

Application of Hilbert-Huang Transform in Interference Analysis of Borehole Inclinometer in Yanshou

Qiang Sun¹, Zhichao Zou¹, Xiaojun Wu², Jiye Li³, Jianhui Ren⁴, Dawei Li³, Yanji Zhang², Qiang Wang¹

¹Acheng Seismic Station, Harbin Heilongjiang

²Tonghe Seismic Station, Harbin Heilongjiang

³Seismological Bureau of Heilongjiang Province, Harbin Heilongjiang

⁴Earthquake Prevention and Disaster Reduction Technology Center of Harbin City, Harbin Heilongjiang

Email: joyfulsun@163.com

Received: Jul. 24th, 2018; accepted: Aug. 7th, 2018; published: Aug. 14th, 2018

Abstract

HHT method is used to analyze the observation data of Yanshou borehole tilt, extract the signal of earth tide and recognition and extraction of influencing factors such as atmospheric environment changes, ice crack and reservoir capacity. The results show that the original data of Yanshou borehole tilt are consistent with the spectral signals obtained from the analysis of theoretical earth tide data. Atmospheric pressure in the time-frequency domain shows that the dominant frequency is below 300 - 500 μHz , that is to say, the cycle is about 35 min. The dominant frequency of reservoir capacity change mainly embodied in long period: 0.115 - 0.1365 μHz (85-101 days).

Keywords

HHT, Borehole Inclinometer, Interference Analysis, Earth Tide, Frequency Characteristics

基于HHT方法在延寿钻孔倾斜干扰分析中的应用

孙 强¹, 邹志超¹, 武晓军², 李继业³, 任建辉⁴, 李大伟³, 张彦吉², 王 强¹

¹哈尔滨市阿城地震台, 黑龙江 哈尔滨

²通河地震台, 黑龙江 哈尔滨

³黑龙江省地震局, 黑龙江 哈尔滨

⁴哈尔滨市防震减灾技术中心, 黑龙江 哈尔滨

文章引用: 孙强, 邹志超, 武晓军, 李继业, 任建辉, 李大伟, 张彦吉, 王强. 基于 HHT 方法在延寿钻孔倾斜干扰分析中的应用[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(4): 788-795. DOI: 10.12677/ag.2018.84085

Email: joyfulsun@163.com

收稿日期: 2018年7月24日; 录用日期: 2018年8月7日; 发布日期: 2018年8月14日

摘要

利用HHT方法对延寿钻孔倾斜观测数据分析计算, 提取固体潮汐信号; 对大气环境变化、冰裂、水库库容等影响因素的响应进行识别提取。结果表明延寿钻孔倾斜原始数据与理论固体潮数据分析得到的频谱信号一致。气压在时频域上的表现为优势频率低于300~500 μHz , 即周期35 min左右, 库容变化优势频率主要体现为长周期: 0.115~0.1365 μHz (85~101天)左右。

关键词

HHT, 钻孔倾斜, 干扰分析, 固体潮, 频率特征

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Hilbert Huang Transform (HHT)是一种全新信号处理方法, 对于处理非线性、非平稳信号有清晰的物理意义, 能够得到信号包含时间、频率、振幅的三维离散时频谱, 提供了清晰的局部细节的时频特征(Huang *et al.*, 1998)。HHT 方法具有较好的客观性与自适应性, 适合于描述具有非线性非平稳变化特征的信号, 该方法自推出以来已经成功地应用在地球物理学领域、生物医学领域和设备故障诊断领域[1][2][3][4][5]等。国内学者在研究 HHT 在地震资料分析方面, 也发表了大量的文章。在地震信号与资料的分析 and 处理方面、提高地震资料分辨率、噪声剔除以及提取地震瞬时属性等方面都有较好的应用[6]-[13]。周攀等基于 HHT 提取昆明、下关重力固体潮的地震前兆信息, 设计了重力固体潮地震前兆分析的特征参数, 计算得到的实际参数和理论参数的频率比值[14]; 李东生等在 HHT 方法在山丹地电场数据处理中的应用[15]清楚地分离出大地电场的主要周期成分; 王宁等在时频分析方法在形变数据中的应用研究中认为, HHT 方法保存了信号本身的物理特性, 同时也具有很好的时间和频率分辨率[16], 然而 HHT 方法在地震前兆观测数据分析中尚处于起步阶段, 还没有得到普遍应用。

