

基于希尔伯特-黄变换的汶川地震记录分析*

裴强, 胡波

(大连大学 土木工程研究与技术开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 利用 HHT 方法对 6 个台站的汶川 8.0 级地震加速度记录进行 EMD 分解, 进而对地震波输入结构的总能量进行分解, 得到地震动能量在 IMF 分量之间的分布关系。同时通过对各分量边际能量谱的分析, 可以从另一方面得到地震波的频谱特性, 边际能量谱峰值频率与地震波傅立叶谱的卓越频率相同, 边际能量谱也可以作为一种估算震动卓越周期的方法。

关键词: Hilbert-Huang Transform; 经验模态分解; 能量分布; 卓越频率; 汶川 8.0 级地震

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)02-0246-05

0 引言

采用恰当的数据分析方法, 从地震记录中提取地面运动特性是非常重要的: 作为模拟地震动的输出和地震现象的解释, 有助于对地震震源机制、在非线性土壤中传播等问题的理解; 作为岩土和结构工程系统的输入, 可以用来计算结构的动力非线性反应, 从而评估结构的抗震性能。

传统的地震记录分析方法, 如傅立叶谱分析对地震记录等非平稳数据分析会产生扭曲或者信息记录不完全等问题 (Zhang *et al.*, 2003)。Huang 等 (1998, 1999) 提出了将经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, 简称 EMD) 与著名的 Hilbert 谱分析相结合, 形成了一种新的数据处理方法, 称之为希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang Transform, 简称 HHT)。HHT 方法是专为非线性、非平稳数据分析所设计, EMD 是 HHT 方法的关键部分, 任何复杂的数据都可以通过 EMD 分解成有限的、少量的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, 简称为 IMF)。HHT 方法已经引起了工程和科研领域的广泛关注 (公茂盛等, 2007, 2010; 鞠萍华等, 2009; 祁克玉等, 2010; 王彬等, 2005; 周擎等, 2005; Duffy, 2004; Li

et al., 2005; Jia *et al.*, 2009; Jiang, Yan, 2008; Ortega, Smith, 2009; Zhang *et al.*, 2003)。

地震对结构的作用本质上是能量的传递、转换和耗散的过程, 当地震动输入结构的能量小于结构的耗能能力时, 结构是安全的, 反之结构将会破坏, 因此, 对地震输入能量的研究显得尤为重要。本文利用 Hilbert-Huang 变换方法对 2008 年汶川 8.0 级强震进行分解, 研究其输入能量, 得到了地震动输入能在频域的分布特性。并对边际能量谱分析, 发现地震动的频谱特性与傅立叶谱吻合。

1 基于希尔伯特-黄变换的汶川地震动分析

1.1 台站选取

笔者选取汶川卧龙、名山、芦山县飞仙关、荣经石龙、汉源九襄和布拖拖觉 6 个台站所记录的汶川 $M_s 8.0$ 地震东西向地震动加速度记录, 每个台站原始地震记录采样间隔 0.005 s, 为方便准确地对各个台站地震动记录进行对比分析, 对所有台站地震动采样间隔统一取 0.05 s, 采样起始时间统一到 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 21 秒, 采样长度为 140 s。各个台站地震记录的基本信息如表 1 所示。

* 收稿日期: 2011-06-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50908027) 和地震工程与工程振动开放实验室资助项目 (2009A10) 联合资助。

表 1 6 个台站地震波的基本信息

Tab. 1 Basic imformations of seismic waves recorded by 6 stations

台站名称	场地条件	观测对象	记录器型号	震中距/km	加速度峰值/Gal
汶川卧龙	土层	自由地表	ETNA	20	957.7
名山	土层	自由地表	MR2002	95	171.2
芦山县飞仙关	土层	自由地表	MR2002	103	124.1
荣经石龙	土层	自由地表	MR2002	121	93.1
汉源九襄	土层	自由地表	MR2002	170	-74.9
布拖拖觉	土层	自由地表	MR2002	345	-10.4

1.2 地震动的 EMD 分解

笔者对 6 个台站的汶川地震加速度记录分别进行经验模态分解，得到不同数量的固有模态分量，下面仅列出汶川卧龙台的加速度时程记录（图 1）及其经过经验模态分解后的固有模态分量（图 2）。

