

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.174

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于 EMD 的长周期地震动分量提取方法

谭潜^{1,2}, 李英民², 杨永斌²

(1. 中机中联工程有限公司, 重庆 400039; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:在实际地震记录形成过程中存在高、低频成分地震波的叠加,地震动高、低频成分的组成是地震动反应谱特征的重要反映。采用数字滤波技术,以加速度反应谱平均周期 2 s 为截止周期,结合经验模态分解,提取 2 s 以上的本征模态函数及残值重构并基线校正后作为长周期分量,其余本征模态函数重组为短周期分量;通过原地震动与分量的相关性、反应谱的离散性对提取方法的有效性进行验证,并与既有方法进行对比。结果表明:该长周期地震动分量提取方法能较好地提取出在长周期和短周期部分与原地震动具有较好的相关性、地震反应谱离散性较小的长、短周期分量,且较好地反映原地震动的谱特征,在长周期地震动分量提取中具有更好的适应性。

关键词:长周期地震动;经验模态分解;本征模态函数;反应谱;频谱参数;长周期分量

中图分类号:P315.5;P315.9 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)03-0119-09

Method of long period ground motions component extraction based on empirical mode decomposition

TAN Qian^{1,2}, LI Yingmin², YANG Yeongbin²

(1. CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400039, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In the actual seismic record formation process, there is a superposition of high and low frequency components of seismic waves. The composition of high and low frequency components of ground motion is an important reflection of the characteristics of the response spectrum of ground motion. This study is based on the digital filtering technology, taking the average period of acceleration response spectrum (T_{avg}) 2 s as the cut-off period and combining with empirical mode decomposition (EMD), and it extracted the intrinsic mode function (IMF) and residual component which the cut-off period above 2 seconds as long-period components of long period ground motions (LPGM) after refactoring and baseline correction. The remaining IMFs were reorganized into short-period components; The validity of the extraction method is verified by correlation between seismic records and their components and the discreteness of the original ground motion and the response spectrum. It also compare this method with existing methods. The results show that the extraction method for LPGM components in this paper can better extract the long and short period components of the seismic response spectrum that are less discrete and have a good correlation with

收稿日期:2020-07-12

基金项目:国家自然科学基金(51478068);重庆市自然科学基金博士后科学基金(cstc2019jcyj-bshX0070)

作者简介:谭潜(1982-),男,博士(后),主要从事地震工程、结构抗震及钢结构研究,E-mail: tanqianzl@sina.cn.

Received:2020-07-12

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51478068); Postdoctoral Science Foundation of Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2019jcyj-bshX0070)

Author brief: TAN qian (1982-), postdoctor, main research interests: earthquake engineering, structural seismic and steel structure, E-mail: tanqianzl@sina.cn.

the original ground motions in the long and short periods respectively. It better reflects the spectral characteristics of original ground motions and has better adaptability in the LPGM component separation.

Keywords: long-period ground motions; empirical mode decomposition (EMD); intrinsic mode function (IMF); response spectrum; spectral parameter; long period component

在实际地震记录形成过程中,存在各种成分地震波的叠加(图 1)^[1],故地震记录的主要特性由其成分特性来表达更具代表性。对地震动原始记录的分析处理是以往研究地震动的主要方向,其忽视了地震动分量分析,而地震记录中存在长周期分量的事实不能否认^[2]。在长周期地震动界定中,徐龙军等^[3]以规准反应谱的离散性分析为基础,指出地震动的反应谱特征与地震记录的长周期分量是不可忽视的两个方面。对地震记录各类分量的提取和分析是确定地震动类型的可靠方法。地震动分量提取方法与信号分析方法息息相关。学者们在信号处理方法的基础上提出了相关分量提取方法,Khanse等^[4]利用傅里叶变换方法确定频率,结合巴特沃斯滤波器对地震记录进行分量分离,提取出长周期地震动脉冲分量,进而对相应的位移反应进行分析评估;陈红等^[5]采用分数阶伽柏变换对地震信号进行时频分析,其中一项重要的应用就是利用分数阶伽柏变换来进行分数域谱分解,同时,也可以提取频域中的不同尺度和不同方向上的特征,优势明显;Baker^[6]以小波理论为基础,提取地震记录分量,从而对脉冲和非脉冲的地震记录进行识别,具有较好的区分度,但是,不能对地震动分量的特性进一步的描述是此方法的不足;Mallat 分解与重构是一种基于多尺度分析的小波变换分离分量的关键技术,赵国臣等^[7]将其引入到地震记录分量提取中,认为是一种有效的方法;Farid 等^[8]应用滑动平均滤波方法,结合截止频率,将原地震记录分解,提取脉冲型分量,剩下作为剩余分量。将提取的分量输入结构,探索结构的弹性反应。商业软件 Seismo Signal 中自带数字滤波器,可以对地震动进行滤波,提取相应的分量,徐龙军等^[3]利用软件的此功能提取脉冲分量,并对地震记录反应谱及提取的分量反应谱的离散性进行分析和校验。