HHT 方法在延寿钻孔倾斜分析尚属首次尝试, 利用 HHT 时频分析方法提取固体潮汐特征, 针对形变资料中可能存在的冰裂、突跳、库容变化和大气环境等干扰情况, 进行 EMD 分解, 提取重构数据再进行频谱分析, 探讨可能存在的干扰因素在时频域的优势频率。

2. HHT 基本原理

HHT 由经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和 Hilbert 谱分析两部分组成。在应用过程中, 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。

2.1. 经验模态分解

HHT 处理非平稳信号的基本过程为: ① 利用 EMD 方法, 将给定信号分解为若干固有模态函数(以

Intrinsic Mode Function 或 IMF 表示), 这些 IMF 是满足一定条件的分量; ② 对每一个 IMF 进行 Hilbert 变换, 得到相应 Hilbert 谱, 即将每个 IMF 表示在联合的时频域中; ③ 汇总 IMF 的 Hilbert 谱, 得到原始信号的 Hilbert 谱[17]。

2.2. Hilbert 变换

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, 使之生成解析信号, 然后计算出瞬时频率, 进而求出 Hilbert 时频谱(亦称 Hilbert 幅值谱)和 Hilbert 边际谱[18]。

3. HHT 方法在延寿钻孔倾斜数据中的时频特征分析

延寿台倾斜观测使用的是 CZB-1 型竖直摆倾斜仪, 仪器核心部分是采用一个竖直方向悬挂的重力摆。工作原理是当地表产生倾斜变化时, 摆的支撑架随着产生倾斜, 而高精度的位移传感器把二者得相对位移换成电压的变化, 再用记录仪器把电压信号记录下来。钻孔井深 71.6 m, 孔径 152 mm, 井口距传感器距离 61 m, 一定程度上避开了地表干扰。但人为干扰、仪器零漂、周围环境和天气状况等干扰因素是无法避免的。

3.1. 基于 HHT 方法提取固体潮信号

选取延寿短时及连续一个月的倾斜整点值数据, 基于 HHT 方法对固体潮汐信号进行提取。计算结果表明, 原始数据与理论固体潮数据分析得到的频谱信号一致, 均为 22.64 μHz 和 10.57 μHz , 即周期 12.27 小时的半日波信息和 26.27 小时全日波信息(图 1, 图 2, 图 3)。

对 2008 年 5 月延寿钻孔倾斜 EW 向整点值数据与理论固体潮数据进行分析, 由 EMD(图 2)的分解可以看出数据被分解成 7 个 IMF 分量。频率高的 IMF 总是比频率低的 IMF 优先被筛分出来。然而, 在这些本征模态函数中并非都含有地球物理信息, 这就需要对这些筛分出来的 IMF 进行希尔伯特变换分析。图 3 是计算得到的 Hilbert 边际谱。通过分析看出 imf1、imf2 为固体潮汐信号, Hilbert 时频谱可以很明显的反映出固体潮频率随时间变化的情况及非潮汐信号对固体潮汐的影响。边际谱分析可以很好地识别数

