

古田地震水口水电站重力坝强震 观测记录 HHT 分析^{*}

方嘉治, 赵志伟, 蔡宗文, 危福泉

(福建省地震局, 福建 福州 350003)

摘要: 利用 HHT 变换研究 2008 年 3 月 6 日福建古田 $M_L 4.6$ 地震中, 水口水电站重力坝强震反应台阵获取的强震反应观测资料的时频特性及重力坝结构动力特性, 得到如下结论: (1) 强震记录能量集中在 $0 \sim 15$ Hz 频段和 $10 \sim 15$ s 时段; (2) 重力坝顺河向主频为 3.7 Hz。分析结果对认识水库地震近场地震动特性和重力坝地震反应有一定的实际意义。

关键词: 重力坝; 边际谱; Hilbert 能量谱; 瞬时能量谱

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)02-0236-04

0 引言

长期以来, 地震工程领域对结构强震记录最常用的处理方法就是傅立叶分析和小波分析, 但从根本上来说, 这两种方法都建立在信号为稳态的基础上, 处理结构强震记录这类非平稳性很强的信号可能会产生一些比较严重的问题, 如能量泄漏等 (公茂盛等, 2007)。HHT (Hilbert-Huang Transform) 变换是一种全新的数据处理方法, 具有简单高效、自适应性强、高分辨率、多分辨率等优点 (Huang *et al.*, 1998)。该方法提出后, 在大气、海洋、医学和机械等各个工程领域得到迅速推广和应用。在地震工程领域中, 王彬等 (2005)、李洪泉等 (2003)、李书进等 (2004)、张郁山等 (2005) 对强震观测资料采用 HHT 变换识别结构动力特性进行了系统研究, 并认为对于结构强震记录这种非平稳性很强的数据, 可以用边际谱识别结构自振频率。鉴于此, 本文首先对 HHT 变换原理作了介绍, 然后用 HHT 方法研究 2008 年 3 月 6 日福建古田 $M_L 4.6$ 地震水口水电站重力坝强震记录, 得到了结构强震记录时频幅值三维分布特性、边际谱、Hilbert 能量谱和瞬时能量谱; 又根据坝基和坝顶强震记录 Hilbert 边际谱识别了水口水电站重力坝顺河向自振频率, 将坝基和坝顶强震记录能量谱和瞬时能量谱进行对比

并阐述了差异。

1 HHT 变换原理

HHT 变换是由美国宇航局的 Huang 等 (1998) 提出的一种全新的信号处理方法。它的核心思想是依据数据本身的时间尺度特征将信号分解为有限个固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF), 然后对各模态分量进行 HHT 变换构造解析信号, 得到信号的瞬时频率和振幅, 进而得到三维 Hilbert 时频谱, 获取信号的局部特性。经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 的目的就是将复杂信号分解成一组具有较优 HHT 变换性能的固有模态函数, 即保证信号经 HHT 变换后具有清晰的瞬时振幅和瞬时频率。

对于任一固有模态函数 $c(t)$, 其 HHT 变换 $\hat{c}(t)$ 定义为信号和 $1/\pi t$ 的卷积:

$$\hat{c}(t) = \frac{1}{\pi} P \int \frac{c(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (1)$$

式中, P 为柯西主值, 这样强调了信号的局部属性, 避免了 Fourier 变换中因强制拟合产生的实际不存在的频率成分。 $c(t)$ 的解析信号 $z(t)$ 可定义为

$$z(t) = c(t) + i \hat{c}(t) = a(t) e^{i\theta(t)}. \quad (2)$$

* 收稿日期: 2011-05-11.

基金项目: 地震科技联合基金 (105087) 资助.

式中, $a(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别为信号 $x(t)$ 的瞬时振幅和瞬时相位:

$$a(t) = \sqrt{c^2(t) + \hat{c}^2(t)}, \tag{3}$$

$$\theta(t) = \arctan(\hat{c}^2(t)/c(t)). \tag{4}$$

由瞬时相位可得到信号的瞬时频率

$$\omega(t) = d\theta(t)/dt. \tag{5}$$

如果把振幅显示在频率—时间平面上, 就可以得到 Hilbert 幅值谱

$$H(\omega, t) = Re \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i\int \omega_j(t) dt}, \tag{6}$$

