

白泉, 韩晶晶, 盛国华, 张正帅. 2015. 地震动反应谱拟合过程中小波基函数的选取. 地震学报, 37(6): 1037—1044.  
doi:10.11939/jass.2015.06.013.  
Bai Q, Han J J, Sheng G H, Zhang Z S. 2015. Selection of wavelet basis function in the simulation of seismic response spectrum. *Acta Seismologica Sinica*, 37(6): 1037—1044. doi:10.11939/jass.2015.06.013.

# 地震动反应谱拟合过程中 小波基函数的选取<sup>\*</sup>

白 泉<sup>1)</sup> 韩晶晶<sup>1),\*</sup> 盛国华<sup>1)</sup> 张正帅<sup>2)</sup>

1) 中国沈阳 110870 沈阳工业大学建筑与土木工程学院

2) 中国济南 250014 山东省地震局

**摘要** 基于目标功率谱, 本文从定量角度提出一种地震动反应谱拟合过程中小波基函数的选取方法。首先通过修正不同小波基函数所对应的小波系数来拟合地震动反应谱; 然后设定总体误差绝对值和误差均方差这两个定量指标来描述各拟合波功率谱与目标功率谱的差异, 借助数理统计的独立权数原理, 求得不同小波基函数所对应的定量指标的综合评价值; 最后对比综合评价值, 得到拟合精度最高、误差离散最小的最优小波基。应用该方法, 选取8种常见的小波基函数进行实例分析。结果表明, 该方法得到的最优拟合波与原信号差异不大, 拟合波反应谱、功率谱与目标反应谱、功率谱均吻合得较好, 从而验证了该方法的正确性。

**关键词** 小波基函数 地震动反应谱拟合 最优基 功率谱 非平稳特性

doi:10.11939/jass.2015.06.013 中图分类号: P315.3<sup>+1</sup> 文献标志码: A

## Selection of wavelet basis function in the simulation of seismic response spectrum

Bai Quan<sup>1)</sup> Han Jingjing<sup>1),\*</sup> Sheng Guohua<sup>1)</sup> Zhang Zhengshuai<sup>2)</sup>

1) School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology,  
Shenyang 110870, China

2) Earthquake Administration of Shandong Province, Ji'nan 250014, China

**Abstract:** Based on the target power spectrum, this paper proposed a method for selecting wavelet basis function in the simulation of seismic response spectrum from a quantitative point of view. Firstly, we revised the different wavelet coefficients that correspond to different wavelet basis functions to simulate the seismic response spectrum. And then we set two quantitative indices, *i.e.*, overall error absolute values and mean square errors to describe the differences between the power spectrum of the simulated wave and the target power spectrum. Using the principle of independent weight in mathematical statistics, we obtained the comprehensive evaluation values of the quantitative indices that

\* 基金项目 辽宁省教育厅基金项目(L2013050)资助。

收稿日期 2015-05-15 收到初稿, 2015-08-17 决定采用修改稿。

\* 通讯作者 e-mail: hanjingjing\_stu@163.com

correspond to the different wavelet basis functions. Finally, from all of the comprehensive evaluation values, we got the optimal wavelet basis with highest simulation accuracy and minimum discreteness of error. Using this method, we selected eight kinds of common wavelet basis functions for instance analysis. The results show that the optimal simulated wave based on this method has slight difference from the original signal, and simulated wave response spectrum coincides well with the target response spectrum, the same as power spectrum, verifying the correctness of the method proposed in this paper.

**Key words:** wavelet basis function; simulation of seismic response spectrum; optimum basis; power spectrum; non-stationary characteristic

## 引言

近年来,被誉为数学“显微镜”的小波变换已成为分析与处理地震动信号的一种新兴且有效的工具。常用的小波基函数种类众多,其本身也具有多样性,在地震动反应谱拟合过程中,应用小波变换对同一地震波进行分析时,由于选用的小波基函数不同,因而分析结果差异很大。

