

2011年四川炉霍 $M_s5.3$ 地震加速度记录的 时频分析与能量计算

李大虎^{1,2}, 梁明剑¹, 黎小刚¹, 顾勤平³

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要:2011年4月10日四川炉霍发生 $M_s5.3$ 地震。本文选取了此次地震中不同震中距的台站所获取的三分量加速度时程记录, 针对目前 EMD 分解的 HHT 方法存在的模态混叠问题, 采用了一种基于 EEMD 分解提取信号时频特性的方法, 对加速度记录进行能量计算和时频分析发现, 该方法不但有效抑制了以往 EMD 分解过程中所出现的模态混叠问题, 而且还较好地提取到记录的时频特性和能量集中分布的时频段。并与 Fourier 变换、小波分析进行了对比研究证明了该方法在处理非平稳、非线性强震信号中的有效性和实用性, 在强震数据处理领域有着较好的应用前景。

关键词: 聚类经验模态分解(EEMD); 希尔伯特黄变换(HHT); 加速度记录; 时频特性; 瞬时能量谱; 四川炉霍 $M_s5.3$ 地震

中图分类号: P315.914 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2012)04-0335-07
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2012.04.0335

Time-frequency Analysis and Energy Calculation for Acceleration Records of Luhuo $M_s5.3$ Earthquake in Sichuan Province in 2011

LI Da-hu^{1,2}, LIANG Ming-jian¹, LI Xiao-gang¹, GU Qin-ping³

(1. Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China;
2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;
3. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

Abstract: Luhuo $M_s5.3$ earthquake occurred in Sichuan on April 10, 2011. In this paper three components of acceleration time history records acquired by different stations with different epicenter distances are selected. Aimed at the problem in HHT method in the decomposition of EMD which is present common way for extracting the signal time-frequency characteristics, a EEMD method is used and the energy calculation and time-frequency analysis on acceleration records are made. The method can not only effectively restrain the problem occurred in EMD decomposition process, but also can extract record's time-frequency characteristics and the energy concentration distribution bands. Comparative study among this method and Fourier transform and wavelet analysis is made. The validity and practicability of the method are proved in dealing with the unsmooth, nonlinear strong signal, and has a good prospect in earthquake data processing area.

Key words: Ensemble Empirical Mode Decomposition(EEMD); Hilbert-Huang Transform(HHT); acceleration records; Time-frequency characteristics; Instantaneous energy spectrum

收稿日期: 2011-12-22

基金项目: 国地震局地震科技星火计划项目(XH12041Y); 地震行业科研专项(201008006)

作者简介: 李大虎(1982-), 男(汉族), 安徽灵璧人, 在读博士, 从事场地地震安全性评价、强震数据处理等工作。

0 引言

2011年4月10日17时02分,四川省甘孜藏族自治州炉霍县境内发生 $M_s5.3$ 地震(东经 100.9° ,北纬 31.3°),震中位于鲜水河断裂炉霍段上。四川省数字强震动观测台网在震区附近的8个台站获取了主震的三分向加速度记录,其中在震中距40 km范围内获得了3条 140 cm/s^2 以上的记录,最大水平峰值加速度记录为炉霍地办台记录到的EW向分量 403.5 cm/s^2 。台站分布位置如图1所示。利用P波初动方向资料和CAP方法求解出的震源机制解反映此次地震为纯走滑型的断层错动性质。

为了提取到地震发生后更多关于强震记录的时频特性和动力特征,为地震波的传播规律及抗震设计等方面的研究奠定基础^[1],长期以来地震工程界对强震加速度记录最常用的处理方法就是傅里叶变换和小波分析,抑或S变换、CWD分布、ZAM分布等时频分析方法^[2],而这些方法大都是建立在信号为稳态的基础上,并且由于Fourier变换无法进行时频局部化分析和小波变换存在基函数选取不定等

问题^[3]。因此,近年来很多专家与学者采用了具备精确分解优势和非线性动态数据刻划能力的希尔伯特黄变换(HHT)来对强震记录进行时频分析^[4-5]。但是由于经验模态分解(EMD)过程中存在的模态混叠问题,这不但会使得单独的固有模态函数(IMF)分量缺乏明确的物理意义,还会造成EMD算法运行过程中的不稳定。为了抑制模态混叠效应同时提取到关于地震动更多的时频特性及地震波的动力学特征,本文采用一种基于聚类经验模态分解(EEMD)的HHT计算方法,对炉霍地震中获取的不同震中距的台站记录(炉霍专业台、炉霍地办台以及甘孜地办台)进行时频分析和能量计算,以得到不同台站获取的加速度记录信号的边际谱、相位谱、Hilbert时频幅值谱及能量谱,量化提取其平均周期、中心频率和Hilbert能量在不同时频段上的分布等特性,进而与快速傅里叶变换(FFT)、小波变换(WT)进行对比研究,并对所选取的强震台站中各频带的能量进行定量计算,最后从瞬时能量谱的角度分析其与逆一走滑型汶川8.0级地震的强震记录的不同,以期从中获得一些新的认识。

