville 分布^[19,20]、小波变换^[21,22],以及基于信号自适应分解的时频分析方法,如希尔伯特-黄变换^[23]、局部均值分解^[24]等,由于能够同时提供振动信号的时域和频域局部信息,已经被广泛应用于旋转机械的状态监测与故障诊断,并取得了丰硕的研究成果^[20,25-28]。

然而,上述时频分析方法都有各自不同的缺陷,如短时傅里叶变换的时频窗口是固定不可调的,Wigner-Ville 分布得到的时频分布图存在交叉项的干扰,小波变换母小波的选择和分解层数等不具有自适应性,希尔伯特-黄变换作为一种新的自适应的时频分析方法,虽然实现了信号的自适应分解,但是分解过程中会产生拟合误差、模态混叠和端点效应等,局部均值分解有计算量大,平滑次数的选择等问题^[3]。下面重点介绍小波变换、希尔伯特-黄变换和局部均值分解相关理论,以及它们在机械故障诊断领域的应用现状。

1.2.1 小波变换

小波变换是法国地球物理学家 Morlet 在 20 世纪 80 年代在分析地震信号时提出的一种信号处理方法。与傅里叶变换相比,小波变换是时间-频率的局部化分析,通过伸缩平移运算对信号(函数)逐步进行多尺度细化,自动地适应信号时频分析的要求,可聚焦到信号的任意细节,克服了傅里叶变换不能同时分析时频域的缺陷,是继傅里叶变换之后在科学方法上的重大突破。之后的著名数学家 Meyer, Mallat 以及 Daubechies 等都对小波分析理论的发展和完善做出了巨大的贡献^[29,30]。

如今,小波变换已经是一种应用非常广泛的信号处理工具,由于能够同时提供信号的时域和频域的局部化信息,而且具有多尺度特性,因此,在旋转机械故障特征频率的分离、微弱信号的提取和早期的故障诊断等方面都得到了广泛的应用。如:林京和屈梁生院士较早地将连续小波技术应用在滚动轴承滚道缺陷和齿轮裂纹的识别中,并指出连续小波变换具有很强的弱信号检测能力,非常适合故障诊断领域,并建立了“小波熵”的概念,以此作为基小波参数的择优标准^[31];徐金梧和徐科通过小波包分解和信号重构提取滚动轴承动信号中被噪声所掩盖的由滚动表面剥落磨损所引起的冲击成分,分析滚动轴承出现内圈剥落、外圈剥落和正常情况下的振动信号,发现此方法可以有效地进行滚动轴承的故障诊断^[32];郑海波和李志远根据连续小波变换具有较二进离散小波变换和小波包变换更精细的尺度分辨率的特点,提出了基于连续小波变换的时间平均小波谱的概念,同时建立了两种基于时间平均小波谱的谱形比较法和特征能量法,并用于变速箱齿轮的故障诊断^[33];程军圣等针对滚动轴承故障振动信号的特点,通过构造脉冲响应小波,采用连续小波变换提取振动信号的特征,提出了两种新的滚动轴承故障诊断方法:尺度-小波能量谱比较法和时间-小波能量谱自相关分析方法,并通过分析滚动轴承外圈和内圈故障试验数据,发现两种方法都能检测到滚动轴承的故障,有效识别滚动轴承故障模式,为滚动轴承故障诊断提供了新的手段和途径^[34];何正嘉等详细研究了基于小波分析理论的机械设备非平稳信号处理方法及应用^[35];訾艳阳等将小波分析与非线性动力学的分形理论相结合,依据小波变换和分形理论在多尺度分析和自相似上的一致性,提出了一种小波分形技术,从而为非平稳故障诊断提供了一种有效的新技术^[36];蒋平等比较了连续小波变换、短时傅里叶变换和维格纳-威利分布提取微弱信号特征的特性,发现连续小波变换的四阶累积量在微弱信号特征提取中有较好的效果^[37];钱立军和蒋东翔研究了小波变换在横向裂纹转子升速过程状态监测中的应用,通过提取裂纹转子在升速过程中的特征,为实际旋转机械的振动故

