

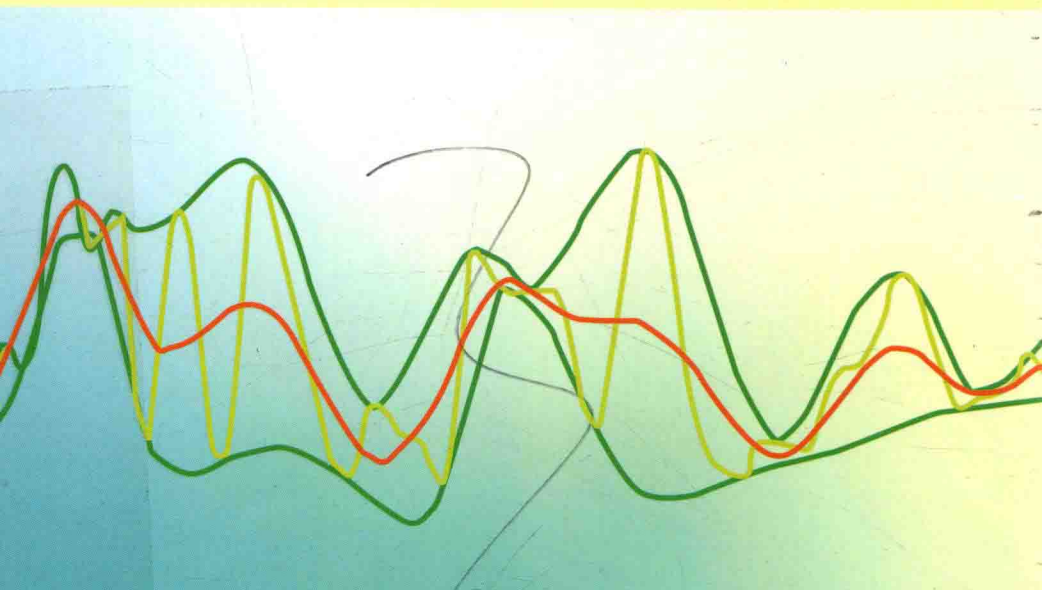


国防科技著作精品译丛

Hilbert-Huang Transform and Its Applications
2nd Edition

希尔伯特-黄变换及其应用 (第2版)

[美] Norden E. Huang [加] Samuel S.P. Shen 著
张海勇 韩东 王芳 徐池 陈立军 译



 **World Scientific**
Connecting Great Minds

 **国防工业出版社**
National Defense Industry Press

希尔伯特-黄变换及其应用 (第2版)

Hibert-Huang Transform and Its Applications:
2nd Edition

[美] Norden E. Huang

[加] Samuel S. P. Shen 著

张海勇 韩 东 王 芳 徐 池 陈立军 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2015 -270 号

图书在版编目 (CIP) 数据

希尔伯特-黄变换及其应用: 第二版/ (美) 黄锬 (Norden E Huang), (加) 沈善普 (Samuel S P Shen) 著; 张海勇等译. -- 北京: 国防工业出版社, 2017. 4
书名原文: Hilbert Huang Transform and Its Applications: 2 Edition
ISBN 978-7-118-11367-9

I. ①希… II. ①黄… ②沈… ③张… III. ①希尔伯特变换 IV. ①O177.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 123197 号

Copyright © 2014 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Simplified Chinese translation arranged with World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore.

The Publisher shall submit to the Proprietor for his approval a proof of the copyright page and the cover of his edition.

希尔伯特 - 黄变换及其应用 (第 2 版)

[美] Norden E. Huang [加] Samuel S. P. Shen 著
张海勇 韩 东 王 芳 徐 池 陈立军 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 24 $\frac{3}{4}$

字 数 440 千字

版 印 次 2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—1500 册

定 价 120.00 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

序言

自 2005 年第一版出版,已过去 8 年时间。在这期间,HHT (Hilbert-Huang transform) 的应用经历了爆发式的增长。每年都发表数百篇论文,其覆盖领域从宇宙哲学到生物医学诊断。召开了 3 次 HHT 国际会议:第一次是在中国台湾召开,时间是 2006 年;第二次在中国广州的中山大学召开,时间是 2008 年;第三次在中国青岛第一海洋研究所召开,时间是 2011 年。每次会议都有来自世界各地的 100 多位科学家和工程师参加。