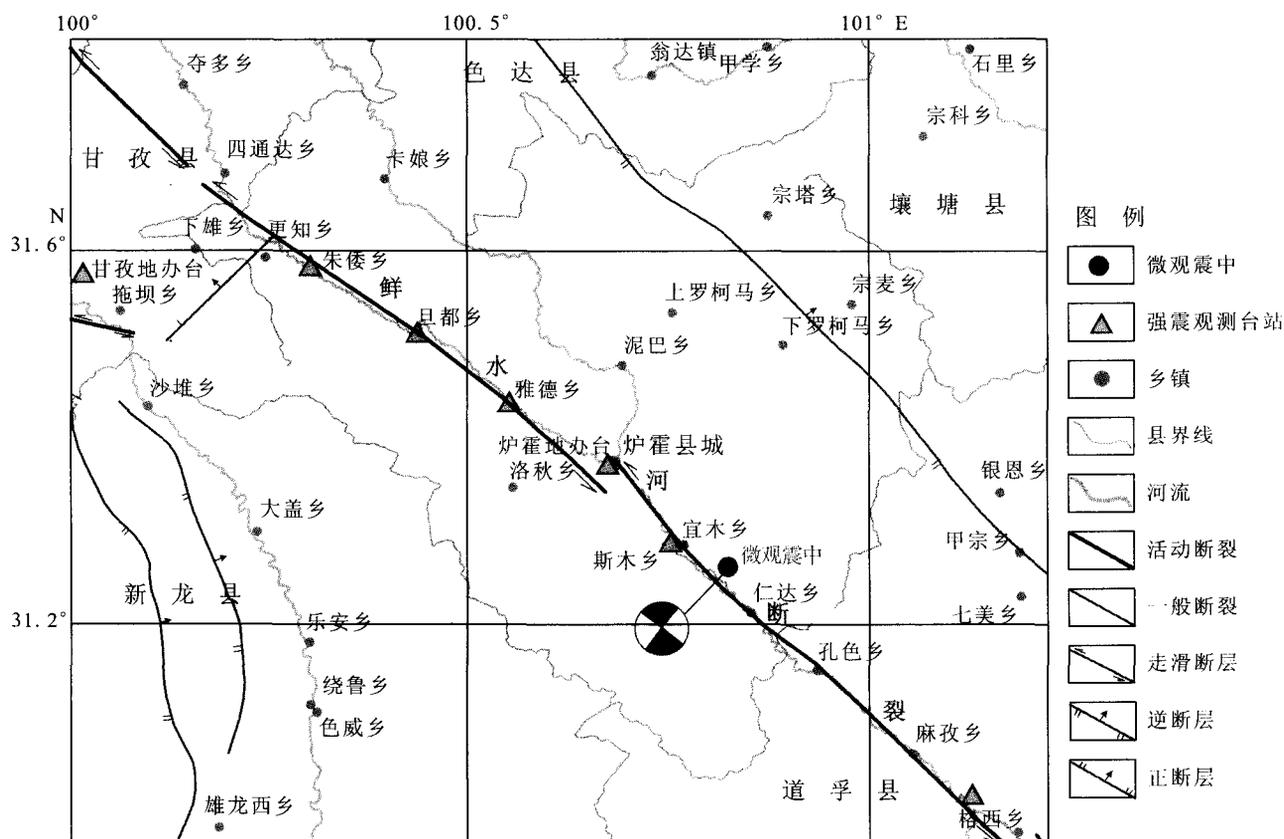


图1 区域地震构造与台站分布图

Fig. 1 Distribution of regional seismic tectonics and seismic stations.

1 EEMD 方法原理与谱分析

本文之所以选择基于聚类经验模态分解 (EEMD) 的 HHT 进行加速度记录的时频分析在于其不但能够有效抑制以往 EMD 分解过程中出现的模态混叠问题,而且使得分解出的 *IMF* 分量的物理意义更加清晰。该方法主要由 EEMD 分解和 Hilbert 变换两部分组成。

1.1 EEMD 分解原理及算法流程

本文所采用聚类经验模态分解原理为:当附加的白噪声均匀分布在整个时频空间时,该时频空间就由滤波器组分割成的不同尺度成分组成,那么,对于每次 EMD 分解,添加的白噪声在整个时频空间是均匀分布的,信号的不同频率尺度被自动投影到由白噪声所建立的均匀时频空间的相应频率尺度上。由于每次 EMD 分解添加不同的白噪声,噪声之间不相关,因此对所有 EMD 分解的相应 *IMF* 求整体平均后,人为添加的噪声被抵消掉,全体的均值最后将会被认为是真正的结果。唯一持久稳固的部分是信号本身,所加入的多次测试是为了消除附加的噪声^[6-7]。对于将 EEMD 分解应用于在提取强震动记录时频特性方面,笔者已对汶川地震不同断层距的强震记录做过相应的对比研究^[8]。其算法流程如下:

(1) 初始化 EMD 执行总次数 M , 白噪声的幅值系数 $k, m=1$;

(2) 执行第 m 次 EMD 分解试验;

①在输入信号 $x(t)$ 中加入一组随机高斯白噪声序列 $nm(t)$, 得到加噪的待处理信号 $xm(t)$: $xm(t) = x(t) + k nm(t)$;

②用 EMD 分解 $xm(t)$, 得 I 个 *IMF* $c_{jm} (j=1, \dots, I)$, c_{jm} 表示第 m 次计算分解出的第 j 个 *IMF*;

③若 $m < M$, 返回步骤(2), $m = m + 1$;

(3) 对 M 次试验的每个 *IMF* 计算均值 ($j=1, 2, \dots, I; m=1, 2, \dots, M$);

(4) 输出作为 EEMD 分解得到的第 j 个 *IMF*, $j=1, 2, \dots, I$ 。

1.2 Hilbert 变换与谱分析

对地震动加速度信号的各 *IMF* $c_i(t)$ 做 Hilbert 变换^[9-10], 得到

$$\hat{c}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} c_i(\tau) \frac{1}{t-\tau} d\tau$$

再构造原信号的解析信号: $z_i(t) = c_i(t) + i\hat{c}_i(t) = a_i(t)e^{j\theta_i(t)}$, 其中 j 为虚数单位。

$$a_i(t) = \sqrt{c_i(t)^2 + \hat{c}_i(t)^2}$$

$$\theta_i(t) = \arctan\left(\frac{\hat{c}_i(t)}{c_i(t)}\right)$$

上面两式明确表达了瞬时振幅和瞬时相位,很好地反映了信号的瞬时特征。

在此基础上再定义瞬时频率为

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt}$$

于是可以得到

$$z_i(t) = a_i(t)e^{j\theta_i(t)} = a_i(t)e^{j\int\omega_i(t)dt}$$

进而得到

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t)e^{j\theta_i(t)} = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t)e^{j\int\omega_i(t)dt}$$

这就称作 Hilbert 谱:

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t)e^{j\int\omega_i(t)dt}$$

再定义 Hilbert 边际谱:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt$$

另外作为 Hilbert 边际谱的附加结果,可以定义 Hilbert 瞬时能量谱:

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

瞬时能量谱提供了信号能量随时间的变换情况。

如果振幅的平方对时间积分,可以得到 Hilbert 能量谱:

$$ES(\omega) = \int_0^T H^2(\omega, t) dt$$

2 加速度记录的时频分析

2.1 EEMD 分解结果

选取不同震中距的台站获取的加速度记录进行处理和计算,包括炉霍专业台(震中距 14.2 km)NS 向分量和炉霍地办台(震中距 24.0 km)NS 向分量。对炉霍专业台 NS 向分量进行 EEMD 分解结果的分量及其功率谱分别如图 2 所示,从图 2 中可以看出,原信号已被分解成 8 个 *IMF* 分量(C1~C8)和 1 个残余项 $R(\text{res})$ 。并且随着分解的进行,所得到的 *IMF* 分量频率逐渐降低,直到分解出频率已经很低的最后一个趋势项 R 。其中各个 *IMF* 分量包含了不同的尺度特征。

关于每个 *IMF* 分量具体的时频信息,经计算后列于表 1。

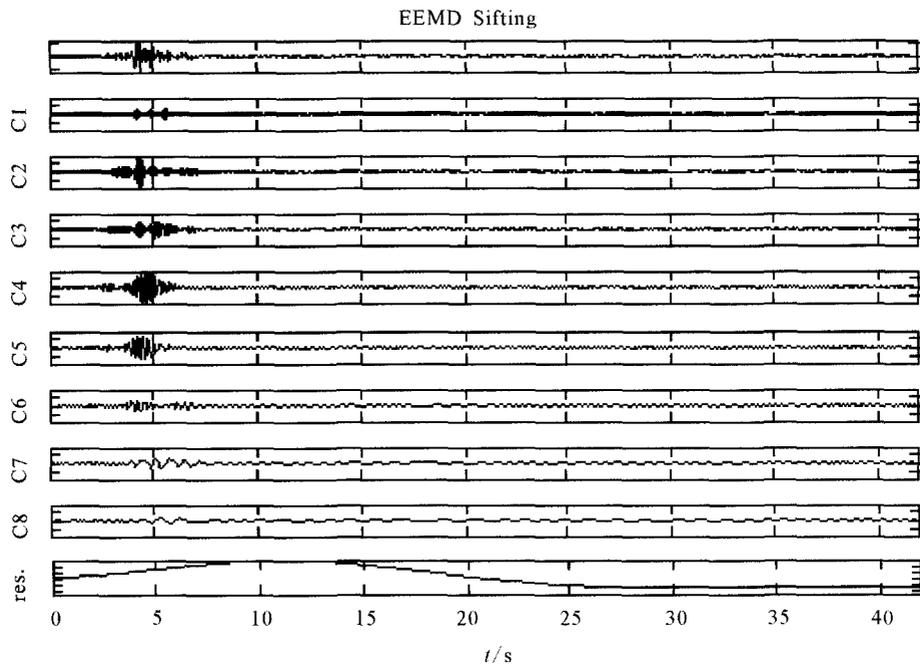


图 2 基于 EEMD 分解得到的炉霍专业台各 IMF 分量

Fig. 2 The IMF components from decomposition of EEMD recorded at Luhuo professional station.