障诊断提供了依据^[38];Zheng 等提出了一种基于连续小波变换的齿轮故障诊断方法^[22];Lou 等提出了基于小波变换和自适应神经模糊推理系统的滚动轴承故障诊断方法^[21];Peng 和 Chu 回顾了小波变换在机械状态监测和故障诊断领域的应用,并综述了不同小波的特点和在分析不同旋转机械故障中的优势^[39];Hu 等将改进的小波包分解和支持向量机相结合,提出了一种基于小波包分解和支持向量机集成的旋转机械故障诊断方法^[40];针对旋转机械故障中母小波选择困难的问题,Rafiee 等提出了一种选择母小波函数的方法,并将其应用于齿轮早期故障的诊断^[41];Chen 等提出了一种基于振动信号模型的自适应小波变换方法,并将其应用于液压发动机的故障诊断^[42];Tang 等提出了一种基于 Morlet 小波变换和 WVD 的风机故障诊断^[43];Kankar 等研究了连续小波变换在滚动轴承故障诊断中的应用^[44];Purushotham 等利用小波分析和隐马尔可夫模型对滚动轴承多类故障进行识别^[45];最近,Yan 等对小波分析在旋转机械故障诊断领域的应用进行了详细的回顾,讨论了连续小波变换、离散小波变换、小波包变换以及第二代小波变换等在机械故障诊断的应用,并对小波变换在故障诊断的应用前景和趋势进行了预测^[46]。

尽管小波变换在旋转机械故障诊断领域中得到了广泛的应用,但小波变换也有其固有的缺陷,主要表现在:(1)小波变换本质上是一种窗口可调的傅里叶变换,分解存在模态混叠问题;(2)不同的小波基,信号的分析效果不同,但如何根据待分析信号选择合适的小波基仍没有确切的标准;(3)小波变换虽然具有多分辨率分析的功能,但是小波基和分析尺度的选择决定了分辨率的大小,因此,本质上小波分析不具有自适应性。正是上述固有缺陷在一定程度上制约了小波变换在旋转机械故障诊断领域的进一步应用。

1.2.2 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)是 20 世纪 90 年代末由著名的美籍华人科学家 Huang N E 院士等提出的一种处理非线性和非平稳数据的时频分析方法,HHT 包含两部分:经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特变换(Hilbert transform, HT),即对于一个多分量信号,首先采用 EMD 对其进行自适应分解,得到若干个瞬时频率具有明确的物理意义内禀模态函数(intrinsic mode function, IMF)和一个趋势项之和,再对得到的每个 IMF 进行希尔伯特变换,获取每个 IMF 的瞬时幅值和瞬时频率,进而得到原始信号的完整时频分布^[16]。由于 HHT 非常适合处理非线性和非平稳信号,因此,该方法自提出以来,在海洋学、大气科学、语音分析、图像处理、地球物理、机械故障诊断等诸多工程领域都得到了广泛的应用^[47]。湖南大学于德介教授研究团队和重庆大学秦树人教授研究团队较早地将 HHT 引入机械故障诊断领域,其他学者也对 HHT 理论进行了研究、应用和完善,取得了许多有意义的研究成果。如:程军圣等提出了基于 EMD 的能量算子解调方法,并将其应用于机械故障诊断,结果表明能量算子解调要优于 HT 解调^[48],同时,针对滚动轴承提取故障特征困难的问题,还提出基于 EMD 和 AR 模型的滚动轴承故障诊断方法以及基于 EMD 和希尔伯特谱的机械故障诊断方法^[49,50];钟佑明和秦树人依据 Hilbert 变换的局部乘积定理对 HHT 的理论依据进行了详细探讨^[51];胡劲松研究了经验模态分解在旋转机械故障诊断中的应用^[52],提出了一种基于 EMD 的旋转机械振动信号滤波技术^[53];Liu 等将 EMD 和希尔伯特谱分析应用于齿轮箱故障诊断^[54];Peng 等将小波分析与改进的希尔伯特-黄变换进行了对比,提出先对信号进行小波包分解,再对得到的窄带信号进行经验模态分解,确保得到的 IMF 分量为单分量信号,并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,结果表明该方法效果要优于原 EMD 方法^[25,55];文献^[56]采用 EMD 方法成功地提取了