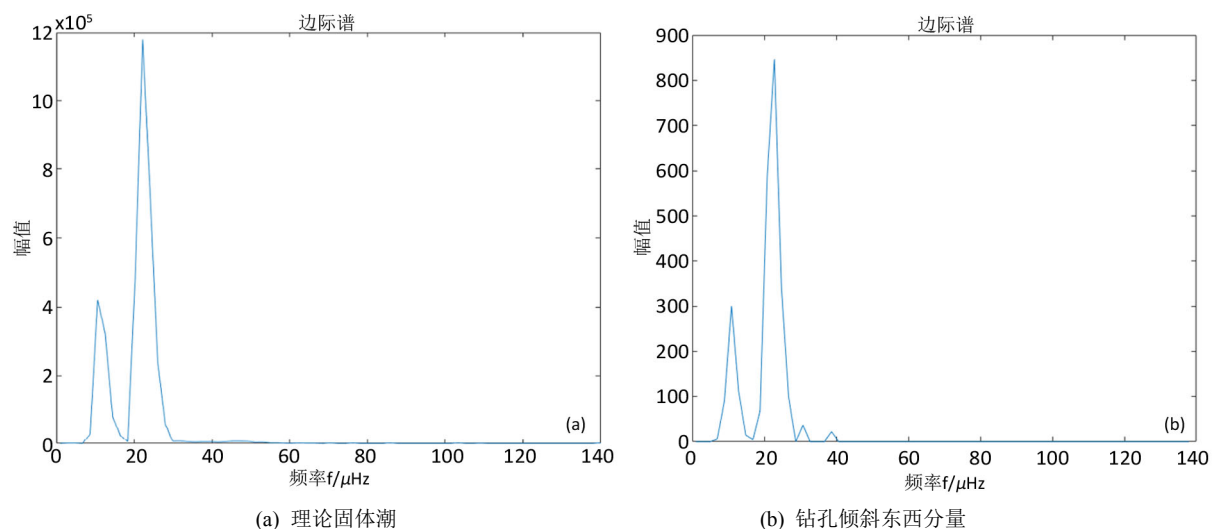


Figure 1. Theoretical earth tide and Hilbert spectrum of Yanshou borehole inclined minute value during 18-19 February 2008
图 1. 2008 年 2 月 18~19 日理论固体潮与延寿钻孔倾斜分钟值 Hilbert 谱

