

Hilbert-Huang变换及其 在电力系统中的应用

Hilbert-Huang Transform and
Its Applications in Power System

刘志刚 著



科学出版社

Hilbert-Huang 变换及其 在电力系统中的应用

刘志刚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书着重介绍 Hilbert-Huang 变换的研究现状及改进方法,详细讨论 Hilbert-Huang 变换在电力系统电能质量扰动信号的检测与分类、电力负荷短期预测等领域中的应用,包括 Hilbert-Huang 变换与其他人工智能方法结合的应用。

本书可作为高等院校电气工程专业师生的参考教材,也可供从事电气工程信号处理、故障诊断和识别的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中的应用 / 刘志刚著. —北京: 科学出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-03-045757-8

I. ①H… II. ①刘… III. ①电力系统-系统管理 IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 227818 号

责任编辑:孙 芳 张晓娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:20 1/4

字数:409 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

时间和频率是描述信号的两个最基本的物理量。在分析信号时,总希望能够同时获得信号在时域和频域的联合信息,而傅里叶变换是全局性变换,即从时域变换到频域,不可能同时具备时域和频域的联合信息。对傅里叶变换不足的改进一直是人们研究的动力和目标。Hilbert-Huang 变换基于经验模态分解(empirical mode decomposition)和 Hilbert 谱理论,所对应的频率不是传统意义上的傅里叶频率而是基于 Hilbert 变换的瞬时频率。它是一种新的非平稳、非线性信号分析方法,可以认为是一种自我调整的时频分析方法,它可以根据信号的局部时变特征进行自适应的时频分解。Hilbert-Huang 变换仍是一个新的尝试,它还在快速发展中,目前极为需要的是一个坚实的理论基础,这将是今后的一个重要课题。

电力系统原本就是非线性问题研究的起源地。现代电力系统结构复杂、地域分布广、运行方式多变,具有高维、非线性、动态特性复杂等特征。电力系统本身及相关装置和设备的正常运行、发生异常、出现故障等均会产生相应的信号,这些信号通常表现出时变、瞬时和受噪声干扰等特点。另外,目前计及新能源接入智能电网的出现使得电力系统的信号更为复杂,因此利用现代信号分析中的非平稳非线性处理技术进行电力系统的信号分析已逐渐成为研究人员的普遍共识。

在《Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中的应用》一书中,刘志刚教授通过介绍 Hilbert-Huang 变换研究现状及改进方法,讨论了 Hilbert-Huang 变换在电力系统中电能质量扰动信号的检测与分类和电力负荷的短期预测中的应用,该书具有很好的基础研究和工程应用意义。除此之外,该书还讨论了非平稳信号分析中几个常见概念和傅里叶变换的不足及改进方法等。该书是作者在 Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中应用方面多年研究成果的总结,对于从事现代信号分析及电力系统应用研究的学者和工程技术人员具有很好的参考和借鉴意义。

相信随着 Hilbert-Huang 变换的发展,其在电力系统中的应用会越来越深入,希望 Hilbert-Huang 变换能够对电力系统的实际工程应用有重要的促进作用。



Norden E. Huang
美国国家工程院院士
中国工程院外籍院士
2015 年 6 月

前 言

Norden E. Huang 博士等于 1998 年提出了经验模态分解算法,在此基础上引入 Hilbert 谱概念和 Hilbert 谱分析方法,被美国航空航天局命名为 Hilbert-Huang 变换,简称 HHT。Hilbert-Huang 变换问世短短十几年以来,引起众多学者和工程研究人员的极大关注,它已被应用在地震分析、海洋湍流、机械故障、电力系统、轨道交通、生物医学、图像处理等领域。目前国内还没有介绍 Hilbert-Huang 变换在电力系统应用的书籍,本书正是在这种背景下完成的。

傅里叶变换是信号处理领域重要的基础理论之一,其本质是任何连续测量的时间序列或信号都可以表示为不同频率的正弦波信号的无限叠加,这种理论对平稳信号尤其是周期信号分析是非常有效的,但对于非周期信号或时变信号,这种分析会存在很多不足。人们对这些不足进行了很多富有成效的改进,如加入窗口函数、时频联合、改变基函数等,但是这些理论改进后所对应的频率参数仍是傅里叶变换意义上的频率。另外,这些改进理论大都拘泥于明确的数学框架,对于不同的信号其变换方式是固定不变的。

