

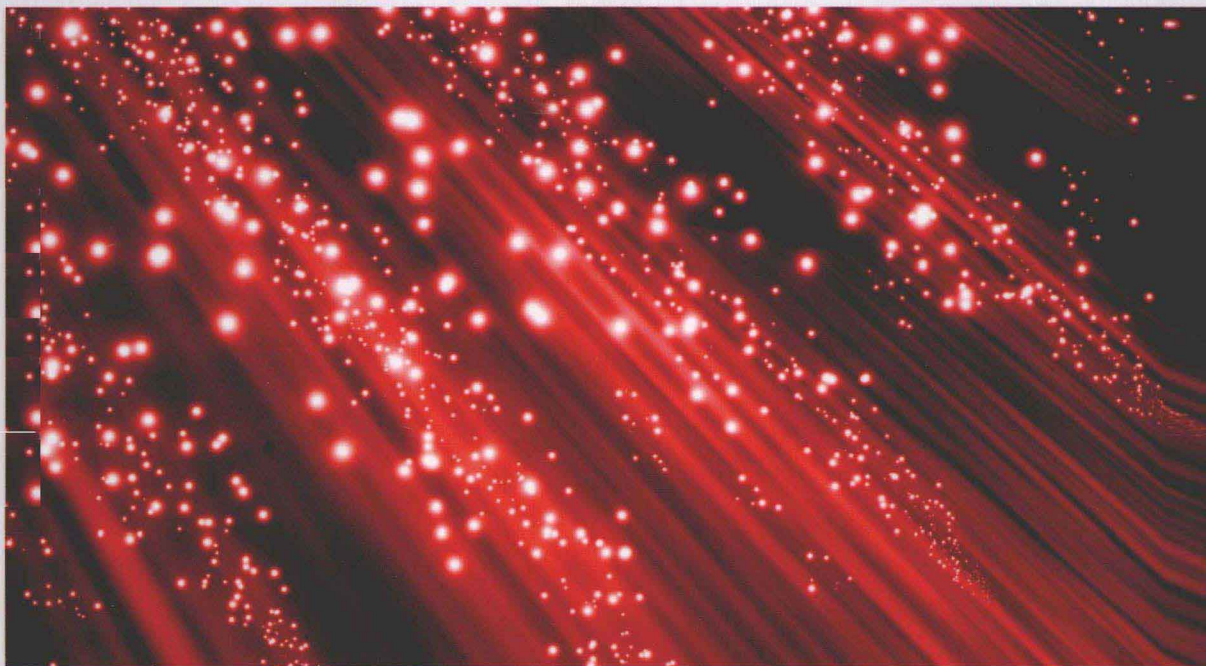


国防科技图书出版基金

Applications of Empirical Mode Decomposition in Vibration Analysis

经验模态分解 在振动分析中的应用

杨永锋 吴亚锋 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

经验模态分解在振动 分析中的应用

**Applications of Empirical Mode Decomposition in
Vibration Analysis**

杨永锋 吴亚锋 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

经验模态分解在振动分析中的应用 / 杨永锋, 吴亚锋著. —北京: 国防工业出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-118-09168-7

I. ①经... II. ①杨... ②吴... III. ①时间序列分析—应用—振动分析—研究 IV. ①032

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 285786 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 11 $\frac{3}{4}$ 字数 209 千字

2013 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 52.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆 军

陈良惠 房建成 赵万生 赵风起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前言

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是当前迅速发展并得到广泛应用的时间序列分析方法。从本质上讲, EMD 是一个自适应二进滤波器组, 包括了解析(展开)和重构(恢复)两个过程。通过解析, 把一个时间序列分解成若干个分量, 通过研究这些分量来揭示原序列的特征。信号经过 EMD 被分解为若干具有不同特征尺度的特征模态函数, 而不是像傅里叶变换把信号分解成正弦或余弦函数。因此, EMD 既能对线性稳态信号进行分析, 又能对非线性和非平稳信号进行分析, 具有很高的信噪比。本书结合笔者在科研工作中的成果, 将经验模态分解引入到振动信号分析中, 重点介绍其在非线性振动、结构振动和语音信号分析中的应用。

