

# 非平稳地震动过程模拟方法(Ⅱ)\*

梁建文

(中国天津 300072 天津大学土木工程系)

**摘要** 在总结回顾具有同一统计特征非平稳地震动过程模拟的研究基础上,提出了一个模拟产生与某个给定地震动记录具有同一统计特征——时变功率谱的非平稳地震动过程的方法.方法具有如下一些特点:模拟产生的样本过程在幅值上和频率上均是非平稳的,幅值和频率的非平稳性均取决于目标时变功率谱;任意一个样本过程的时变功率谱未必符合目标谱,但在统计意义上却严格符合目标谱.最后,论文以 Landers 地震的一个加速度记录为例对方法进行了验证.

**关键词** 非平稳地震动过程 模拟 时变功率谱 渐进功率谱 Morlet 小波功率谱

**中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

## 引言

在进行非线性结构随机地震反应的蒙特卡罗分析时,需要大量具有同一统计特征的地震动过程;在结构抗震理论分析中,为了研究某一参数的影响,需要保持其它参数不变,也需要具有同一统计特征的一组地震动过程;在进行结构模型试验时,同样需要具有同一统计特征的一组地震动过程;……。由于地震是稀有的自然事件,满足这种要求的实际地震动记录是无法得到的,只能通过人工模拟来产生.根据不同问题,模拟产生的地震动过程需要满足不同的条件,如符合给定的功率谱或反应谱等.但在很多情况下,为了继承实际地震动记录的某些未知特征(胡聿贤,1988;廖振鹏,1992),人们常选择一个实际地震动记录,如 El Centro 波或 Taft 波等,希望模拟产生与该地震动记录具有同一统计特征的非平稳地震动过程(胡聿贤,1988;廖振鹏,1992);最常见的是目标谱符合该实际地震动记录的功率谱或反应谱.

目标谱符合功率谱表示模拟产生的地震动样本过程的功率谱,在统计意义上与目标功率谱是一致的,通常是这样来实现的:计算实际地震动记录的功率谱,利用平稳随机过程模拟方法(Shinozuka, Jan, 1972)产生平稳地震动过程,再选择一强度(幅值)包络函数进行非平稳化.首先需要指出的是,这样产生的地震动过程在幅值上虽然是非平稳的,但在频率上仍然是平稳的,与实际地震动记录差距较大;其次,由于非平稳化的原因,这样直接产生的非平稳地震动过程的功率谱与目标功率谱也是不一致的;再者,因包络函数选择的任意性,常常会得到与目标地震动记录相差甚远的地震动过程.

目标谱符合反应谱表示模拟产生的地震动样本过程的反应谱,在统计意义上与目标反应谱是一致的.首先计算实际地震动记录的反应谱(或直接利用相应于设计地震和场地条

\* 教育部优秀青年教师资助计划和国家自然科学基金项目(50378063)资助.  
2003-10-22 收到初稿,2004-03-03 收到修改稿,2004-05-09 决定采用.

件的设计反应谱), 根据反应谱和功率谱近似转换关系得到功率谱, 或者直接由地震动记录计算功率谱, 然后模拟产生平稳地震动过程, 再利用包络函数非平稳化, 得到非平稳地震动过程, 最后进行迭代逐步拟合目标反应谱(Scanlan, Sachs, 1974; Ohsaki, 1979; 胡聿贤, 何训, 1986). 需要指出的是, 反应谱拟合这一步骤只是为了提高符合反应谱的精度(包络函数非平稳化在一定程度上降低了符合反应谱的精度); 同时还需要指出的是, 由文献(Scanlan, Sachs, 1974)模拟产生的地震动过程虽然幅值是非平稳的, 但频率仍是平稳的; 文献(Ohsaki, 1979; 胡聿贤, 何训, 1986)注意到相位差的概率分布与加速度包络形状的关系, 采用相位差谱替代 $[0, 2\pi]$ 均匀分布随机相位以反映包络函数的需要, 但由此模拟产生的地震动过程在初始阶段和结束阶段与实际地震动记录仍有一定差距, 而且进一步的研究发现, 幅值谱对包络函数形状有着不可忽略的影响(赵凤新, 胡聿贤, 1994): 采用相位差谱来决定包络函数只适用于频率平稳地震动过程.