在经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)等信号处理与分量分离技术在地震动信号处理中应用的基础上,采用合适评价长周期地震动的截止周期,实现了表征长周期地震动特性的长周期分量

的提取,验证了提取分量的合理性与有效性,提出可应用于长周期地震动识别及其规律特性研究的地震动分量提取方法。

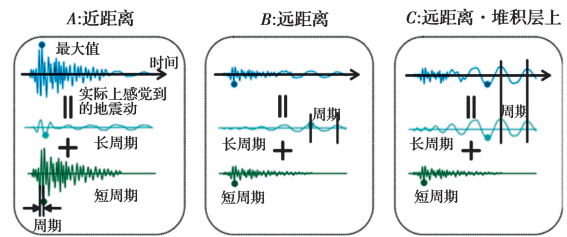


图 1 长周期地震动的叠合

Fig. 1 Superposition of the long period ground motions

1 EMD 理论

EMD 作为一种新型自适应非平稳信号处理方法,不仅对线性平稳信号处理效果较好,而且对地震波等非线性、非平稳信号的分析处理有很好的适用性。本征模态函数(IMF)是 EMD 的前提。EMD 方法认为信号都是由若干 IMF 组成,如果 IMF 相互重组叠加,便可以重构为复合信号^[9]。所以,EMD 的重要目标就是为了得到 IMF 们,实现这个目标受到两个条件的限制:首先,峰值点的个数与函数穿零数必须相等或者最多相差一个;其次,局部极大值构成的上包络线和极小值构成的下包络线的平均值为零,以 IMF 们为基础可展开 EMD,其过程如下:

1) 基于给定的地震记录信号 $x(t)$, 分别标记出其所有局部极大值 $x_{\max}(t)$ 和局部极小值 $x_{\min}(t)$;

2) 将所有的局部极大值($x_{\max}(t)$)点、局部极小值($x_{\min}(t)$)点分别用 3 次样条曲线连接起来,形成上、下包络线;

3) 对包络线上的局部极大值、局部极小值取平均

$$m(t) = \frac{x_{\max}(t) + x_{\min}(t)}{2} \quad (1)$$

4) 移除初始地震记录信号中的平均趋势

$$d(t) = x(t) - m(t) \quad (2)$$

5) 移除平均趋势的 $d(t)$ 如果满足上述两个限定条件,令 $c_i(t) = d(t)$ 作为一个 IMF,则可以算出残量 $r(t) = x(t) - d(t)$;反之,如 $d(t)$ 不满足两个限制

条件,则进入第下一步继续筛选;

6)反复运行1)~5)步,让 $d(t)$ 满足限制条件要求,最终得到多个 IMF 和残量 $r_n(t)$, $r_n(t)$ 为单调函数或者为常数

$$\begin{aligned} x(t) - c_1(t) &= r_1(t) \\ r_1(t) - c_2(t) &= r_2(t) \\ &\dots \\ r_{n-1}(t) - c_n(t) &= r_n(t) \end{aligned} \quad (3)$$

反过来,可以通过 n 个 IMF 分量 ($c_i(t)$) 与残量 ($r_n(t)$) 的线性组合得到原始信号

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (4)$$

2 截止周期确定

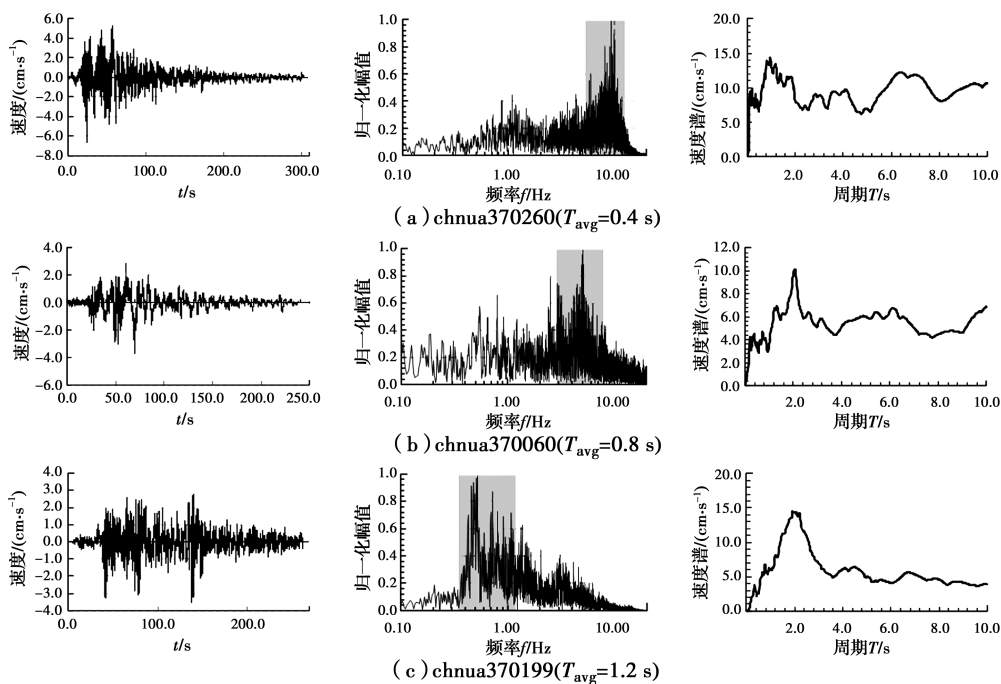
数字信号处理领域常用数字滤波技术调制频率分量,文献[4]采用频率 1.67 Hz 作为识别脉冲特征的界限。Rathje 等^[10-11]通过对地震记录的频谱周期参数对比后发现,加速度反应谱平均周期 T_{avg} (式(5))在反映长周期地震动的低频特性方面具有无可比拟的优势,且采用频谱参数 T_{avg} 能将地震记录的高、低频分量分布情况更准确地区分,低频分量更容易被识别。杜东升等^[12]研究表明, T_{avg} 的变化与震级的变化具有一致性, T_{avg} 是敏感性更好的频谱参数,在评价长周期地震动时更具优势。由 T_{avg} 计算公式可以知道其物理意义表示的是周期关于对应谱值平方的一个加权平均值,反映了地震动频谱在整个计算频域内的分布情况^[11]。