某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^[57];康海英等将计算阶次跟踪方法与经验模态分解技术相结合,提出一种研究旋转机械瞬态信号故障诊断的分析方法,结果表明阶次跟踪技术能够有效地避免传统频谱方法所无法解决的“频率模糊”现象,将非平稳信号转化为准平稳信号,经验模态分解方法能够提取包含故障信息的内禀模态函数,将两种方法相结合是对传统频谱分析法的有力补充^[58];康守强等采用经验模态分解方法对振动信号进行分解,再对得到的每个内禀模态函数建立自回归模型,并估计模型的参数和残差方差,再以此作为各类状态信号的特征矩阵,同时结合改进的超球多类支持向量机分类器,从而实现了滚动轴承故障位置及性能退化程度的诊断^[59];李琳等采用 EMD 滤波,再结合分形理论中的关联维数计算方法,对齿轮正常、齿根裂纹和断齿三种不同工况的振动信号进行识别,该方法降低了噪声对关联维数计算结果的影响,通过对仿真信号和齿轮箱实测信号进行分析,验证了该方法的有效性^[60];为了提取振动信号不同频率的故障特征,Yang 等提出了一种基于 EMD、能量熵和人工神经网络的滚动轴承故障诊断方法^[61];汤宝平等提出了一种基于形态奇异值分解和经验模态分解的滚动轴承故障特征提取方法^[62]。

研究发现,EMD 有一个最主要的缺陷——模态混淆。针对此,Wu 等提出了一种基于噪声辅助分析的总体平均经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD),EEMD 通过向待分解信号中添加白噪声,均匀化极值点尺度,再采用 EMD 对加噪信号进行分解,对不同的分解结果进行总体平均,将得到的集成结果作为最终的分解结果^[63]。窦东阳等通过仿真试验和实际动静碰摩故障案例证实了 EEMD 算法的有效性,并与 EMD 算法进行了对比,结果表明 EEMD 结果更准确^[64];雷亚国提出了一种基于 EEMD 和敏感 IMF 的改进 HHT 方法,首先采用 EEMD 对振动信号分解,得到若干个无模式混叠的 IMF 分量,再通过敏感度评估算法从所有的 IMF 分量中选择最能反应故障特征的敏感 IMF,进而得到改进的 Hilbert-Huang 谱,并通过仿真试验和转子早期碰摩故障诊断的工程实例验证了改进 HHT 方法的有效性^[65];为了更好地提取振动信号故障特征,王书涛等提出了一种基于 EEMD 样本熵和 GK 模糊聚类的故障特征提取和分类方法,建立了一种机械故障准确识别的有效途径,并通过实验及工程实例数据验证了该方法的有效性和优越性^[66];Lei 将 EEMD 应用于转子系统的故障诊断,通过实测信号分析结果表明 EEMD 效果要优于 EMD^[67];Lei 等对 EMD 方法在旋转机械故障诊断的应用情况进行了一个全面总结,讨论了 EMD 方法存在的几个公开问题,并探讨了 EMD 在机械故障诊断未来研究的主题^[68]。

虽然 HHT(EMD 和 HT)方法在机械故障诊断领域得到了广泛应用,但 HHT 仍存在包络过冲与不足、端点效应、模态混叠以及由 HT 引起的端点能量泄漏和无法解释的负频率等问题。针对这些问题,国内外相关学者相继提出了许多改进措施和方法,取得了一定的进展,但这些问题仍未完全解决,理论上仍需进一步发展和完善。