表 1 IMF 分量统计特征值

模态	中心频率 /Hz	平均周期/s	最大振幅 /[cm · s ⁻²]	最大振幅对应的时/s	最大振幅对应的频率/Hz
IMF1(C1)	10.511 9	0.092 3	168.103 7	4.325 0	11.406 1
IMF2(C2)	6.000 0	0.235 1	112.231 4	4.725 0	4.791 2
IMF3(C3)	5.845 2	0.301 7	62.939 8	4.240 0	4.305 0
IMF4(C4)	3.107 1	0.351 7	65.142 5	4.255 0	3.716 9
IMF5(C5)	1.392 9	0.757 3	29.093 1	4.385 0	1.785 3
IMF6(C6)	1.083 3	1.053 7	21.435 0	4.525 0	0.903 3
IMF7(C7)	0.511 9	1.871 2	6.740 9	5.115 0	0.567 1
IMF8(C8)	0.142 9	5.355 6	2.101 0	8.835 0	0.279 0

除了以上基于 EEMD 分解得到的各 IMF 分量分析时频特性外,本文又对部分分量进行了功率谱分析计算,由于篇幅所限,在此仅选取了 3 个 IMF (IMF2、IMF4 和 IMF6) 的功率谱图(图 3)进行说

明。图 4 为震中距 14.2 km 的炉霍专业台所获取的加速度记录 NS 向分量的原始记录,通过 FFT 分析可以看出,原始信号的频谱较丰富,且大部分分布在 0~20 Hz 以内。

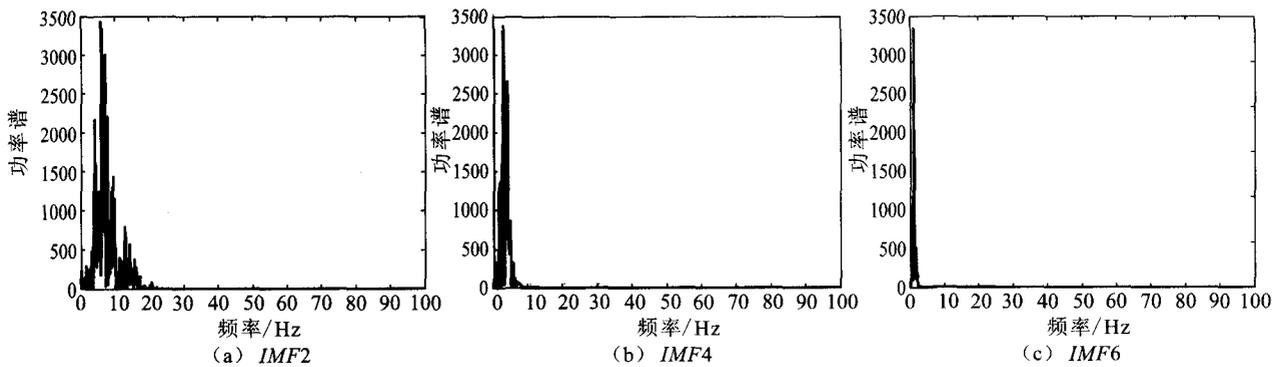


图 3 三个 IMF 分量的功率谱图

Fig. 3 The power spectrum diagrams of three IMF components.

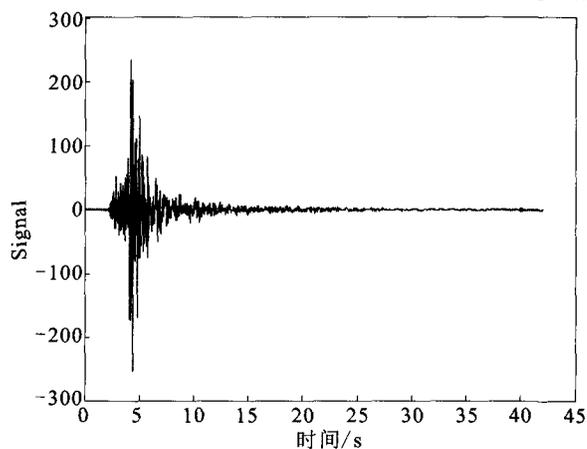


图 4 炉霍专业台的加速度时程记录

Fig. 4 Acceleration schedule records of Luhuo professional station.

