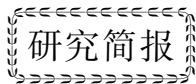


文章编号: 0253-3782(2007)02-0222-05



基于 HHT 提取重力固体潮的地震前兆信息^{*}

张 立^{1, 2)} 傅容珊¹⁾ 周 挚²⁾ 山秀明³⁾
梁 虹⁴⁾ 全海燕⁵⁾

- 1) 中国合肥 230026 中国科学技术大学地球和空间科学学院
- 2) 中国昆明 650224 云南省地震局
- 3) 中国北京 100084 清华大学电子工程系
- 4) 中国昆明 650091 云南大学信息学院
- 5) 中国昆明 650051 昆明理工大学信息工程与自动化学院

关键词 HHT 重力固体潮 瞬时频率 地震前兆

中图分类号: P315.72⁺6

文献标识码: A

Hilbert-Huang Transformation(HHT)是一种新的非线性信号处理方法(Huang, 1998). 通过 HHT 对信号进行经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD), 能有效地把各种频率成分以本征模态函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)形式从中分离出来. 再对 IMF 序列进行 Hilbert 变换, 可得到包含时间、频率、振幅的三维离散时频谱. 它提供了非常清晰的局部细节时频特征, 适合于描述具非线性非平稳变化特征的信号.

固体潮是唯一能够预先计算出的地球形变现象. 其理论值提供了一个平稳过程的分析背景: 可以依据地表任一点的固体潮理论值, 对比分析相应的固体潮观测值. 地震孕育过程是一个非平稳过程, 它叠加在平稳过程的背景上. 这就是固体潮地震观测的物理本质所在. 重力固体潮不仅已成为地震观测的重要手段, 而且是地震成因、地震前兆与地震预报研究的重要内容. 这主要是因为: 地震事件归根结底是发生在地质体中的力学过程; 地震孕育过程中, 重力固体潮观测的能量与频率都会出现相应的变化. 所以, 有必要从三维时频空间对地震影响重力固体潮的非线性非平稳作用加以分析.

本文在重力固体潮分析中引入 HHT; 结合 Hilbert-Huang 变换的优越性和固体潮的特点, 以相应的理论计算值作为对比背景, 设计提取地震前兆信息的特征参数, 研究震前瞬时频率特征参量异常变化特征, 捕捉地震前兆信息. 有关震前瞬时能量特征参量的研究另文讨论.

1 HHT

HHT 方法由经验模态分解和 Hilbert 变换两部分组成: 首先将原始信号分解成一组本征模态函数(IMF), 然后对本征模态函数进行 Hilbert 变换.

一般的实际信号常常是复杂信号, 不一定满足 IMF 条件. 故 Huang 等(1998)创造性地提出了一个假设: 任何信号都是由一些不同的 IMF 组成; 任何时候, 一个复杂信号都可以包含多个 IMF 信号; 如果模

^{*} 云南省自然科学基金项目(2003D0084M)和“十五”国家科技攻关项目(2004BA601B01-01-04)资助.
2006-05-08 收到初稿, 2007-01-18 决定采用修改稿.

† 通讯作者. e-mail: ynzl63@163.com

态之间相互重叠, 便形成复合信号. 在此基础上, Huang 等进一步指出, 可以用 EMD 将 IMF 筛选出来 (Huang *et al.*, 1998). 筛选的基本思想和步骤见 Huang 等(1998)、周挚等(2005)文章. 筛分后, 原始信号可由有限个 IMF 以及一个剩余分量(趋势项)之和表示. 由于每一个 IMF 代表一组特征尺度的信号, 因此筛分过程在本质上是复杂信号分解为不同特征波动的叠加.

Hilbert 变换是信号检测理论研究和通信工程应用中的一个重要工具. 通过 Hilbert 变换, 可以在不造成信息损失的前提下, 将一个实信号构造成一个复信号(解析信号), 使研究实信号的瞬时包络、瞬时相位和瞬时频率成为可能. 将 Hilbert 变换应用于 IMF, 可生成解析信号; 然后计算出瞬时频率, 进而求出 Hilbert 时频谱和 Hilbert 边际谱(Huang *et al.*, 1998; 周挚等, 2005).

2 提取重力固体潮地震前兆的分析思路

虽然 Hilbert 时频谱直观地显示了幅度-频率随时间变化的情况, 但 Huang-Hilbert 变换结果的三维分布中, 很难看出相关地震的直观异常表现(周挚等, 2005). 这说明简单地用瞬时频率和瞬时幅值作为分析地震前兆的特征参数并不容易达成目标. 故需要在一定的物理思想指导下, 变通使用 HHT, 以探索适用的特征参数.

