

Hilbert-Huang 变换在大坝监测资料分析中的应用

郭航忠¹ 丛培江¹

(1 河海大学水利水电工程学院,南京市西康路 1 号,210098)

摘 要:运用 Hilbert-Huang 变换(HHT)从时频域的角度对大坝监测资料进行了分析。通过经验模态分解(empirical mode decomposition,EMD),测值序列被分解为以不同频率波动的内在模态分量(IMF)和代表序列变化趋势性的余量,其分解所得的各 IMF 分量的变化具有调幅调频特征,余量则可以反映测值趋势性变化的局部特征。效应量和环境量测值的 Hilbert 谱存在一定的相似性,测值变化的调幅调频特征反映了大坝、基岩和周围环境组成的复杂系统的非线性和非平稳性。

关键词:大坝监测;Hilbert-Huang 变换;时频分析

中图法分类号:P258

水工建筑物观测物理量的实测资料实际上是一个时间序列^[1],因此可以运用一些时间序列的分析方法对其进行分析。Fourier 变换是常用的信号处理分析方法,一些学者利用 Fourier 变换对监测数据进行了频谱分析^[2-5]。但是,Fourier 变换要求信号是周期的或者为一平稳信号,而且利用 Fourier 变换进行频谱分析反映的是信号的整体特征,难以反映信号的局部特征。实际的大坝监测资料虽然表现出一定的周期性,但由于整个大坝系统(包括环境量)的复杂性,以及大坝的各观测物理量中存在一定的时效,整个大坝系统为一复杂的非线性系统,实测资料系列并不是严格周期的,也不是一平稳信号,因此,利用 Fourier 变换对监测资料进行分析存在一定的局限性。小波分析是近年发展起来的一种时频局部化分析方法,在许多领域得到了应用,一些学者也将该方法应用于监测数据的处理中^[6-8],但小波基的选取对小波分析的结果影响较大。1998 年,Huang 等针对非线性、非平稳时间序列提出了一种新的时频分析方法——Hilbert-Huang 变换(HHT)分析方法^[9]。该方法充分利用了信号数据,不必像小波分析那样需事先选定基函数,是一种自适应的局部时频分析方法。本文将该方法应用于大坝安全监控领域中,对大坝监测资料进行了 HHT 分析。

1 监测资料的 HHT 分析

Hilbert-Huang 变换(HHT)主要由 EMD 分解和 Hilbert 谱分析组成^[9]。这里以某拱坝的坝顶径向位移为例,说明 HHT 在大坝安全监控领域中的应用。测值序列为自动化监测的测值,1 d 一个测值。测值序列及 EMD 分解后的结果如图 1 所示。图 1 中, s 为测值序列过程线, $c_1 \sim c_7$ 为经 EMD 分解后得到的 7 个 IMF 分量, r 为余量,横轴表示测值当日至始测日的天数。

从图 1 可以看出,测值序列被分解成了以不同频率波动的序列,从 c_1 到 c_7 ,频率逐渐降低。分量 c_1 序列值变化最快,频率最高,主要为由环境量、监测系统等各种随机因素引起的大坝变形中的随机成分。分量 c_4 、 c_5 、 c_6 和 c_7 的周期性较明显,尤其是 c_6 和 c_7 ,且其幅值相对于其他分量要大,说明大坝变形这两个周期的变化所占的比重较大。分量 c_4 和 c_5 主要为以周和月为单位的大坝变形周期分量,从时间过程线还可以看出,其波动的幅度是随着时间变化的,波动的频率也存在一定的变化,为一调幅调频过程;分量 c_6 的平均周期为年周期,即为大坝变形中的年周期分量,主要由环境量的年周期变化引起;分量 c_7 呈 3 a 周期变化,主要由环境量的 3 a 周期变化引起。