将 $H(\omega, t)$ 对时间积分, 可得到 Hilbert 边际谱

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt. \tag{7}$$

将振幅的平方对时间积分, 可定义 Hilbert 能量, 它表达了每个频率在整个时间长度内所累积的能量

$$ES(\omega) = \int_0^T H^2(\omega, t) dt. \tag{8}$$

将振幅的平方对频率积分, 可定义瞬时能量 $IE(\omega)$, 它提供了信号能量随时间的变化情况

$$IE(\omega) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega. \tag{9}$$

2 强震记录及台阵简述

张力飞和邢国良 (1996) 就水口水电站重力坝强震反应台阵的台阵设计、监测仪器选型、强震设台、台阵验收等方面做了介绍, 张锦福和蔡辉腾 (2009) 详细论述了此次地震的震源参数以及水口水电站重力坝强震反应台阵的强震记录情况, 本文不再赘述。水口水电站重力坝高 101 m, 强震反应台阵由 7 个测点 21 个频道组成。每个测点由竖直向、顺河向 (上游至下游) 和横河向 (左岸至右岸) 三个频道组成, 测点具体的布设方案如图 1 所示, 其中测点 C7 布设在大坝左岸基岩自由场上。

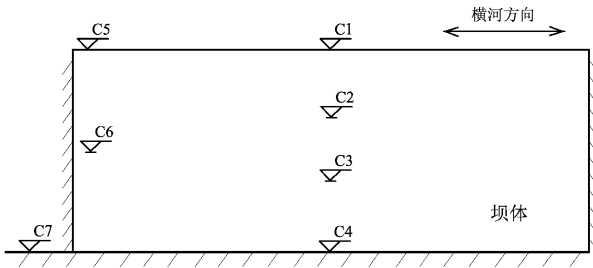


图 1 台阵布设方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the array installation

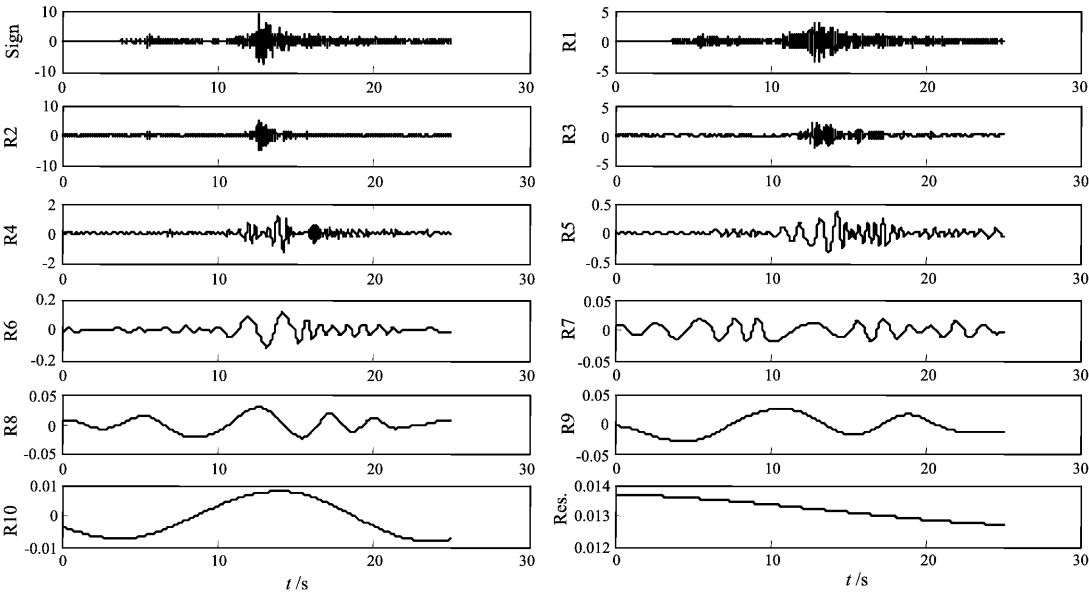


图 2 C1 测点顺河向记录及各 IMF 分量 (单位: Gal)

Fig. 2 Riveralong records of strong motion and the IMF component decomposed by EMD for measuring point C1 (unit: Gal)

3 强震记录 HHT 分析

据 2008 年福建古田 $M_L4.6$ 地震强震记录可知, 坝体中部 C2 测点和 C3 测点因仪器原因未能获取记录, 而 C5 测点和 C6 测点位于坝体左侧, 边界效应影响较大, 因此笔者仅选取 C1 和 C4 测点的强震记录作为分析对象 (张锦福, 蔡辉腾, 2009)。