机械结构出现损伤时的频率分化现象给人以有益启示. 研究表明, 正常振动信号的能量分布相对集中, 而故障振动信号的能量则向高频和低频两端扩散(王珍, 马孝江, 2002; 李宏坤, 马孝江, 2003). 见图 1 所示.

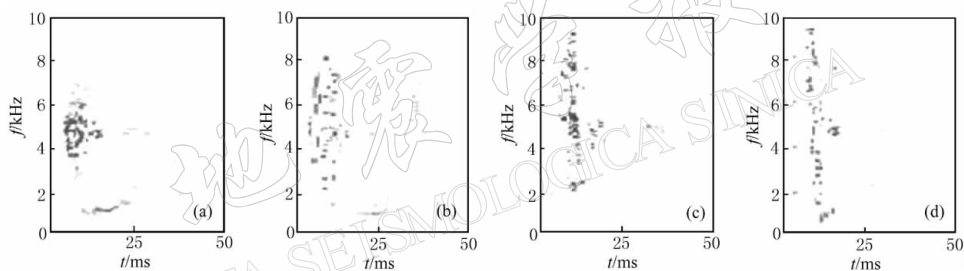


图 1 柴油机缸盖正常态与故障态振动信号的时频谱对比(引自王珍, 马孝江, 2002)

(a) 正常阶段; (b) 初期阶段; (c) 中期阶段; (d) 后期阶段

事实表明, 浅源地震是地壳介质在应力作用下发生快速脆性破裂的结果; 地震破裂过程中频率分化现象是一种客观存在. 岩石破裂实验和地震物理观测均表明, 地震破裂过程也存在类似机械结构损伤的频率分化现象(Ohnaka, Mogi, 1982; 许昭永等, 1998; 王赞赞等, 2003; 臧绍先, 范建利, 1987). 潘长良等(2001)研究了单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征. 结果表明, 加载过程中, 应力达到一定水平时声发射数发生突跳, 声发射频谱由低频向高频发展, 到一定应力水平后基本保持稳定, 能量由低频向高频集中. 李正光等(2005)发现岩石剪切破坏实验中, 大破裂前也存在高频脉冲和低频波. 李瑞浩等(1995)在研究滇西试验场重力固体潮观测与地震的关系时, 注意到下关台重力固体潮观测的震前高频异常: 1988 年 11 月 6 日澜沧耿马 7.1 级地震前 8 小时, 未经滤波的记录曲线明显变粗, 约 10 mm, 大约是正常记录的 5 倍之粗. 刘万琴等(1999)基于数字化地震记录, 分析了 3 次破坏性矿震的震源参数和断层面解, 发现井下近场记录不仅有高频振动, 而且有低频振动. 苏昉和田维(2002)观测到了强地震前的次声波.

地震过程中频率特征点出现随时间变化的频率分化现象, 有望携带地震前兆信息.

3 设计重力固体潮分析的特征参数

我们结合 Huang-Hilbert 变换的优越性和固体潮的特点, 同时以相应的理论计算值作为参照背景, 设计提取地震前兆信息的特征参数.

二维边际谱反映了考虑区间内重力固体潮的实际频率成分及其在该区间能量(振幅)的大小. 为了达到短临地震预报的目标, 这个区间应设计得尽可能小. 考虑到重力固体潮分解后的主要成分是半日波和日波, 且其中的日波可能会在 24 小时左右波动, 故 48 小时肯定能包含至少一个完整的日波周期. 所以这个区间以 2 天为宜.

在 2 天区间的边际谱中, 无论是日波或半日波, 都可以确定其下截止频率和上截止频率, 可称之为日波或半日波的低端频率和高端频率; 由此求出日波或半日波的带宽和中心频率. 故边际谱中与瞬时频率有关的分析参数是: 日波频段低端频率、日波频段高端频率、半日波频段低端频率、半日波频段高端频率、日波频段中心频率、半日波频段中心频率、日波频段带宽、半日波频段带宽.

上述基于瞬时频率的特征参数可用于描述重力固体潮, 但直接用这些参数与地震对应, 则比较困难. 重力固体潮的理论计算值可以为我们提供一个平稳过程的参考背景. 取重力固体潮的理论计算值作为输入, 用 Huang-Hilbert 变换计算出该平稳过程的相应特征参数. 用观测值的计算结果作分子, 用理论值的计算结果作分母, 这个比值随时间的变化就可以反映出非平稳地震过程对重力固体潮平稳过程的影响作用.

上述特征参数并不都是线性相关的. 由于这一工作从未有人做过, 所以我们选取了这些参数作为分析指标进行尝试, 希望从中找出对地震前兆敏感的特征参数.