$$T_{avg} = \frac{\sum_i T_i \left[\frac{S_a(T_i)}{PGA} \right]^2}{\sum_i \left[\frac{S_a(T_i)}{PGA} \right]^2} \quad \Delta T_i \leq 0.05 \text{ s},$$

$$0.05 \text{ s} \leq T_i \leq 10 \text{ s} \quad (5)$$

式中: T_i 为加速度谱对应的离散等间隔周期点; $S_a(T_i)$ 为周期点的加速度反应谱; PGA 为地震动加速度时程对应的峰值。

为了更好地体现 T_{avg} 对地震动特性区分的实用性,以 T_{avg} 在 0.4~5.1 s 范围内的 10 条汶川地震记录为数据基础,结合地震动的速度时程、归一化傅里叶幅值谱和速度谱(图 2),分析地震动频谱特性随 T_{avg} 变化而变化的规律:1)从速度时程看,地震动的速度时程曲线随 T_{avg} 的增大而越来越稀疏,穿零点越来越少,表示其长周期成分不断丰富,表明 T_{avg} 的变化能在一定程度上反映地震动周期的变化;2)从傅里叶谱(0.1~20 Hz)看,灰色背景的主频区域随 T_{avg} 的增大而向低频方向平移,低频成分占比逐渐增加,显示出地震记录主要频谱成分随 T_{avg} 的变化而变化的趋势,以 $T_{avg} = 2$ s 为界,1 Hz 以下的低频成分占比迅速增加,1 Hz 以上的高频部分占比迅速减小;3)从速度谱看,谱幅值相对较大的区段则随着 T_{avg} 的增大向长周期段平移,同样以 $T_{avg} = 2$ s 为界,越大长周期成分越丰富,速度反应谱峰值 2 s 后基本不断向右移动。可见, $T_{avg} = 2$ s 界限区分明显,可作为长周期分量提取的频谱指标。