本书第二版更新了自 2005 年以来的一些 HHT 方法的进展,增加了 3 个额外章节,分别为:整体模态分解 (EEMD),多元 EMD (MEMD),以及时间依赖的内部相关性 (TDIC)。引入到 HHT 方法中的新部分有效地扩展了 HHT 的应用范围和使用群体。新版也包含更多的索引,以便读者迅速地找到书中特定理论和步骤的恰当位置。

在这 3 个新章节所阐述方法的进展之外,EMD 也取得了数学上的重大进展。数学家对于发展新的有效的算法,通过探索信号和图像中的稀疏性来表示多尺度信号和图像的兴趣也越来越大。其结果是,EMD 能作为数据时频表示的非线性版本。自 EMD 引入以来,EMD 数据表示引领了令人振奋的数学进展。加州理工学院的 Thomas Y. Hou 教授和他的团队,以及北京清华大学的 Shi Zuqiang 教授指出,通过基于稀疏性的非线性最优过程,可将任意函数分解为一系列内部模态函数的和。他们的结果是长期回避的理论基础的重大进展,因为他们的工作证明了 EMD 是傅里叶展开的系统归纳,是自定义和自适应的计算程序。

这些进展推动了两个由应用数学团体所组织的国际会议：第一个是 2011 年美国明尼苏达大学的数学及其应用学会 (IMA) 主办的热点问题研讨会，主题是“非线性非平稳信号的瞬时频率和趋势”；第二个是 2013 年由美国加州大学洛杉矶分校的纯粹与应用数学学会主办，为期一周的专题研讨会“自适应数据分析和稀疏性”。这些研讨会的目标是探索自适应数据分析方法的潜力。其中一个主题就是确定非线性和非平稳数据中的趋势和瞬时频率，这一个是是在气候和经济学研究中有挑战性，同时也是关键性的问题。这些会议讨论了在自适应数据分析、其他新的数学理论，以及有效的计算方法等方面，确定趋势和瞬时频率的近期重大进展。这些努力涉及一系列的数学工具，包括非线性变化方法、最优化、数据的稀疏表示、随机算法，以及统计方法。这些专题研讨将各领域的专家集合到一起，互相交换思想，确定新的研究机会，并发展 HHT 研究中的新兴方向。新机会包括探索内部潜在过程，创建预见性的模型并扩展回归中的趋势研究，后者对于其他研究团体有巨大兴趣，例如计量经济学和金融。

为了总结越来越多的研究结果，在 2009 年，由主编 Thomas Y. Hou 和 Norden E. Huang 共同创办了一个新期刊：*Advance in Adaptive Data Analysis* (AADA)。AADA 期望成为一个跨学科的期刊，致力于报道数据分析方法及其应用的原始研究结果，尤其特别关注自适应方法。这个期刊的任务是在常规数据处理水平上提升数据分析，使它作为科学探索和工程应用的一个工具。在最近 5 年，AADA 已经刊登了超过 200 篇科技文章，充分发挥了推广现有 HHT 研究最新成果的作用。例如，高引用率、广泛应用的 EEMD 方法就出现于 AADA 的首期。

HHT 的应用领域自 2005 年起变得越来越丰富，而且依旧有活力地增长。没有哪本书籍可以概括 HHT 已经出现的大多数重要结果。自 2005 年，在某种程度上，本书是作为 HHT 方法的一个介绍，是 1998 年 Huang 等原始文章“*The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis*, Proc. Roy. Soc. London, A454, 903-995”的补充。新版增加了 3 个新的章节，我们希望本书能够在更综合性的书籍出现之前，继续作为 HHT 的介绍。

Norden E. Huang 和 Samuel S. P. Shen

中国台湾台中市和美国圣地亚哥

2013 年 8 月

目录

第 1 章 希尔伯特 – 黄变换及其相关数学问题介绍	1
1.1 简介	1
1.2 希尔伯特 – 黄变换	3
1.2.1 经验模态分解 (抽取过程)	4
1.2.2 希尔伯特谱分析	13
1.3 近期进展	15
1.3.1 归一化希尔伯特变换	15
1.3.2 置信限	18
1.3.3 IMF 的统计学意义	19
1.4 与 HHT 相关的数学问题	20
1.4.1 自适应数据分析方法	20
1.4.2 非线性系统辨识方法	21
1.4.3 非平稳过程预测问题 (EMD 的边界效应)	22
1.4.4 样条问题 (HHT 的最佳样条实现, 收敛和 2D) ...	22
1.4.5 最优化问题 (最佳 IMF 选择和模态混合唯一性) .	23
1.4.6 近似问题 (希尔伯特变换和积分)	24
1.4.7 与 HHT 相关的众多统计学问题	25
1.5 结论	25
参考文献	26