4 震例分析

选取昆明基准地震台重力固体潮观测资料, 通过计算, 对瞬时频率特征参量加以分析.

2002 年 5 月 13 日嵩明 4.6 级地震: 震中距 30.53 km. 震前 4 个月, 日波低端频率比、半日波低端频率比、日波高端频率比、半日波高端频率比、日波中心频率比、半日波中心频率比均出现比值大于 2 倍均方差正异常, 幅度显著且同步(图 2).

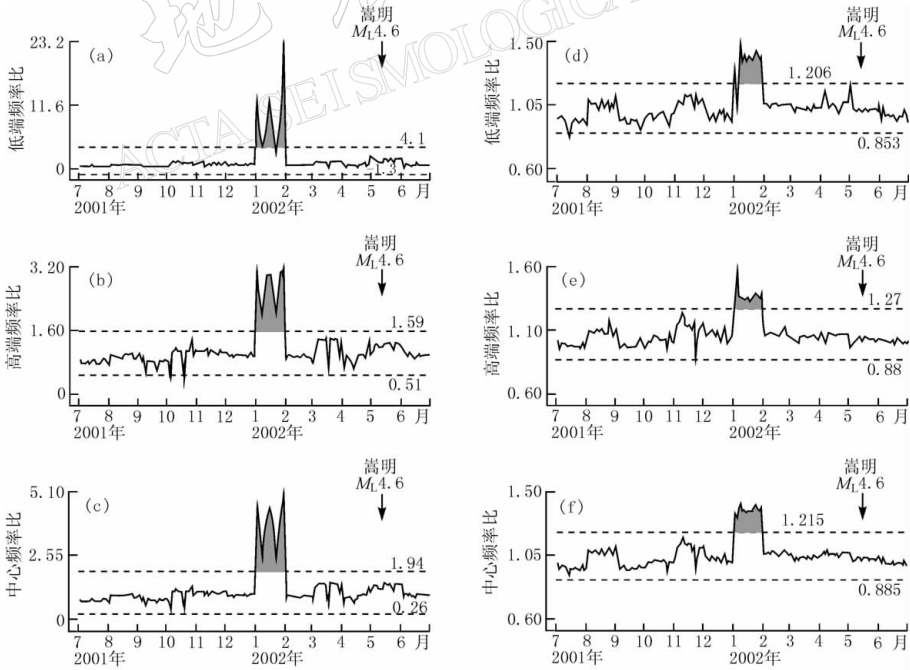


图 2 嵩明地震. (a) 日波低端频率比; (b) 日波高端频率比; (c) 日波中心频率比
(d) 半日波低端频率比; (e) 半日波高端频率比; (f) 半日波中心频率比

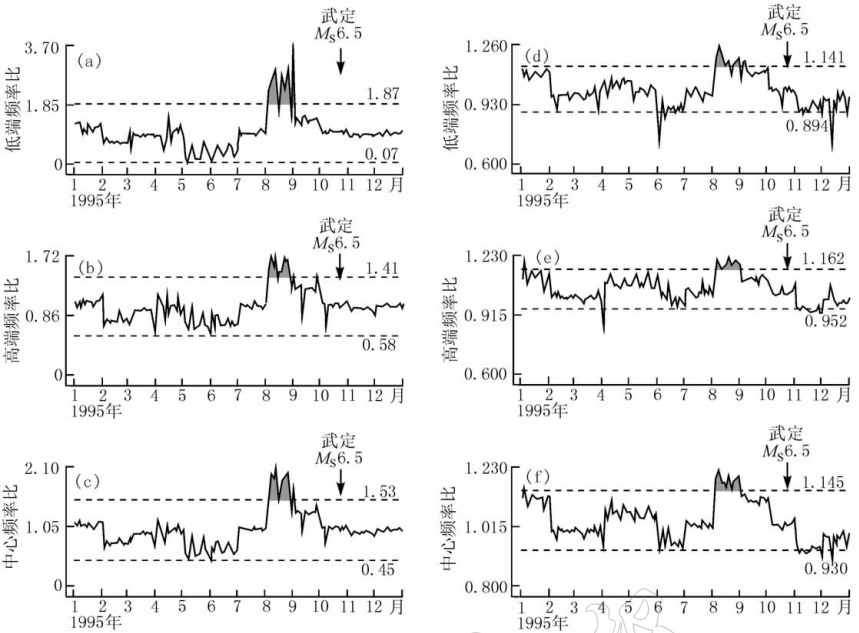


图 3 武定地震. (a) 日波低端频率比; (b) 日波高端频率比; (c) 日波中心频率比
(d) 半日波低端频率比; (e) 半日波高端频率比; (f) 半日波中心频率比

1995 年 10 月 24 日武定 6.5 级地震: 震中距 87.26 km, 震前 2 个月, 日波低端频率比、半日波低端频率比、日波高端频率比、半日波高端频率比、日波中心频率比、半日波中心频率比均分别出现比值大于 2 倍、1.5 倍均方差正异常, 幅度显著且同步(图 3).