1.2.3 局部均值分解

局部均值分解(local mean decomposition, LMD)是 Smith 于 2005 年为了克服 EMD 的缺陷而提出的另一种自适应的信号分解方法^[24]。LMD 将每一个复杂非平稳信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义的类似于 IMF 的单分量信号——乘积函数(product function, PF)之和,其中每一个单分量信号是包络信号和纯调频信号的乘积。LMD 通过滑动平均的方式定义连接曲线,避免了 EMD 中三次样条函数的拟合及误差,分解自动得到包络信号和纯调频信号,对纯调频信号采用反余弦变换得到信号的瞬时相位和瞬时频率。LMD 方法提出不久,湖

南大学程军圣教授和浙江大学杨世锡教授等较早地将其引入到机械故障诊断领域,其他学者也对 LMD 进行了研究,解决了 LMD 存在的部分理论和应用问题。如张亢等将局部均值分解与经验模态分解进行了对比,结果表明局部均值分解在端点效应和迭代次数方法要优于经验模态分解^[69],并针对 LMD 的端点效应问题,提出了一种基于自适应波形匹配的端点处理方法^[70];程军圣等分别研究了局部均值分解在滚动轴承和齿轮故障诊断中的应用,提出了基于局部均值分解的阶次跟踪分析以及基于局部均值分解循环频率和能量谱方法^[71-73];陈保家等将 LMD 应用于机车故障诊断^[74];刘卫兵等提出了基于局部均值分解和高阶矩谱的机械故障诊断方法^[75];任达千等研究了 LMD 的端点效应对旋转机械故障诊断的影响^[76];Chen 等提出了一种基于 LMD 的解调方法,并将其应用于机械故障诊断^[77];Liu 等将 LMD 应用于风机的故障诊断^[78];Yang 等提出了一种基于集成局部均值分解和神经网络的故障诊断方法,并将其应用于转子系统的碰摩故障诊断^[79];Wang 提出了一种基于改进的 LMD 的解调方法,并将其应用于转子碰摩故障的诊断^[80];李志农等提出了一种局域均值分解的机械故障欠定盲源分离方法,结果表明在处理非平稳信号混合的欠定盲源分离方面比传统时频域的盲源分离方法有更好的分离效果^[81];张超等针对实际机械故障诊断中强噪声背景下难以提取故障特征的情况,提出了一种基于随机共振消噪和局域均值分解的轴承故障诊断方法,实验结果表明该方法可以提高信噪比,实现微弱信号的检测,有效地应用于轴承故障诊断^[82];徐继刚等针对旋转机械复合故障振动信号的非平稳特征,通过局部均值分解方法将振动信号分解为若干个 PF 分量和一个残余分量之和,然后通过计算各 PF 分量与原始复合故障信号的相关系数来确定包含故障特征信息的主要成分,针对主要成分中的低频分量进行频谱分析从而提取故障特征,针对主要成分中的高频分量采用包络谱分析提取调制故障特征,对齿轮箱的轴承、轴复合故障振动信号进行分析结果表明了该方法的有效性和可行性^[83];唐贵基等首先利用 LMD 算法对故障信号进行自适应分解,分解后获得一组位于不同频带的乘积函数分量,然后利用所提出的峭度准则对分解结果进行筛选,筛选出峭度值最大的 PF 分量,并对其包络信号做切片双谱分析,从而提取出故障特征频率信息,通过对实测轴承内圈、外圈故障振动信号进行分析,诊断结果证明该方法具有一定的可靠性^[84];杨斌等针对齿轮故障振动信号的非平稳特征,提出了基于局部均值分解和主分量分析的齿轮损伤识别方法,实验数据分析结果表明本方法能有效地识别齿轮损伤类型^[85];聂鹏等提出一种基于局部均值分解处理声发射信号的刀具故障诊断方法,实验结果表明该方法可以有效地应用于刀具故障诊断^[86];王欢欢研究了基于 LMD 的风力发电机旋转机械故障诊断虚拟仪器系统^[87]。

