

基于小波包方法的非平稳地震动模拟和设计谱拟合

李亚楠, 王国新*

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 提出了一种基于小波包分解和重构的模拟非平稳地震动并拟合设计谱的方法. 该方法模拟出工程用地震动并调整频率分量, 使其以一定的精度拟合设计谱. 首先, 利用 5 个参数生成了构成地震动加速度时程的小波包系数矩阵, 并通过小波包重构获得加速度时程, 该系数矩阵模拟了实际地震记录中频率随持时逐渐减小的特点. 其次, 将模拟的地震动利用小波包分解方法分解为具有高分辨率非重叠的小波包系数矩阵, 然后根据设计谱调整频率分量. 数值算例表明, 该方法模拟的不同持时的加速度时程均能吻合同一设计谱, 且迭代后仍然能保留地震动的非平稳特性. 另外, 该方法具有较稳定和较快的收敛过程, 能在有限次调整迭代中实现较高的拟合精度.

关键词: 地震动模拟; 谱兼容加速度时程; 小波包; 非平稳时程

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201603007

0 引言

在工程抗震设计中, 反应谱技术自提出以来, 一直是抗震设计规范中的重要内容之一^[1-3]. 而随着设计方法和计算机技术的发展, 人们已经不再满足于抗震设计的反应谱静力分析方法, 而开始考虑全部地震过程, 尤其对于重要工程结构, 如核电站、大坝、大型储物装置、大跨桥梁、超高层建筑等. 输入结构的地震动时程的反应谱必须在一定精度下与设计加速度反应谱(以下简称设计谱)相拟合, 也就是所谓的谱兼容时程(spectrum-compatible time history). 通常情况下, 拟合方法是对实际强震记录做修正, 让其满足设计谱. 然而, 由于强震记录的数量有限且分布不均匀, 不能满足多方面要求, 地震动的模拟越来越受到重视.

一条加速度时程的反应谱是唯一的且是很容易计算的, 但是由给定的设计谱来寻求加速度时程这一反问题求解却是非常困难的. 在过去的三十多年里, 许多学者对此问题给出了不同的解法. Scanlan 等在 1974 年提出了著名的三角级数模型

来模拟具有给定功率谱的地震动加速度时程^[4], 这一方法也是工程上应用最广泛的方法之一. 随后, 就开启了利用傅里叶谱幅值和相位迭代的研究思路. 傅里叶变换是非常直接的反应谱拟合方法, 多数学者把重点放在了时域幅值非平稳的模拟上^[5-7]. 然而该方法存在着局限性: 一是没有很好的收敛特性; 二是如果傅里叶谱修正得过多, 则加速度时程的非平稳特性将发生较大的改变. 之后, 演化功率谱方法^[8-9]被提出来反映模拟地震动的频率特性, 该方法假定相位和相位差遵循一定的概率分布. 从此, 频率非平稳性的模拟受到了学者的重视. Mukherjee 等^[10]基于小波变换提出了一种直接对实际记录进行频率修正来拟合设计谱的方法, 从而可以保留实际记录的大部分频率特性. 但该方法精度不高且没有给出拟合精度的分析结果. 其他方法, 如基于谐小波的方法^[11]和希尔伯特黄变换法^[12]也在保留地震动的瞬时频率方面取得了较为理想的效果. 国内对反应谱拟合技术的研究多采用基于相位谱和相位差谱的方

法^[13-16]. 随后,赵凤新等提出了多阻尼反应谱拟合的时域叠加法^[17]并引入到小波变换中^[18],其在精度上取得了较好的效果.

本文提出一种基于小波包变换的反应谱拟合方法,首先模拟具有时间和频率非平稳性的地震动;然后采用小波包分解的方法将地震动加速度时程分解为有限频率段;最后根据设计谱,对各个频率段进行调整并迭代,从而达到较高的拟合精度.通过对一个核电站的设计谱进行拟合,分别得到两条不同的地震动加速度时程,并且讨论该方法的精度.

1 基本原理

小波方法同时在时间域和频域对信号做分解,从而将频谱在时间轴上展开.小波包是小波方法的延伸,它不仅对低频部分做分解,同时也对高频部分继续分解,提高了频率的分辨率.