本文提出一个模拟产生目标谱符合给定地震动记录时变功率谱的非平稳地震动过程的方法. 方法的显著特点在于, 样本地震动过程在幅值上和频率上均是非平稳的, 幅值和频率的非平稳性均取决于目标时变功率谱; 任意一个样本地震动过程的时变功率谱未必符合目标谱. 但在统计意义上却严格符合目标谱. 这是现有其它一些方法难以达到的. 这样, 如果能够比较准确地估计给定地震动记录的时变功率谱, 就可以借助作者在文献(梁建文, 2005)中提出的非平稳地震动过程模拟方法来产生与某一给定地震动记录具有同一统计特征——时变功率谱的非平稳地震动过程.

## 1 非平稳地震动过程时变功率谱估计

非平稳随机过程时变功率谱的定义有多种(Cohen, 1995), 如渐进功率谱、瞬时功率谱、短时功率谱以及小波功率谱等. 渐进功率谱(Priestley, 1965, 1967)作为平稳随机过程功率谱的一个直接推广, 同时又具有比较明确的物理意义, 因此在地震动记录的分析方面尤其得到了广泛的应用. 然而, 由于渐进功率谱中复调谐函数  $A(t, \omega)$  无法唯一确定(Hammond, 1968), 在非平稳地震动过程渐进功率谱实际估计中多假定地震动过程为均匀调谐过程, 亦即复调谐函数仅为时间的实函数  $A(t)$ , 如文献(Liu, 1970; Bendat, Piersol, 2000), 地震动幅值包络函数(Amin, Ang, 1968)实际即是该假定最主要的应用之一. 然而需要指出的是, 根据均匀调谐假定求得的渐进功率谱, 其频率含量并不随时间变化, 无法反映地震动过程频率非平稳的特性.

根据 Priestley 渐进谱理论(Priestley, 1965, 1967), 非平稳随机过程  $f_0(t)$  的渐进功率谱可以直接通过下式来估计:

$$S(t, \omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f_0(\lambda) \omega(t - \lambda) e^{-i\omega\lambda} d\lambda \right|^2 \quad (1)$$

式中,  $\omega(t)$  为权重函数, 须满足条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2(t) dt = 1 \quad (2)$$

不难看出, 不同的权重函数会得到不同的估计结果. 至于权重函数持续时间的长短, 基于不确定性原理(Priestley, 1967), 可根据具体问题对功率谱在时间和频率上分辨率要求来确定. 值得指出的是, 式(1)又称为物理谱(physical spectrum)(Mark, 1970), 或者短

时功率谱(Flanagan, 1972).

Morlet 小波变换 (wavelet transform) 作为短时付氏变换 (short-time Fourier transform) 的一个推广 (彭玉华, 2000), 在时频分辨率上得到了进一步的提高, 是前面提到的多种时变功率谱中时频分辨率比较高的一种. 基于小波变换我们可以求得小波功率谱.

2 算例分析

以 Landers 地震 (1992 年) 时在 Joshua 的一个加速度记录 (图 1) 为目标进行模拟. 该记

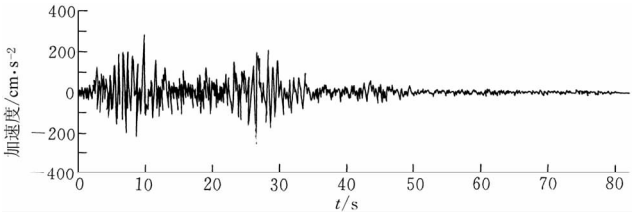


图 1 Landers 地震 Joshua 加速度记录

先来估计 Landers 地震记录的渐进功率谱. 分别选择权重函数 I:

$$w^I(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (\sigma = 0.5) \quad (\text{正态分布函数}) \quad (3)$$

和权重函数 II:

$$w^II(t) = \frac{1}{2} (0 \leq t \leq 2) \quad (\text{矩形函数}) \quad (4)$$

不难验证, 权重函数 I 和 II 均满足条件 (2).

图 2 和图 3 分别给出了由权重函数 I 和 II 得到的渐进功率谱 I 和渐进功率谱 II. 图 4

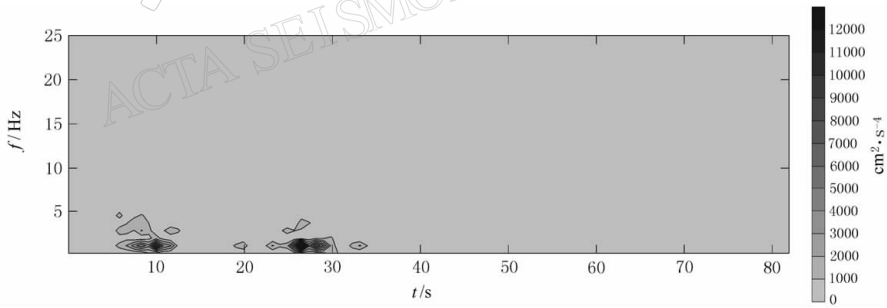


图 2 Landers 地震记录渐进功率谱 I (权重函数 I)