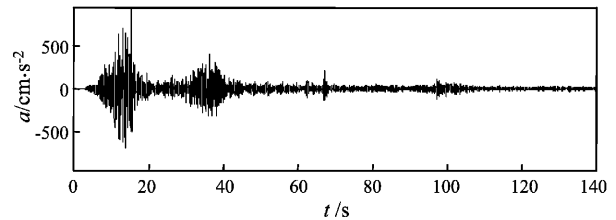


图 1 卧龙台的加速度时程记录
Fig. 1 Acceleration time history
recorded by Wolong Station

1.3 地震动的 Hilbert 能量谱分析

1.3.1 地震动的 Hilbert 边际能量谱强度分析

对 6 个台站的地震记录及其固有模态分量分别求边际能量谱，然后对边际能量谱进行求和得到

原始地震记录和各分量的总能量。根据能量守恒原理，原始地震记录的总能量与各分量能量的和应该相等，本文的计算结果也是如此。从表 2 中可以看出随着震中距的增大，地震动总能量快速衰减，震中距由汶川卧龙台站的 20 km 扩大到布拖拖觉台站的 345 km 时，能量由 $741 \times 10^6 \text{ Gal}^2$ 衰减到 $0.623 \times 10^6 \text{ Gal}^2$ ，能量衰减了大约 99.92%。

图 3 表示每个台站地震波所分解出的 IMF 分量的能量占该站记录的地震波总能量的百分比，从图中可以看出地震动能量主要集中在前 5 个 IMF 分量，能量比重最大的通常在第 1 或者第 2 个 IMF 分量，到第 6 个 IMF 分量时 6 条地震波中的 5 条能量比重已经趋近于 0。因此在利用希尔伯特-黄变换对地震动能量进行分析时，可以对前几个固有模态分量进行重点研究。

1.3.2 地震动的 Hilbert 边际能量谱频率分析

表 3 中列出了对各个台站进行经验模态分解后，分别对原始地震波和 IMF 分量求取边际能量谱的谱峰值、边际能量谱峰值所在频率以及卓越频率（傅立叶谱峰值所在频率）。

表 2 6 个台站地震波的能量计算结果

Tab. 2 Energy spectrum calculation result of seismic waves recorded by 6 stations

台站	IMF 分量数	总能量 E_I $/(\times 10^6 \text{ Gal}^2)$	各 IMF 分量能量/ $(\times 10^6 \text{ Gal}^2)$													能量总和 $/(\times 10^6 \text{ Gal}^2)$
			E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}	E_{12}	E_{13}	
汶川卧龙	13	741.000	251.000	256.000	170.000	45.000	10.900	4.250	0.813	0.757	0.106	0.251	0.033	0.063	0.199	739.000
名山	12	78.500	49.000	14.400	9.460	3.670	1.070	0.325	0.254	0.173	0.039	0.006	0.003	0.002	—	78.500
芦山飞仙关	12	63.200	54.100	5.550	2.160	0.921	0.230	0.130	0.058	0.027	0.015	0.000	0.000	0.003	—	63.200
荣经石龙	11	32.600	16.300	6.780	4.390	4.120	0.711	0.140	0.075	0.013	0.009	0.003	0.000	—	—	32.600
汉源九襄	10	24.400	4.280	8.740	8.360	2.310	0.496	0.114	0.036	0.017	0.002	0.004	—	—	—	24.300
布拖拖觉	12	0.623	0.148	0.142	0.120	0.110	0.055	0.026	0.013	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	—	0.619