1.1 小波包分解

信号的时间和频率关系叫时频图,能够表征信号这一关系的方法有很多,如短时傅里叶变换、离散与连续小波变换、小波包变换和伪韦格纳分布.然而地震动模拟不仅需要信号进行分解,同时需要能够方便、完整地逆变换回时域,小波包分解与重构即符合这一要求.

小波包分解与重构的定义如下:

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \tag{1}$$

$$x(t) = \sum_{i=1}^{2^j} \sum_{k=1}^{2^{N-j}} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \tag{2}$$

式中: $x(t)$ 是信号序列, 2^N 是信号数据点个数, $c_{j,k}^i$ 是在 j 层分解下的第 i 尺度的第 k 个位置的小波包系数, $\psi_{j,k}^i(t)$ 是定位了时间 t_k 和频率 f_i 的小波包函数.本文的小波包函数采用 Meyer 小波.

在给定的分解层数 j 下,第 i 尺度的第 k 个位置的小波包系数可以用下式计算:

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, t) e^{i\omega t} d\bar{Z}(\omega) \right\} \psi_{j,k}^i(t) dt \tag{3}$$

其中 $A(\omega, t)$ 是与时间和频率相关的调制函数; $\bar{Z}(\omega)$ 是带有正交增量的复随机过程,可以表达为

$$E[d\bar{Z}(\omega)d\bar{Z}^*(\omega')] = \begin{cases} S_{\bar{Z}\bar{Z}}(\omega)d\omega; & \omega=\omega' \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \tag{4}$$

式中: $E[\cdot]$ 是期望, $S_{\bar{Z}\bar{Z}}(\omega)$ 是均值为零的双边功率谱密度(PSD)平稳过程.

$$\bar{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\bar{Z}(\omega) \tag{5}$$

小波 $\psi_{j,k}^i(t)$ 在 t_k 具有时间定位的特性,因此可以假设

$$c_{j,k}^i \approx \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, t_k) e^{i\omega t_k} \psi_{j,k}^i(\omega) d\bar{Z}(\omega) \tag{6}$$

图 1 为 1979 年美国 Imperial Valley 地震中 El Centro Array #12 号台站记录的时频图.加速度时程位于正上方,单位为重力加速度 g ($g=9.81\text{ m/s}^2$);左边为傅里叶幅值谱.中间的黑白色方块即小波包系数,颜色的深浅代表了系数的大小,图中色度条的数值为系数绝对值的相对值.可以看出,小波包系数矩阵中数值大的部分同时对应地震波加速度时程的时域和频域中幅值较大的区域.这说明,如果表达出该小波包系数矩阵的总体特征,就可以通过小波包重构的方法将地震动模拟出来,并且可以修正这些系数,从而达到拟合设计谱的目的.

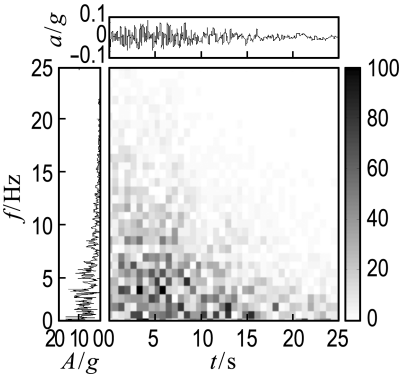


图 1 时频图
Fig. 1 Time-frequency diagram

1.2 地震动模拟

从式(2)可以看出,如果得到了小波包系数矩阵,就可以模拟出一条地震动时程.而如果该小波包系数矩阵拥有与实际记录相似的特征,则通过小波包重构得到的模拟时程同样和实际记录相似.本文首先通过对一条高斯白噪声进行窗口化,

来模拟地震动的时域非平稳性. 所用的 Saragoni 窗函数^[19]表达如下:

$$w(t)=a(t/T_d)^b e^{-a/T_d} \tag{7}$$

$$b=-\theta \ln \tau/(1+\theta(\ln \tau-1)) \tag{8}$$

$$c=b/\theta \tag{9}$$

$$a=(e/\theta)^b \tag{10}$$

式中: $w(t)$ 是 Saragoni 窗函数, T_d 是模拟时程的持时, θ 是窗函数的峰值发生点占整个高斯白噪声时长的比例,且在 Gaussian 白噪声结束时的幅值占峰值的比例为 τ ; a 、 b 和 c 是中间参数. 图 2 展示了不同 θ 和 τ 下 Saragoni 窗函数归一化后的形状.