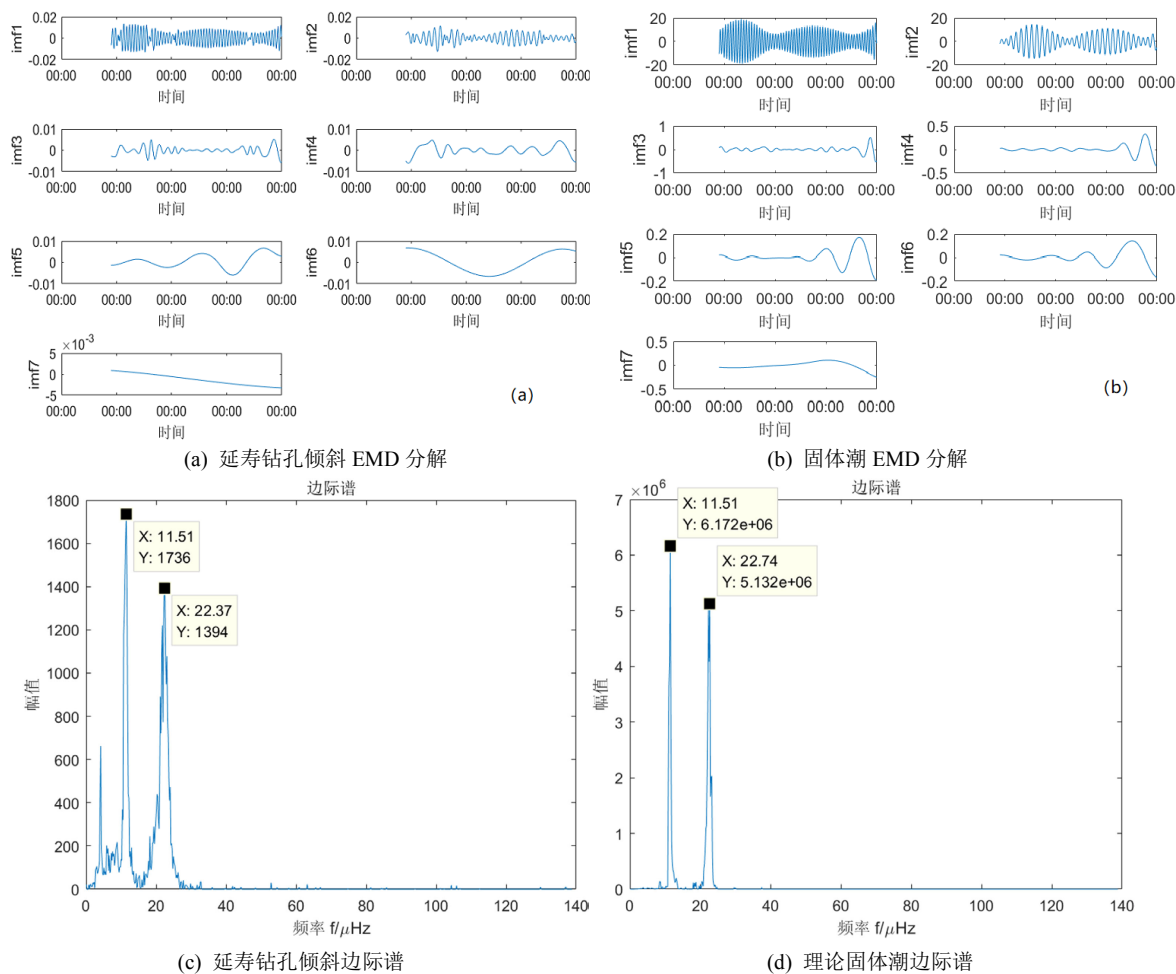


Figure 2. Analysis of EW integer value and theoretical earth tidal spectrum of Yanshou borehole tilt in May 2008
图 2. 延寿钻孔倾斜 2008 年 5 月 EW 向整点值与理论固体潮谱分析

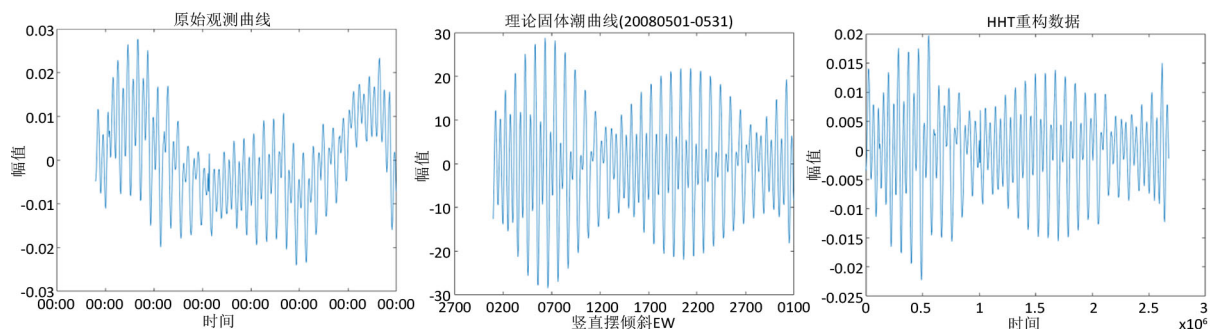


Figure 3. Contrast diagram of original curve, theoretical curve and reconfiguration curve of Yanshou borehole tilt
图 3. 延寿钻孔倾斜原始曲线、理论曲线和重构曲线对比图

据中的频率信息,对 2008 年 5 月延寿钻孔倾斜 EW 向整点值数据分析得到的频主要信号分量为 22.37 μHz 和 11.51 μHz , 即周期 12.41 小时和 24.13 小时半日波和日波信息。根据 EMD 分解结果,我们可以确定 imf1 为半日波, imf2 为日波, imf3、imf4、imf5、imf6 为其他周期信息, imf7 可能为仪器零漂造成的趋势项。为了更好的体现 HHT 对固体潮信息的提取,基于 imf1 和 imf2 分量对数据进行重构,可以看出重构数据(图 4)基本上和理论固体潮信息非常吻合。