第 2 章 总体经验模态分解及其多维扩展	29
2.1 简介	29
2.2 经验模态分解	30
2.3 总体经验模态分解	32
2.4 多维总体经验模态分解	37
2.5 总结和讨论	44
参考文献	45
第 3 章 经验模态分解的多元扩展	48
3.1 简介	48
3.2 EMD 的多元扩展	51
3.2.1 EMD 的复扩张	51
3.2.2 三元 EMD	55
3.2.3 多元 EMD	58
3.3 MEMD 的模态对准属性	59
3.4 MEMD 的滤波器组属性和噪声辅助 MEMD	60
3.5 应用	63
3.5.1 用多普勒雷达数据的速度估计	63
3.5.2 使用 NA-MEMD 的呼吸研究	64
3.5.3 运动图像数据分类	65
3.6 讨论和结论	66
参考文献	67
第 4 章 基于 B 样条的经验模态分解	71
4.1 简介	71
4.2 经验模态分解的 B 样条算法	73
4.3 一些相关的数学结果	76
4.4 BS-EMD 的性能分析	83
4.5 应用举例	89
4.6 结论和未来研究方向	96
参考文献	97

第 5 章 与 EMD 相当的滤波器组, 从说明到应用	101
5.1 简介	101
5.2 频域随机透视图	102
5.2.1 模型和仿真	102
5.2.2 等价传输函数	103
5.3 时域的确定性透视图	107
5.3.1 模型和仿真	107
5.3.2 等价冲击响应	107
5.4 选择的应用	109
5.4.1 基于 EMD 的缩放比例指数估计	109
5.4.2 EMD 作为数据驱动的谱分析工具	112
5.4.3 用 EMD 降噪并去除长期趋势	113
5.5 结论	117
参考文献	118
第 6 章 HHT 抽取和滤波	120
6.1 简介	120
6.2 HHT 抽取的目标	122
6.2.1 幅度和相位函数的限制	123
6.2.2 截止点分析	126
6.3 Huang 的抽取算法	126
6.4 增量, 实时 HHT 抽取	127
6.4.1 检测迭代的收敛性	128
6.4.2 时间扭曲分析	129
6.4.3 计算扭曲滤波器特性	131
6.4.4 分离幅度和相位	132
6.5 标准时间滤波	133
6.6 案例研究	134
6.6.1 简单的参考实例	134
6.6.2 幅度调制例子	135
6.6.3 频率调制例子	138
6.6.4 幅度阶跃例子	141
6.6.5 频移例子	145

6.7 总结和结论	148
6.7.1 个案研究发现总结	148
6.7.2 研究方向	149
参考文献	149
第 7 章 内部模态函数的统计显著性检验	152
7.1 引言	152
7.2 EMD 中高斯白噪声属性	154
7.2.1 数值试验	155
7.2.2 IMF 的平均周期	155
7.2.3 IMF 的傅里叶谱	156
7.2.4 IMF 的可能分布及它们的能量	158
7.3 平均能量密度的扩展函数	161
7.4 噪声数据统计显著性检测的例子	164
7.4.1 NAOI 数据 IMF 检验	165
7.4.2 SOI 数据的 IMF 检测	167
7.4.3 GASTA 数据的 IMF 检验	168
7.4.4 后验检测	170
7.5 总结和讨论	170
参考文献	171
第 8 章 基于时间的内在相关性	174
8.1 引言	174
8.2 相关系数分析的局限性	176
8.3 TDIC 和 EMD	180
8.3.1 TDIC 的计算	180
8.3.2 TDIC 在绘图中的图形注释	181
8.3.3 时间相关的内在互相关	183
8.3.4 时间相关的内在自相关	185
8.3.5 减少相关系数的局限性	187
8.4 TDIC 的地球物理数据的应用	190
8.4.1 ENSO 和 IOD	191
8.4.2 古气候观测	194