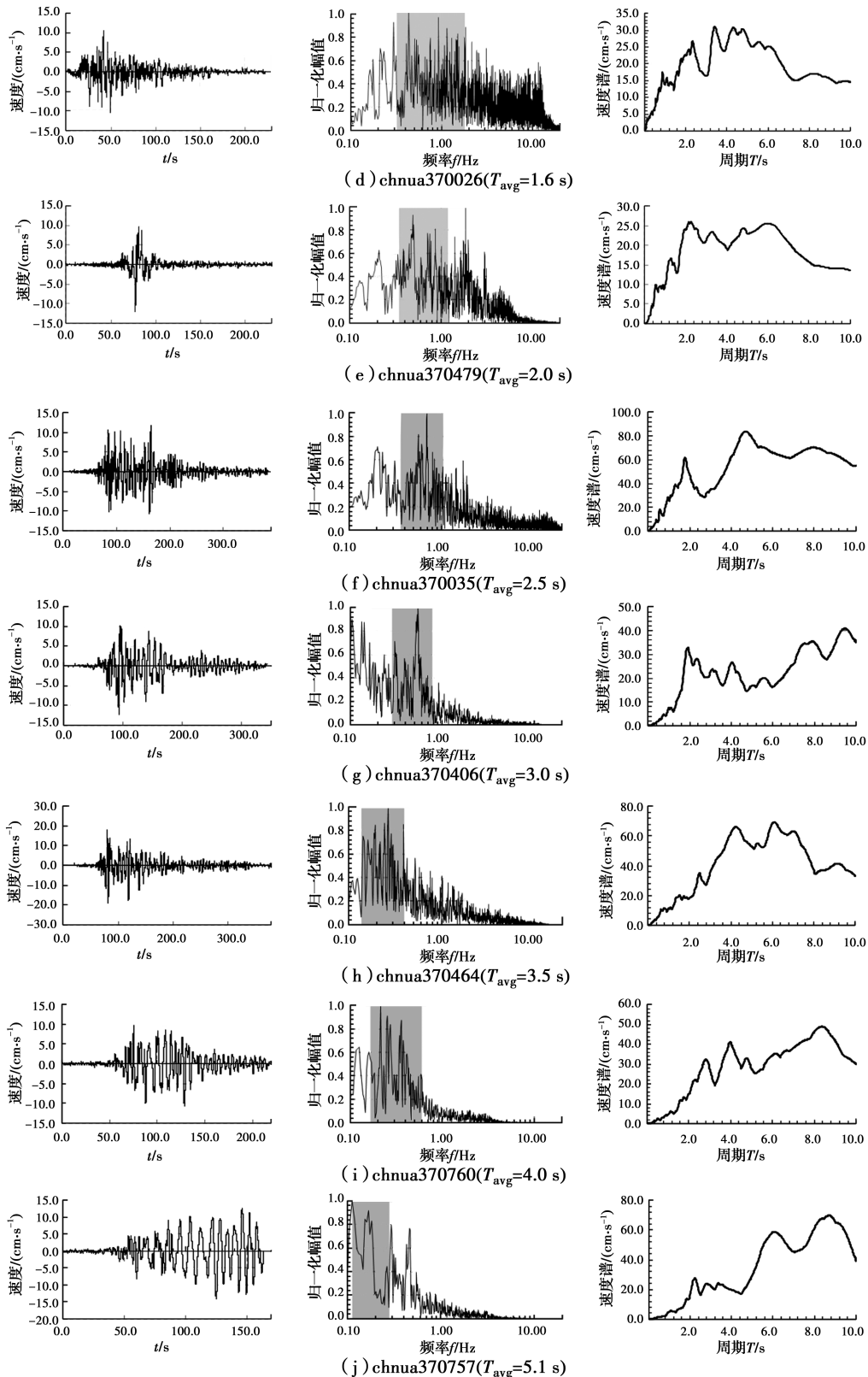


图 2 地震记录速度时程、归一化傅里叶谱和速度谱伴随 T_{avg} 的变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of velocity time-history, normalized Fourier spectrum and velocity spectrum with vary T_{avg}

3 分量提取方法步骤

1) 地震记录的提取。以汶川地震中的长周期地

震动 chnua370505 为例,其加速度、速度、位移时程曲线见图 3(a),采用 EMD 方法的步骤对原始地震记录(Original)加速度时程分解,提取地震记录中的

IMFs 和残余分量(R),提取的 IMFs 以 $I_1, I_2, I_3 \dots I_{12}$ 表示,见图 3(b),通过 EMD 的步骤可以知道,最终提取的 IMFs 和 R 均需符合 EMD 中的两个限制条件。

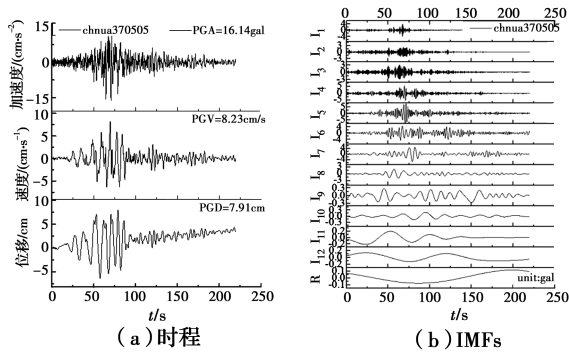


图 3 chnua370505 时程及 IMF 分量

Fig. 3 Time history and IMF components of chnua370505

2)地震动长、短周期分量的重构。基于地震动 chnua370505 的 IMFs 求解对应的 T_{avg} 值,如表 1 所示;由于地震记录周期 10 s 以后不确定性的存在,导致在限定周期范围时仅取值 10 以内。以 $T_{avg} = 2$ s 为界,将提取的 2 s 及以上的 IMFs 与 R 叠加重构为长周期分量(long period components, LPC),小于 2 s 的 IMFs 重新组合为短周期分量(short period components, SPC)。表 1 显示:地震动的前 4 个 IMFs 的 T_{avg} 小于 2 s,叠加组合为初始短周期分量,后面 7 个 IMFs 与 R 的 T_{avg} 大于 2 s,重新组合为初始长周期分量,组合后的长、短周期分量时程见图 4。根据 EMD 中地震信号重构公式(4)可知,重构后的加速度 LPC 与 SPC 应符合式(6)、式(7)的范式,形成的长、短周期分量与 IMFs 叠加的误差应在可接受范围内,式中 k 表示 $T_{avg} \leq 2$ s 的 IMFs 最大分量的下标。进一步对加速度分量积分,得到速度分量(图 4),为后续校正做准备。

$$SPC \approx \sum_{i=1}^k I_i \quad (6)$$

$$LPC \approx \sum_{i=k+1}^n I_i \quad (7)$$

表 1 chnua370505 的 IMFs 对应的 T_{avg} 值

Table 1 T_{avg} values corresponding to IMFs of chnua370505

I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
0.49	0.55	0.88	1.97	2.72	3.79	6.53
I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}	R	
7.61	7.06	5.30	5.25	5.34	4.93	