Hilbert-Huang 变换是一种新的非平稳、非线性信号分析方法,可以认为是一种自适应时频分析方法,它可以根据信号的局部时变特征进行自适应的时频分解。Hilbert-Huang 变换以经验模态分解和 Hilbert 变换为基础,可以克服传统方法中用无意义的谐波分量来表示非平稳信号的缺陷,并可得到极高的时频分辨率,具有良好的时频聚集性。另外,Hilbert-Huang 变换不受傅里叶变换框架的束缚,因为它不是基于傅里叶变换的频率分析,而是基于 Hilbert 变换的瞬时频率分析,这使得瞬时频率具有更明确的意义。

本书包括 5 章内容,主要讨论 Hilbert-Huang 变换以及在电力系统信号处理中的应用。第 1 章主要讨论非平稳信号处理中几个常见概念,包括信号平稳性的矛盾、瞬时频率的争论和不确定性原理的讨论。这些概念的讨论对后面 Hilbert-Huang 变换及应用的理解具有很好的帮助作用。第 2 章主要讨论傅里叶变换的不足及改进方法,包括傅里叶变换及其不足、傅里叶变换的第一类改进方法、第二类改进方法、第三类改进方法及小波变换的延伸。这一章的主要目的是为引入 Hilbert-Huang 变换进行铺垫,详细分析傅里叶变换的不足及三种类型的改进思路,以及每类改进目前存在的问题。另外,鉴于目前小波变换的延伸是研究的热点,着重介绍小波变换延伸中复小波、多小波和超小波的内容。第 3 章主要讨论

Hilbert-Huang 变换研究现状及改进方法,包括 Hilbert-Huang 变换及特性、Hilbert-Huang 变换存在的问题、端点效应及模态混叠的抑制和 Hilbert-Huang 变换的拓展等。这一章的主要目的是介绍 Hilbert-Huang 变换内容及讨论其目前存在的问题,着重对端点效应和模态混叠两类问题进行分析。通过这两类改进方法的综述,对重要改进方法进行介绍,并对其改进性能进行分析。另外,本章还介绍 Hilbert-Huang 变换的三种拓展方法。第 4 章主要讨论 Hilbert-Huang 变换在电能质量分析中的应用,包括电能质量检测与识别研究现状、基于 Hilbert-Huang 变换的谐波与间谐波检测、暂态扰动检测、电能质量混合扰动识别和基于 Hilbert-Huang 变换拓展方法的电能质量扰动参数检测等内容。这一章的主要目的是讨论 Hilbert-Huang 变换及其改进在电能质量检测与识别中的应用,实验表明 Hilbert-Huang 变换可以有效地对一些电能质量扰动进行检测与识别。在具体使用过程中,与一些人工智能方法相结合,如多标签排位支持向量机等,可以对复杂的混合电能质量扰动进行有效的检测与识别。另外,本章也介绍 Hilbert-Huang 变换拓展方法在电能质量扰动参数检测方面的应用。第 5 章主要讨论 Hilbert-Huang 变换在电力负荷预测中的应用,包括电力负荷预测概述、电力负荷预测的主要方法、EMD 在短期电力负荷预测中的应用、基于 EEMD 与 SS-PSO 结合的短期电力负荷预测方法、计及风电并网的电力负荷预测和基于等效负荷预测模型的负荷预测等部分。这一章的主要目的是讨论 Hilbert-Huang 变换在计及风电并网的电力负荷预测中的应用,实验表明, Hilbert-Huang 变换可以有效地对计及风电并网的负荷进行预测。在具体预测过程中,分别与四种神经网络和支持向量机相结合对每个固有模态分量进行预测,并比较其性能。为了准确预测第一个固有模态分量,将改进的 EMD 算法与区域粒子群优化算法相结合,进行电力负荷的组合预测。另外,考虑计及风电并网的负荷预测需求,建立基于等效负荷预测模型,采用 PSO 和灰色关联度的线性组合预测模型进行负荷预测。实验表明, Hilbert-Huang 变换可以将负荷序列进行有效的分解,与其他方法结合可以得到令人满意的预测结果。