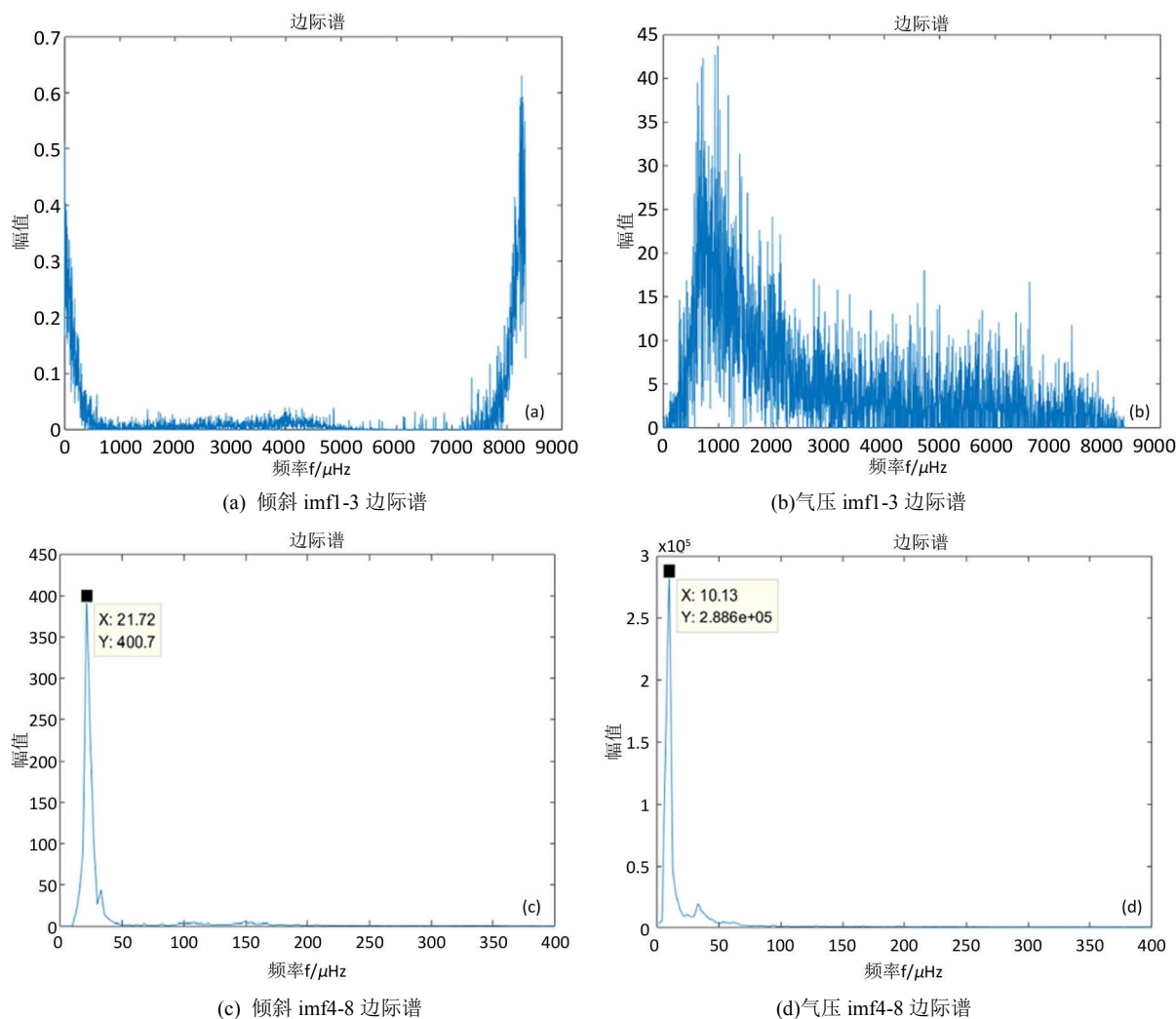


Figure 4. Yanshou borehole tilt and barometric pressure marginal spectrum during 7-8 November 2009

图 4. 2009 年 11 月 7~8 日延寿倾斜与气压边际谱

3.2. 气压干扰提取

2009 年 11 月 7~8 日 17 个小时内气压出现剧烈变化, 变幅可达 22.2 hpa。对气压分钟值数据与倾斜 EW 向分钟值数据分别做 EMD 分解, imf 分解为 9 个分量, 1~3 imf 分量为高频信息, 4~8 imf 分量为低频信息, 重构 4~8 imf 分量。分别对 1~3 imf 分量和 4~8 imf 分量进行谱分析(图 4), 倾斜 4~8 imf 分量重构数据保留了完整的半日波周期数据, 气压 4~8 imf 分量重构数据很好地体现了全日波周期数据。倾斜 1~3 imf 分量重构边际谱干扰信息主要体现在 68.51~265.4 μHz (周期 63~243 分钟), 气压 1~3 imf 分量重构边际谱干扰信息主要体现在 477.4 μHz (周期在 35 分钟)左右, 因此气压不是延寿钻孔倾斜的主要干扰源。

3.3. 冰裂干扰

延寿台西南方向为长寿湖水库, 每到冬季和春季由于水库封冻与融化会存在冰裂现象。对 2008 年 4 月 13~14 日钻孔倾斜数据进行 EMD 分解, 将 IMF5-9 分量进行数据重构并进行边际谱分析, IMF5-9 分量半日波及全日波信息优势明显, 但 IMF5 分量仍留存冰裂干扰频谱, IMF6-9 分量重构数据更为理想(图 5)。