3.1 C1 测点顺河向记录分析

C1 测点的强震记录 (顺河向) 经 EMD 分解后, 得到 10 个 IMF 分量和 1 个趋势项, 如图 2 所示。EMD 分解首先将记录中的高频分量分离出来, 之后所分解出的 IMF 分量的频率依次降低, 波长逐渐增加, 残余项并不是常数, 说明该记录有一个趋势。对 EMD 分解结果进行 Hilbert 分解后得到的振幅—频率—时间分布关系、边际谱、能量谱、瞬时能量谱分别如图 3、图 4 所示。从图 4a 和图 4b 可以看出, 大部分能量集中在 0 ~ 15 Hz 以内,

主要能量突出体现在 3.7 Hz, 也即重力坝结构顺河向主频为 3.7 Hz, 另由瞬时能量谱 (图 4c) 可知能量主要集中在 10 ~ 15 s 之内。

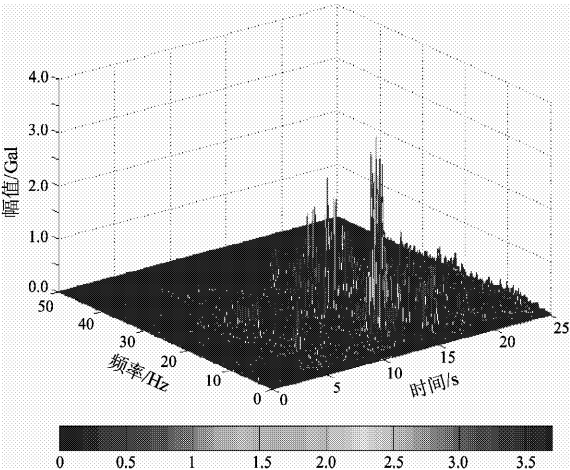


图 3 C1 测点顺河向记录 Hilbert 幅值谱
Fig. 3 Hilbert amplitude spectrum of riveralong records of strong motion for measuring point C1

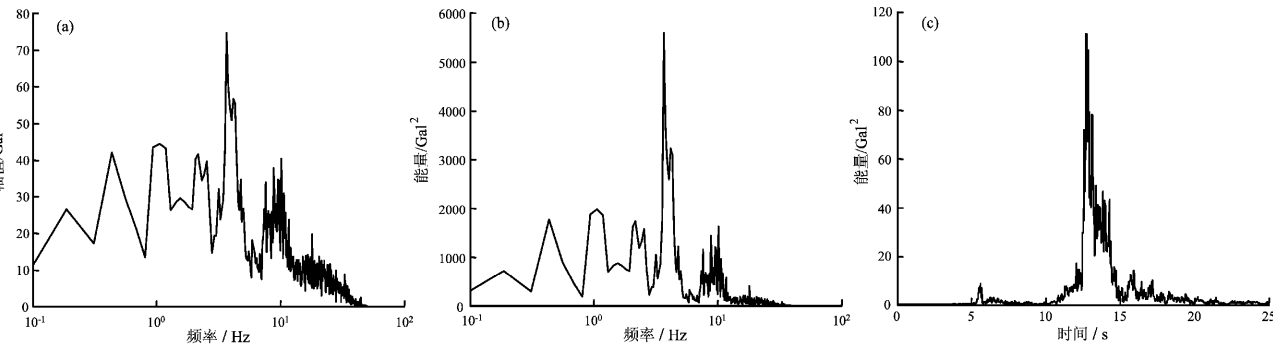


图 4 C1 测点顺河向记录的边际谱 (a)、Hilbert 能量谱 (b) 和瞬时能量谱 (c)
Fig. 4 Marginal spectrum (a)、Hilbert energy spectrum (b) and instant energy spectrum (c) of riveralong records of strong motion for measuring point C1