本书的主要内容来源于国家自然科学基金(51007074)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-08-0825)、教育部霍英东青年教师基金(101060)等项目的研究成果,也得到了国家自然科学基金(U1134205、51377136)的支持,是作者团队成员多年研究成果的总结,其中包括作者指导的博士研究生和硕士研究生的研究成果;同时也参考了国内外有关 Hilbert-Huang 变换及其应用的学术论文和书籍。在本书的撰写过程中,朱玲硕士和高松硕士完成书中一些仿真程序的编写,王英博士和崔艳硕士参与了相关的校稿工作,在此表示感谢。

2012 年秋, Norden E. Huang(黄镌)教授来成都进行一周的讲学,在此期间作者与黄镌教授进行了深入讨论和交流;2015 年春,黄镌教授在看了本书的初稿后,亲自为该书作序,在此对黄镌教授的支持和鼓励表示感谢。

本书所参考的文献已在每章后列出,谨向这些文献的作者表示感谢。另外,限于作者水平,有些观点和结论尚不成熟,希望能够起到抛砖引玉的作用。书中不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2015 年 6 月于成都

目 录

序

前言

第 1 章 非平稳信号处理中几个常见概念	1
1.1 引言	1
1.2 信号平稳性的矛盾	2
1.2.1 信号非平稳性的两种含义	4
1.2.2 非平稳信号与时变信号	5
1.3 瞬时频率的争论	5
1.3.1 傅里叶频率	6
1.3.2 瞬时频率	6
1.4 不确定性原理的讨论	13
1.4.1 量子力学中的不确定性原理	14
1.4.2 信号处理中的不确定性原理	14
1.4.3 不确定性原理的争论	22
1.5 本章小结	23
参考文献	23
第 2 章 傅里叶变换的不足及改进方法	25
2.1 引言	25
2.2 傅里叶变换及其不足	26
2.2.1 傅里叶变换的定义	26
2.2.2 傅里叶变换的物理意义	27
2.2.3 傅里叶变换存在的不足	28
2.3 傅里叶变换的第一类改进方法	33
2.3.1 短时傅里叶变换的定义	34
2.3.2 短时傅里叶变换的不足	34
2.3.3 Gabor 展开的定义	35
2.3.4 Gabor 展开的不足	36
2.4 傅里叶变换的第二类改进方法	37
2.4.1 Wigner-Ville 分布的定义	37
2.4.2 Wigner-Ville 分布的不足	37

2.4.3	Cohen 类分布的定义	38
2.4.4	Cohen 类时频分布的不足	39
2.5	傅里叶变换的第三类改进方法	39
2.5.1	小波的定义	39
2.5.2	小波变换的本质	42
2.5.3	小波变换的不足	43
2.6	小波变换的延伸	52
2.6.1	复小波	52
2.6.2	多小波	57
2.6.3	超小波	70
2.7	本章小结	73
	参考文献	73
第 3 章	Hilbert-Huang 变换研究现状及改进方法	79
3.1	引言	79
3.2	Hilbert-Huang 变换及特性	80
3.2.1	Hilbert-Huang 变换介绍	80
3.2.2	Hilbert-Huang 变换的特点	87
3.3	Hilbert-Huang 变换存在的问题	89
3.3.1	端点效应问题	89
3.3.2	模态混叠问题	89
3.3.3	筛分停止准则问题	90
3.3.4	样条拟合问题	90
3.4	端点效应的抑制	91
3.4.1	端点效应抑制方法综述	91
3.4.2	基于人工神经网络和镜像延拓相结合的端点效应处理方法	93
3.4.3	基于支持向量机和镜像延拓相结合的数据延拓方法	101
3.5	模态混叠的抑制	108
3.5.1	模态混叠抑制方法综述	108
3.5.2	差频法改善模态混叠	109
3.5.3	基于 Fourier 变换改善模态混叠	111
3.5.4	集合经验模态分解法改善模态混叠	115
3.5.5	高频谐波注入法改善模态混叠	116
3.6	Hilbert-Huang 变换的拓展	127
3.6.1	LMD 分解	127
3.6.2	HVD 分解	131