基于小波变换的地震动反应谱拟合主要是对给定的初始时程进行小波分解得到小波分量,通过调整小波分量,使地震动加速度时程反应谱逼近给定的目标谱(Scanlan, Sachs, 1974; Mukherjee, Gupta, 2002; 谢异同等, 2011a, b),其中选择小波基函数是较为关键的步骤。Scanlan 和 Sachs(1974)提出频域调整法,通过在初始地震动加速度时程上叠加窄带小波来拟合地震动反应谱。Mukherjee 和 Gupta(2002)借助小波变换提出了一种迭代修正目标反应谱的方法。谢异同等(2011a)提出一种同时对多阻尼比目标反应谱拟合的方法,以阿里亚斯强度作为控制参数,分两次来调整地震动;同样地,其选用紧支撑的半正交 B 样条小波对地震动进行分解(谢异同等, 2011b),通过对各分量能量谱峰值的分析,进而对地震动进行调整。樊剑等(2009)采用 db4 小波和小波作为母小波,分别对 Northridge 波作离散小波变换,得到了信号功率谱图和小波重构图。相比之下,小波变换在频域内具有较高的频谱描述能力,而 db4 小波在时间域的重构能力较弱。白泉等(2013)选用具有较好正则性、衰减快且频域上具有紧支集的 Meyer 小波作为母小波,通过静态离散小波变换提出一种地震动加速度时程的调整方法。

在拟合非平稳地震信号时,现有研究(高静怀等, 1996; Giaralis, Spanos, 2009; 曾宪伟等, 2010; 张郁山, 赵凤新, 2014)大部分只是从定性角度分析选择小波基函数。本文从定量角度提出一种地震动反应谱拟合过程中小波基函数的选取方法。该方法基于改进的金井清谱,依据已存在的小波系数迭代修正法拟合地震动反应谱。通过选取 8 种不同的小波基函数对同一地震波,即 Taft 波进行小波分解和小波系数修正、重构,得到各自所对应的拟合地震动反应谱;通过分析对比拟合波功率谱与目标功率谱的总体误差绝对值和误差均方差,并对其进行综合评价,从而得到地震动反应谱拟合的最优小波基。

## 1 基于小波变换的地震动反应谱拟合

对于任意信号  $x(t)$ , 经过  $j$  尺度的小波变换都可以表示为小波序列  $y(j, k)$  的线性组

合, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^N V_i(j, k) * \psi(j, k), \quad (1)$$

式中:  $V(j, k)$  为小波系数;  $\psi(j, k)$  为依赖于参数  $j$  和  $k$  的小波基函数,  $j$  为尺度因子,  $k$  为平移因子;  $N$  为信号采样点数.  $y(j, k)$  的具体表达式参见彭玉华(1999)著作.

小波系数主要对频率位于某特定尺度所对应频带的单自由度振子的反应有较大贡献 (Basu, Gupta, 1997). 在此基础上, 本文借助小波系数修正法, 先求出不同尺度所对应频带的目标反应谱在该频带上所围的面积, 同样地求出修正之前重构波反应谱在该频带上所围的面积; 然后将二者比值作为修正系数, 对小波系数进行调整. 但是根据动力学原理, 调整某一特定频带的地震动将会对相邻频带地震动产生影响, 从而影响拟合精度. 因此, 需要采用迭代法对各频带的小波系数进行修正. 本文依据现有文献(樊剑等, 2009; 谢异同等, 2011a; 张郁山, 赵凤新, 2014)设定迭代次数 10 次作为终止条件, 则经迭代修正后的系数表达式为

$$V_x^{(i+1)}(j, k) = V_x^{(i)}(j, k) \frac{\int_{\Delta f_j}^{\Delta f_j} [\text{TSA}(T)] dT}{\int_{\Delta f_j}^{\Delta f_j} [\text{CSA}(T)] dT}, \quad (2)$$

式中,  $V_x^{(i)}(j, k)$  为第  $i$  次迭代的小波系数值,  $\text{TSA}(T)$  为周期  $T$  的目标加速度反应谱,  $\text{CSA}(T)$  为修正之前周期为  $T$  的重构波的加速度反应谱,  $\Delta f_j$  为  $j$  尺度所对应的频带. 按照上述方法通过对迭代修正后的小波系数进行重构即可得到拟合地震波  $x_{\text{mod}}(t)$ .