3.4. 库容干扰分析

延寿台西南方向为长寿湖水库, 水库距钻孔倾斜观测井 100 m 左右, 库容最高可达 2500 万 m^3 , 根据邱泽华老师提出的三维荷载模型[19], 已计算得出水库库容日常变化对延寿钻孔倾斜的干扰小于限定标准[20] (图 6)。

对 2008 年~2009 年水库库容和延寿钻孔倾斜观测数据进行频谱分析(图 7), 水库库容变化边际谱优势频率为 0.115~0.1365 μHz (85~101 天), 倾斜边际谱优势频率为 0.2765~0.4066 μHz (28~41 天)。库容变化并不是延寿钻孔倾斜的主要影响因素, 但在月周期作用的频率成分与延寿钻孔倾斜频谱有所交叉。

4. 结论与讨论

1) 时频分析时实际观测数据经常包含较大噪声和各种干扰, 有用的信号往往偏弱, 这样很难直接利用 HHT 方法提取出我们需要的前兆信息, 因此, 非常必要对数据进行预处理, 将明确原因的干扰先行剔除, 并且

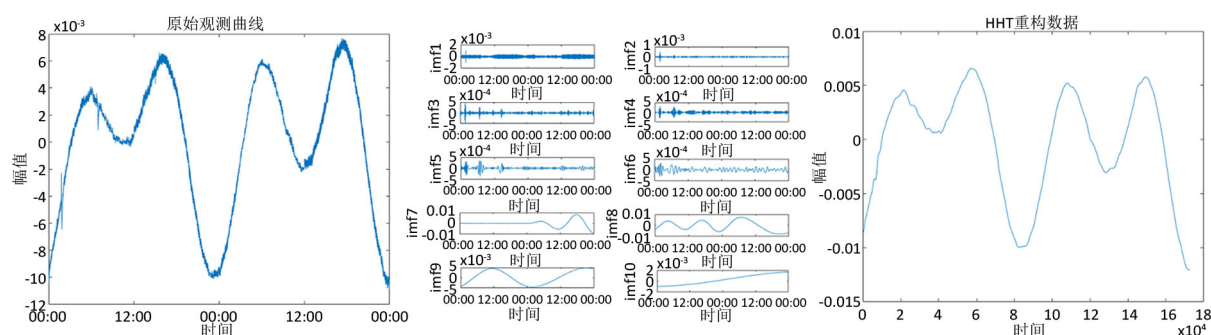


Figure 5. EMD decomposition and refactoring data of borehole tilt during 13-14 April 2008

图 5. 2008 年 4 月 13~14 日钻孔倾斜 EMD 分解及重构数据

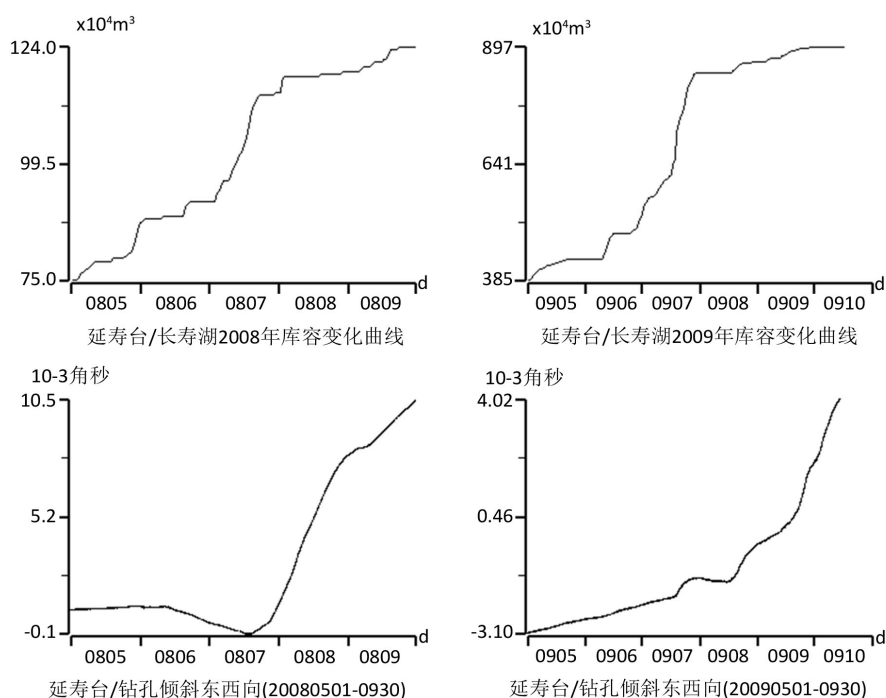


Figure 6. The curve diagram of Reservoir Capacity and Yanshou borehole tilt during 2008-2009