针对局部均值分解存在的模态混淆问题,程军圣等提出了一种总体平均局部均值分解方法,首先添加不同的白噪声到待分解信号,再采用 LMD 对加噪信号进行分解,将多次分解结果的平均值作为最终的分解结果,最后通过对仿真信号和转子局部碰摩试验数据进行分析,结果表明总体平均局部均值分解能有效地抑制 LMD 的模态混淆问题^[88]。在此基础上,Yang 等将总体平均局部均值分解应用于转子碰摩故障诊断^[79]。虽然 LMD 避免了 EMD 中的过包络、欠包络以及由希尔伯特变换而产生的负频率等问题,但是 LMD 本身也存在迭代计算量大、频率混淆、端点效应等问题。

1.3 主要研究内容

上述分析表明,目前在旋转机械故障诊断领域得到广泛应用的信号处理方法均有其优点

及局限性,而这些局限性将影响到旋转机械故障诊断的精确性和可靠性,因此迫切需要新的理论和信号处理方法来提高现有旋转机械故障诊断水平。

局部特征尺度分解(Local characteristic-scale decomposition, LCD)是在研究了 EMD 和 LMD 方法的基础上提出的一种新的信号分解方法。EMD 和 LMD 和这类信号分解方法的共同点是,通过定义瞬时频率具有物理意义的单分量信号,依据单分量信号的定义来定义均值曲线,通过不断的筛分,从而实现对信号自适应分解。因此,EMD 等方法在提供有效的自适应时频分析方法的同时,也提供了一个很好的自适应时频分析思路,即首先假设任意一个复杂信号由若干个瞬时频率具有物理意义的单分量信号组成,并给出瞬时频率具有物理意义的单分量信号的定义条件,然后据此条件对信号进行自适应分解。因此,这类信号分解方法的关键是如何给出瞬时频率具有物理意义的单分量信号所需要满足的条件。实际上,EMD 中定义的 IMF 分量或者 LMD 中定义的 PF 分量需要满足的条件都只是瞬时频率具有物理意义的充分条件,而非必要条件,也就是说,满足其他条件的单分量信号的瞬时频率也同样可以具有物理意义。正是由于 EMD 和 LMD 中分别采用各自的方式来定义 IMF、PF 分量从而导致了 EMD、LMD 方法的某些缺陷,如 EMD 的计算速度慢、LMD 的信号突变、滑动平均计算量大等问题。

为了避免这些缺陷,本书基于信号极值点的局部特征尺度参数,定义了另一种瞬时频率具有物理意义的单分量信号——内禀尺度分量(intrinsic scale component, ISC)。同时在定义 ISC 的基础上,提出了一种新的自适应信号分解方法——局部特征尺度分解(LCD)。与 EMD 和 LMD 相比,LCD 在计算速度、频率分辨率以及抑制端点效应和模态混叠等方面有一定的优越性。

本书作者在国家自然科学基金项目(项目编号:51375152)的资助下,深入研究了局部特征尺度分解方法及相关理论。理论方面,对 LCD 方法及其理论进行了研究和改进,主要包括:(1)LCD 均值曲线改进;(2)模态混叠的解决;(3)ISC 分量瞬时频率估计等。在此基础上,提出了若干种信号的时频分析和解调方法。应用方面,将 LCD 和基于熵的复杂性理论相结合,应用于机械故障振动信号的特征提取。同时针对单一尺度熵存在的问题,研究和开发了基于粗粒化方式的多尺度分析理论和基于 LCD 分解的自适应多尺度分析理论。同时,为了实现机械故障的智能诊断,在研究振动信号的故障特征提取方法的基础上,本书还发展了基于 LCD 和模式识别理论的旋转机械智能故障诊断,并提出了若干种旋转机械故障诊断方法。

本书的主要研究内容包括:

(1)针对常用的机械振动信号处理方法存在的缺陷,在定义瞬时频率具有物理意义的单分量信号——内禀尺度分量的基础上,提出了一种新的非平稳数据处理方法——局部特征尺度分解。

(2)针对局部特征尺度分解均值曲线定义存在的问题,提出了基于分段多项式的改进的局部特征尺度分解和广义经验模态分解方法,并通过仿真信号和实验数据将两种方法与经验模态分解和局部特征尺度分解进行了对比。