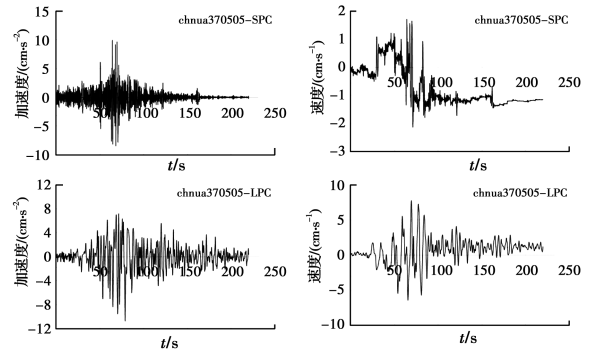


图 4 叠加后的加速度与速度分量

Fig. 4 Acceleration and velocity components after superposition

3)分量基线漂移的消除。由图 4 的加速度与速度时程曲线可看出,重新组合的加速度分量时程无基线漂移,速度时程偏移明显。与原始地震动进行基线校正同样的目的,为了消除基线偏移对信号处理结果造成的干扰,保证分析结果的有效性,对重构后的加速度分量时程进行基线校正与滤波,形成校正后最终的加速度长周期分量与短周期分量,积分得到速度分量时程,消除基线漂移后的加速度、速度时程如图 5 所示。可以看出,基线校正对基线漂移的控制效果明显,速度分量时程的偏向大幅度减小,校正后的地震动分量能更好地代表实际地震动,可将地震动中的干扰因素最大程度地排除。

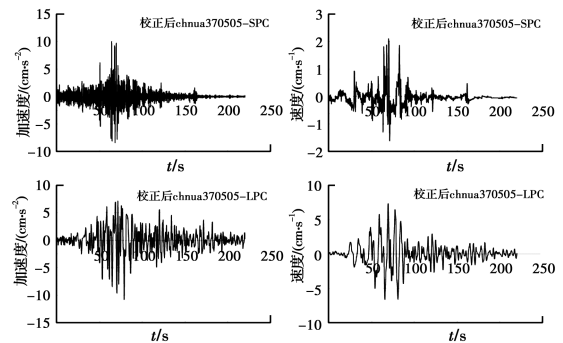


图 5 消除基线漂移的分量时程

Fig. 5 Component time history by eliminating baseline drift

4 长周期分量提取方法的有效性验证

4.1 地震波分量提取

以 Chi-Chi 地震中的地震记录 ILA056-NS 与 TCU052-EW 验证本文提出的提取方法的有效性。基于地震动记录的波形特点,王博等^[13]将长周期地

震动分为远场长周期地震动与近断层长周期地震动,从而可将 ILA056-NS 归类于前者,而 TCU052-EW 归类于后者;图 6 展示了两条地震记录的加速度与速度时程与其分量。可以看出:在原始记录中,

基线漂移均未在加速度时程和速度时程中出现;观察加速度、速度分量的时程,基线偏移在加速度分量中没有出现,而速度分量偏移明显,是对上述分量提取方法二次校正的必要性的进一步确认。