注：“—”表示该地震波没有该 IMF 分量。

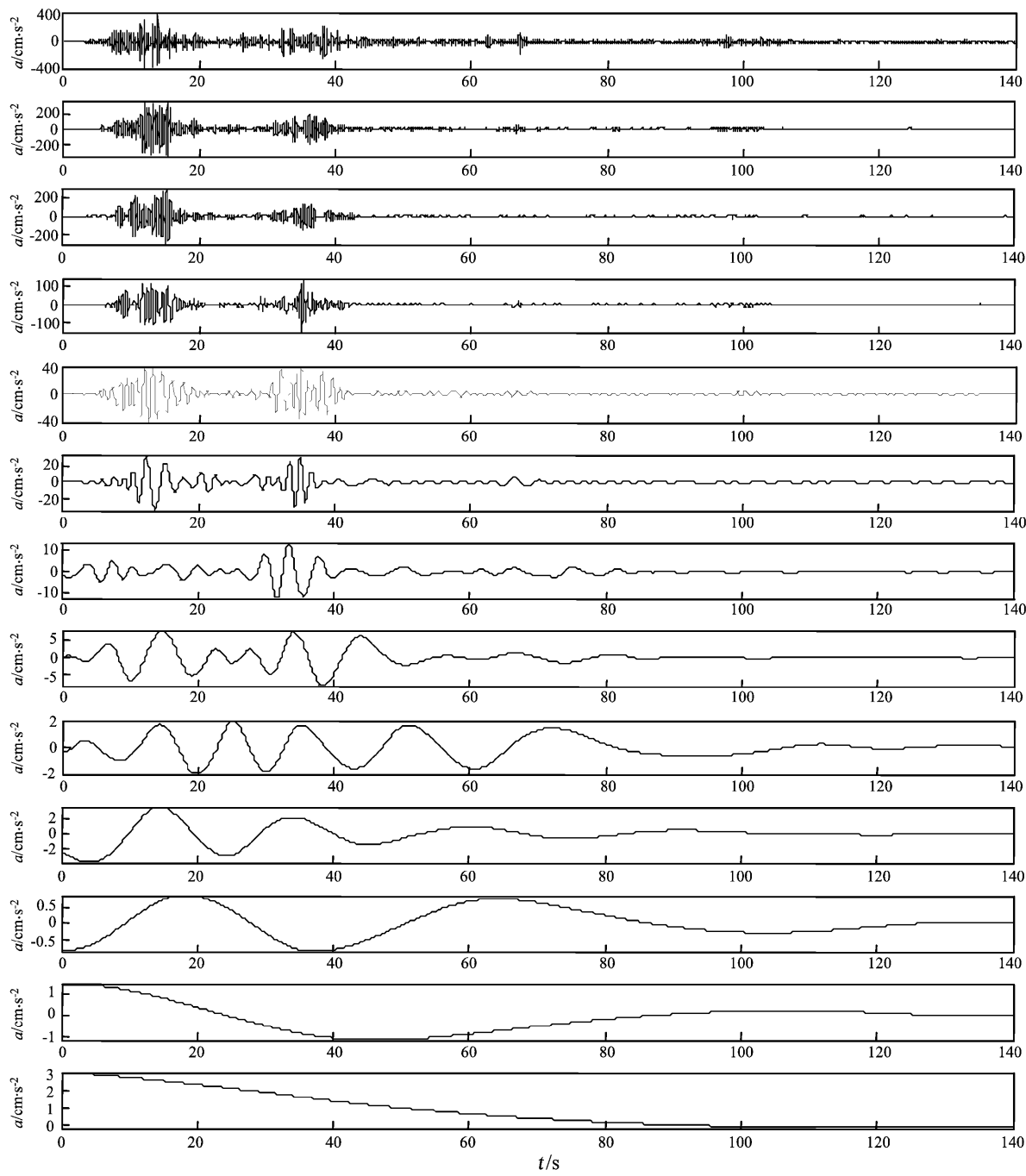


图2 卧龙台的加速度时程记录经 EMD 分解后的固有模态分量

Fig. 2 IMF components of acceleration time history decomposed by EMD recorded by Wolong Station

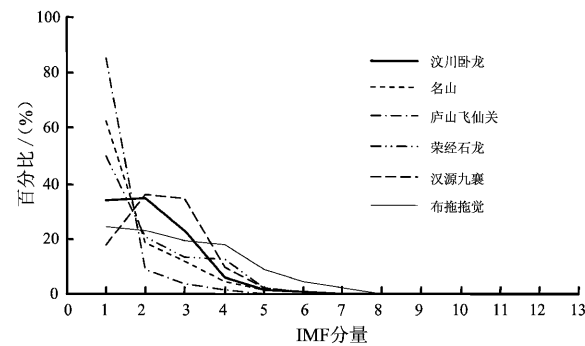


图3 各分量能量和占原始地震波总能量百分比
Fig. 3 Percentage of energy spectrum of each IMF component account for the total energy spectrum of original seismic wave

表 3 各个台站地震波的能量谱分析及卓越周期

Tab. 3 Energy spectrum analysis and predominant periods of seismic waves recorded by 6 stations