(3)针对局部特征尺度分解和经验模态分解的模态混叠问题,提出了两种抑制模态混叠的新方法——部分集成局部特征尺度分解和完备总体平均局部特征尺度分解。为了解决经验模态分解的模态混叠,提出了部分集成经验模态分解和基于伪极值点假设的经验模态分解,并通过分析仿真信号将提出的方法与 EMD 和 LCD 方法进行了对比。

(4)针对现有单分量信号瞬时频率估计方法存在的缺陷,提出了两种新的单分量信号瞬时

频率估计方法——经验包络法和归一化正交法。同时,针对机械振动信号这类多分量信号解调难的问题,提出了基于 LCD 的经验包络解调方法和基于 GEMD 与归一化正交解调方法,并对仿真和试验信号进行分析,结果表明本书提出的方法能有效地提取机械振动信号的故障特征,实现机械设备故障诊断。

(5)针对机械振动信号故障特征提取难的问题,提出了基于局部特征尺度分解和熵理论的振动信号特征提取方法。在此基础上,发展了多尺度理论,并扩展了多尺度熵、多尺度模糊熵和多尺度排列熵等非线性动力学参数的应用,将它们应用于机械振动信号的特征提取。

(6)为了实现机械故障智能诊断,将最近提出的模式识别方法——基于变量预测模型的模式识别(VPMCD)方法的应用扩展到旋转机械故障诊断领域。

第 2 章 局部特征尺度分解(LCD)方法

2.1 引言

机械设备故障振动信号大部分是非线性和非平稳信号,传统的基于傅里叶分析的线性信号处理方法不可避免地有一定的局限性。时频分析方法如短时傅里叶变换、小波变换、希尔伯特-黄变换(HHT)、局部均值分解(LMD)等,由于能够同时提供信号时域和频域局部信息从而在机械故障诊断中得到了广泛的应用^[6,35,89]。

HHT 方法是 20 世纪 90 年代末由美籍华人科学家 Huang N E 院士等提出的一种处理非线性和非平稳数据的时频分析方法^[23,90,91]。该方法包含两部分:经验模态分解(EMD)和希尔伯特变换(HT)。EMD 能够自适应地将一个复杂信号分解为若干个内禀模态函数(IMF)之和,再对得到的每一个 IMF 分量做 HT,得到其瞬时幅值、瞬时相位和瞬时频率信息,进而可得到原始信号的完整时频分布。HHT 方法自提出后,在经济数据、大气科学、地震数据分析、结构模态识别、语音和生物信号分析、图像数据处理以及机械故障诊断等诸多方面和工程领域都得到了广泛应用^[14,50,92-98]。但 HHT 方法也存在许多问题,一方面,EMD 缺少理论模型和数学基础,对分量的物理意义缺乏合理的数学模型解释^[99];另一方面,EMD 在使用过程中会产生过包络、欠包络、频率混淆、端点效应以及由希尔伯特变换而产生的端点能量泄漏和无法解释的负频率等^[16]。这些问题虽然取得了一定的研究进展,但是仍未得到完全解决。

局部均值分解(LMD)是 Smith 为了克服 HHT 的不足而提出的另一种时频分析方法^[24]。LMD 将一个单分量的调幅调频信号看成是其本身包络和一个纯调频信号的乘积,即 PF 分量,自适应地将一个复杂信号分解为若干个瞬时频率具有物理意义的 PF 分量之和。LMD 避免了 EMD 中的过包络、欠包络以及由希尔伯特变换而产生的负频率等问题,有一定的优势,因此,很快被相关学者引入到机械故障诊断领域,取得了良好的应用效果^[3,87,100]。但是 LMD 本身也存在迭代计算量大、频率混淆、端点效应等问题。之后,Frei 和 Osorio 提出了另外一种自适应时频分析方法——本征时间尺度分解(intrinsic time-scale decomposition, ITD)^[101]。ITD 方法能够自适应地将任何复杂信号分解为若干个相互独立的合理旋转分量(proper rotation, PR)之和。但是经研究发现,由于 ITD 方法中对基线(或称为均值曲线)的定义是基于信号本身的线性变换,从第二个分量开始,得到的 PR 分量不同于一般意义上的 IMF,有明显的信号波形失真,这导致得到的信号的时频分布也出现较大的失真。