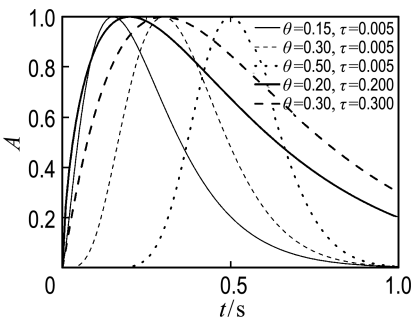


图 2 Saragoni 窗函数在不同 θ 和 τ 时的形状
Fig. 2 The shape of Saragoni window function with different θ and τ

然后,对窗口化的高斯白噪声做小波包分解. 这里采用的模拟时间间隔为 0.005 s,分解层数 j 为 9,所以分解后的小波包系数频率分辨率为 0.195 3 Hz,时间分辨率为 2.560 0 s. 此时小波包系数在时频图的频率带上是均匀分布的,需要对每一列系数做修正. 图 3(a)展示了美国 1992 年 Big Bear 地震中 Seal Beach-Office Bldg 台站记录到的一条加速度时程的时频图,可以看出其频率在时域上是不断变化的. 在地震波开始阶段,主要包含了高频分量,随着时间的进行和地震动幅值的减弱,频率逐渐衰减. 从图 1 也可以看出该特性. 通过对大量强震记录的分析,发现大多数地震动均存在该现象. 因此,在对每一列小波包系数进行调整时,本文采用了不同的归一化函数. 这里采用对数正态分布密度(logarithmic normal distribution density, LNDD)函数作为基准函数:

$$L_k(f;\mu_{wk},\sigma_{wk})=\frac{1}{f\sigma_{wk}\sqrt{2\pi}}e^{-(\ln f-\mu_{wk})^2/2\sigma_{wk}^2}; \tag{11}$$
$$k=1,2,\cdots,2^N/2^j$$

式中: $L_k(\cdot)$ 是对第 k 列小波包系数进行归一化的函数, f 是频率, μ_{wk} 和 σ_{wk} 分别是 $L_k(\cdot)$ 的均值和方差. 图 3(b)显示了采用 LNDD 对每列小波包系数进行归一化后的模拟结果,可以看出和实际记录的时频图是十分相似的.

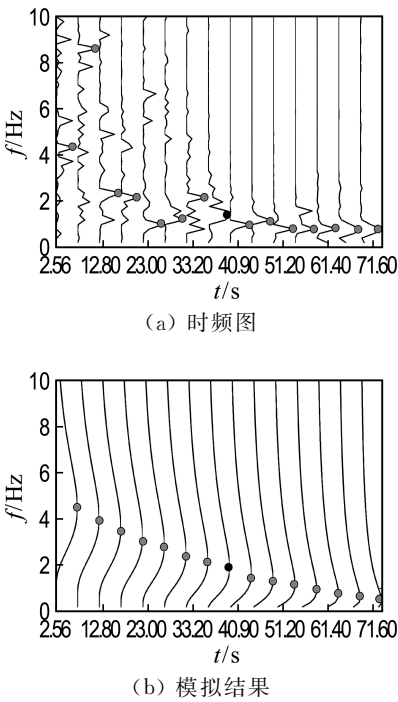


图 3 时频图和模拟结果

Fig. 3 Time-frequency diagram and simulation results

在该调整过程中, μ_{wk} 和 σ_{wk} 由下式计算:

当 $k < m$ 时,

$$\mu_{wk}=\mu_{wm}(1+p)^{m-k} \tag{12}$$
$$\sigma_{wk}=\sigma_{wm}(1-2p)^{m-k}$$

当 $k \geq m$ 时,

$$\mu_{wk}=\mu_{wm}(1-0.5p)^{k-m} \tag{13}$$
$$\sigma_{wk}=\sigma_{wm}(1+2p)^{k-m}$$