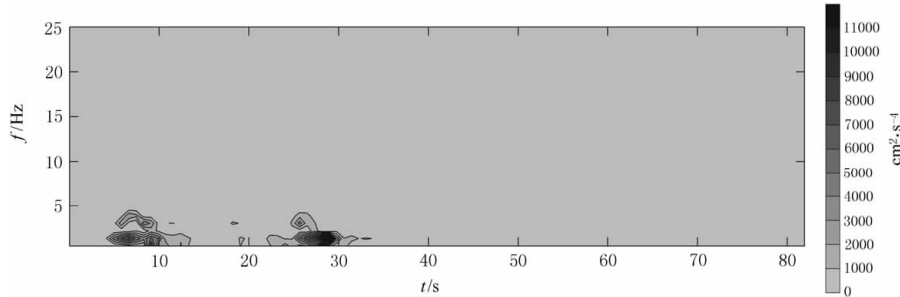


图 3 Landers 地震记录渐进功率谱 II (权重函数 II)

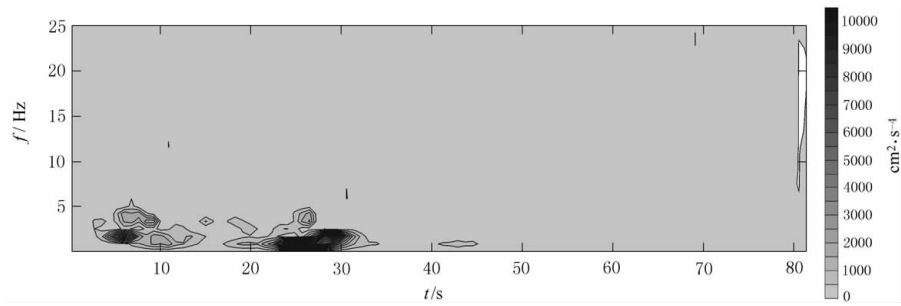


图 4 Landers 地震记录 Morlet 小波功率谱

给出了利用 Morlet 小波变换求得的 Morlet 小波功率谱. 从图可以看出, 对该 Landers 地震加速度记录来讲, 渐进功率谱与小波功率谱时频分辨率相差并不大.

图 5, 6 和 7 分别给出了由渐进功率谱 I、渐进功率谱 II 和小波功率谱模拟的加速度过程. 图 8, 9 和 10 分别给出了由渐进功率谱 I、渐进功率谱 II 和小波功率谱模拟的 1 000 个样本过程的标准差. 从图 5 ~7 可以看出, 模拟的样本加速度过程在整体趋势上均有两组峰值, 分别与渐进功率谱 I、渐进功率谱 II 和小波功率谱的两组峰值相对应, 然而对于具体的一个样本过程来讲, 每组峰值中峰值的个数、峰值大小及峰值出现的位置等均相差很大. 以样本过程的加速度峰值为例, 对应于渐进功率谱 I, 3 个样本过程

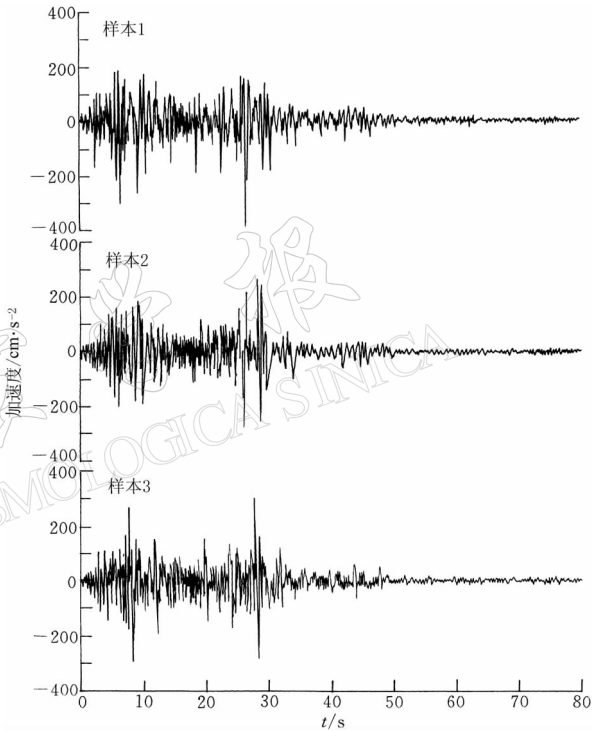


图 5 三个模拟的样本过程(渐进功率谱 I)