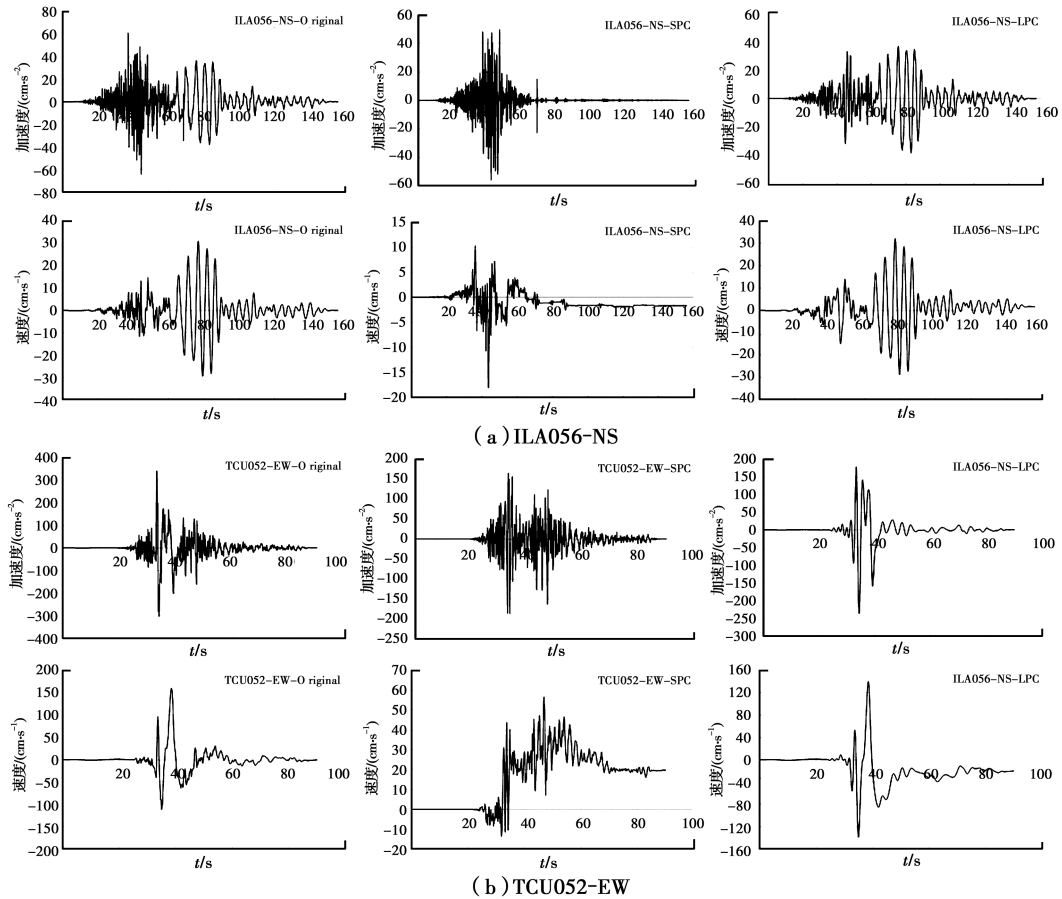


图 6 ILA056-NS、TCU052-EW 原地震记录及分量加速度和速度时程

Fig. 6 Acceleration and velocity time history of original seismic records (ILA056-NS、TCU052-EW) and their components

4.2 原地震记录与其长周期分量相关性

验证提取分量的代表性和有效性,可以分析地震记录分量与原地震动的相关性。图 4 与图 6 显示,未校正的地震记录分量速度时程存在明显基线偏移;对比图 5 中校正后的分量速度时程,漂移消除效果较好。分析校正后的地震动分量速度时程与原地震动的相关性更可靠。从图 7 可看出相关性趋势:从地震记录的波形判断,两条地震记录校正后的 LPC 与原始地震动吻合较好,SPC 与原地震动吻合较差,说明长周期地震动的 LPC 在很大程度上能够代表长周期地震动,而 SPC 则不能代表,表明上述提取分量的代表性与有效性,同时,表 2 中的相关性系数计算值也更进一步说明基于速度的 LPC 与长周期地震动速度时程的相关性更好。

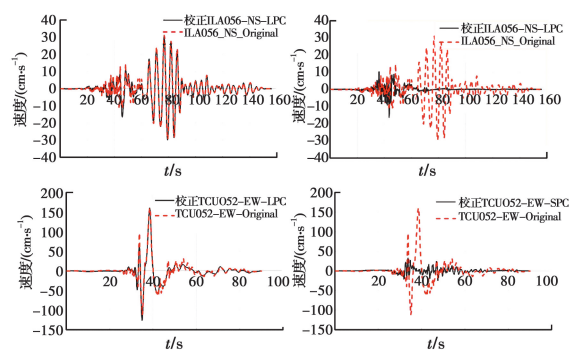


图 7 原地震记录与重构校正后分量的相关性

Fig. 7 Correlation between original seismic records and their reconstructed and baseline drift corrected components

4.3 地震地面运动反应谱的离散性分析

分量提取方法的适用性已经通过相关性验证做出说明,进一步可以通过地震记录分解前后反应谱

表 2 原地震记录与分量速度时程的相关性系数

Table 2 Correlation coefficients of velocity time history of original seismic records and their components

地震记录	TCU052-EW-Original	ILA056-NS-Original
校正 TCU052-EW-LPC	0.977	
校正 TCU052-EW-SPC	0.130	
校正 ILA056-NS-LPC		0.974
校正 ILA056-NS-SPC		0.075

的变化来验证。在设计反应谱准确估计的影响原因中,基于统计分析的地震反应谱的离散性不可忽视,且加速度反应谱长周期段的离散性更加突出^[3]。图 8 对比了两条原始地震记录与其长、短周期分量的反应谱的吻合程度,ILA056-NS 反应谱与长周期分量反应谱在长周期段整体吻合较好,TCU052-EW 吻合稍差,短周期分量与两条原地震记录在短周期段吻合,长周期段偏差显著。此种差异,是由远场长