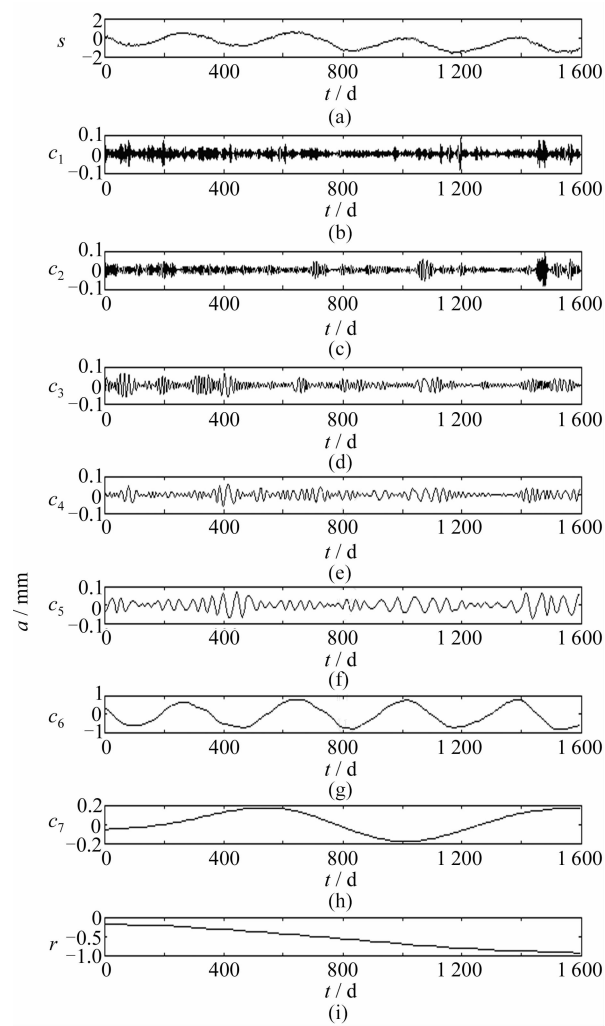


图 1 位移测值序列的 EMD 分解结果
Fig. 1 EMD Results of Monitoring Data of Dam Deformation

余量 r 则反映了测值序列的趋势性,从图中可以看出,测值有减小的趋势。

图 2 为测值序列与 7 个 IMF 分量及余量 r 之和的差值序列(即 $s - (\sum_{i=1}^7 c_i + r)$)。从图 2 可以看出,差值很小,即可以由各 IMF 分量及余量

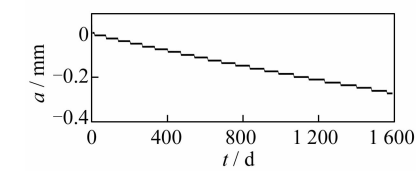


图 3 统计模型分离的时效分量
Fig. 3 Secular Separated by Statistic Model

从图 5 可以看出,按其分布特征大致可分为三个区域。第一个区域为能量分布集中的低频部分,即图中底部颜色较深的两条线。频率相对较

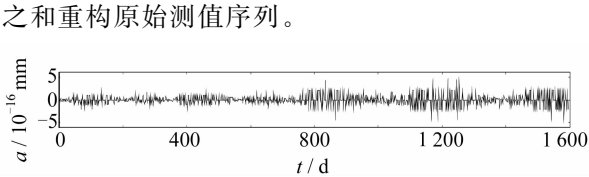


图 2 原测值序列与重构序列差值
Fig. 2 Difference Between Monitoring Data and Reconstructed Data

图 3 为用统计模型分离的时效分量,选取的时效分量模型为线性项加对数项。对比图 1 中的余量 r 和统计模型分离的时效分量可以看出,两者整体变化趋势是一致的,但在变化规律上又略有不同。余量 r 在两端变化较为平缓,中间从第 500 d 到 1 000 d 的大致范围内曲线斜率较大,其变化速率要比两端大;而统计模型分离的时效分量前期变化相对较快,到后期变化则相对较缓,这是由事先所选用的时效分量模型的性质所决定的。对比位移测值的过程线也可以看出,在第 600 d 到第 1 000 d 的大致范围内,测值有减小的趋势,考察此段时间域内的环境量变化过程线(如图 4 所示)可以看出,气温变化平稳,水位有一减小的趋势,而两端水位变化则相对平稳,这与余量 r 的变化规律相似。因此,位移测值的这一趋势性变化主要由上游水位变化引起。由此说明,EMD 分解所得的余量 r 反映的并不仅仅是测值时效分量的不可恢复部分,还包括了由于环境量的趋势性变化而引起的测值的趋势性变化部分。若环境量变化平稳,无明显的趋势性变化,则反映的是测值时效分量的不可恢复部分的变化规律。

图 5 为变形测值序列的 Hilbert 谱,为了表示的方便,图中的幅值经归一化后取对数,灰度的深浅代表幅值的相对大小,颜色越深,则其幅值相对越大,即该时刻在该频率的能量越大,波动性越强。