全书共分 8 章, 第 1 章对常见振动时频分析方法进行了介绍, 重点对经验模态分解在本书所涉及领域的研究进展进行了介绍; 第 2 章介绍了经验模态分解的基本理论和概念, 分析了经验模态分解的特性; 第 3 章针对经验模态分解的端点效应和模态混叠问题, 提出基于 Volterra 模型、最大 Lyapunov 指数预测和支持向量机回归预测三种端点延拓方法, 并使用 EEMD 对模态混叠问题进行研究; 第 4 章介绍了利用小波和经验模态分解进行阈值去噪的方法; 第 5 章、第 6 章和第 7 章分别介绍了经验模态分解在非线性信号处理、故障诊断和语音信号处理中的应用; 第 8 章针对前述方法, 重点介绍经验模态分解在实验数据处理中的应用。

本书的工作得到西北工业大学任兴民、秦卫阳、姜节胜和杨智春教授的大力帮助, 得到台湾中央大学 Norden E. Huang 教授、东北大学闻邦椿院士、浙江大学朱位秋院士、上海交通大学李鸿光教授的大力支持, 博士研究生裘焱、王元生和硕士研究生李野、高喆、李素洁、陈耿等也为本书做出贡献, 在此, 作者表示衷心感谢。

本书中介绍的相关研究得到了国家自然科学基金(项目编号 10902084、11272257)、中国博士后科学基金(项目编号 200902605)、陕西省自然科学基金研究计划项目(项目编号 2011JQ1011)、陕西省青年科技新星计划、航天支撑技术基金、机械系统与振动国家重点实验室开放基金(项目编号 MSV-2010-16)、西北工业大学基础研究基金(项目编号 JC201242)和西北工业大学“翱翔之星”计划的资助。

由于作者水平有限, 书中疏漏和不妥之处, 恳请广大读者批评指正。

杨永锋 吴亚锋

2013 年 5 月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 时频分析方法的研究意义	1
1.2 常见时频分析方法及其局限性	2
1.2.1 短时傅里叶变换	2
1.2.2 Wigner - Ville 分布	3
1.2.3 小波变换	4
1.3 经验模态分解的提出	5
1.4 经验模态分解的研究现状	7
1.5 经验模态分解的优势和研究方向	8
1.5.1 经验模态分解的优势	8
1.5.2 经验模态分解的研究方向	9
1.6 经验模态分解在振动信号处理中的应用	12
1.6.1 信号去噪	12
1.6.2 非线性振动分析	13
1.6.3 故障诊断	14
1.6.4 语音增强	15
1.6.5 其他应用	16
第 2 章 经验模态分解基本理论	17
2.1 瞬时频率	17
2.2 特征模态函数	18
2.3 经验模态分解	19
2.4 希尔伯特谱分析	22
2.5 经验模态分解特性	24
第 3 章 经验模态分解的端点延拓和模态混叠	25
3.1 端点问题的提出	25
3.2 利用 Volterra 模型的端点延拓	26

3.2.1	Volterra 模型简介	26
3.2.2	仿真分析	27
3.3	基于最大 Lyapunov 指数预测的端点延拓	29
3.3.1	最大 Lyapunov 指数的混沌预测相关概念方法	29
3.3.2	仿真分析	36
3.4	基于支持向量机回归预测的端点延拓	39
3.4.1	支持向量机回归预测原理	39
3.4.2	仿真分析	41
3.5	采用聚合经验模态分解抑制模态混叠	42
3.5.1	经验模态分解的模态混叠	42
3.5.2	聚合经验模态分解的原理及分解步骤	42
3.5.3	聚合经验模态分解在滚动轴承信号分解中的应用	45
第 4 章	阈值去噪方法	47
4.1	小波去噪	47
4.1.1	小波变换	47
4.1.2	小波去噪的基本原理和方法	48
4.1.3	小波阈值去噪	48
4.1.4	新小波阈值函数去噪	50
4.2	经验模态分解阈值去噪方法	52
4.3	仿真分析	53
第 5 章	基于经验模态分解的非线性振动分析	58
5.1	基于经验模态分解的非线性预测	58
5.1.1	最大可预测时间	58
5.1.2	仿真分析	59
5.2	随机噪声对经验模态分解及其非线性特征的影响	68
5.2.1	随机噪声对非线性响应经验模态分解的影响	68
5.2.2	噪声对非线性特征的影响	71
5.3	IMF 变化对原信号非线性特征影响	74
5.3.1	IMF 缺失对系统非线性特征影响	75
5.3.2	IMF 比例缩小对系统非线性特征影响	77
5.3.3	IMF 移位对系统非线性特征影响	79
第 6 章	基于经验模态分解的故障特征提取与信号处理	82
6.1	利用经验模态分解下的 Volterra 模型提取结构损伤特征量	82