图 6. 2008~2009 年水库库容与延寿钻孔倾斜曲线图

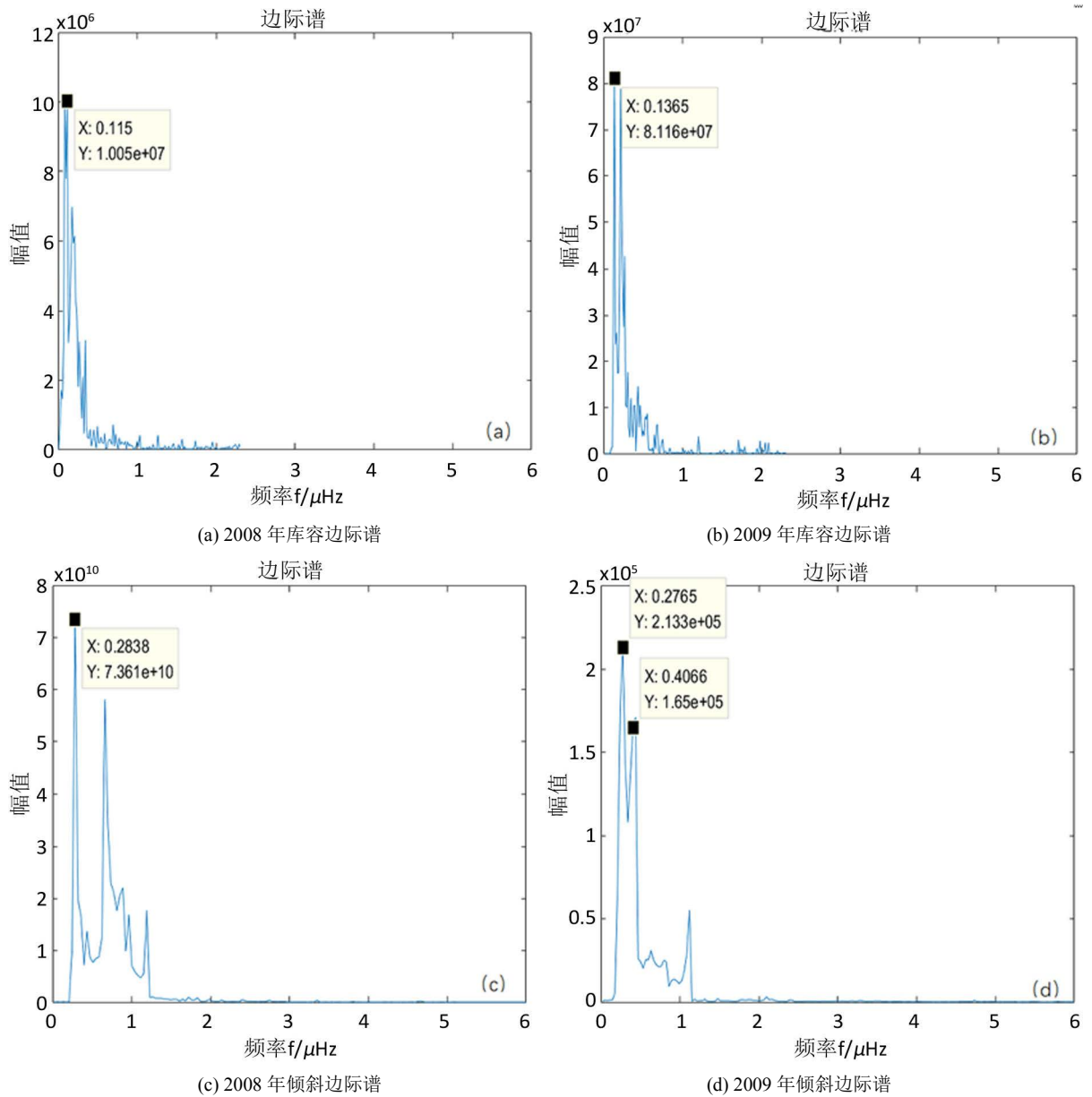


Figure 7. The Marginal Spectrum of Reservoir Capacity and Yanshou borehole tilt during 2008-2009