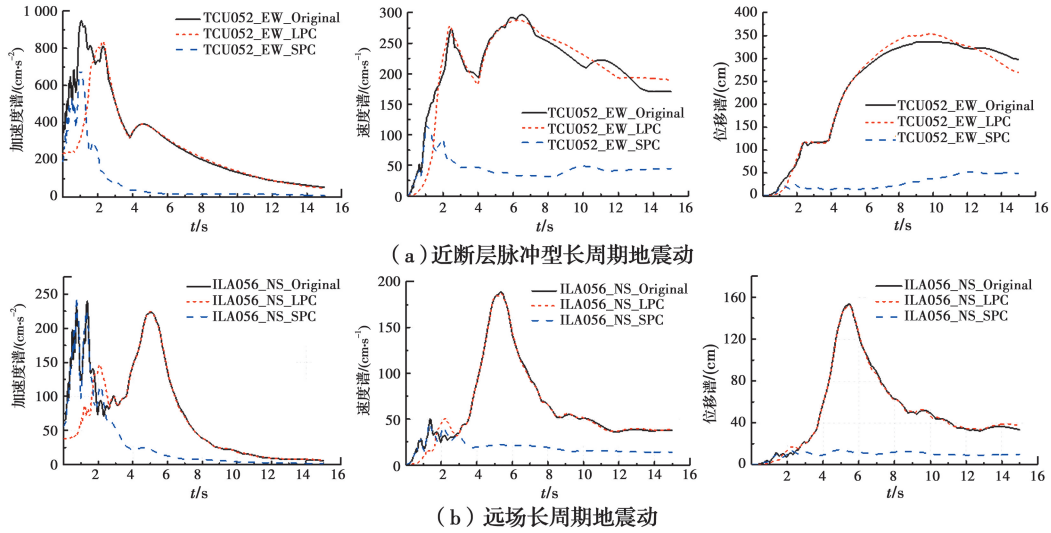


图 8 地震记录(ILA056-NS,TCU052-EW)及其长、短周期分量反应谱

Fig. 8 Seismic records(ILA056-NS,TCU052-EW)and their long , short periodic components response spectra

周期地震动与近断层长周期地震动的长周期分量更丰富的分布特征决定的。徐龙军等^[3]以离散性系数 k 来评价地震反应谱的离散性,其计算公式见式(8)。借用参数 k 来评估 LPC 反应谱与原始地震记录反应谱的离散性。离散系数 k 与离散性是正相关关系。基于两条地震记录与其分量反应谱,计算得到 k ,见表 3。从表中 k 的值可判断,长周期分量与原长周期地震动的离散性较小,短周期分量与原长周期地震动的离散性较大,同图 8 结果一致。

$$k = \frac{\sum_{T=\Delta T}^{T_{tot}} (|S_{1T} - S_{2T}| \Delta T)}{\sum_{T=\Delta T}^{T_{tot}} (S_{1T} \Delta T)} \quad (8)$$

式中: S_{1T} 为原地震动在周期 T 时的反应谱值; S_{2T} 为各分量在周期 T 时的反应谱值; ΔT 为反应谱的计算周期间距,取为 0.02; T_{tot} 为反应谱的计算最大周期,取 15 s。

表 3 长、短周期分量与原地震记录反应谱的离散性系数
Table 3 Discretization coefficients of response spectra of original ground motions and their long, short period components

	TCU052-EW-Original	ILA056-NS-Original
TCU052-EW-LPC	0.155	
TCU052-EW-SPC	0.736	
ILA056-NS-LPC		0.187
ILA056-NS-SPC		0.596

5 不同分量提取方法的结果对比

Baker^[6]对脉冲型地震动进行分量分离时采用了基于小波分析的分量提取方法,小波分析过程中,母波选择多贝西四阶小波,将地震记录分解为 15 个分量,并计算每个分量的 T_{avg} 值,其值大于 2.0 s 的重构为长周期分量,小于 2 s 的组合为短周期分量;Farid Ghahari 等^[8]采用滑动平均滤波方法提取脉冲型分量。其步骤:1)用短时傅里叶变换计算速度

时程的卓越周期 T_p ; 2) 采用式(9)结合卓越周期 T_p 得到参数 m 的值, 式(9)中参数 α 采用文献[8]中的经验取值 0.25, dt 为地震记录采样点的时间间隔; 3) 以 m 值代入式(10)计算截止频率 f_c , f_c 取倒数得到截止周期 T_c (式(11)); 4) 利用 T_c , 结合滑动平均滤波来识别长、短周期分量。将上述两种方法提取的分量反应谱与以 EMD 方法提取的分量转换反应谱一起与原地震动的反应谱进行吻合性对比, 由图 9 可以看出, 基于 EMD 的长周期分量提取方法提取的长周期分量反应谱在长周期段与原地震动反应谱

整体上吻合较好; 与基于小波分析的方法相比, 在 ILA056-NS 中, 长周期段具有相近的效果, 在 TCU052-EW 中, 本文的方法提取效果更好; 而与基于滑动平均滤波的方法比, 本文方法提取的长周期分量均能更好地预测地震记录和反应谱的趋势。