(图 5)的第一组峰值分别为相应标准差的 2.79, 1.78 和 2.70 倍, 第二组峰值分别为相应标准差的 3.18, 2.23 和 2.50 倍; 对应于渐进功率谱 II, 3 个样本过程(图 6)的第一组峰值分别为相应标准差的 2.13, 2.07 和 2.54 倍, 第二组峰值分别为相应标准差的 2.87, 1.73 和 2.44 倍; 对应于小波功率谱, 3 个样本过程(图 7)的第一组峰值分别为相应标准差的 2.49, 3.49 和 2.41 倍, 第二组峰值分别为相应标准差的 3.39, 2.68 和 2.14 倍. 从样本过程峰值的离散程度看, 模拟产生的地震动样本过程还是比较理想的.

3 结论

本研究提出了一个模拟产生目标谱符合给定地震动记录时变功率谱的非平稳地震动过程的方法. 方法的显著特点在于, 样本地震动过程的在幅值上和频率上均是非平稳的, 幅

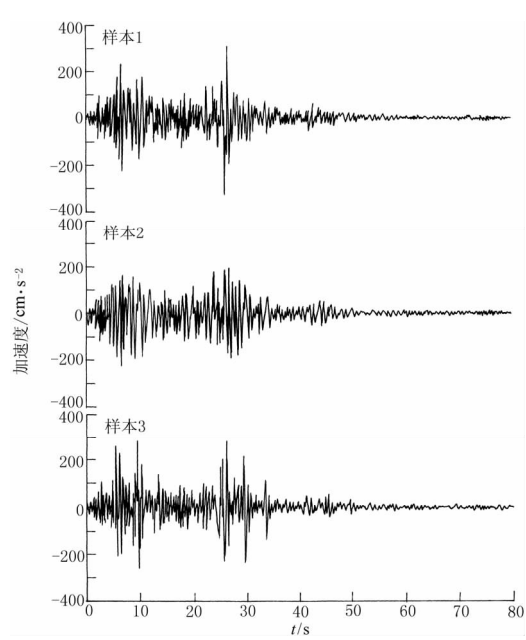


图 6 三个模拟的样本过程(渐进功率谱Ⅱ)

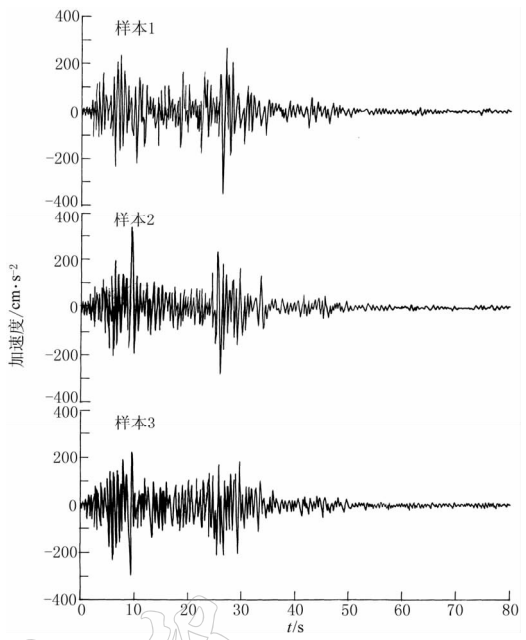


图 7 三个模拟的样本过程(Morlet 小波功率谱)

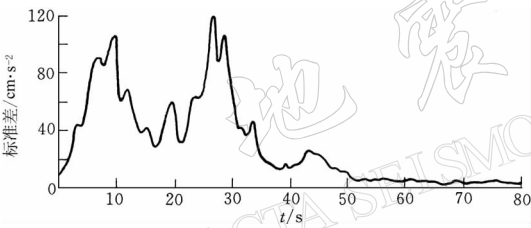


图 8 1 000 个样本过程的标准差(渐进功率谱Ⅰ)

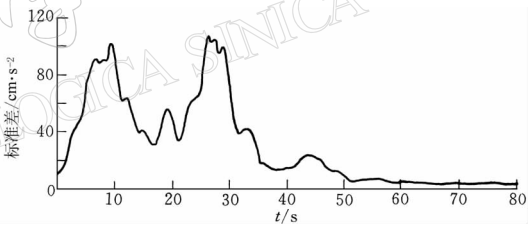


图 9 1 000 个样本过程的标准差(渐进功率谱Ⅱ)