8.5 总结和结论	200
参考文献	201
第 9 章 希尔伯特 - 黄变换用于气象数据	204
9.1 引言	204
9.2 步骤	206
9.3 应用	211
9.3.1 海平面高度	211
9.3.2 太阳辐射	215
9.3.3 气压图形观测	217
9.4 结论	220
参考文献	221
第 10 章 经验模态分解和气候变异性特性	224
10.1 引言	224
10.2 数据	225
10.3 方法	227
10.4 置信限的统计测试	229
10.5 结果和物理诠释	233
10.5.1 年度周期	233
10.5.2 准两年振荡	234
10.5.3 类似于 ENSO 的模式	235
10.5.4 在平流层的太阳周期信号	235
10.5.5 第五个模式	237
10.5.6 趋势项	237
10.6 结论	238
参考文献	238
第 11 章 卫星数据流中轨道飞行物 EMD 修正	242
11.1 简介	242
11.2 NDVI 图像处理	245
11.3 经验模态分解	247
11.4 轨道漂移对 NDVI 的影响与 EMD-SZA 滤波	249

11.5 结论和讨论	252
11.6 扩展到 8 km 数据	256
11.7 NOAA-16 数据融合	257
11.8 结论	259
参考文献	259
第 12 章 非线性非平稳年度周期的每天的表面空气温度 数据的 HHT 分析	264
12.1 简介	264
12.2 分析方法和计算算法	268
12.3 数据	271
12.4 时间分析	272
12.4.1 TAC 和 NAC 的例子	272
12.4.2 数据的时间分辨率	276
12.4.3 EMD 方法的鲁棒性	276
12.5 频率分析	283
12.5.1 NAC 的希尔伯特谱	283
12.5.2 关于 NAC 和 TAC 异常的方差	284
12.5.3 关于 NAC 和 TAC 异常的功率谱	285
12.6 结论与讨论	286
参考文献	287
第 13 章 非线性海洋波的希尔伯特变换	290
13.1 简介	290
13.2 希尔伯特-黄谱分析	291
13.3 风生波的谱	295
13.4 统计特性和群组结构	298
13.5 总结	302
参考文献	303
第 14 章 结构损伤的经典模态分解和瞬时相位检测	306
14.1 结构健康监测简介	306

14.2 瞬时相位和经验模态分解	308
14.2.1 瞬时相位	309
14.2.2 经验模式分解和希尔伯特谱	310
14.2.3 从测量数据中提取瞬时相位	312
14.3 损伤检测中的应用	314
14.3.1 一维结构	314
14.3.2 试验验证	317
14.3.3 瞬时相位检测	320
14.4 携带多重损伤的框架结构	322
14.4.1 框架试验	322
14.4.2 利用 HHT 谱检测损伤	326
14.4.3 利用瞬时相位特征检测损伤	328
14.4.4 自回归建模与预测误差	331
14.4.5 基于混沌吸引子的预测误差	334
14.5 总结和结论	337
参考文献	338

第 15 章 基于 HHT 的桥梁结构健康监测方法

15.1 简介	342
15.2 回顾现有方法的技术发展水平	344
15.2.1 数据处理方法	345
15.2.2 加载条件	348
15.2.3 瞬时加载	349
15.3 希尔伯特-黄变换	350
15.4 损伤检测准则	351
15.5 损伤检测案例研究	353
15.6 结论	360
参考文献	361

第 16 章 HHT 在图像分析中的应用

16.1 引言	367
16.2 回顾	369

16.3 数字坡度图像分析	369
16.3.1 NASA 试验室	369
16.3.2 数字摄像机和设置	370
16.3.3 获得试验图像	371
16.3.4 对图像使用 EMD/HHT 分析	373
16.3.5 数字摄像机和结构	374
16.4 总结	381
参考文献	382