2.2 Hilbert 变换与谱分析

将 EEMD 分解后的 IMF 各分量经 Hilbert 变换和文中 1.2 所列公式计算后,得到了图 5 中的 Hilbert 边际谱。与 FFT 谱对比可以发现,在低频处 FFT 谱会低估地震动的幅值;随着频率的增加 FFT 谱又会放大地震动的幅值。同样对其他两个不同通道(EW 向和 UD 向)以及所选取的不同震中距的台站(炉霍和甘孜地办台)获取的强震记录进行傅里叶谱与边际谱对比也可以发现这个现象。

3 能量计算与分析

3.1 能量计算

将震中距为 14.2 km 的炉霍专业台获取到的加速度记录 NS 向分量和震中距为 24.0 km 的炉霍地办台获取到的加速度记录 NS 向分量分别记为 DATA1NS 和 DATA2NS,从 Hilbert 能量谱(图 6)中可以看出此次地震信号能量在频率上的集中程度。DATA1NS 的能量分布在 0~20 Hz 的主振频域范围以内,DATA2NS 的能量分布在 0~10 Hz 以内,其中主频带之内又包括多个子振频带,具体计算量值列举在表 2 和表 3 之中。

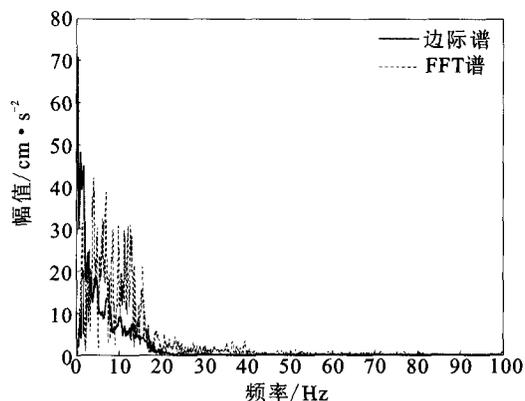


图 5 边际谱与傅里叶谱对比

Fig. 5 The comparison between Marginal spectrum and Fourier spectral.

表 2 DATA1NS 信号能量集中区各频段对应的能量

频段	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10
能量	96 008	290 050	159 320	132 260	284 050	151 140	162 780	197 980	109 690	105 790
频段	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~16	16~17	17~18	18~19	19~20
能量	196 190	124 360	89 727	79 886	39 117	40 564	27 795	14 578	18 310	7 287

表 3 DATA2NS 信号能量集中区各频段对应的能量

频段	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10
能量	31 362	43 551	127 460	92 046	871 860	367 180	245 590	452 520	489 190	166 790

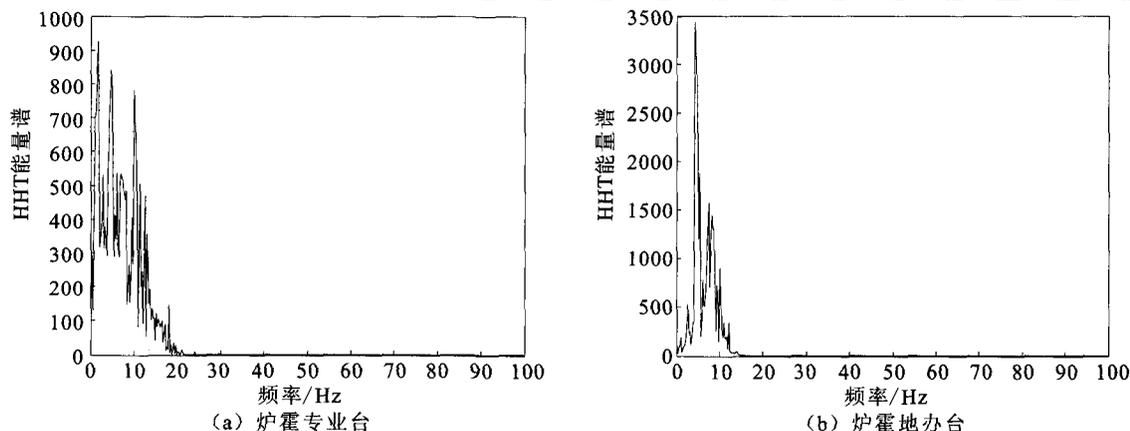


图 6 不同台站记录的 NS 向分量能量谱

Fig. 6 The energy spectrums of NS component from different station records.