3.6.3 CEEMD 分解	134
3.7 本章小结	137
参考文献	137
第 4 章 Hilbert-Huang 变换在电能质量分析中的应用	141
4.1 引言	141
4.2 电能质量检测与识别研究现状	142
4.2.1 电能质量扰动检测与识别概述	142
4.2.2 单一电能质量检测与识别研究现状	142
4.2.3 混合电能质量检测与识别研究现状	145
4.3 基于 Hilbert-Huang 变换的谐波与间谐波检测	154
4.3.1 基于 Hilbert-Huang 变换的谐波检测	154
4.3.2 电气化铁路实测谐波的检测	159
4.4 基于 Hilbert-Huang 变换的暂态扰动检测	170
4.4.1 基于 EMD 的暂态扰动检测	170
4.4.2 基于 EEMD 的暂态扰动检测	174
4.5 基于 Hilbert-Huang 变换的电能质量混合扰动识别	175
4.5.1 基于 EEMD 的电能质量混合扰动检测	175
4.5.2 基于时频多特征量的混合扰动识别	178
4.5.3 基于 EEMD 和多标签排位支持向量机的混合扰动识别	187
4.6 基于 Hilbert-Huang 变换拓展方法的电能质量扰动参数检测	199
4.6.1 基于改进的局部均值分解的电能质量扰动参数检测	199
4.6.2 基于希尔伯特振动分解的谐波与间谐波的检测	203
4.6.3 基于互补集合经验模态分解的电能质量扰动参数检测	205
4.7 本章小结	212
参考文献	212
第 5 章 Hilbert-Huang 变换在电力负荷预测中的应用	217
5.1 引言	217
5.2 电力系统负荷预测概述	217
5.2.1 电力负荷预测的分类	217
5.2.2 电力负荷序列的特性	218
5.3 电力负荷预测的主要方法	219
5.3.1 多尺度分解方法	219
5.3.2 人工智能方法	220
5.3.3 组合预测方法	221
5.3.4 其他方法	222

5.4 EMD 在短期电力负荷预测中的应用	223
5.4.1 电力负荷的 EMD 分解	225
5.4.2 EMD 与人工神经网络的结合	227
5.4.3 EMD 与支持向量机的结合	246
5.4.4 几种方法预测结果的比较	250
5.4.5 基于 EMD 的组合负荷预测	251
5.5 基于 EEMD 与 SS-PSO 结合的短期电力负荷预测方法	254
5.5.1 EEMD 与 SS-PSO 结合的预测方案	254
5.5.2 SS-PSO 原理	256
5.5.3 电力负荷序列的 EEMD 分解	259
5.5.4 电力负荷预测模型	263
5.5.5 电力负荷预测结果	263
5.6 计及风电并网的电力负荷预测	269
5.6.1 风电功率预测研究现状	269
5.6.2 短期电力负荷与风电功率数据的特性对比	271
5.6.3 基于 PSO 和灰色关联度的线性组合预测	280
5.6.4 短期电力负荷的预测结果及分析	284
5.6.5 风电功率的预测结果及分析	293
5.7 基于等效负荷预测模型的负荷预测	301
5.7.1 等效负荷的预测模型及整体思路	301
5.7.2 等效负荷的预测结果及对比分析	303
5.8 本章小结	306
参考文献	306

第1章 非平稳信号处理中几个常见概念

1.1 引言

信号,作为现代科学最常用的词汇之一,不仅在科学领域,而且在日常生活中也经常被使用。不同的科学领域,信号的含义是不尽一致的。在信息论中,信号是可用数学函数表示的一种信息流;在计算机科学中,信号表示计算过程中传递的事件;在通信领域中,信号是通信协议的一部分。信号本质是消息的表现形式,信号是传递信息的载体,信息则是信号的具体内容。信号处理就是将记录在某种媒体上的信号进行处理,以便获得有用信息的过程,它是对信号进行提取、变换、分析、综合等处理过程的统称。