6.1.1	利用经验模态分解下的 Volterra 模型提取损伤特征量的方法和步骤	83
6.1.2	仿真分析	85
6.2	利用特征模态函数分量包络矩阵的奇异值提取结构损伤特征量	87
6.2.1	利用特征模态函数包络和奇异值提取损伤特征量的方法和步骤	87
6.2.2	仿真分析	88
6.3	基于经验模态分解的振动信号盲源分离	90
6.3.1	盲源分离研究背景	90
6.3.2	主分量分析	91
6.3.3	EMD - PCA - DSS 方法	91
6.3.4	仿真分析	93
第 7 章	基于经验模态分解的语音信号研究	99
7.1	语音信号基本概念	99
7.1.1	语音、人耳感知及干扰噪声	99
7.1.2	语音增强的意义和应用	102
7.1.3	语音增强方法研究进展	103
7.2	基于经验模态分解的语音增强	104
7.3	基于经验模态分解的语音端点检测	106
7.3.1	语音端点检测算法	106
7.3.2	基于经验模态分解的互相关函数的语音端点门限值编码 ..	108
7.4	基于人耳听觉特性的小波变换的语音增强	110
7.4.1	基于小波变换的耳蜗滤波器组实现	110
7.4.2	基于人耳听觉特性的小波变换的语音增强算法	119
7.5	算法测试及性能评价	121
7.5.1	语音质量评价方法	121
7.5.2	仿真分析	123
第 8 章	经验模态分解在实验数据分析中的应用	135
8.1	滚动轴承的结构损伤检测实验	135
8.1.1	滚动轴承的主要损伤形式	135
8.1.2	滚动轴承的结构组成、固有频率和损伤特征频率	136
8.1.3	滚动轴承振动信号特征	137
8.1.4	滚动轴承损伤实验	138

8.1.5 实验结果	138
8.2 结构损伤特征量提取	152
8.2.1 滚动轴承损伤与非损伤的特征量提取	152
8.2.2 滚动轴承不同损伤位置的特征量提取	153
8.2.3 滚动轴承不同损伤程度的特征量提取	153
8.3 Volterra 模型在滚动轴承信号分解中的应用	154
8.4 非线性裂纹转子实验信号的端点延拓	156
8.4.1 实验模型及其原理	156
8.4.2 实验装置	156
8.4.3 实验数据分析	157
8.5 双盘转子信号的盲源分离	159
参考文献	162

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Time – Frequency Analysis	1
1.2	Review of Time – Frequency Analysis Methods	2
1.2.1	Short Time Fourier Transform	2
1.2.2	Wigner – Ville Distribution	3
1.2.3	Wavelet Transform	4
1.3	Appearance of Empirical Mode Decomposition	5
1.4	Recent Research of Empirical Mode Decomposition	7
1.5	Feature and Research Area of Empirical Mode Decomposition	8
1.5.1	Feature	8
1.5.2	Research Area	9
1.6	Applications of Empirical Mode Decomposition in Vibration	
	Signal Processing	12
1.6.1	Signal Denoising	12
1.6.2	Nonlinear Vibration Analysis	13
1.6.3	Fault Diagnosis	14
1.6.4	Speech Enhancement	15
1.6.5	Other Area	16
Chapter 2	Theory of Empirical Mode Decomposition	17
2.1	Instantaneous Frequency	17
2.2	Intrinsic Mode Function	18
2.3	Empirical Mode Decomposition	19
2.4	Hilbert Spectral Analysis	22
2.5	Characteristics of Empirical Mode Decomposition	24
Chapter 3	End Effect and Mode Mixing of Empirical Mode Decomposition	25
3.1	End Effect Problem	25

3.2	Application of Volterra Model in End Effect	26
3.2.1	Introduction of Volterra Model	26
3.2.2	Simulation Examples	27
3.3	Application of Largest Lyapunov Exponent Prediction in End Effect	29
3.3.1	Largest Lyapunov Exponent Prediction Related Concepts	29
3.3.2	Simulation Examples	36
3.4	Application of Support Vector Machine Regression Prediction in End Effect	39
3.4.1	Principle of Support Vector Machine Regression Prediction	39
3.4.2	Simulation Examples	41
3.5	Application of Ensemble Empirical Mode Decomposition in Mode Mixing	42
3.5.1	Mode Mixing of Empirical Mode Decomposition	42
3.5.2	Principle and Procedure of Ensemble Empirical Mode Decomposition	42
3.5.3	Application in Signal Decomposition of Rolling Bearing	45
Chapter 4	Thresholding Denoising Method	47
4.1	Wavelet Denoising	47
4.1.1	Wavelet Transform	47
4.1.2	Principle and Method of Wavelet Denoising	48
4.1.3	Wavelet Thresholding	48
4.1.4	New Wavelet Thresholding Denoising Function	50
4.2	EMD Thresholding Method	52
4.3	Simulation Examples	53
Chapter 5	Nonlinear Vibration Analysis Based on Empirical Mode Decomposition	58
5.1	Nonlinear Prediction	58
5.1.1	Lyapunov Time	58
5.1.2	Simulation Examples	59
5.2	Random Noise Effect on Empirical Mode Decomposition and Nonlinear Signals	68
5.2.1	Random Noise Effect on Empirical Mode Decomposition	68
5.2.2	Random Noise Effect on Nonlinear Characteristics	71