从表2和表3中还可以看出,从不同震中距台站所接收到的加速度记录提取到的能量最大的优势频段是不同的,DATA1NS的主要能量集中1~2 Hz,而DATA2NS主要能量集中4~5 Hz。需要特别指出的是,经过HHT得到的地震动能量谱图并不是真正的能量值,它的量纲也不是国际单位制的焦耳,或工程单位制中的公斤力米或CGS制中的尔格,究其原因,是因为Hilbert变换本质上是一个宽频带全通滤波,当地震动加速度单位取gal时, $IE(t)$ 的单位就是 $gal \times gal \times rad/s$ 。所以Hilbert能量谱只是间接地反映了输入能量随频率的变化情况,至于能量随着时间变化趋势则用Hilbert瞬时能量谱来表示,后面的章节将会介绍。

3.2 基于能量概念的崩科结构破坏机理初步分析

与国内其他建筑物结构形式不同的是,由于炉霍县位于高原地区,建筑物大多属于藏式民居,当地称之为“崩科”。“崩科”结构的房屋使用了大量的木材,并用夯土墙或块石墙打围,内部采用穿斗木架通柱、双梁双檩双挂条,地嵌锁脚井字形屋架(图7)。虽然这种结构的房屋具有良好的抗震性能,但在本次 $M_s5.3$ 地震中,各乡镇行政村的房屋还是出现了不同程度的破坏,具体表现为土墙或石墙出现裂缝、倾斜或局部垮塌,主体结构破坏并不严重。



图7 宜木乡“崩科”结构房屋

Fig.7 “Bengke” building structure in Yimu village.

由于基于能量概念的分析能够较好地反映振动强度、频谱特性,特别是持时对建筑物的综合影响,因此对它的研究成了研究抗震设计的一个重要发展方向^[11-12]。对工程的抗震设计而言,我们在关心地震的总能量的基础上,更应该关心的是地震动峰值能量的最大值,它表征了地震动对结构破坏能力的大小,因此地震动峰值能量的最大值能够较为全面地反映地震动三要素(幅值、频谱和持时)的综合作

用效果。从表2和表3中可以看出,不同震中距的台站所记录到的地震动峰值能量的最大值是不同的,而且能量分布的优势频段也是不同的,DATA1NS和DATA2NS的最大能量分别集中1~2 Hz和4~5 Hz之间,这对我们通常的幅值越大,持时越长,累积能量和峰值能量越大的认识做了补充,而且对于不同频带而言,相邻频段上如果地震波都具有较高的能量,那么,它对于结构的冲击通常就会越大,结构发生破坏的可能性也就越大。崩科结构的房屋虽然有别于一般意义上的土木或砖木结构的房屋,但也同样适用于这一破坏机理。并且,从表3中所列举的炉霍地办台加速度记录的能量分布还可以发现,相邻频段都具有较高的能量造成的破坏会很大,这与震害调查中所确定该地(炉霍县新都镇)为宏观震中相一致。所以,基于能量概念结合HHT计算,对建筑物的震害进行尝试研究具有探索意义。

4 与汶川地震加速度记录的对比

由于汶川 $M_s8.0$ 地震是龙门山构造带逆冲—右旋错动的结果,而此次炉霍地震则是纯走滑型的断层错动,这也导致了其能量的释放过程中出现的差异。因此本文选取了汶川地震中距离断层在30 km内的德阳白马台所获取的强震记录NS向分量(简记为BMNS)做了基于EEMD分解的HHT分析得到该分量的瞬时能量谱图(图9),图8(a)、(b)、(c)分别为炉霍专业台、炉霍地办台以及甘孜地办台(震中距93.7 km)获取到的加速度记录NS向分量的瞬时能量谱图。对比这三张图可以发现,图9所示的德阳白马台记录NS向分量瞬时能量谱图反映了该次地震能量的释放是分段的,这与张勇等人^[13]通过对震源时间函数分析得出汶川地震整个过程有5个主要的能量释放阶段基本一致;而从图8则反映出炉霍地震的能量释放大体上经历了一至两次的释放过程,主要能量释放集中出现在5 s左右。因此,Hilbert瞬时能量谱不但能够清晰地表达能量随时间的变化情况,而且还可以发现能量峰值出现的时刻,它在表达地震动信号的时频特性方面有着较好的用途。图10为炉霍专业台获取的SN向加速度时程信号进行基于sym4小波函数变换后得到的小波谱图,从图中虽然可以看出能量大部分集中在高尺度的低频区,但它也只是定性描述,具体的时频对应关系无法定量提取,所以小波谱无法表现出很好的局部化效果,更无法像Hilbert瞬时能量谱