传统信号处理一般假设信号本身为线性的、高斯性的和平稳性的,而现代信号处理则是以非线性、非高斯性和非平稳性的信号为研究对象。其中,近十几年研究的热点是非平稳信号处理技术,尤其以时频分析(time frequency analysis)的研究为代表,如短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)、戈勃展开(Gabor transform, GT)、维格纳-威利分布(Wigner-Ville distribution, WVD)、科恩类分布(Cohen class distribution)、小波变换(wavelet transform, WT)等。对于目前绝大部分时频分析,其频率特征实质是傅里叶频率(Fourier frequency),即基于傅里叶变换(Fourier transform, FT),因此对信号傅里叶变换本身的限制,也会在这些时频分析的实际应用中体现。为此,需要寻求一种不以傅里叶变换为基础的新的时频分析方法,希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)就是其中重要的代表方法。

现代电力系统是目前世界上最复杂、最庞大的人造系统之一。该系统结构复杂、地域分布广、运行方式多变,导致其在正常和故障等状态时产生的信号呈现出时变、暂态和受噪声干扰等特点。现代信号处理中的非平稳处理技术已在电力系统信号处理中得到广泛使用,但在某些情况下仍然存在着一些不足。Hilbert-Huang 变换相比于其他非平稳信号处理方法,具有一些独特的优点。因此,将 Hilbert-Huang 变换应用于电力系统中的信号处理,尤其是对暂态或时变信号的处理,已成为其在电力系统中应用研究的重要趋势。

在介绍本书的内容之前,有必要对一些基本概念进行较为详细的介绍和讨论,主要包括信号的平稳性、信号的频率和不确定性原理。实际上,这些概念至今并没有十分明晰的定论,但它们一直影响着人们对信号处理尤其是非平稳信号处理的

理解和实际应用。

另外,除非特别说明,本书中的信号均指一维信号,且对信号幅值进行了归一化处理。

1.2 信号平稳性的矛盾

从信号统计性能描述的角度,信号可以被分为确定性信号和随机信号。狭义的信号确定性,指该信号的数学表达式能够确定,对于指定的某一时刻,信号有确定的值与之对应。广义的信号确定性,指该信号的数学统计特性能够确定。随机信号又称为不确定信号,是指无法用确定的时间函数来表达的信号。随机信号不能用确定的数学关系式来描述,任何一次观测只代表其在变动范围中可能产生的结果之一,其值的变动服从统计规律。随机信号不是时间的确定函数,其在定义域内的任意时刻没有确定的函数值,如图 1-1 所示。

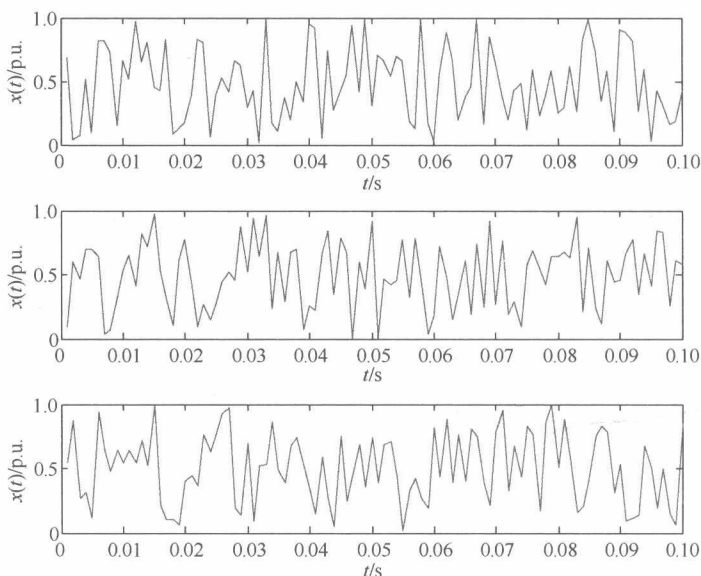


图 1-1 随机信号示意图

对于随机信号的处理必须依靠信号的统计量,如均值、方差、相关函数以及高阶统计量等。人们在进行随机信号处理时,总希望能够用较少的统计量描述信号更多的统计特性,这就涉及随机信号的平稳性问题。严格意义上讲,对信号平稳性的讨论前提是该信号必须为随机信号。