## 2 小波基函数的选取

### 2.1 小波基函数选取的判别方法

小波基函数即小波分析的基, 不是唯一存在的, 所有满足小波条件的函数都可以作为小波基函数, 故其选取就显得尤为重要. 选取小波基函数常用的方法主要有以下 3 种(杨福生, 1999; 高志, 余啸海, 2007):

1) 利用自相似函数. 对于小波变换, 如果选择的小波基函数对信号有一定的相似性, 则变换后的能量比较集中, 可以有效减少计算量, 如下式:

$$x(t) = \sum_{j \in Z} (W_{2j}f) * \chi_{2j}(t), \quad (3)$$

式中若  $\chi_{2j}(t)$  与  $x(t)$  有某种程度上的相似, 则变换后的能量比较集中, 计算量小.

2) 利用判别函数. 针对本文地震动反应谱拟合问题, 找出一些关键性技术指标, 例如拟合谱与目标谱的总体误差绝对值和误差均方差等, 得到一个判别函数, 将各种小波基函数带入其中, 通过对比得到最优基.

3) 利用支集长度. 大部分应用选择支基长度为 5—9 的小波, 因为支集太长会产生边界问题, 支集太短则消失矩太低, 不利于信号能量的集中.

本文在地震动反应谱拟合过程中选用判别函数法. 通过选取判别函数, 以拟合波功率谱与给定目标功率谱之间的总体误差绝对值和误差均方差作为定量指标, 进行小波基函数的选取. 以实测的 Taft 地震波作为母波, 以《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)建议的反应谱相容的

功率谱函数——改进的金井清谱(欧进萍, 王光远, 1998)作为目标功率谱, 通过小波变换对各个尺度上的小波系数进行迭代修正, 重构得到拟合地震动反应谱.

上述所用的目标功率谱是基于金井清模型, 经欧进萍和王光远(1998)修正后得到, 其函数表达式为

$$S(\omega) = \frac{1 + 4\zeta_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}}{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_g^2})^2 + 4\zeta_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}} \frac{1}{(1 + \frac{\omega^2}{\omega_r^2})} S_0, \quad (4)$$

式中:  $\zeta_g$  和  $\omega_g$  分别为地表土层阻尼比和固有圆频率;  $\omega_r$  为基岩特性的谱参数, 取值为  $8\pi$ ;  $S_0$  为谱强度因子, 是反映地震动强弱的谱参数.

## 2.2 小波基函数的选取

本文主要从定量方面分析地震波功率谱与目标功率谱的差异, 具体来讲即对比拟合地震波功率谱与目标功率谱的总体误差绝对值和误差均方差的大小, 并对二者进行综合评价, 以得到拟合精度高的小波基函数.

根据功率谱密度函数的定义以及小波基函数之间的正交性, 可得功率谱密度函数与小波系数之间的关系, 即

$$G(f_j) = \frac{1}{\Delta f} \sum_{i=1}^N V_i^2(j, k), \quad (5)$$

式中,  $\Delta f$  为尺度  $j$  所对应的频带宽度,  $G(f_j)$  为功率谱密度函数在  $f_j$  处的值.

通过判别函数法确定小波基函数, 以功率谱总体误差绝对值和误差均方差作为判别函数的两个指标, 其表达式分别为(樊剑等, 2008)

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs}[G_i^m(f_j) - G_i(f_j)], \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ \text{abs}[G_i^m(f_j) - G_i(f_j)] - \mu \}^2}, \quad (7)$$

式中,  $\mu$  为总体误差绝对值,  $\sigma$  为误差均方差,  $G_i^m(f_j)$  为拟合地震波在频率  $f_j$  处的功率谱密度值,  $G_i(f_j)$  为目标功率谱密度函数在  $f_j$  处的值,  $N$  为采样点数.

通过对不同小波基函数得出的  $\mu$  值和  $\sigma$  值, 选出精度高、误差小的小波基函数作为拟合波的最优基函数. 但是仅独立地比较这两个指标值, 并不能综合提取最优小波基函数, 而需要对这两个指标进行综合评价. 本文借助数理统计中的多元分析方法——独立权数法, 通过确定这两个指标的权重对其进行综合评价. 在此引入复相关系数  $R$  对上述两个指标进行综合评价, 其计算公式为(吴祈宗, 侯福均, 2013)

$$R = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}}, \quad (8)$$

式中:  $y_i$  为不同小波基函数所对应的第  $i$  个指标值;  $\hat{y}_i$  为以其它指标为自变量、第  $i$  个指标为函数的经验公式;  $\bar{y}_i$  为不同小波基函数所对应的第  $i$  个指标的均值.