(图 9)和 Hilbert 边际谱(图 5)一样较为精确地表达 信号能量的时频分布特性。

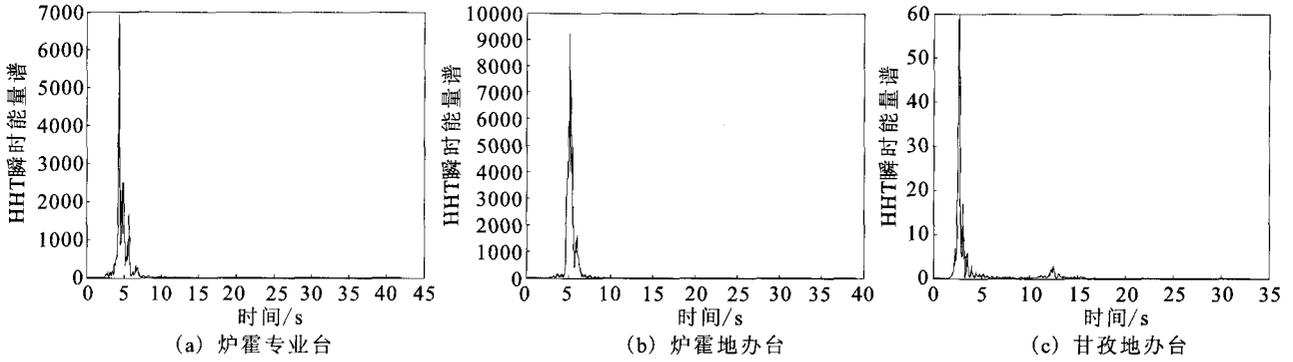


图 8 不同台站记录 NS 向分量瞬时能量谱

Fig. 8 Instantaneous energy spectrums of NS component from different station records.

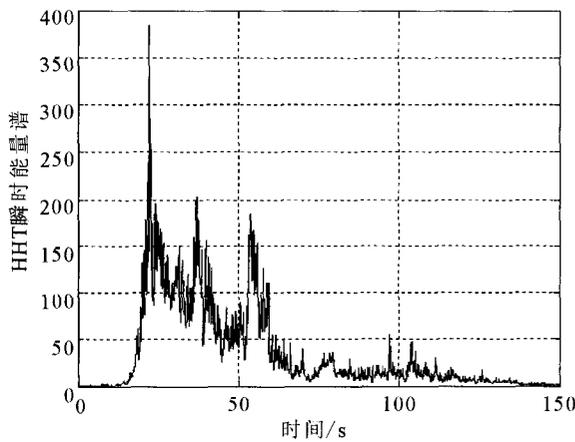


图 9 德阳白马台记录 NS 向分量瞬时能量谱

Fig. 9 Instantaneous energy spectrum of NS component from Baima station records in Deyang.

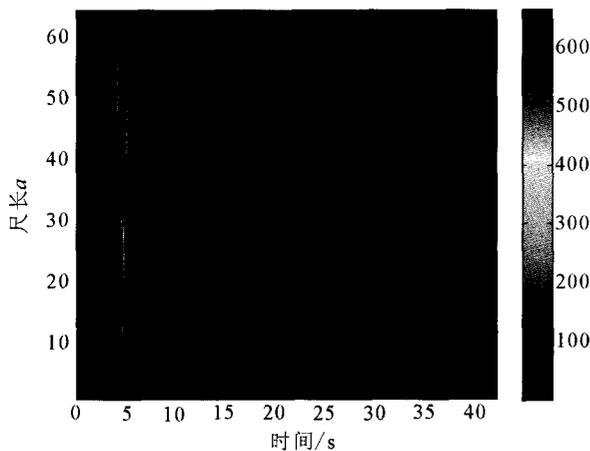


图 10 BMNS 基于 sym4 小波基的小波谱

Fig. 10 Wavelet spectrum of MANS based on sym4 wavelet-basis.

5 结论与建议

(1) 本文选取了 2011 年四川炉霍地震中不同

震中距的台站所获取的三分量加速度时程记录,采用基于 EEMD 分解的 HHT 进行了能量计算和时频分析,不但有效抑制了以往 EMD 分解过程中所出现的模态混叠问题,而且还较好地提取了记录的时频特性和能量集中分布的时频段,从而证明了该方法在处理非平稳、非线性地震信号中的有效性和实用性,在地震工程领域有着较好的应用前景。然而,与 Fourier 变换和小波分析不同的是,HHT 作为一种经验性的自适应方法目前仍存在一些不完善的地方,例如样条差值的量化及边界效应的处理等,在今后还需不断完善其相关的数学理论,并研究分解过程中的快速算法,争取将 EEMD 算法和一些可视化编程工具(Visual C++、C# 或 .NET)结合起来,开发出基于 EEMD 分解和频谱分析的应用软件,将会为以后的地震数据处理工作带来很大的方便。

(2) 针对藏区特有的崩科结构的房屋,本文只是基于能量概念从相邻频段的能量集中分布会对建筑物造成的破坏情况进行了初步的定性一半定量的分析,如果需要详细研究该崩科结构详细的振动特性和破坏情形,还必须结合各台站具体的场地条件等资料,对加速度记录数据进行基于 HHT 的瞬时输入能量定量计算。除此之外,还需采用系统识别理论和结构动力学等相关知识并量化分析,识别该种结构的基本参数(质量、阻尼、刚度、反应谱等),判别在结构遭遇地震后房屋受到损伤后的阻尼、刚度和自振频率变化情况,为抗震设计提供坚实的依据。

致谢:在本文的撰写过程中,得到了成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室李才明教授的悉心指导和帮助;在与李军博士的探讨过程中

(下转 358 页)

整。打孔 2~4 m,如果孔直接打到基岩处,则利用水泥浇筑将仪器底座和基岩直接固死;如果尚未到基岩处,则插入钢筋至基岩处,然后在此基础上浇筑水泥墩,保证仪器底座和基岩完全耦合。