第 1 章

希尔伯特 – 黄变换及其相关数学 问题介绍

希尔伯特 – 黄变换 (HHT) 是一种基于经验的数据分析方法。它的展开基是自适应的, 可以对非线性和非平稳过程产生的数据, 获得有物理意义的表示。自适应性的优点有一定的代价, 即难以建立坚实的理论基础。本章介绍它的基本理论, 简要描述归一化希尔伯特变换的近期进展, 包括归一化希尔伯特变换、希尔伯特谱的置信限度、内部模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 的统计显著性测试。然后讨论与 HHT 相关的数学问题。问题包括 (i) 自适应数据分析的一般方法; (ii) 非线性系统的识别方法; (iii) 非平稳过程预测问题, 这与经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 边界效应有密切联系; (iv) 样条问题, 集中在为 HHT 寻找最佳样条工具、EMD 的收敛及二维 EMD; (v) 最佳 IMF 选择的最优化问题以及 EMD 分解的唯一性问题; (vi) 涉及希尔伯特变换保真度和数据真实积分的近似问题; (vii) 列出了与 HHT 相关的多种数学问题。

1.1 简介

传统的数据分析方法都是基于线性和平稳性的假设。仅在近年才有新方法被引入到分析非线性和非平稳数据。例如, 小波分析和 Wagner-Ville 分布 (Flandrin, 1999; Gröchenig, 2001) 是针对线性但却是非平稳数据的设计的。另外, 大量的非线性时间序列分析方法是针对

非线性但却是平稳且因果系统设计的(例如,见 Tong 1990; Kantr and Schreiber 1997; Diks 1999)。不幸的是,大多数实际系统,不论自然的或是人造的,数据更接近于同时包含非线性和非平稳性,分析从这样系统所得的数据是一个令人畏惧的问题。即使是广泛接受的带有确定基函数的数据展开数学规范也需要回避,因为对事先确定基函数的卷积计算,产生了除解之外的更多问题。要表示非线性和非平稳性数据的一个必要条件就是自适应基函数。一个事先确定的函数作为基函数是不能被信赖的,不论这个基函数有多么精密。有少数自适应方法可用于数据分析, Windrow 和 Stearns (Windrow and Stearns, 1985) 对这些方法进行了总结。然而,他们书中所给出的这些方法都是对平稳过程设计的。对于非线性非平稳数据, 自适应性是绝对必要的, 没有现成的方法可用。这样的基函数如何定义? 基函数的数学属性及其问题是什么? 数据分析的自适应方法如何获得? 要自适应, 就意味着基函数的定义是数据依赖的, 一种事后定义的基函数, 这种方法不同于已建立的数据分析数学样式。因此, 所需的定义就对数学团队提出了很大的挑战。为检验真实世界的的数据, 即便很具有挑战性, 新方法也无疑是很有需求的。一个近期发展的方法, 希尔伯特 - 黄变换 (HHT), 由 Huang 等 (Huang et al. 1996, 1998, 1999) 提出, 似乎有能力迎接这种挑战。

HHT 包含两部分, 即经验模态分解 (EMD) 和希尔伯特谱分析 (HSA)。该技术对于分析非线性非平稳数据是切实可行的, 尤其对于时频能量显示, 已经被多种方式检验和证实, 但都仅仅是经验性的。在所有研究的案例中, HHT 给出的结果较所有传统的时频分析方法分辨率更锐利。而且, HHT 在大多数的数据检验中都揭示了数据的真实物理意义。尽管该方法很强大, 但完全是凭经验的。为了使该方法更健全更严谨, 许多与 HHT 相关的重要数学问题需要解决。这里将列出所需面对的一些问题, 希望引起数学团体对 HHT 的兴趣, 迎接这个非常有趣的具有挑战性和关键性的研究领域。一些问题很简单, 可能在近几年就被解决, 另一些问题很难并需要花费更多的精力。回顾傅里叶分析的历史, 该技术在 1807 年提出, 直至 1933 年才被完全证明 (Plancherel, 1933), 可见付出了大量的时间和精力。在讨论数学问题前, 先给出一个简短的 HHT 方法简介。读者对细节感兴趣的话可以查阅 Huang 等的文章 (Huang et al. 1998, 1999)。

1.2 希尔伯特 - 黄变换

HHT 的发展是由详细描述非线性扭曲波所推动的, 其中信号的振动是在非平稳过程中天然存在的。众所周知, 自然界的物理进程大多是非线性非平稳的, 然而很少有数据分析方法能处理这样进程中所产生的数据。现有的方法要么是处理线性非平稳数据, 要么是处理非线性但平稳统计确定性过程, 正如前文所论述的。要检验真实世界中的非线性非平稳且随机的过程, 急需采用全新方法, 这是由于非线性过程需要特别的对待。过去那种对非线性系统强加线性结构是不恰当的。除周期性以外, 在过程中详细的动力学因素也需要确定, 因为非线性系统的一个典型的特点是它们的内波频率调制, 导致在一个振动周期中, 瞬时频率发生变化。举一个非常简单的非线性系统例子, 由非耗散多芬方程给出:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + x + \varepsilon x^3 = \gamma \cos(\omega t) \quad (1.1)$$