图 7. 2008~2009 年水库库容与延寿钻孔倾斜边际谱

结合数字滤波等其它有效方法联合分析, 先将观测数据进行滤波, 对滤出的某些频段信号再进行 EMD 分解。

2) HHT 方法能够很好地提取固体潮信息, 延寿钻孔倾斜原始数据与理论固体潮数据分析得到的频谱信号一致, 均为 22.64 μHz 和 10.57 μHz , 即周期 12.27 小时的半日波信息和 26.27 小时全日波信息。气压优势频率主要分布在 477.4 μHz (周期在 35 分钟) 左右。水库库容变化边际谱优势频率主要体现为长周期: 0.115~0.1365 μHz (85~101 天)。

3) 固体潮特征具体较为明确的物理意义, HHT 方法也可以很好剔除部分干扰, 提高数据分析质量。

基金项目

中国地震局监测、预测、科研三结合课题项目资助, 课题编号: CEA-JC/3JH-160802。

参考文献

- [1] Rilling, G., Flandrin, P. and Goncalves, P. (2003) On Empirical Mode Decomposition and Its Algorithms. *Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, Grado, June 2013, 8-11.
- [2] 胡红英. 局域波分解方法、特征剖析及应用研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学机械电子工程系, 2006.
- [3] 丁康, 陈健林, 苏向荣. 平衡和非平衡振动信号的若干处理方法及发展[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1): 1-10.
- [4] 张琦, 阙沛文, 陈天璐. 基于经验模态分解的管道超声回波信号噪声消除[J]. 测试技术学报, 2006, 20(6): 508-511.
- [5] 刘贵栋, 沈毅. 基于 Hilbert-Huang 变换的医学超声信号去噪[J]. 中国医学物理学杂志, 2007, 24(5): 377-380.
- [6] 公茂盛, 谢礼立. HHT 方法在地震— I: 程中的虑 J{j 之初步探讨[J]. 世界地震工程, 2003, 19(3): 39-43.
- [7] 段生全, 贺振华, 黄德济. I{T 方法及其在地震信号处理中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(4): 396-400.
- [8] 吴琛, 周瑞忠. Hilbert-Huang 变换在提取地震信号动力特性中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 41-46.
- [9] 张义平, 李夕兵, 赵国彦. 基于 HHT 方法的爆破地震信号分析工程爆破[J]. 2005, 11(1): 1-7.
- [10] 汪小将, 陈宝书, 曹思远. HHT 振幅频率恢复处理技术研究与应用[J]. 中国海上油气, 2009, 21(1): 19-22.
- [11] 惠晓宇, 刘洪. HHT 方法在研究地震旋回体中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(3): 624-628.
- [12] 周挚, 山秀明, 张立, 等. 基于 HHT 提取昆明、下关重力固体潮的地震前兆信息[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 836-844.
- [13] 吕品姬, 赵斌, 陈志遥, 等. 一种新的固体潮观测数据特征量提取方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 76-79.
- [14] 陈涛, 吕品姬, 李正媛. 基于 HHT 提取九江地震及宁蒗地震固体潮前兆信息[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(4): 64-69.
- [15] 李东生, 冯红武, 刘淑娟. HHT 方法在山丹地电场数据处理中的应用[J]. 防灾科技学院学报, 2013, 15(3): 61-66.
- [16] 王宁, 吴云, 张燕. 时频分析方法在形变数据中的应用研究[J]. 地震工程学报, 2016, 36(2): 413-420.
- [17] Huang, N.E. (1998) The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings of the Royal Society A*, **454**, 903-995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- [18] Huang, N.E. (1996) Computer Implicated Empirical Mode Decomposition Method, Apparatus, and Article of Manufacture. U.S. Patent Pending.
- [19] 邱泽华. 钻孔应变观测点到地面载荷干扰源最小“安静”距离的理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4063-4067.
- [20] 孙强, 李继业, 李希文, 等. 新城水库对延寿倾斜观测的影响评价[J]. 防灾科技学院学报, 2012, 14(1): 29-34.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ag@hanspub.org