为保证基线只在垂直方向上受力和运动,需要利用支架为其设计导向机构,保证基线单自由度运动方向并尽可能降低导向机构与基线之间摩擦力的影响。

(4) 新型传感器的研制

除了在仪器结构和环境因素上的考虑外,测量端的位移传感器需要保证更高的测量精度。为了保证仪器在 2~4 m 基线情况下能清晰记录到垂直向固体潮汐,传感器分辨力应小于 0.001 μm,量程 ≥ 40 μm^[6]。目前台站水平应变测量正在使用的差动变压器的精度约为 0.01 μm,不能满足测量要求。

为了获得更高的测量精度,传感器拟采用差动式电容传感器,需要解决的问题主要包括:①电容极板的工艺处理:由于测量精度要求很高,对电容极板的表面处理要求就十分严格,拟采用传统研磨方式加工基面,超声波加工工作面,最后激光刻线的方法来实现。②电容传感器的密封要好。山洞的潮湿环境是影响其测量精度最为主要的一个原因。

除此以外,观测系统还需要考虑标定装置、数据采集传输、防雷、后期数据处理等一系列问题。一套完整的垂直应变观测系统应该是一个不断创新、完



(上接 341 页)

也听取了很多建议;审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见;台站的加速度记录数据由四川省地震局台站管理中心的赖敏老师提供。在此一并向他们表示衷心的感谢!

[参考文献]

[1] 卢大伟,姚凯,闵祥仪,等. 兰州现象台存放台阵汶川 M_s8.0 强震动记录与分析[J]. 西北地震学报,2011,33(2):171-176.
 [2] 姚家骏,杨立明,冯建刚. 常用时频分析方法在数字地震波特征量分析中的应用[J]. 西北地震学报,2011,33(2):105-110.
 [3] 李大虎,何强,李才明,等. MATLAB 与 C++ 混合编程实现航磁异常提取的小波分析方法研究[J]. 地震研究,2011,25(2):98-105.
 [4] 武安绪,吴培雅,兰从欣,等. Hilbert-Huang 变换与地震信号的时频分析[J]. 中国地震,2005,21(2):207-215.
 [5] 公茂盛,谢礼立,连海宁,等. 基于 HHT 的结构强震记录分析研究[J]. 地震工程与工程振动,2007,27(6):24-29.
 [6] Z Wu, N E Huang. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J].

善、实验的过程。

4 小结

垂直应变的研究需求是迫切的,其理论研究已经很成熟,但在国际上和国内却很少有相关的观测系统。本文主要从理论上给出了三维地壳应变观测的需求,建立了垂直应变观测系统的初始模型,讨论了观测系统研制过程中需要注意的问题和理论上的解决方案,有待后续工作进一步完善和验证。当然一套完整的观测系统的研制面临的问题依然很多,希望以此文为契机,逐步深入垂直应变系统的研究填补国内在此观测领域内的空白。

[参考文献]

[1] 罗腾,白征东,过静琨,等. 基于北斗卫星系统的地质灾害监测系统在西藏地下水位和地应力监测中的应用[J]. 工程勘察,2011,39(2):78-80.
 [2] 刘序俨,李平,张雁滨. 垂直应变固体潮理论值计算及其调和和分析[J]. 地壳形变与地震,1989,9(4):46-50.
 [3] 刘序俨,黄声明,梁全强. 正交曲线坐标系的应变张量转换[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(2):71-76.
 [4] 罗少聪,孙和平,徐建桥. 大气变化对位移、重力和倾斜观测影响的理论计算[J]. 地球物理学报,2005,48(6):1288-1294.
 [5] 张文来,罗宏江,苏萍. 气压变化对 SS-Y 伸缩仪观测日变曲线的干扰分析[J]. 内陆地震,2006,20(3):266-270.
 [6] 吕宠吾,孙亚强. SS-Y 型短基线伸缩仪及其标定装置[J]. 地壳形变与地震,2001,21(3):82-88.
 Proc. R. Soc. Land. A,2004,460(2046):1597-1611.
 [7] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis,2009,1:1-41.
 [8] 李大虎,赖敏,何强,等. 基于聚类经验模态分解(EEMD)的汶川 M_s8.0 强震动记录时频特性分析[J]. 地震学报,2012,34(3):350-362.
 [9] Rilling G, Flandrin P, Gonc P, et al. On empirical mode decomposition and its algorithms[A]// IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, NSIP-03 [C]. Grado, Italy; IEEE,2003:1-5.
 [10] Flandrin P, Rilling G, et al. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Process,2004,11:112-114.
 [11] Akiyama H. Earthquake-resistant design for building[M]. Tokyo, Japan; University of Tokyo Press,1985.
 [12] Kamamra H, Galambos, Theodore V. Earthquake loads structural for reliability[J]. J. STRUCT. ENG-ASCE, 1989,115(6):1446-1462.
 [13] 张勇,冯万鹏,许力生,等. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2008,38(10):1186-1194.