5.3	Changes Effect on Nonlinear Characteristics by Intrinsic Mode Function	74
5.3.1	Missing Effect of Intrinsic Mode Function	75
5.3.2	Scaled Effect of Intrinsic Mode Function	77
5.3.3	Shift Effect of Intrinsic Mode Function	79

Chapter 6 Fault Feature Extraction and Signal Processing Based on Empirical Mode Decomposition

82

6.1	Volterra Model in Feature Extraction of Structural Damage	82
6.1.1	Methods and Procedure	83
6.1.2	Simulation Examples	85
6.2	Using Enveloping Matrix's Singular Value of Intrinsic Mode Function in Structural Damage Feature Extraction	87
6.2.1	Methods and Procedure	87
6.2.2	Simulation Examples	88
6.3	Blind Source Separation of Vibration Signal Based on Empirical Mode Decomposition	90
6.3.1	Background of Blind Source Separation	90
6.3.2	Principal Component Analysis	91
6.3.3	EMD – PCA – DSS Method	91
6.3.4	Simulation Examples	93

Chapter 7 Speech Signal Analysis Based on Empirical Mode Decomposition

99

7.1	Basic Concepts of Speech Voice Signal	99
7.1.1	Voice, Ear Perceives and Interference Noise	99
7.1.2	Speech Enhancement Significance and Application	102
7.1.3	Recent Researches of Speech Enhancement	103
7.2	Speech Enhancement Based on Empirical Mode Decomposition	104
7.3	Speech Endpoint Detection Based on Empirical Mode Decomposition	106
7.3.1	Speech Endpoint Detection Algorithm	106
7.3.2	Speech Endpoint Threshold Coding Based on Cross – Correlation Function of Empirical Mode Decomposition	108
7.4	Wavelet Transform of Speech Enhancement Based on Ear Characteristics	110

7.4.1	Cochlear Filter Bank Realization by Wavelet Transform	110
7.4.2	Algorithm of Wavelet Transform Speech Enhancement Based on Ear Characteristics	119
7.5	Algorithm Testing and Evaluation	121
7.5.1	Speech Quality Evaluation Method	121
7.5.2	Simulation Examples	123
Chapter 8 Application of Empirical Mode Decomposition to the Experimental Data Analysis		135
8.1	Experiments for Structural Damage Detection of Rolling Bearing ...	135
8.1.1	Major Damage Type	135
8.1.2	Composition, Natural Frequency and Damage Characteristic Frequency	136
8.1.3	Vibration Signal Characteristics	137
8.1.4	Damage Experiment	138
8.1.5	Experimental Analysis	138
8.2	Structural Damage Feature Extraction	152
8.2.1	Damage and Non – Damage	152
8.2.2	Different Damage Locations	153
8.2.3	Different Damage Degree	153
8.3	Application of Volterra Model to Rolling Bearing Signal Decomposition	154
8.4	End Effect Solution to Experimental Signal of Nonlinear Cracked Rotor	156
8.4.1	Principle and Model of Experiment	156
8.4.2	Experimental Devices	156
8.4.3	Experimental Data Analysis	157
8.5	Blind Source Separation of Fault Rotor Signal	159
References		162

第 1 章 绪 论

1.1 时频分析方法的研究意义

信号分析与处理的目的是把信号的某些特征表达得更清楚,例如通过变换来更清楚地显现信号的某种特征,其最重要也是最基本的两个变量就是时间和频率。在传统的信号分析与处理方法中,我们把信号表示为时间或频率的函数,而不是两者的联合函数,该类方法中最典型的的就是傅里叶变换^[1]。

