

基于非均匀调制模型的完全非平稳 多点地震动特性分析与模拟

陈辉国¹, 李英民²

(1.后勤工程学院军事土木工程系, 重庆 401311; 2.重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 通过引入非均匀调制函数模型, 实现了对地震动时频非平稳特性起重要作用的时变功率谱的模型化, 结合模型参数识别方法, 验证了利用所采用非均匀调制函数模型来表征地震动时频非平稳特性的有效性. 同时, 利用 SMART1 台阵记录, 对非均匀调制函数参数的空间变化特性进行了分析, 并探索了利用非均匀调制函数参数化模型实现完全非平稳多点地震动模拟的方法. 算例分析表明, 该方法不仅避免了传统演变谱法实现过程中对时变功率谱理论模型进行简化所带来的不足, 而且可同时考虑空间地震动的相干效应、行波效应并与目标反应谱拟合较好, 在实际工程中具有较强的推广应用价值.

关键词: 非平稳地震动; 多点地震动; 非均匀调制; 演变谱

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)04-0523-8

Characteristics analysis and simulation of non-stationary and spatially variable ground motion based on a non-uniform modulation model

CHEN Huiguo¹, LI Yingmin²

(1.Department of Civil engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China

2.College of Civil engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: By introducing a non-uniform modulation function, the time-varying power spectrum model which plays an important role in the non-stationary characteristics simulation of ground motion is implemented. Combined with the model parameter identification method, the effectiveness of the modulation function is verified and the non-stationary characteristics of ground motions have also been tested. Using SMART1 array records, the spatial variation characteristics of the non-uniform modulation function parameters are analyzed and the simulation method of the fully non-stationary spatially variable ground motion based on the non-uniform modulation function parameterized model is explored. Example analysis shows that the method not only avoids the shortcomings caused by the simplified theoretical model of time-varying power spectral during traditional evolution spectrum methods, but also takes the ground motion spatial coherence effects, wave passage effect into account. It can fit the target response spectrum better, which implies the method proposed in this paper has a strong application value in practical engineering.

Key words: non-stationary ground motion; spatially variable ground motion; non-uniform modulation; evolutionary spectrum

现有大量研究表明, 观测得到的地震动通常表现为一个强非平稳随机过程. 在现有的非平稳地震动模拟方法中, 较为常用的是Prisotley提出的演变谱法^[1], 该方法将非平稳过程转化为一个平稳过程与确定性调制函数的积分, 从而由平稳过程的谱密度得到非平稳过程随时间变化的谱密度. 正是基于此种优势, 国内外众多研究者相继建立了不同非平稳过程的谱特性描述方法与非平稳地震动模型, 以至于该方法已成为目前非平稳地震动模拟应用最为广泛的方法^[2-3]. 而对于大型桥梁等空间延展结构而言, 由于其结构不同支点所在空间位置场地条件的不同, 常常导致结构各点地震输入在时频非平稳的分布特性上出现差别, 使得空间多点地震动的时频非平稳特性模拟变得更为复杂. 为解决多点地震

动模拟过程中的非平稳特性实现问题, Shinozuka^[4]首次将演变谱方法应用到多维多点非平稳地震动模拟过程中, 后续的研究者如Yang^[5]、Yamazaki^[6]、Conte^[7]等又各自在此基础上对演变谱方法在多点地震动场模拟中的应用进行了发展. 但是, 上述方法虽然在理论推导上保证了时频完全非平稳多点地震动模拟的可行性, 但在实际应用中, 由于完全时变功率谱模型化的困难, 更多的只是采用简化的非时变功率谱模型以及强度调制方法进行多点地震动合成分析, 导致大多数情况下实现的只是时域非平稳, 而非时频完全非平稳. 钟菊芳^[8]虽然利用SMART1台阵记录对Kameda时变功率谱^[9]模型参数的空间变化特性进行了分析, 但提出的多点非平稳地震动模拟方法只是在考虑时变功率谱影响的

单点地震动模拟公式中增加了行波效应,并未考虑空间多点地震动场的空间相干效应,与传统的多点随机过程演变谱法并不相适应. Deodatis^[10]通过对1964年日本Niigata地震场地液化特性的分析,采用分段的时变功率谱模型,实现了具备Niigata地震动时频非平稳分布特性的空间多点地震动模拟,该方法考虑可考虑空间各点地震动行波效应、相关性以及各点不一致场地条件的影响,是目前空间非平稳多点地震动场模拟较为理想的方法,但由于其提出的时变功率谱模型不具推广性,对具备不同时频非平稳分布特性的其他地震动并不适用.