$$m = \alpha \frac{T_p}{dt} \quad (9)$$

$$f_c = \frac{1}{dt} \frac{1}{m-1} \quad (10)$$

$$T_c = \frac{1}{f_c} \quad (11)$$

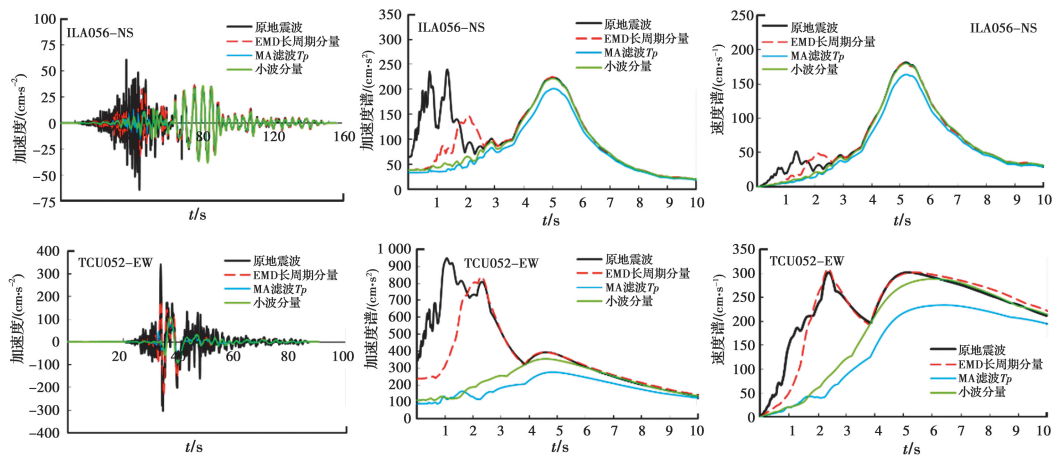


图 9 EMD、MA、Wavelet 分量提取结果对比

Fig. 9 Comparison of component extraction results by EMD, MA, Wavelet

6 结论

研究了基于 EMD 的长周期地震动分量提取方法, 对方法的有效性进行了分析, 并与以往的分量提取方法进行对比, 主要结论包括:

1) T_{avg} 大于 2 s 的长周期成分在长周期地震动中起着至关重要的作用。由于对于大多数长周期地震记录, 周期高于 2 s 的速度谱振幅通常比周期低于 2 s 的速度谱振幅更具优势, 2 s 以下基本不再出现峰值点。归一化傅里叶谱的频率成分偏向于低频, 通过地震动特性分析确定了分量分离的周期参数 (T_{avg}) 及取值, 该结果被建议作为长周期地震动识别程序中的关键参数。

2) 采用经验模态分解方法, 将地震动波分解成 IMFs; 结合截止周期 $T_{avg} = 2$ s, 将相应的 IMFs 分别重组为长周期分量、短周期分量并校正, 进而建立地震动长周期分量提取方法, 并提出了分量提取实现

的程序。

3) 基于原地震动与长、短周期分量的相关性, 地震动反应谱与长、短周期分量的反应谱的离散性对分量提取方法的有效性进行了验证, 并将基于 EMD 的分量提取方法与基于小波、滑动平均滤波的方法进行了比较, 验证了方法的合理性与有效性。提取的长周期分量是长周期地震动识别模型化的数据基础与参数指标来源。

参考文献:

- [1] 周福霖, 崔鸿超, 安部重孝, 等. 东日本大地震灾害考察报告[J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 1-20.
ZHOU F L, CUI H C, SHIGETAKA A B E, et al. Inspection report of the disaster of the East Japan earthquake by Sino-Japanese joint mission [J]. Building Structure, 2012, 42(4): 1-20. (in Chinese)
- [2] 王亚勇. 关于设计反应谱、时程法和能量方法的探讨 [J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 21-28.

- WANG Y Y. A review of seismic response spectra, time history analysis and energy method [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(1): 21-28. (in Chinese)
- [3] 徐龙军, 赵国臣, 谢礼立. 基于分量分离方法的地震动反应谱[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2013, 46(11): 1003-1011.
- XU L J, ZHAO G C, XIE L L. Ground motion response spectra through component decomposition method [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2013, 46(11): 1003-1011. (in Chinese)
- [4] KHANSE A C, LUI E M. Pulse extraction and displacement response evaluation for long-period ground motions [J]. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 2010, 3(4): 211-223.
- [5] 陈红, 彭真明, 王峻, 等. 地震信号分数阶 Gabor 变换谱分解方法及应用[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(3): 867-873.
- CHEN H, PENG Z M, WANG J, et al. Spectral decomposition of seismic signal based on fractional Gabor transform and its application [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(3): 867-873. (in Chinese)
- [6] BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(5): 1486-1501.
- [7] 赵国臣, 徐龙军, 谢礼立. 基于多尺度分析方法的近断层地震动特性分析[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(12): 4153-4163.
- ZHAO G C, XU L J, XIE L L. On near-fault ground motion characteristics through multi-scale method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(12): 4153-4163. (in Chinese)
- [8] FARID G S, JAHANKHAH H, GHANNAD M A. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(7): 536-546.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 1971(454): 903-995.
- [10] RATHJE E M, ABRAHAMSON N A, BRAY J D. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(2): 150-159.
- [11] RATHJE E M, FARAJ F, RUSSELL S, et al. Empirical relationships for frequency content parameters of earthquake ground motions [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(1): 119-144.
- [12] 杜东升, 王曙光, 刘伟庆, 等. 长周期地震动影响因素及频谱参数研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(Sup1): 1-8.
- DU D S, WANG S G, LIU W Q, et al. Study on affecting factors and spectral parameters of long period ground motions [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(Sup1): 1-8. (in Chinese)
- [13] 王博, 白国良, 王超群, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的长周期地震动能量时频分布比较研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(3): 71-80.
- WANG B, BAI G L, WANG C Q, et al. Comparative study on energy time-frequency distribution of long-period ground motions based on Hilbert-Huang Transform [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33(3): 71-80. (in Chinese)

(编辑 胡玲)