因此,目前在众多文献中出现的“非平稳信号”与“非平稳随机信号”在统计信号意义上应该是完全一致的。

下面介绍随机信号的严格平稳性和广义平稳性^[1,2]。

若一随机过程 $\{x(t_1), \dots, x(t_n)\}$ 的联合分布函数与 $\{x(t_1 + \tau), \dots, x(t_n + \tau)\}$ 的联合分布函数对于所有的 $t_1, \dots, t_n$ 和 $\tau \in T$ 都相同,则随机过程 $\{x(t), t \in T\}$ 称为严格平稳随机过程。严格平稳随机过程也称狭义平稳过程,所对应的随机信号 $x(t)$ 为严格平稳随机信号。

这意味着,平稳随机信号的统计特性与所选取的时间起点无关,或者说,整个随机过程中的统计特性不随时间的推移而变化。实际中,按照上面的定义判断一个随机信号的平稳性是非常不容易的,这是因为在很多情况下,完全获得一个随机过程的联合分布函数是非常困难的,因此,就有了广义平稳性的概念。

随机过程 $\{x(t), t \in T\}$ 称为广义平稳过程,若满足:

(1) 期望函数,即一阶原点矩函数: $E\{x(t)\} = m$ 为常数。

(2) 均方值函数,即二阶原点矩函数: $E\{|x(t)|^2\} < \infty$ 。

(3) 协方差函数,即二阶混合中心矩函数: $E\{[x(t) - m][x(\tau) - m]^* \} = R_x(t - \tau) - |m|^2$ 。其中, $R_x(t - \tau) = E\{x(t)x(\tau)^*\}$ 为随机过程的自相关函数, $x(\tau)^*$ 代表 $x(\tau)$ 的复数共轭。

则广义平稳随机过程也称弱平稳、协方差平稳或二阶平稳过程,所对应的随机信号 $x(t)$ 为广义平稳随机信号。

该定义的本质含义是:在期望函数为常数,均方值函数存在的情况下,一个随机过程的协方差函数不随时间的推移而变化,即与起始时间无关,而只取决于时间差 $t - \tau$,因此广义平稳也称协方差平稳或二阶平稳。将随机信号分为平稳信号和非平稳信号具有重要的实际意义,若信号为平稳信号,则可使问题分析变得非常简单。一个信号不是广义平稳的,则称它是非平稳信号。

传统上使用概率与数字特征来描述平稳随机信号的统计,工程上多用相关函数与时变功率谱来描述,近年来还发展了用时变参数信号模拟描述的方法^[3,4]。此外,还需根据问题的具体特征规定一些描述方法。目前,对非平稳随机信号还很难有统一而完整的描述方法。

通过对信号平稳性与非平稳性的介绍,可以看出,对于非平稳信号的定义是基于信号的统计特性,而通常所说的时频分析一般并未涉及信号本身的统计特性,将时频分析作为非平稳信号处理中的重要部分在很多方面是存在矛盾的。例如,研究非平稳信号一般采用时频联合分析的方法,如短时傅里叶变换、维格纳-威利分布、小波变换等,来观察信号瞬时频率随时间的变化,在做这些时频分析时,并没有使用涉及信号的均值、方差、相关函数等统计量,这些分析明显是把非平稳信号当成确定性信号来处理。

因此,将时频联合分析应用于非平稳信号处理时,信号本身是确定的,如电力

系统中的扰动信号和故障信号等,这与非平稳信号的数学定义是矛盾的。

1.2.1 信号非平稳性的两种含义

对非平稳概念的理解,通常有两种含义:针对随机过程的含义和针对确定性信号的含义。针对随机过程的含义在前面已进行了详细定义,其只有集合总体意义的统计特性,并无时间意义的统计特性,即随机信号的平稳与非平稳的区别是集合总体意义统计的不同,而不是时间意义统计的不同。