以复相关系数  $R$  的倒数作为各指标的权重, 求取各小波基函数的综合评价值, 即

$$\omega = \frac{1}{R_1} \mu + \frac{1}{R_2} \sigma. \quad (9)$$

根据上述两个指标的表现意义, 最终取  $\omega$  最小值时所对应的小波基为最优小波基.

### 3 实例分析

依据上述地震动反应谱拟合过程以及小波基函数的选取方法, 以 Taft 波作为母波, 选取 8 种不同的小波基函数进行地震动反应谱拟合. 通过综合分析各定量指标, 从中选取拟合地震动反应谱的最优小波基. 本文采用薛素铎等(2003)和梁建文(2005)给出的与《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)相对应的目标功率谱函数(式(4))中各参数的取值, 选择Ⅷ度地震、Ⅲ类场地中设计地震分组为第 1 组的场地条件. 各参数具体取值为  $\zeta_g = 0.8$ ,  $\omega_g = 4\pi$ ,  $S_0 = 232.6 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ .

由于用于小波分解的小波基函数种类众多, 本文仅以 haar, db4, db8, dmey, sym5, coif5, bior3.9 和 bior6.8 等 8 种小波为例, 按照上述的小波基函数选择方法, 通过 MATLAB 编程, 对 Taft 波进行小波分解, 分解层数为 7 层, 计算得到了  $\mu$ ,  $\sigma$  和  $\omega$  值, 如表 1 所示. 可以看出,  $\mu$  值越小, 说明拟合地震波功率谱与目标功率谱的差异越小, 拟合精度越高;  $\sigma$  值越小, 说明误差离散越小, 拟合波的整体性越好. 取  $\omega$  最小值时所对应的小波基为最优小波基, 即 sym5 为本文方法所得到的最优小波基. 选用该小波基函数, 对 Taft 波进行 7 层小波分解, 迭代修正 10 次重构得到拟合波.

表 1 不同小波基函数下拟合波的总体误差绝对值  $\mu$ 、误差均方差  $\sigma$  和综合评价值  $\omega$

Table 1 Overall error absolute values  $\mu$ , mean square errors  $\sigma$  and comprehensive evaluation values  $\omega$  of the simulated waves based on different wavelet basis functions

| 小波名称 | $\mu$  | $\sigma$ | $\omega$ | 小波名称    | $\mu$  | $\sigma$ | $\omega$ |
|------|--------|----------|----------|---------|--------|----------|----------|
| haar | 74.214 | 628.232  | 351.223  | sym5    | 71.420 | 511.637  | 291.528  |
| db4  | 73.564 | 610.441  | 342.003  | coif5   | 76.817 | 705.733  | 391.275  |
| db8  | 75.633 | 672.327  | 373.981  | bior3.9 | 74.808 | 644.205  | 359.506  |
| dmey | 80.603 | 838.580  | 459.591  | bior6.8 | 75.187 | 659.217  | 367.202  |

图 1 为 Taft 母波与拟合波的加速度时程对比图. 可以看出, 调整系数后重构的地震动加速度时程与原信号的地震动加速度时程差异不大, 即运用本文所选的小波基函数能够保留原始信号在时域上的非平稳特性. 图 2 为原信号、拟合信号与目标信号反应谱对比图. 可以看出, 相比原信号反应谱, 调整后拟合信号反应谱与目标信号反应谱更为符合, 证明最优基的选择保证了重构的精度. 但由于小波变换只能详细分析信号的低频部分, 因此出现一些拟合顽固点, 这一问题将在后期利用小波包变换进行解决. 图 3 为基于 Taft 母波的拟合地震波功率谱与改进的金井清目标功率谱对比图. 可以看出, 依据调整后的小波系数重构得到的拟合地震波功率谱与目标功率谱符合较好, 说明要分析信号时频域上的特性, 在进行信号拟合时选择合适的小波基函数非常关键.