其中 μ_{wm} 和 σ_{wm} 是对第 m 列小波包系数归一化的 LNDD 的均值和方差,这里, $m=\text{int}(2^N/2^j)$, $\text{int}(\cdot)$ 是取整函数. 因此,第 m 列实际上就是位于加速度时程持时中间的一列. 在该列之前,频率应增大;在该列之后,频率应逐渐减小. 而 p 是频率变化率参数. 经过多次与实际记录对比,为了避

免过高和过低的频率, p 对于模拟不同持时的地震动时程应有不同的取值:

$$p = \begin{cases} 0.04; & T_d \leq 90 \text{ s} \\ 0.02; & 90 \text{ s} < T_d < 150 \text{ s} \\ 0.01; & T_d \geq 150 \text{ s} \end{cases} \quad (14)$$

这样,就得到了归一化后的小波包系数. 利用式(2)进行小波包重建,就可以获得模拟的加速度时程 $x(t)$.

1.3 设计谱拟合

当得到模拟时程 $x(t)$ 后,重新将其进行小波包分解. 该步中,分解层数 j 增加到 12 层,这样频率分辨率将增大到 0.024 4 Hz,从而保证了反应谱在 2~4 s 周期上的分辨率. 分解后得到的小波包系数矩阵 c 具有 2^j 个行向量,每个行向量 c_j^i 代表了对应频率下的能量:

$$c = (c_j^1 \quad c_j^2 \quad \cdots \quad c_j^i \quad \cdots \quad c_j^{N_t}) \quad (15)$$

$$c_j^i = (c_{j,1}^i \quad c_{j,2}^i \quad \cdots \quad c_{j,k}^i \quad \cdots \quad c_{j,N_t}^i) \quad (16)$$

这里,行向量 c_j^i 对应的频率为 0.024 4 i Hz; $N_t = 2^j$ 和 $N_t = N/N_t$ 分别是频率点和时间点的数量.

可以看出,在该步中增加了频率的分辨率. 根据测不准原理^[20],小波包分解中频率分辨率和时间分辨率不可能同时无限扩大,在增加频率分辨率的同时,势必要损失一定的时间分辨率. 对于设计谱拟合来说,要保证频率分辨率的精度才能达到较好的效果. 虽然损失了时间分辨率,但对于长持时的地震动而言,影响较小,而对于短持时时程,可以通过补零的方法将其持时适当地延长.

分解完以后,根据设计谱的谱值,通过调整式(15)中的小波包系数并不断迭代,可以达到模拟时程的反应谱与设计谱吻合的目的. 通常情况下,设计谱是以结构周期来表示的. 这里,首先将设计谱转换为以频率表示的形式,并根据分解后的小波包系数对应的频率进行线性插值,使设计谱的频率和式(15)中的频率向量一一对应. 在迭代时,每个 c_j^i 第 n 次迭代可以表示为

$${}^{(n+1)}c_j^i = {}^{(n)}c_j^i \times \frac{[PSA(f_i)]_{\text{target}}}{[PSA(f_i)]_{\text{simulated}}}; \quad i=1,2,\cdots,N_t \quad (17)$$

其中 $[PSA(f_i)]_{\text{target}}$ 是设计谱上对应的频率点 f_i 的谱值, $[PSA(f_i)]_{\text{simulated}}$ 是模拟时程的伪加速度

谱上对应频率点 f_i 的谱值.

在每次迭代后,对小波包系数矩阵进行重建,得到相应的加速度时程. 其相应的伪加速度谱和设计谱的误差可以表示为

$$E^{(n)}(T_l) = \frac{|[PSA(T_l)]_{\text{target}} - [PSA^{(n)}(T_l)]_{\text{simulated}}|}{[PSA(T_l)]_{\text{target}}} \quad (18)$$

其中 T_l 是反应谱的周期, $E^{(n)}(T_l)$ 是某周期点对应的相对误差. 当平均相对误差 (E_{mean}) 不再减小时,可以判断为迭代终止. 值得注意的是,每次迭代后,不需要将加速度时程进行重新分解,而是继续用式(15)对小波包系数矩阵进行调整即可. 另外,当各个周期点中最大相对误差 (E_{max}) 小于某一限值时,可以判断为迭代成功.