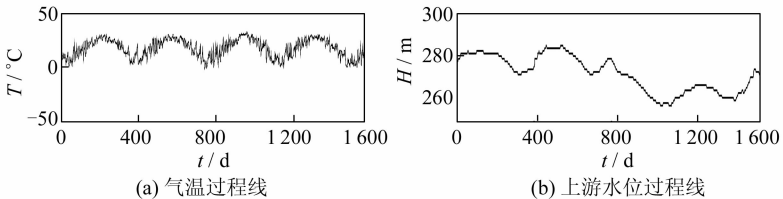


图 4 环境量变化过程线
Fig. 4 Changing Process Line of Environment Variables

高的、随着时间带有波动的主要为年周期的波动;频率最低的、除两端有波动外的为 3 a 周期的波动。在 1 000 d 附近的低频部分的局部放大图如

图 6 所示,从局部放大图可以看出,颜色较深的频率在 0.0027 d^{-1} 左右,即为年周期;颜色较浅的频率在 0.00093 d^{-1} 左右,即为 3 a 周期。第二个区域为在频率 $0.01\sim0.04\text{ d}^{-1}$ 范围内,Hilbert 谱图表现出一定的规律性和随机性。第三个区域为频率大于 0.04 d^{-1} 的高频波动部分,能量分布比较离散。由此可以看出,大坝变形主要以低频长周期的变化为主,高频短周期的变化为辅。图 7 和图 8 分别为气温和上游水位测值序列的 Hilbert 谱,两者的分布规律与位移测值序列的 Hilbert 谱分布规律相似,低频区域能量分布较为集中,高频区域能量分布较为离散,存在较为明显的年周期和 3 a 周期的波动,由此说明大坝变形与气温和上游水位的密切相关关系。从大坝变形测值序列的各 IMF 分量和 Hilbert 谱以及气温和上游水位测值序列的 Hilbert 谱中可以看出,测值序列由不同频率和振幅的波动成分组成,而且波

动的振幅和频率是随着时间变化的,为一调幅调频过程,这种波动性正是大坝、基岩和周围环境组成的复杂系统非线性、非平稳性的表现。

图 9 和图 10 分别为变形测值序列的 Hilbert 边际谱和 Fourier 谱,图中纵轴数值经归一化处理,仅表示谱值的相对大小。从图 9 可以看出,在低频段有两个明显的峰值,分别对应 3 a 周期和年周期的变化,高频分量则表现的不是很明显。对比 Fourier 谱可以看出,两者最大和次大的峰值出现的位置一致,但两峰值的相对大小并不一致;在高频部分,两者的分布也不一致,Fourier 谱在高频部分占有一定的比重,而 Hilbert 谱在高频部分所占的比重较小。其原因在于,Fourier 谱是用整个时域上频率和振幅不变的正弦或余弦函数来分解原序列的,当被分析的序列为包含非线性的非平稳序列时,势必造成虚假的谐波分量和能量的泄漏。

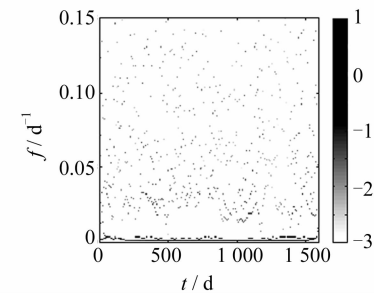


图 5 位移测值序列的 Hilbert 谱
Fig. 5 Hilbert Spectrum of Dam Deformation Monitoring Data

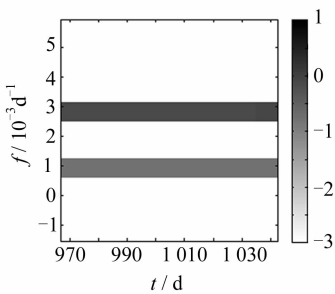


图 6 位移测值序列 Hilbert 谱局部放大图
Fig. 6 Enlarged View of Hilbert Spectrum of Monitoring Data

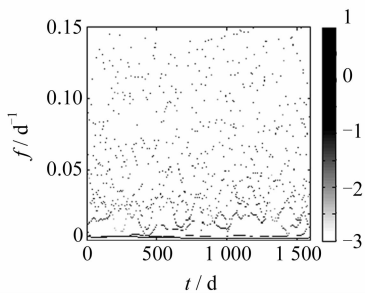


图 7 气温测值序列的 Hilbert 谱
Fig. 7 Hilbert Spectrum of Air Temperature Monitoring Data

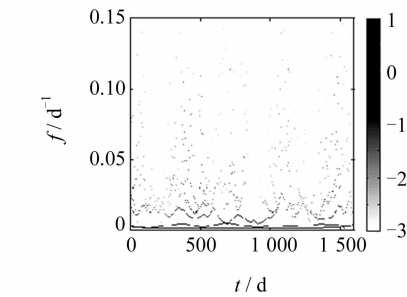


图 8 上游水位测值序列的 Hilbert 谱
Fig. 8 Hilbert Spectrum of Upstream Water Level Monitoring Data