### 4 讨论与结论

在拟合地震动反应谱应用中, 选用不同的小波基函数拟合同一地震动反应谱的精度一般是不同的, 且现有研究多是定性分析不同小波基函数对拟合地震动反应谱的影响, 因此

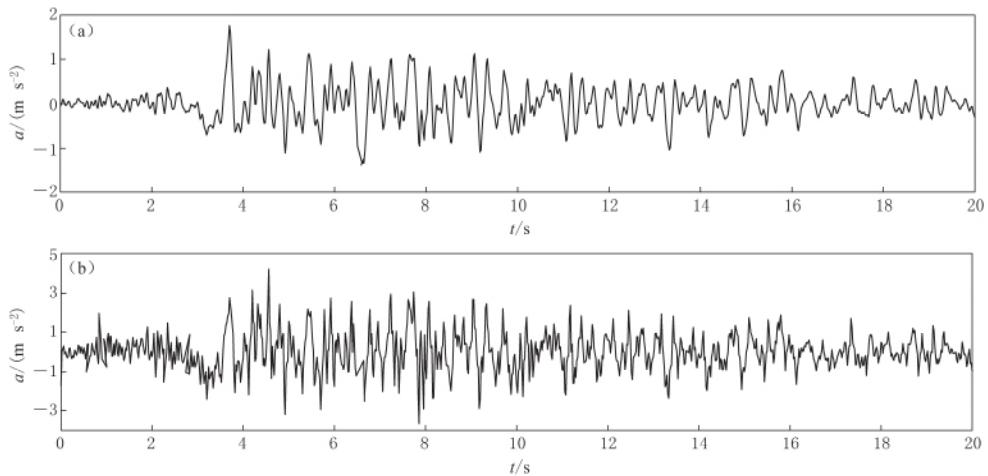


图 1 Taft 母波(a)与拟合波(b)的加速度时程对比

Fig. 1 Comparison of acceleration time history of Taft mother wave (a) with that of simulated wave (b)

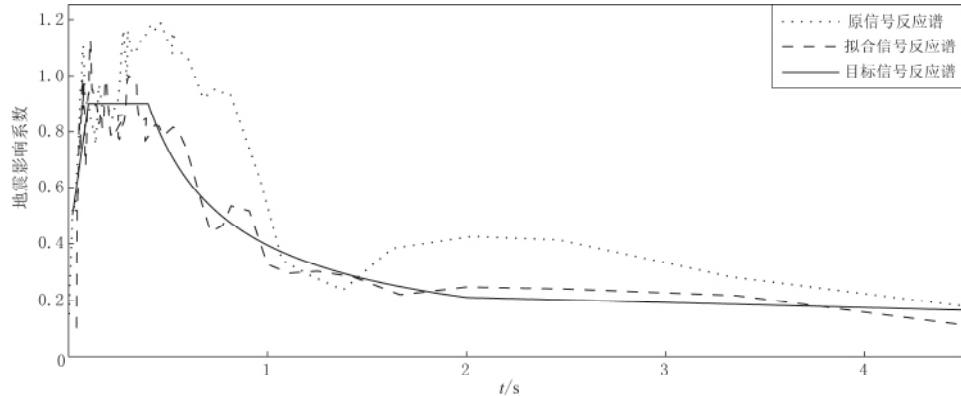


图 2 原信号、拟合信号与目标信号反应谱对比

Fig. 2 Comparison of response spectrum of original signal with that of simulated signal and target signal

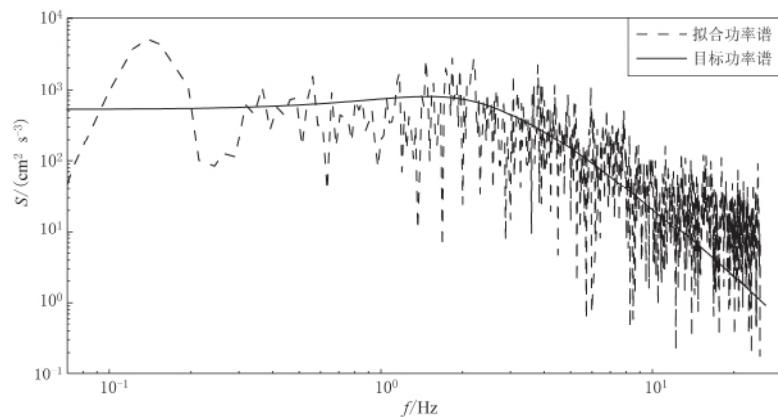


图 3 拟合地震波功率谱与目标功率谱对比

Fig. 3 Comparison of the simulated wave power spectrum with the target power spectrum