式中: ε 为一个不必非常小的参数; γ 是频率为 ω 的周期作用函数的振幅。

在式 (1.1) 中, 如果参数 ε 是零, 那么这个系统就是线性的, 解也很容易得知。然而, 假如 ε 是非零的, 那么这个系统是非线性系统。过去, 所有只要包含这样参数的系统都可以用微扰方法求解, 这里假设 $\varepsilon \ll 1$ 。然而假如 ε 与 1 相比不是那么小的话, 那么这个系统将变得高度非线性, 并且如分叉和混沌等少数现象也会伴随产生。这时, 微扰求解方法就不再适用了, 需要尝试数值解。无论哪种方式, 式 (1.1) 代表了一个非常简单的非线性系统, 但它也包含了所有非线性系统所具有的复杂性。用稍微不同的方式重写这个方程, 得

$$\frac{d^2x}{dt^2} + x(1 + \varepsilon x^2) = \gamma \cos(\omega t) \quad (1.2)$$

它的特点可以被更好地解释。括号里的数值可被认为是一个变化的弹簧常数, 或者一个变化的钟摆长度。因为钟摆的频率 (或周期) 由其长度决定, 很明显, 式 (1.2) 中所述系统的频率会随其位置时刻变化, 即使是在一个摆动周期内。正如 Huang 等 (Huang et al. 1998) 所指出的, 这个内波频率变化正是非线性系统的特征。过去, 当分析方法是基于线性傅里叶分析时, 除非凭借谐波, 否则这种内波频率变化不能被描述。因此, 任何非线性扭曲波形都被归于“谐波扭曲”。谐波扭曲是当我们强加线性结构到非线性系统时, 一种数学上的人为产物。它们可

能有数学含义,但没有物理含义(Huang et al. 1999)。例如,在水波例子中,这样的谐波成分在真实波形中没有任何实际的物理特征。用具有物理含义的方式描述这样的系统,应该采用瞬时频率,这样可以揭示内波频率调制。

计算瞬时频率的最简单方法是使用希尔伯特变换,通过该方法,任何维数为 L^P 的实值函数 $x(t)$ 的复共轭 $y(t)$ 可由式(1.3)确定(例如,见 Titchmarsh 1950):

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \text{PV} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1.3)$$

式中:PV 代表此奇异积分的主要值。

通过希尔伯特变换,定义解析信号为

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (1.4)$$

式中

$$a(t) = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta(t) = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (1.5)$$

其中: $a(t)$ 为瞬时振幅; θ 为相位函数。

瞬时频率可简单表示为

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.6)$$

强调了它的数学形式的详细的希尔伯特变换可查看 Hahn (Hahn 1996) 的文章。本质上,式(1.3)所定义的希尔伯特变换是 $x(t)$ 与 $1/t$ 的卷积。因此,式(1.3)强调了 $x(t)$ 的局部特性。在式(1.4)中,极坐标形式更加清晰地描述了这种局部属性,这种方式最符合 $x(t)$ 的幅度和相位变化三角函数。即便使用希尔伯特变换,定义即时频率也引出很多辩论。事实上,对于任意给定的函数,敏感的瞬时频率通过这种方法也不能被发现。由 Hahn 所提出的其中一个直接的应用(Hahn, 1996)会导致任意给出的数据具有几乎相等的正频率和负频率值问题。其结果就是,过去对希尔伯特变换的应用被限制在窄带数据,限制在窄的带宽并有相同数目的极值点和过零点。然而,频域滤波是线性操作,滤波后的数据会剥离谐波,结果会导致波形的扭曲。希尔伯特变换的真正优势是在 Huang 等引入了经验模态分解方法后才变得明显。

1.2.1 经验模态分解(抽取过程)

正如 Huang 等指出(Huang et al. 1996, 1998, 1999),经验模态分解对于处理非线性非平稳过程是非常必要的。与已有的方法相比,新