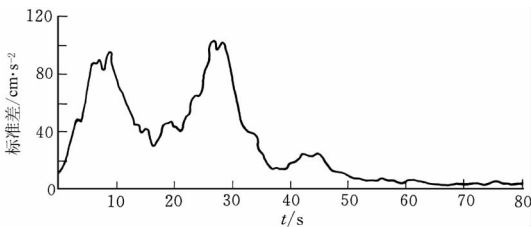


图 10 1 000 个样本过程的标准差  
(Morlet 小波功率谱)

值和频率的非平稳性均取决于目标时变功率谱;任意一个样本地震动过程时变功率谱未必符合目标谱,但在统计意义上却严格符合目标谱.方法的直接工程应用之一是,可为一些重要的地震记录(如 El Centro 波、Landers 波、Taft 波、天津波等)补充大量具有同一统计特征——时变功率谱的地震动样本过程.

论文以 Landers 地震的一个记录为例模拟产生了目标谱符合该地震记录渐进功率谱和小波功率谱的非平稳地震动样本过程.结果表明,本文方法是可行的;渐进功率谱和 Morlet 小波功率谱均可以作为目标谱来模拟产生地震动样本过程,并可以得到精度相当的结果.

## 参 考 文 献

- 胡聿贤. 1988. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 211~215
- 胡聿贤, 何训. 1986. 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, **6**(2): 37~51
- 梁建文. 2005. 非平稳地震动过程模拟方法(Ⅰ)[J]. 地震学报, **27**(2): 213~228
- 廖振鹏. 1992. 强烈地震地面运动模拟[A]. 见: 国家地震局工程力学研究所主编. 中国地震工程研究进展[C]. 北京: 地震出版社, 27~38
- 彭玉华. 2000. 小波变换与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 8~10
- 赵凤新, 胡聿贤. 1994. 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, **14**(2): 1~6
- Amin M, Ang A H S. 1968. Nonstationary stochastic models of earthquake[J]. *J Eng Mech, ASCE*, **94**(2): 559~583
- Bendat J S, Piersol A G. 2000. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*[M]. 3<sup>rd</sup> Edition. New York: John Wiley and Sons, 499~506
- Cohen L. 1995. *Time-Frequency Analysis*[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 82~92
- Flanagan J L. 1972. *Speech Analysis: Synthesis and Perception*[M]. 2<sup>nd</sup> Edition. New York: Springer-Verlag, 155~161
- Hammond J K. 1968. On the response of single and multidegree of freedom systems to non-stationary random excitations [J]. *J Sound Vibration*, **7**(3): 393~416
- Liu S C. 1970. Evolutionary power spectral density of strong-motion earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **60**(3): 891~900
- Mark W D. 1970. Spectral analysis of the convolution and filtering of non-stationary stochastic processes[J]. *J Sound Vibration*, **11**(1): 19~63
- Ohsaki Y. 1979. On the significance of phase contents in earthquake ground motions[J]. *Earthq Eng Struc Dynam*, **7**(5): 427~439
- Priestley M B. 1965. Evolutionary spectra and non-stationary processes[J]. *J Royal Statistics Society, Series B*, **27**(2): 204~237
- Priestley M B. 1967. Power spectral analysis of non-stationary random processes[J]. *J Sound Vibration*, **6**(1): 86~97
- Scanlan R H, Sachs K. 1974. Earthquake time histories and response spectra[J]. *J Eng Mech, ASCE*, **100**(4): 635~655
- Shinozuka M, Jan C-M. 1972. Digital simulation of random processes and its application[J]. *J Sound Vibration*, **25**(1): 111~128

SIMULATION OF NON-STATIONARY GROUND  
MOTION PROCESSES (Ⅱ)

Liang Jianwen

(Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** This paper proposes a method for simulation of non-stationary ground motion processes having the identical statistical feature, time-dependent power spectrum, with a given ground motion record, on the basis of review of simulation of non-stationary ground motion processes. The method has the following advantages: the sample processes are non-stationary both in amplitude and frequency, and both the amplitude and frequency non-stationarity depend on the target power spectrum; the power spectrum of any sample process does not necessarily accord with the target power spectrum, but statistically, it strictly accords with the target power spectrum. Finally, the method is verified by simulation of one acceleration record in Landers earthquake.

**Key words:** non-stationary ground motion processes; simulation; time-dependent power spectrum; evolutionary power spectrum; Morlet wavelet power spectrum