傅里叶变换的研究与应用至今已经历了近二百年。1822 年法国数学家傅里叶在研究热传导理论时发表了“热的分析理论”,提出并证明了将周期函数展开为正弦级数的原理,奠定了傅里叶级数的理论基础。其后,泊松、高斯等人把这一成果应用到电学中去。此后,傅里叶提出了非周期信号作为正弦波加权积分的表达式——傅里叶变换的定义,使得傅里叶变换成为信号与系统设计不可缺少的重要工具。20 世纪 60 年代以来,随着计算机、数字集成电路技术的发展,在傅里叶变换方法中出现了“快速傅里叶变换”(Fast Fourier Transform, FFT),它为傅里叶变换这一数学工具赋予了新的生命力^[2]。

傅里叶变换建立了信号从时间域到频率域的变换桥梁,即

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$
$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-j2\pi ft} df$$

傅里叶变换是域变换,在时间域内难以观察的现象和规律,在频率域内往往能十分清楚地显示出来。但上述两式都是全局性的变换式,即每一时刻 t 的信号值 $x(t)$,都是全部频率分量共同贡献的结果;同样,每一频率分量的信号 $X(f)$ 也是全部时间范围内 $x(t)$ 共同贡献的结果。傅里叶变换是在整体上将信号分解为不同的频率分量,而缺乏局域性信息,即它不能告诉我们某种频率分量发生在哪些时间内,而这对非平稳、非线性信号^[3]是十分重要的。事实上,信号的频谱 $X(f)$ 等于信号 $x(t)$ 和无穷区间的正弦波基函数的内积,即

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt = \langle x(t), e^{-j2\pi ft} \rangle$$

因此,基于无穷区间的平稳基函数是不可能表现出非平稳非线性信号 $x(t)$ 的局

部信息的。

全局性的变换在实际应用中会碰到一些问题。例如对于实际信号 $x(t)$, 我们能得到的仅是一个有限时间段内的信号, 因此在求信号频谱时, 只能做以下近似:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \approx \int_{-T}^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt = \hat{X}(f)$$

即在实际计算中, 我们只能得到 $x(t)$ 加时窗后的近似频谱 $\hat{X}(f)$, 此频谱中不可避免地会产生泄漏、混叠等现象, 而严格准确的频谱通常是无法知道的。傅里叶变换的这些缺陷表明, 它虽然为人们提供了一种从频域观察信号的手段, 但通常情况下它所反映的并不是信号的真实谱信息。傅里叶变换只适用于分析信号组成分量的频率不随时间变化的平稳信号, 并且不能给出任何有关这些正弦波何时出现何时消亡的信息。而自然界中许多天然和人工信号, 譬如语音、生物医学信号、声纳信号和机械振动等, 都是典型的非平稳信号, 其特点是持续时间有限, 而且是时变的。传统信号处理中的三个基本假设: 线性、高斯性和平稳性在实际应用中有局限性, 信号的非线性、非高斯性和非平稳性是现代信号处理需要进一步研究的, 这类信号的分析 and 处理比傅里叶变换的要求更多、更严格。如果仍然采用信号分解的概念, 则必须使用具有局域性的基函数, 用时间和频率的联合函数来表示信号, 由此产生了信号的时频分析技术。

信号的时频分析技术是在时间 - 频率域而不是仅在时域或频域上进行^[4]。时频分析的基本思想是: 设计时间和频率的联合函数, 用它同时描述信号在不同时间和频率的能量密度和强度, 即利用时频分布来分析信号, 能给出各个时刻的瞬时频率及其幅值, 并且能够进行时频滤波和时变信号研究^[5]。目前发展较为成熟的时频分析法主要有短时傅里叶变换、Wigner - Ville 分布、小波变换等。

1.2 常见时频分析方法及其局限性

1.2.1 短时傅里叶变换

对于非平稳信号而言, 传统的傅里叶变换只可以从全局的角度分析信号在时间 - 频率域的平均值, 却不可以从局部去分析信号的特征信息。Gabor 于 20 世纪 40 年代提出了短时傅里叶变换的概念, 以解决傅里叶变换的不足^[6]。短时傅里叶变换一经提出就在非线性、非平稳信号分析领域得到了广泛的应用^[7]。

从理论上讲, 短时傅里叶变换处理信号的思想类似于数学中的微积分思想, 即将一个非线性信号 $x(t)$ 看成是若干个短的线性信号的和。从方法上来说, 短时傅里叶变换是通过在时域上设定一个尺度 τ 不变的窗函数 $g(t - \tau)$, 再沿着时间轴平移来覆盖整个信号。被截得的信号段即可看成是线性的, 进而可以对