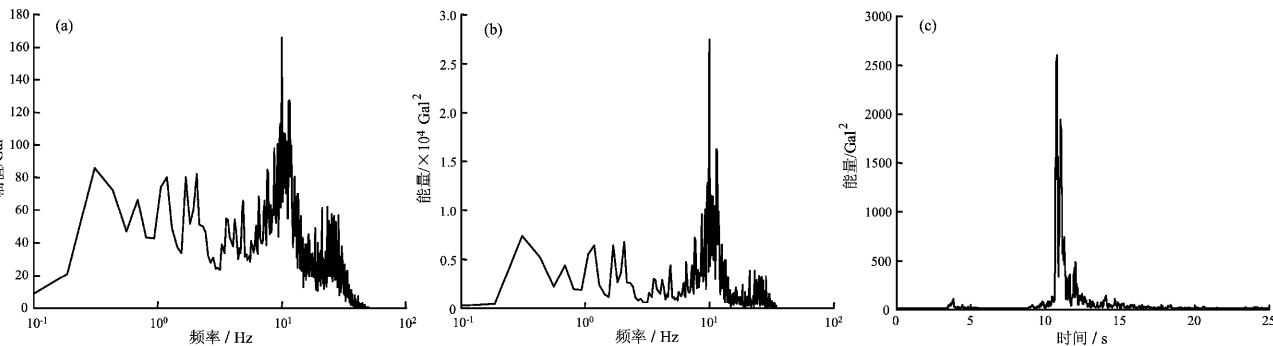


图 5 C4 测点顺河向记录的边际谱 (a)、Hilbert 能量谱 (b) 和瞬时能量谱 (c)
Fig. 5 Marginal spectrum (a)、Hilbert energy spectrum (b) and instant energy spectrum (c) of riveralong records of strong motion for measuring point C4

3.2 C4 测点顺河向记录分析

C4 测点顺河向强震记录经 EMD 分解后, 得到 10 个 IMF 分量和 1 个趋势项。经 HHT 变换得到的振幅—频率—时间分布关系、边际谱、能量谱、瞬时能量谱, 基于篇幅考虑, 仅给出边际谱、能量谱、瞬时能量谱, 分别如图 5 所示, 由图 5a 和图 5b 可知, 坝底地震输入主要能量集中在 10 Hz 左右, 由图 5c 瞬时能量谱可知能量主要集中在 10 ~ 15 s 之内。

4 结论

本文以水口水电站重力坝为研究对象, 利用 HHT 方法研究 2008 年 3 月 6 日古田 $M_L 4.6$ 地震水口水电站重力坝强震记录的时频特性及坝体顺河向主频, 得出主要结论如下: ① 强震记录能量集中在 0 ~ 15 Hz 频段和 10 ~ 15 s 时段; ② 重力坝顺河向主频为 3.7 Hz。

参考文献:

- 公茂盛, 谢礼立, 连海宁, 等. 2007. 基于 HHT 的结构强震记录分析研究[J]. 地震工程与工程振动, 12(6): 24 - 29.
- 李洪泉, 董亮, 吕西林. 2003. 基于小波变换的结构损伤识别与试验分析[J]. 土木工程学报, 36(5): 52 - 57.
- 李书进, 虞晖, 瞿伟廉. 2004. 基于 Hilbert-Huang 变换的结构损伤诊断[J]. 武汉理工大学学报, 26(8): 44 - 47.
- 王彬, 杨润海, 郭梦秋, 等. 2005. 昆明高层建筑强震观测记录 HHT 分析[J]. 地震研究, 28(1): 78 - 81.
- 张锦福, 蔡辉腾. 2009. 2008 年古田 4.1、4.6 级地震强震动观测记录[J]. 华南地震, 29(3): 111 - 116.
- 张力飞, 邢国良. 1996. 水口水电站重力坝强震反应台阵[J]. 水力发电, (11): 30 - 32.
- 张郁山, 梁建文, 胡聿贤. 2005. 应用 HHT 方法识别刚度渐变的线性 SDOF 体系的动力特性[J]. 自然科学进展, 15(5): 597 - 603.
- 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]. Proceedings of the Royal Society of London, 454 (1971): 903 - 995.

HHT Analyses on Observational Recordings of Strong Motion Recorded by Gravity Dam of Shuikou Hydropower Station in Gutian $M_L 4.6$ Earthquake

FANG Jia-zhi, ZHAO Zhi-wei, CAI Zong-wen, WEI Fu-quan

(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

Abstract

Using Hilbert Huang Transform (HHT), we studied the time-frequency characteristic of observational data of strong motion recorded by the strong motion response arrays of the gravity dam in Shuikou Hydropower Station in Gutian $M_L 4.6$ earthquake and the structural dynamic characteristic of gravity dam. Conclusions were obtained as follows: (1) The frequency of strong motion record energies was centralized between 0 and 15 Hz while its time interval was centralized between 10 s and 15 s. (2) The dominant frequency along the stream direction of concurrent gravity dam was 3.7 Hz. The results have certain practical significance for the understanding of the ground motion characteristics in near field of reservoirs earthquake and the seismic response of gravity dam.

Key words: gravity dam; marginal spectrum; Hilbert energy spectrum; instant energy spectrum