提供一种合理选取高精度小波基函数的方法显得尤为重要。本文以小波变换为研究工具,从定量角度提出一种地震动反应谱拟合过程中选择小波基函数的方法。基于该方法,以haar, db4, db8, dmey, sym5, coif5, bior3.9 和 bior6.8 等 8 种小波基函数为例,通过 MATLAB 编程进行实例分析。结果表明:8 种不同小波基函数得到的总体误差绝对值  $\mu$  各不相同,误差均方差  $\sigma$  也各不相同;  $\mu$  值越小, 拟合地震波功率谱与目标功率谱的差异越小;  $\sigma$  值越小, 拟合波的整体性越好; 对于不同的小波基函数拟合同一地震动反应谱时, 拟合波功率谱的合成精度不同; 综合评价值  $\omega$  从定量方面直接得到拟合波的最优基; 加速度时程反应谱曲线以及功率谱曲线的吻合程度则直观地展现了最优小波基所对应的较高拟合精度。

需要指出的是,在对本文所采用的方法进行验证时,只选取了 8 种现有且常见的小波基函数,适用范围并不明确。例如,对于构造的小波基函数是否适用,当同时选用现有小波基和构造小波基时是否适用等,还有待进一步探讨。此外,本文提出的小波基函数选择法是基于实测地震记录 Taft 波、地震烈度为Ⅷ度、场地类别为Ⅲ类,设计地震分组为第 1 组的地区,故有一定的局限性。如需得到适用于所有地震记录、所有场地的最优基,还需进一步研究。由于小波变换只能详细分析信号的低频部分,因此文中所述方法的拟合过程中会出现一些拟合顽固点,该问题将在后期利用小波包变换来解决。

## 参 考 文 献

- 白泉,付亮华,鲍文博,金生吉. 2013. 基于静态离散小波变换的地震动时程调整[J]. 沈阳工业大学学报, 35(4): 469—474.
- Bai Q, Fu L H, Bao W B, Jin S J. 2013. Ground motion time-history modulation based on stationary discrete wavelet transform[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 35(4): 469—474 (in Chinese).
- 樊剑,刘铁,魏俊杰. 2008. 基于小波包变换的人工地震波合成[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 36(3): 42—45.
- Fan J, Liu T, Wei J J. 2008. Generation of artificial earthquakes via the wavelet packet transform[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 36(3): 42—45 (in Chinese).
- 樊剑,吕超,张辉. 2009. 基于离散谐小波变换的地震动时变谱估计及非平稳地震波人工合成[J]. 地震学报, 31(3): 333—341.
- Fan J, Lü C, Zhang H. 2009. Time-varying spectrum estimation and artificial non-stationary ground motion simulation via dyadic harmonic wavelet transform[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 31(3): 333—341 (in Chinese).
- 高静怀,汪文秉,朱光明,彭玉华,王玉贵. 1996. 地震资料处理中小波函数的选取研究[J]. 地球物理学报, 39(3): 392—399.
- Gao J H, Wang W B, Zhu G M, Peng Y H, Wang Y G. 1996. On the choice of wavelet functions for seismic data processing[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 39(3): 392—399 (in Chinese).
- 高志,余啸海. 2007. Matlab 小波分析与应用[M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社: 9—61.
- Gao Z, Yu X H. 2007. *Matlab Analysis and Application of Wavelet*[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press: 9—61 (in Chinese).
- 梁建文. 2005. 非平稳地震动过程模拟方法(I)[J]. 地震学报, 27(2): 213—224.
- Liang J W. 2005. Simulation of non-stationary ground motion processes (I)[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 27(2): 213—224 (in Chinese).
- 欧进萍,王光远. 1998. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育出版社: 109—175.
- Ou J P, Wang G Y. 1998. *Random Vibration of Structures*[M]. Beijing: Higher Education Press: 109—175 (in Chinese).
- 彭玉华. 1999. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社: 21—69.