2 拟合实例

在实际的设计地震动模拟和拟合中,通常要求地震动的反应谱包络设计谱. 以核电站设计为例^[1-2],在所有控制周期 (T) 点中,模拟地震动反应谱低于设计谱的点数不超过 5 个,并且模拟反应谱与设计谱之间的相对误差应控制在 10% 以内. 根据上述要求,本章在周期 0.03~4.00 s 范围内选取了 76 个周期控制点,且设计谱的峰值设置为 1 g . 在该例中,针对设计谱模拟了两种不同持时的地震动加速度时程,即 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$. 图 4 显示了迭代后的加速度时程 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 以及相应的速度和位移时程. 可以看出,加速度时程包含了时间和频率的非平稳性. $x_2(t)$ 在整个持时前半程具有相对较高的频率,而在后半程频率逐渐降低. 由于两个时程均吻合设计谱,其速度与位移时程也具有相似性.

图 5 显示了模拟地震动时程的反应谱 (PSA) 对设计谱的拟合情况. 可以看出,模拟时程的反应谱较好地包络了设计谱,与设计谱非常接近. 由于设定开始迭代的条件为初始模拟出的地震动的反应谱在各个周期上与设计谱误差在一定范围内,图中两个时程迭代前,其反应谱已经接近设计谱,这是通过设定合理的 μ_{wm} 和 σ_{wm} 来达到的. 另外,通过将设计谱谱值增大一定比例的方法,就能达到规范中模拟反应谱低于设计谱点数不大于 5 的要求.

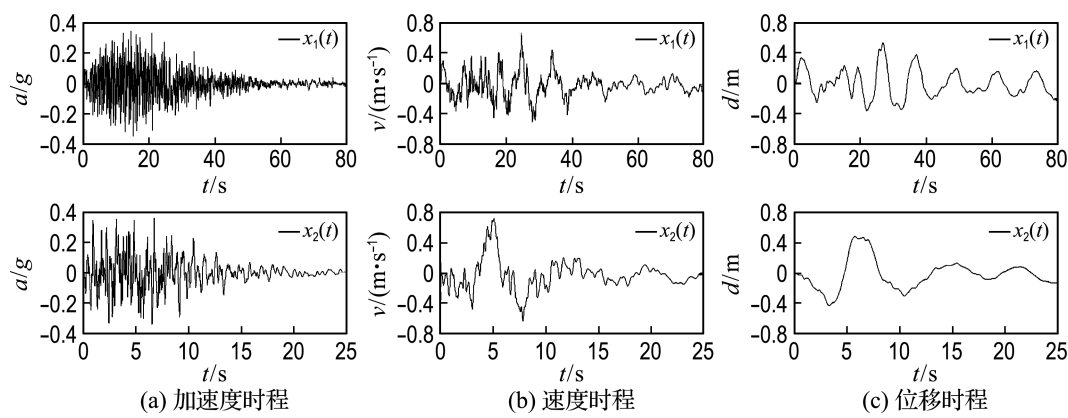


图 4 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 迭代后的加速度、速度和位移时程

Fig. 4 Acceleration, velocity and displacement time histories of $x_1(t)$ and $x_2(t)$ after iteration