虽然 EMD、LMD 与 ITD 方法有各自的优点和缺陷,但是它们在思想上却有一个共同点,即首先定义一种瞬时频率具有物理意义的单分量信号,然后据此对信号进行自适应分解。因此,EMD 等方法在提供有效的自适应时频分析方法的同时,也提供了一个很好的自适应时频分析思路,即首先假设任意一个复杂信号由若干个瞬时频率具有物理意义的单分量信号组成,并给出瞬时频率具有物理意义的单分量信号的定义条件,然后依据此条件对原始信号进行自适应地分解。

在 EMD、LMD、ITD 这类自适应时频分析方法中,关键的问题是如何给出瞬时频率具有物理意义的单分量信号所需要满足的条件。实际上,EMD 方法中定义的 IMF 分量或者 LMD 方法中定义的 PF 分量需要满足的条件都只是瞬时频率具有物理意义的充分条件,而并非必要条件,也就是说满足其他条件的单分量信号的瞬时频率也同样可以具有物理意义。而正是由于 EMD 和 LMD 方法中分别采用上述的条件来定义 IMF、PF 分量而导致了 EMD、LMD 方法的某些缺陷,如 EMD 方法的计算速度慢、LMD 方法中的信号突变等问题。为了避免这些缺陷,本书基于信号极值点的局部特征尺度参数,定义了另一种瞬时频率具有物理意义的单分量信号——内禀尺度分量(ISC)。同时在定义 ISC 的基础上,结合现有时频分析方法的共有特征,提出了一种新的自适应信号分解方法——局部特征尺度分解(LCD)。

2.2 经验模态分解

经验模态分解假设一个复杂信号可被分解为有限个瞬时频率具有物理意义的单分量信号——内禀模态函数(IMF)和一个趋势项之和。其中,IMF 分量的定义满足如下两个条件^[23,91]:

(I)在整个数据段中,极值点个数与过零点个数必须相等,或最多相差不超过一个;

(II)在数据的任一点,由信号极大值定义的上包络线和由信号极小值定义的下包络线的平均值为零。

条件(I)的限制类似于传统的平稳高斯过程中关于窄带信号的定义;条件(II)则把全局的限制改为局部限制,这种限制是必需的,是为了去除由于波形不对称而造成的瞬时频率的波动。条件(I)和(II)保证了单分量信号的瞬时频率具有物理意义。

在定义了瞬时频率具有物理意义的内禀模态函数(IMF)的基础上,Huang 等提出了经验模态分解算法(EMD)^[98]。

对实信号 $x(t)$ ($t > 0$),EMD 分解步骤如下:

(1)确定信号 $x(t)$ 的所有极大值点和极小值点,采用三次样条函数分别将所有极大值点和极小值点连接起来,得到信号的上包络线 $u(t)$ 和下包络线 $v(t)$ 。

(2)定义信号的均值曲线 $m_1(t)$ 为上、下包络线的平均值,即

$$m_1(t) = \frac{u(t) + v(t)}{2} \quad (2.1)$$

(3)将均值曲线从原始信号中分离,即

$$x(t) - m_1(t) = h_1(t) \quad (2.2)$$

理想地,若 $h_1(t)$ 是一个 IMF 分量(满足一定的判据条件),则 $h_1(t)$ 是 $x(t)$ 的第一个分量。

(4)若 $h_1(t)$ 不满足 IMF 定义条件,则将 $h_1(t)$ 视为原始数据,重复上述步骤(1)~(3),得到 $h_1(t)$ 上下包络线的平均值 $m_{11}(t)$ 。若 $h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t)$ 满足 IMF 的条件,则 $h_{11}(t)$ 是 $x(t)$ 的第一个分量;若仍不满足,则重复循环上述过程 k 次,直到 $h_{1k}(t) = h_{1,k-1}(t) - m_{1k}(t)$ 满足 IMF 的定义,记 $c_1 = h_{1k}$,则 c_1 为 $x(t)$ 的第一个 IMF 分量。