- Peng Y H. 1999. *Wavelet Transform and Engineering Application*[M]. Beijing: Science Press: 21–69 (in Chinese).
- 吴祈宗, 侯福均. 2013. *运筹学与最优化方法*[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社: 45–156.
- Wu Q Z, Hou F J. 2013. *Operations Research and Optimization Methods*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press: 45–156 (in Chinese).
- 谢异同, 盛涛, 袁俊. 2011a. 拟合多阻尼比目标反应谱的高精度地震动调整方法[J]. *西北地震学报*, **33**(3): 223–227.
- Xie Y T, Sheng T, Yuan J. 2011a. A modification method of earthquake ground motion with high precision from fitting the multi-damping-ratio target spectrum[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **33**(3): 223–227 (in Chinese).
- 谢异同, 葛兴云, 曲高峰, 邵辉成. 2011b. 基于小波分解的能量谱分析方法及其在汶川地震中的应用[J]. *世界地震工程*, **27**(3): 66–72.
- Xie Y T, Ge X Y, Qu G F, Shao H C. 2011b. Wavelet-based analysis of the energy spectrum and its application to Wenchuan earthquake[J]. *World Earthquake Engineering*, **27**(3): 66–72 (in Chinese).
- 薛素铎, 王雪生, 曹资. 2003. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究[J]. *土木工程学报*, **36**(5): 5–10.
- Xue S D, Wang X S, Cao Z. 2003. Parameters study on seismic random model based on the new seismic code[J]. *China Civil Engineering Journal*, **36**(5): 5–10 (in Chinese).
- 杨福生. 1999. *小波变换的工程分析与应用*[M]. 北京: 科学出版社: 35–78.
- Yang F S. 1999. *Wavelet Transform for Project Analysis and Application*[M]. Beijing: Science Press: 35–78 (in Chinese).
- 曾伟伟, 赵卫明, 师海阔, 李自芮. 2010. 利用小波包变换对地震信号进行时频分析时小波基函数的选取[J]. *地震研究*, **33**(4): 323–328.
- Zeng X W, Zhao W M, Shi H K, Li Z R. 2010. Selection of wavelet basis function in process of time-frequency analysis of earthquake signals using wavelet packet transform[J]. *Journal of Seismological Research*, **33**(4): 323–328 (in Chinese).
- 张郁山, 赵凤新. 2014. 基于小波函数的地震动反应谱拟合方法[J]. *土木工程学报*, **47**(1): 70–81.
- Zhang Y S, Zhao F X. 2014. Matching method of ground-motion response spectrum based on the wavelet function[J]. *China Civil Engineering Journal*, **47**(1): 70–81 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2010. *建筑抗震设计规范* (GB 50011—2010)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 6–17, 31–47.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. *Code for Seismic Design of Buildings* (GB 50011—2010)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 6–17, 31–47 (in Chinese).
- Basu B, Gupta V K. 1997. Non-stationary seismic response of MDOF systems by wavelet transform[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **26**(2): 1243–1258.
- Giaralis A, Spanos P D. 2009. Wavelet-based response spectrum compatible synthesis of accelerograms: Eurocode application (EC8)[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **29**(1): 219–235.
- Mukherjee S, Gupta V K. 2002. Wavelet-based generation of spectrum-compatible time-histories[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **22**(9/10/11/12): 799–804.
- Scanlan R H, Sachs K. 1974. Earthquake time histories and response spectra[J]. *J Eng Mech Div*, **100**(4): 635–655.

## 作者简介



李 媛 中国地震局第一监测中心助理工程师。2012年山东师范大学生物科学专业毕业，获理学学士学位；2015年中国地震局地震预测研究所地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。现主要从事重力反演、地壳形变机制和跨断层形变方面的研究工作。



李昌珑 中国地震局地球物理研究所在读博士研究生。2010年西安交通大学自动化专业毕业，获工学学士学位；2013年中国地震局地震研究所防灾减灾工程及防护工程专业毕业，获工学硕士学位。曾从事地震观测技术的研究工作，现主要从事地震活动性和地震危险性方面的研究工作。



邵延秀 中国地震局兰州地震研究所助理研究员。2007年兰州大学地质工程专业毕业，获工学学士学位；2010年中国地震局兰州地震研究所构造地质学专业毕业，获理学硕士学位。现主要从事活动构造方面的研究工作。



白 泉 沈阳工业大学建筑与土木工程学院副教授。1997年东北大学矿山建设（工业与民用建筑）专业毕业，获工学学士学位；2009年东北大学结构工程专业毕业，获工学博士学位。现主要从事随机荷载模拟及结构动力反应分析等方面的研究工作。辽宁省土木建筑学会会员。

注：何现启、梁建宏、冯丽丽、张红才的简介分别见本刊 Vol. 36, No. 3; Vol. 37, No. 1; Vol. 37, No. 4; Vol. 36, No. 4.