针对确定性信号的非平稳概念尚无明确的定义,但在众多文献中隐含的意义多为参数随时间变化,甚至突变,如正弦信号叠加一个突发脉冲,这个脉冲往往就被视为非平稳。确定性信号往往通过周期信号(或衰减指数信号)来逼近,因此针对确定性信号的非平稳概念往往更狭窄地理解为周期信号的参数(或衰减指数信号的参数)发生变化或突变。但是这种狭义的非平稳仍然不具有严格操作性,如究竟参数变化多大可视为突变。特别是用于估计参数的时间长度选择更是难以把握,它需要结合研究对象的先验知识,经过反复试验来选择一个较为合理的数值^[5]。

在信号处理中,处理非平稳的主要方法有自适应滤波(adaptive filtering, AF)、短时傅里叶变换、短时自回归滑动平均(auto regression moving average, ARMA)参数谱、高阶谱(high-order spectrum, HOS)、时频分布等。这些方法的理论有时建立在集合平均上,但在应用中几乎没有进行集合平均,因此在本质上,它们适用的应该是针对确定性信号的非平稳模型,或者是各态历经过程与确定性函数叠加或耦合^[5]。上述各种处理方法的目的是去掉或抑制确定性因素的影响,而各态历经过程的参数则借助处理方法所隐含的时域平均来估计。

电力系统大量的信号均属于这种情况,如输电线路短路产生的暂态故障信号,电能质量扰动中的暂态脉冲、暂态振荡等,如图 1-2 所示。人们在对这些信号进行分析和处理时,并未对其进行统计特性分析,实际上也不可能对其统计特性进行分析,所进行的仅是直接利用相关的变换手段进行分析与处理,也就是说人们未按照随机信号进行处理,而是按照确定性信号进行处理。

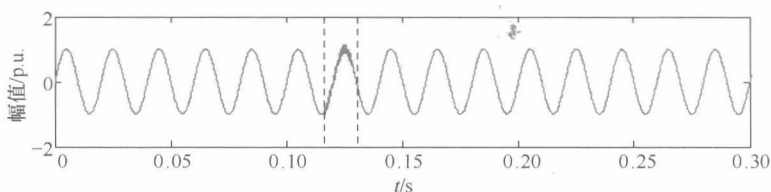


图 1-2 电力系统电能质量中的暂态扰动信号

1.2.2 非平稳信号与时变信号

很多文献认为,“分析和处理平稳信号的最常用也是最主要的方法是傅里叶分析;时频分析,包括小波变换是分析非平稳信号的有效工具”,或“平稳和非平稳信号都是针对随机信号说的,一般的分析方法有时域分析、频域分析、时频联合分析”,这些说法实际上并非十分准确。傅里叶变换和时频分析的前提一般默认信号是确定性信号,该信号并不存在平稳与非平稳之分。

若认可多数文献的说法,则能够较好地解释这里的非平稳信号是时变或频变的确定性信号,这也是一些文献对非平稳信号的解释。但这种解释并不严格,傅里叶变换对一些时变或频变信号的处理效果非常好,如电力系统中常见的谐波信号等。而傅里叶变换的主要缺点是没有时间和频率的联合分布,不能同时分析和处理信号在时域和频域的信息。这些与信号的平稳与否并无联系,仅是提取信号时域和频域信息效果好坏的衡量。

因此,认为非平稳信号为时变或频变信号这种观点在物理和数学意义上的解释并不充分,不能从本质上说明使用时频分析进行非平稳信号处理是合适的结论,这些算法的实现在本质上仍然是时域平均而非集合平均。