台站	数值分析	原波	各 IMF 分量												
			IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10	IMF11	IMF12	IMF13
汶川 卧龙	能量谱峰值/Gal ²	811 800	330 161	484 264	616 415	139 078	56 297	46 419	16 532	19 660	2 646	14 276	1 627	5 223	13 147
	峰值对应频率/Hz	2.46	6.99	3.88	2.31	1.58	0.61	0.33	0.23	0.10	0.09	0.04	0.01	0.01	0.01
	卓越频率/Hz	2.35	6.30	3.14	2.34	1.64	0.69	0.39	0.24	0.11	0.05	0.04	0.02	0.01	0.00
名山	能量谱峰值/Gal ²	37 290	36 125	11 661	10 617	6 676	3 626	1 888	3 062	3 634	2 663	362	187	101	—
	峰值对应频率/Hz	7.78	7.78	4.26	2.61	1.28	0.55	0.33	0.23	0.09	0.05	0.01	0.01	0.00	—
	卓越频率/Hz	7.94	7.94	4.03	2.60	1.41	0.52	0.33	0.24	0.11	0.05	0.02	0.01	0.01	—
庐山 飞仙关	能量谱峰值/Gal ²	55 890	55 830	7 075	2 687	2 605	1 261	948	1 825	1581	604	27	37	202	—
	峰值对应频率/Hz	6.93	6.93	3.94	1.75	0.88	0.55	0.23	0.09	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00	—
	卓越频率/Hz	7.00	6.72	3.96	1.99	1.18	0.55	0.29	0.11	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00	—
荣经 石龙	能量谱峰值/Gal ²	17 240	11 678	7 452	5 687	15 759	4 140	1 378	2 498	535	372	309	9	—	—
	峰值对应频率/Hz	1.13	8.95	4.20	2.29	1.18	0.63	0.26	0.14	0.05	0.04	0.01	0.00	—	—
	卓越频率/Hz	1.09	9.58	4.44	1.76	1.09	0.64	0.21	0.11	0.06	0.04	0.01	0.00	—	—
汉源 九襄	能量谱峰值/Gal ²	18 680	4 638	14 764	16 320	12 180	2 619	1 401	654	571	123	301	—	—	—
	峰值对应频率/Hz	1.85	5.26	2.30	1.85	0.94	0.41	0.21	0.13	0.04	0.01	0.00	—	—	—
	卓越频率/Hz	1.83	5.72	2.36	1.41	0.85	0.47	0.21	0.14	0.05	0.02	0.01	—	—	—
布拖 拖觉	能量谱峰值/Gal ²	580	117	105	177	385	248	304	134	76	118	7	15	5	—
	峰值对应频率/Hz	0.64	4.80	2.80	1.09	0.70	0.51	0.13	0.06	0.05	0.03	0.03	0.01	0.00	—
	卓越频率/Hz	0.69	4.61	2.76	1.34	0.69	0.56	0.16	0.07	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	—

注：“—”表示该地震波没有该 IMF 分量。

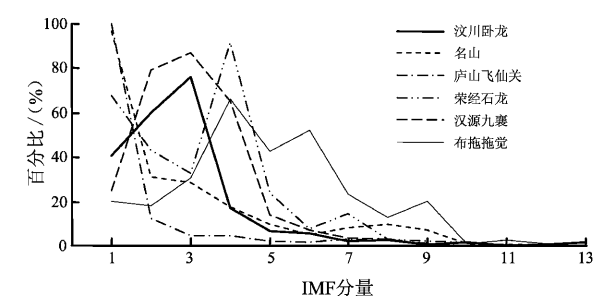


图 4 各分量能量谱峰值占原始地震波能量谱峰值的百分比

Fig. 4 Percentage of energy spectrum peak of each IMF component account for the total energy spectrum peak of original seismic wave

从表 3 和图 4 中可以看出，各个台站的能量谱峰值并不像其能量一样集中在前两个 IMF 分量，而是相对分散地分布在第 1 到第 4 个 IMF 分量中，并且部分 IMF 分量能量谱峰值在原始地震波能量

谱峰值中所占比例很大：汶川卧龙台记录地震波 IMF3 分量占 75.93%；名山台记录地震波 IMF1 分量占 96.88%；庐山飞仙关台记录地震波 IMF1 分量占 99.89%；荣经石龙台记录地震波 IMF4 分量占 91.41%；汉源九襄台记录地震波 IMF3 分量占 87%；布拖拖觉台记录地震波 IMF4 分量占 66.32%，这说明在地震动对结构的影响上，这些分量是卓越的，我们将这种分量称为能量卓越分量。