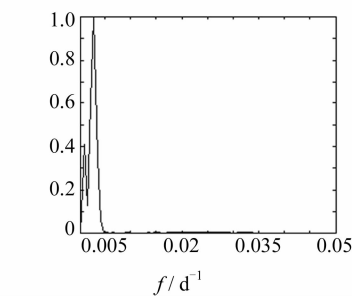


图 9 位移测值序列的 Hilbert 边际谱
Fig. 9 Hilbert Marginal Spectrum of Dam Deformation Monitoring Data

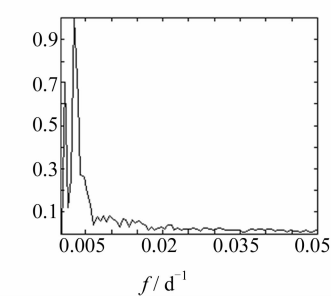


图 10 位移测值序列的 Fourier 谱
Fig. 10 Fourier Spectrum of Dam Deformation Monitoring Data

2 讨论

EMD 分解本质上是一种基于频率的分解方法,水压分量、温度分量和时效的可恢复部分由于存在相同或者相近周期的波动,对测值序列进行

EMD 分解并不能像统计模型和确定性模型一样从中分离出水压、温度和时效分量。最后的余量可以视为测值序列变化的平均过程线,反映了测值变化的趋势性,其中包含了由于环境量的趋势性变化而引起的测值趋势性变化和时效的不可恢复部分。在环境量无明显趋势性变化的情况下,

最后的余量则可以作为大坝变形等各种效应量变化是否稳定的判据。因此, EMD 分解所得的各 IMF 分量及余量为各环境量共同作用的结果, 是一种综合效应。

3 结 语

本文将 HHT 方法运用于大坝安全监控领域中, 以某拱坝径向位移测值序列的 HHT 分析为例阐述了其在大坝安全监控领域中的应用。将测值序列视为一时间序列, 运用信号分析领域中的方法, 从时频两域去观察分析测值序列所具有的特征。本文只是一个初步的尝试, 如何利用时频分析方法从测值序列中提取更加丰富的信息, 并结合物理力学知识去分析和评价大坝这一复杂的非线性系统的安全状况还有待于进一步研究。

参 考 文 献

[1] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003

[2] 邓跃进, 张正禄. 大坝变形的频谱分析[J]. 测绘信息与工程, 1997(4): 7-10

[3] 黄声享, 刘经南. GPS 监测系统基准形变分析与动

态随机模拟[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 485-490

[4] 徐进军, 魏静. 动态数据的谱分析[J]. 工程勘察, 2001(5): 52-54

[5] 李英冰, 徐绍铨, 张永军, 等. 谱分析在 GPS 自动化监测系统中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(4): 343-348

[6] 徐洪钟, 吴中如, 李雪红, 等. 基于小波分析的大坝观测数据异常值检测[J]. 水电能源科学, 2002, 20(4): 20-21

[7] 徐洪钟, 吴中如, 李雪红, 等. 基于小波分析的大坝变形观测数据的趋势分量提取[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(3): 5-8

[8] 谢国权, 戚蓝, 曾新华. 基于小波和神经网络拱坝变形预测的组合模型研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(2): 16-19

[9] Norden E, Huang Zhengshen, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. The Royal Society London, Series A, 1998, 454: 903-995

第一作者简介: 郭航忠, 博士生。主要研究方向为水工建筑物安全监控理论及其应用。
E-mail: ghz_ren@hhu.edu.cn

Application of Hilbert-Huang Transform in Analysis
on Monitoring Data of Dam

GUO Hangzhong¹ CONG Peijiang¹

(1 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, 1 Xikang Road, Nanjing 210098, China)

Abstract: By using the Hilbert-Huang transform(HHT), a newly developed time-frequency analysis method for nonlinear and nonstationary time series is proposed, the monitoring data is analyzed in time-frequency domain. The monitoring data is decomposed into several intrinsic mode function (IMF) components fluctuating at different frequencies and a residual representing the trend of the data through the empirical mode decomposition(EMD). IMF components exhibit amplitude modulation and frequency modulation. The residual can reflect the local feature of the trend. The Hilbert spectrums of the monitoring data of environment variables and effect variables are similar. The amplitude modulation and frequency modulation of monitoring data reflect the nonlinearity and nonstationarity of the complex system composed of dam, rock and environments.

Key words: dam monitoring; Hilbert-Huang transform; time-frequency analysis

About the first author: GUO Hangzhong, Ph. D candidate, majors in safety monitoring of hydraulic structures.
E-mail: ghz_ren@hhu.edu.cn