以上震例分析结果表明, 与下关重力固体潮的分析结果类似, 昆明重力固体潮的瞬时频率特征参数(低端频率比、高端频率比、中心频率比)在震前确实有前兆变化, 对应较好. 这说明重力固体潮观测中客观存在着频率分化现象. 对于同一地震, 日波、半日波的特征参量前兆变化特征均为同步正异常. 对于不同震中距及不同震级的地震, 日波、半日的特征参量前兆变化均出现在震前 2~5 个月内, 表明这些特征参数具有短期地震前兆意义. 因此可以考虑将低端频率比、高端频率比、中心频率比作为短期地震前兆特征参量.

5 结论

1) 重力固体潮存在频率分化现象. 计算结果表明, 重力固体潮观测中客观存在着频率分化现象. 这种现象有可能与地震破裂过程中的物理变化有关. 该变化的物理机制有待于进一步的研究澄清.

2) 瞬时频率特征参数可作为短期地震前兆特征参量. 震例分析表明, 瞬时频率特征参数在震前确有前兆变化, 对应较好. 对于同一地震, 特征参量的前兆变化特征均为同步正异常. 对于不同震中距及不同震级的地震, 特征参量的前兆变化均出现在震前 2~5 个月内. 表明这些特征参数具有短期地震前兆意义. 这些与瞬时频率相关的特征参数具有非常清楚的物理意义, 故可以考虑将低端频率比、高端频率比、中心频率比作为短期地震前兆特征参量.

参 考 文 献

李宏坤, 马孝江. 2003. 局域波法在船舶柴油机燃油系统故障诊断中应用[J]. 大连理工大学学报, 43(2): 168-171.
李瑞浩, 刘贵安, 陈冬生, 等. 1995. 滇西试验场重力潮汐观测及其地震响应特征的研究[J]. 中国地震, 11(2): 161-167.

- 李正光, 杨润海, 赵晋明, 等. 2005. 地震序列类型的岩石破裂实验研究[J]. 地震研究, **28**(4): 388-392.
- 刘万琴, 李世恩, 郑治真, 等. 1999. 破坏性矿震震前短临阶段震源过程研究[J]. 地震学报, **21**(1): 57-64.
- 潘长良, 祝方才, 曹平, 等. 2001. 单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), **32**(4): 336-338.
- 苏昉, 田维. 2002. 2000 年 7~9 月强地震的前兆次声波测量研究[J]. 地震研究, **25**(1): 11-19.
- 王珍, 马孝江. 2002. 局域波边界谱在缸盖振动信号分析中应用研究[J]. 内燃机工程, **23**(3): 50-53.
- 王赞赞, 杨润海, 赵晋明, 等. 2003. 前驱地震波的试验研究及波谱分析[J]. 地震研究, **26**(1): 50-56.
- 许昭永, 杨润海, 王彬, 等. 1998. 突发应变扰动: 一种新的破裂前兆的实验研究[J]. 地震学报, **20**(6): 628-634.
- 臧绍先, 范建利. 1987. 不同单轴加压方式下岩石声发射的时间过程与频率特征[J]. 地震学报, **9**(1): 74-88.
- 周挚, 山秀明, 梁虹, 等. 2005. 固体潮时频分析新方法[J]. 地震研究, **28**(4): 334-339.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, *et al.* 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proc Roy Soc London (Series A)*, **454**: 903-995.
- Ohnaka M, Mogi K. 1982. Frequency characteristics and its relation to the fracturing process to failure[J]. *J Geophys Res*, **87**(B5), 3 873-3 884.

EXTRACTION OF SEISMIC PRECURSORY INFORMATION FROM GRAVITY TIDE AT KUNMING STATION BASED ON HHT

Zhang Li^{1,2)} Fu Rongshan¹⁾ Zhou Zhi²⁾ Shan Xiuming³⁾ Liang Hong⁴⁾ Quan Haiyan⁵⁾

1) School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

3) Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China

4) Information School, Yunnan University, Kunming 650091, China

5) Information Engineering and Automatism School, Kunming University of Science and

Technology, Kunming 650051, China

Key words: HHT; gravity tide; instantaneous frequency; earthquake precursor