抗震设计的重要目标之一就是使结构的自振频率远离结构输入地震能量集中的频段，因而使用地震动能量特征来评价地震波的特性（大小、持时、频率等）是一个很好的选择。

进一步对这些能量卓越分量进行分析，发现这些卓越分量能量谱峰值所在的频率和原始地震波的傅立叶谱卓越频率非常一致，由此可以用边际能量谱峰值所在的频率来表示原地震波的卓越频率。

2 结论

本文运用 HHT 方法分析了 2008 年汶川 8.0 级地震 6 个台站的强震记录,通过 EMD 分解,分析了地震动 IMF 分量的强度及频谱特性,可得结论如下:

(1) 利用 EMD 将地震波分解成不同数量的 IMF 分量,进而对地震波输入结构的总能量进行分解,得到地震动能量在 IMF 分量之间的分布关系。

(2) 通过对各分量边际能量谱的分析,可以从另外一个方面得到地震的频谱特性,边际能量谱的峰值频率与其对应地震动谱的卓越频率相同,边际能量谱也可以作为一种估算震动卓越周期的方法。

参考文献:

- 公茂盛,鹿嶋俊英,谢礼立,等. 2010. 基于结构强震记录的结构时变模态参数识别[J]. 振动与冲击,29(5):171-176.
- 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,27(6):24-29.
- 鞠萍华,秦树人,秦毅,等. 2009. 多分辨 EMD 方法与频域平均在齿轮早期故障诊断中的研究[J]. 振动与冲击,28(5):97-103.
- 祁克玉,施坤林,霍鹏飞,等. 2010. EMD 端点效应处理在转子摩擦故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断,30(5):492-496.

- 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.
- 周攀,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.
- Duffy D G. 2004. The application of Hilbert-Huang transforms to meteorological datasets[J]. Oceanic Technol,21(4):599-611.
- Huang N E,Shen Z,Long S R,*et al.* 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary Time Series Analysis[C]. Proc R Soc Lond A,454(1971):903-995.
- Huang N E,Zheng S,Steven R L. 1999. A new view of nonlinear water waves;The Hilbert spectrum[J]. Annu Rev Fluid Mech,31:417-457.
- Jia R Y,Shou Z F,Shieh J S. 2009. Human heart beat analysis using a modified algorithm of detrended fluctuation analysis based on empirical mode decomposition[J]. Medical Engineering & Physics,31(3):92-100.
- Jiang R,Yan H. 2008. Studies of spectral properties of short genes using the wavelet subspace Hilbert-Huang transform(WSHHT)[J]. Physica A,387(16):4223-4247.
- Li M,Jiang W M,Li X,*et al.* 2005. A test of the dynamical nonstationarity in atmospheric boundary layer turbulence[J]. Chin J Geophys,48(3):493-500.
- Ortega J,Smith G H. 2009. Hilbert-Huang transform analysis of storm waves[J]. Applied Ocean Research,31(3):212-219.
- Zhang R R,Ma S,Stephen H. 2003. Hilbert-Huang transform analysis of dynamic and earthquake motion recordings[J]. Journal of engineering mechanics,129(8):861-875.

Analysis of Acceleration Time Records in Wenchuan Earthquake Based on Hilbert-Huang Transform

PEI Qiang, HU Bo

(Research and Development Center of the Civil Engineering Technology,
Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

Abstract

Using the Hilbert-Huang Transform, acceleration time histories recorded by 6 stations in Wenchuan M8.0 earthquake are decomposed into several Intrinsic Mode Function components by Empirical Mode Decomposition. The total energy of structure inputted by seismic wave is decomposed to get the distribution relation of the ground motion energy in the different IMF component. By analysis of marginal energy spectrum of each IMF component, we can obtain the spectral characteristics of seismic wave. The frequency of marginal energy spectrum peak is the same as the predominant period of the Fourier spectrum of seismic wave, so it can also be used as the way to estimate the predominant period of vibration.

Key words: Hilbert-Huang Transform (HHT); Empirical Mode Decomposition (EMD); energy distribution; predominant frequency; Wenchuan M8.0 earthquake