(5)将 c_1 从 $x(t)$ 中分离出来,得到剩余信号 $r_1(t)$,即

$$r_1(t) = x(t) - c_1 \quad (2.3)$$

再将 $r_1(t)$ 作为原始数据重复以上过程(1)~(4),得到 $x(t)$ 的第二个 IMF 分量 c_2 ;重复上述步骤 n 次,得到信号 $x(t)$ 的 n 个 IMF 分量 c_1, c_2, \dots, c_n ,直到 r_n 是一个单调或极值点个

数不超过三个的函数,循环结束。即

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_1(t) - c_2, \\ &\vdots \\ r_n(t) &= r_{n-1}(t) - c_n, \end{aligned}$$

至此,原始信号 $x(t)$ 被分解为如下形式:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n(t) \quad (2.4)$$

由上述过程知,任何一个复杂信号 $x(t)$ 可被分解为有限个内禀模态函数(IMF)和一个趋势项之和,其中,IMF 分量 c_1, c_2, \dots, c_n 包含了原信号从高到低不同频率段的成分。从基函数理论的角度看,对不同的信号,EMD 分解出的基函数不同,因此,EMD 的基不同于傅里叶分解的基和小波分解的小波基,而是依据分解数据的特征,自适应地选择基函数。EMD 是一种自适应的、高效的数据分解方法,由于这种分解是以局部时间尺度为基础,因此,它能够很好地反映数据的局部特征,非常适应于处理非线性和非平稳数据,已被应用于诸多工程领域。但是,EMD 方法还存在很多问题,如由三次样条拟合引起的过包络和欠包络、端点效应、模态混叠等问题,这些问题的研究虽然取得了一定的进展,但是还未被完全解决。本书在研究了瞬时频率具有物理意义的单分量信号的定义和现有信号分解方法的基础上,提出了一种新的信号自适应分解方法——局部特征尺度分解(LCD)。

2.3 LCD 方法

2.3.1 ISC 定义

在定义瞬时频率具有物理意义的单分量信号之前,先考察瞬时频率具有物理意义的典型单分量信号,如正弦(或余弦)信号、调幅信号、调频信号、调幅调频信号。图 2.1 给出了这四种典型信号的时域波形图。图中,连接任意两个相邻的极大值点的线段与过二者之间的极小值点且垂直于横轴的直线相交于 A 点。图 2.1 中它们都有一个共同点,那就是 A 点与极值 B 点关于横轴近似对称。由此可以给出新的瞬时频率具有物理意义的单分量信号所需要满足的条件。

LCD 方法假设任何复杂信号由不同的 ISC 分量组成,任何两个 ISC 分量之间相互独立,这样任何一个信号 $x(t)$ 就可以被分解为有限个 ISC 分量之和,其中任何一个内禀尺度分量需满足以下两个条件:

(I) 整个数据段内,极大值为正,极小值为负,且任意两个相邻的极大值与极小值之间呈现严格单调性。

(II) 整个数据段内,假设所有极值点为 X_k , 对应的时刻为 $\tau_k, k=1, 2, \dots, M$, 其中 M 为极值数目。由任意两个相邻的极大(或小)值点 $(\tau_k, X_k), (\tau_{k+2}, X_{k+2})$ 确定的直线 $l_k (y = \frac{X_{k+2} - X_k}{\tau_{k+2} - \tau_k}(t - \tau_k) + X_k)$ 在二者之间的极值 X_{k+1} 对应的时刻 τ_{k+1} 处的函数值(记为 A_{k+1})与 X_{k+1} 的比值保持不变,更一般地,即要满足:

$$aA_{k+1} + (1-a)X_{k+1} = 0, a \in (0, 1) \quad (2.5)$$

其中

$$A_{k+1} = X_k + \frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k}(X_{k+2} - X_k) \quad (2.6)$$