综上所述,关于“时频联合分析进行非平稳信号的应用”与“非平稳信号的定义”从概念上是冲突的,目前的研究并不能将两者进行很好的统一。这意味着,这两种说法本质是不一样的,“时频联合分析进行非平稳信号的应用”中的非平稳信号是需要同时进行时域和频域信息提取的确定性信号,通过利用时频联合分析方法进行处理,获得信号的时频信息。“非平稳信号的定义”中的非平稳信号是其统计量与时间相关的信号,需要通过时变参数模型和进化谱等方法进行处理以获得信号参数估计和谱估计^[4,6]。

为了使这两种概念有清晰的区别,本书认为:“非平稳信号”与“非平稳随机信号”是不同的,“非平稳信号”在本书中是指需要分析时频特性的确定性时变信号或频变信号,而“非平稳随机信号”是满足信号非平稳定义随机信号。

1.3 瞬时频率的争论

若明确研究对象为确定性信号,则一个非常重要的概念是频率,虽然该概念非常简单,但是在后面 Hilbert-Huang 变换中的含义却非常重要。在本节中,先介绍傅里叶频率,然后对瞬时频率的定义和限制进行讨论,最后进行简单的总结。

时间和频率是信号分析与处理中两个最常用的物理量。从物理意义上讲,频率就是表征信号交变的物理量。频率是单位时间内某事件重复发生的次数,在物理学中通常以符号 f 或 ν 表示。设 T 时间内某事件重复发生 n 次,则此事件发生

的频率为 $f=n/T$, 单位为 Hz。又因为周期定义为重复事件发生的最小时间间隔, 所以频率也可以表示为周期的倒数。

1.3.1 傅里叶频率

众所周知, 频率和周期信号是对应的, 由于分析周期信号最重要的工具是傅里叶变换, 其变化的结果揭示了信号中周期谐波分量的周期变化快慢, 即频率。因此, 信号处理中的频率实质是傅里叶变换的频率, 也就是谐波信号的频率。若信号不是周期信号, 按照频率是周期倒数的理论, 则频率是不存在的, 如单一波形的矩形信号。但是根据傅里叶变换的本质, 非周期信号可由多个周期的谐波信号叠加而成, 即非周期信号的频率包含了多个谐波信号的频率。那么单一波形的矩形信号就存在频率, 而且是无穷多个。也就是说, 傅里叶分析认为非周期信号是由许多周期谐波信号组成的, 虽然在实际应用中一些分析结果并不能从物理意义上进行解释, 但是从数学角度来看这种方法是没有任何问题的。

谐波信号的频率可以通过求取信号周期的倒数获得, 其物理意义就是单位时间内运动的次数。但实际上获得的信号通常是非谐波周期信号, 需要先将该信号分解为一系列谐波信号, 分解后每个谐波信号频率即为原信号含有的频率。

设时域内一个正弦信号为: $x(t) = \sin(\omega t + \varphi_0)$, ω 为信号的角频率, φ_0 为信号的初相角, 其傅里叶变换为

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1-1)$$

式中, $X(\omega)$ 称为信号 $x(t)$ 的频谱密度函数; f 称为傅里叶频率。频谱密度函数在全局意义上揭示了信号的频域特征。信号中含有的每一个傅里叶频谱是全体含有该频率的谐波贡献的结果, 其实质是表征信号在一定时间内的总体特征。

信号的频谱密度函数可以明确表征在信号总的持续时间内存在哪些频率, 但是没有定位这些频率在什么时候存在, 这是由傅里叶变换的本质所决定的。解决该问题的直接方法是采用时间和频率的联合分布来表征, 另外一种思路是定义随时间变化的频率, 即瞬时频率。

1.3.2 瞬时频率

对于谐波信号, 频率定义为信号周期的倒数, 其值是恒定的, 物理含义也是显而易见的, 然而通常遇到的信号其频谱特性往往是时变的。1936 年 Armstrong 发现在通信中对正弦信号进行频率调制可有效地抑制噪声, 人们随之开始对调频信号中“频率”这一物理量进行研究。1937 年 Carson 和 Fry^[7]推广了频率的定义, 使之成为随时间变化的函数。1946 年 Gabor^[8]给出了经典解析信号的定义, 为研究瞬时频率提供了理论基础。同年, Ville^[9]将 Carson 和 Fry、Gabor 的工作结合到