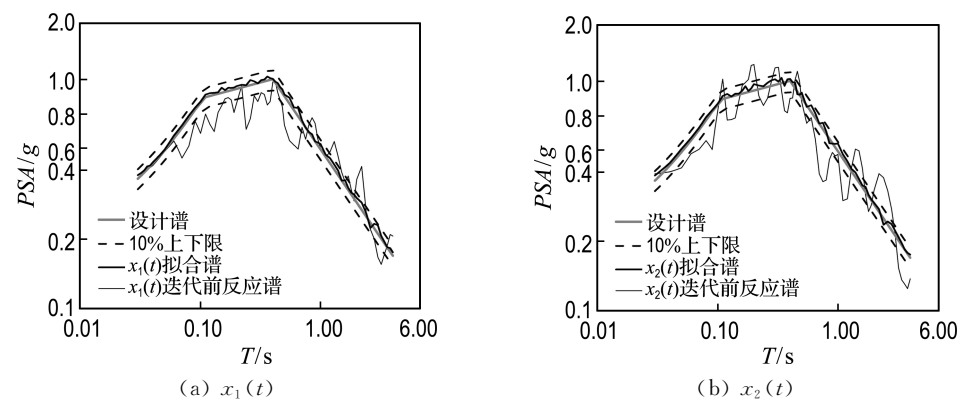


图 5 拟合情况

Fig. 5 Fitting situation

图 6 为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 迭代过程中的收敛情况. 可以看出, E_{mean} 在第 1 次迭代时就可以达到 10% 以内, 并且迭代结束时, 可以收敛到小于 2.5%. E_{max} 在第 1 次迭代时, 其值相对较大, 且在迭代过程中出现先下降后升高的起伏现象. 这是因为在迭代过程中, 出现最大相对误差的周期点

在不断地变换. 最终, 在 20 次迭代步以内, E_{max} 可以达到 7% 左右的误差.

3 结 语

本文基于小波包方法提出了一种新的模拟非平稳地震动且拟合设计谱的方法. 该方法首先通过模拟小波包系数矩阵来生成地震动, 然后根据设计谱来调整小波包系数, 用迭代的方法达到模拟地震动的反应谱吻合设计谱的目的.

本文提出的方法具有以下特点:

- (1) 本文所模拟的地震动具有实际地震记录的特点, 即具有时间和频率非平稳性.
- (2) 模拟地震动的过程简单实用, 通过指定 5 个参数—— T_d 、 θ 、 τ 、 μ_{wm} 和 σ_{wm} , 可以模拟出工程需要的地震动.
- (3) 该方法同时包含了随机性和确定性两方面. 随机性表现在每次迭代失败时将重新随机产

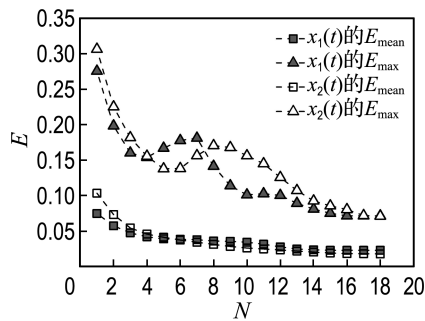


图 6 每次迭代后的平均和最大相对误差

Fig. 6 The mean and maximal relative error after each iteration

生高斯白噪声;确定性表现在 5 个初始设定的参数,将限制模拟出的地震动在有限的范围内变动.

(4)该方法收敛过程较快,且比较稳定,拟合设计谱相对误差较小.

参考文献:

- [1] U. S. Atomic Energy Commission. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants: Regulatory Guide 1. 60 [R]. US: U. S. Atomic Energy Commission, 1973.
- [2] 国家地震局. 核电厂抗震设计规范:GB 50267—97 [S]. 北京:中国计划出版社, 1997.
China Earthquake Administration. Code for Seismic Design of Nuclear Power Plants: GB 50267—97 [S]. Beijing: China Planning Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings:GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [4] Scanlan R H, Sachs K. Earthquake time histories and response spectra [J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 1974, **100**(EM4):635-655.
- [5] Levy S, Wilkinson J P D. Generation of artificial time-histories, rich in all frequencies, from given response spectra [J]. **Nuclear Engineering and Design**, 1976, **38**(2):241-251.
- [6] Iyengar R N, Rao P N. Generation of spectrum compatible accelerograms [J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 1979, **7**(3): 253-263.
- [7] Preumont A. Generation of spectrum compatible accelerograms for the design of nuclear power plants [J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 1984, **12**(4):481-497.
- [8] Giaralis A, Spanos P D. Wavelet-based response spectrum compatible synthesis of accelerograms-Eurocode application (EC8) [J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, **29**(1):219-235.
- [9] Cacciola P, Zentner I. Generation of response-spectrum-compatible artificial earthquake accelerograms with random joint time frequency distributions [J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 2012, **28**:52-58.
- [10] Mukherjee S, Gupta V. Wavelet based generation of spectrum compatible time-histories [J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, **22**(9-12):799-804.
- [11] Spanos P D, Giaralis A, LI Jie. Synthesis of accelerograms compatible with the Chinese GB 50011-2001 design spectrum via harmonic wavelets: Artificial and historic records [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2009, **8**(2): 189-206.
- [12] Ni S H, Xie W C, Pandey M D. Tri-directional spectrum-compatible earthquake time-histories for nuclear energy facilities [J]. **Nuclear Engineering and Design**, 2011, **241**(8):2732-2743.
- [13] 胡聿贤,何训. 考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动, 1986, **6**(2):37-51.
HU Yu-xian, HE Xun. Phase angle consideration in generating response spectrum-compatible ground motion [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1986, **6**(2):37-51. (in Chinese)
- [14] 赵凤新,胡聿贤. 地震动非平稳性与幅值谱和相位差谱的关系[J]. 地震工程与工程振动, 1994, **14**(2):1-6.
ZHAO Feng-xin, HU Yu-xian. On the relationship of earthquake ground motion's non-stationarity with its amplitude spectrum and phase differences spectrum [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1994, **14**(2): 1-6. (in Chinese)
- [15] 杨庆山,姜海鹏. 基于相位差谱的时-频非平稳人造地震动的反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动, 2002, **22**(1):32-38.
YANG Qing-shan, JIANG Hai-peng. Generation of response-spectrum-compatible ground motions based on phase-difference spectrum [J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, **22**(1):32-38. (in Chinese)
- [16] 韦征,叶继红,包伟,等. 考虑幅值谱与相位谱

的人造地震动模拟与反应谱拟合[J]. 工程抗震与加固改造, 2007, **29**(2):100-103, 106.

WEI Zheng, YE Ji-hong, BAO Wei, *et al.* Generation of response-spectrum-compatible ground motions consider the phase spectrum and the amplitude spectrum [J]. **Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting**, 2007, **29**(2):100-103, 106. (in Chinese)

[17] 赵凤新,张郁山. 多阻尼反应谱拟合的时域叠加法[J]. 核动力工程, 2008, **29**(3):35-40.

ZHAO Feng-xin, ZHANG Yu-shan. Time-domain superposition method for fitting multi-damping response spectra [J]. **Nuclear Power Engineering**, 2008, **29**(3):35-40. (in Chinese)

[18] 张郁山,赵凤新. 基于小波函数的地震动反应谱拟合方法[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(1):70-81.

ZHANG Yu-shan, ZHAO Feng-xin. Matching method of ground-motion response spectrum based on the wavelet function [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, **47**(1):70-81. (in Chinese)

[19] Saragoni G R, Hart G C. Simulation of artificial earthquakes [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1974, **2**(3):249-267.

[20] Mallat S. **A Wavelet Tour of Signal Processing** [M]. 2nd ed. New York:Academic Press, 1999.

Simulation of non-stationary ground motions and fitting of design spectrum based on wavelet packet method

LI Ya-nan, WANG Guo-xin*

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A method to simulate the non-stationary ground motions and fit the design spectrum is proposed based on wavelet packet decomposition and reconstruction. The method simulates ground motions for engineering and adjusts its frequency components so that the response spectrum will fit the design spectrum. Firstly, the wavelet packet coefficient matrix for ground motion acceleration time history is generated using 5 parameters, which characterizes the frequency attenuation with duration in real recordings. The acceleration time history can be obtained by wavelet packet reconstruction. Then, by wavelet packet decomposition the simulated ground motion is decomposed into a desired number of wavelet packet coefficient matrices with high resolution and non-overlapping frequency contents, and then the frequency component is adjusted for matching the response spectrum of the simulated accelerogram with specified design spectrum. Numerical example demonstrates that the acceleration time histories with different durations simulated by the proposed method all fit the design spectrum. The accelerograms keep the non-stationarities of ground motion even after iteration. Moreover, the method is stable and fast for convergence, and can achieve high fitting accuracy in limited iteration times.

Key words: ground motion simulation; spectrum-compatible acceleration time history; wavelet packet; non-stationary time history