为解决完全非平稳多点地震动的模拟问题,基于对空间非平稳随机过程演变谱法的分析,通过引入林家浩^[11]、胡灿阳等^[12]提出的非均匀调制函数模型,以 SMART1 台阵记录为例分析了模型参数的空间变化特性,探索了利用非均匀调制函数参数化模型实现完全非平稳多点地震动模拟的方法. 该方法不仅避免了以往研究中对时变功率谱理论模型进行简化所带来的不能较好实现频率非平稳的不足,而且可同时考虑空间地震动的相干效应、行波效应以及目标反应谱的匹配,在实际工程中具有较强的推广应用价值.

1 空间多点随机过程的演变谱法

按照 Priestley 提出基于演变谱密度的非平稳随机过程模型^[1],任意零均值的非平稳随机过程 $y(t)$ 可定义为

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega, t) e^{i\omega t} dF_x(\omega) \quad (1)$$

其中: $F_x(\omega)$ 是一个具有正交增量的复平稳随机过程, $A(\omega, t)$ 为慢变调制函数. 若假设某平稳过程 $x(t)$ 满足

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} dF_x(\omega) \quad (2)$$

则 $y(t)$ 的演变谱(也称时变功率谱或渐进功率谱)函数可表示为

$$S(\omega, t) = |A(\omega, t)|^2 S_x(\omega) \quad (3)$$

式中: $S_x(\omega)$ 为平稳过程 $x(t)$ 的功率谱.

根据 Deodatis^[10]建议的原型谱表示方法,对于一个具备 m 个点的空间非平稳随机场 $y_j(t), (j=1, \dots, m)$, 假设其每个独立的随机分量均为零均值变量, 即

$$E[y_j(t)] = 0 \quad (j=1, \dots, m) \quad (4)$$

其互相关矩阵为

$$R_y(t, t+\tau) = \begin{bmatrix} R_{11}(t, t+\tau) & R_{12}(t, t+\tau) & \cdots & R_{1m}(t, t+\tau) \\ R_{21}(t, t+\tau) & R_{22}(t, t+\tau) & \cdots & R_{2m}(t, t+\tau) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1}(t, t+\tau) & R_{m2}(t, t+\tau) & \cdots & R_{mm}(t, t+\tau) \end{bmatrix} \quad (5)$$

对应的互功率谱密度矩阵为:

$$S_y(\omega, t) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega, t) & S_{12}(\omega, t) & \cdots & S_{1m}(\omega, t) \\ S_{21}(\omega, t) & S_{22}(\omega, t) & \cdots & S_{2m}(\omega, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1}(\omega, t) & S_{m2}(\omega, t) & \cdots & S_{mm}(\omega, t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中

$$S_{jj}(\omega, t) = |A_j(\omega, t)|^2 S_j(\omega), \quad j=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$S_{jk}(\omega, t) = \sqrt{S_{jj}(\omega, t) S_{kk}(\omega, t)} \Gamma_{jk}(\omega) \quad j=1, 2, \dots, m; j \neq k$$

式中: $S_j(\omega)$ 为 $y_j(t), (j=1, \dots, m)$ 的平稳功率谱密度函数. $\Gamma_{jk}(\omega)$ 为 $y_j(t)$ 与 $y_k(t)$ 之间的复相干函数, 其具体表达式为

$$\Gamma_{jk}(\omega) = \gamma_{jk}(\omega) e^{-i\omega d_{jk}/v} \quad (8)$$

其中: γ_{jk} 、 d_{jk} 分别为 $y_j(t)$ 与 $y_k(t)$ 之间的相干函数及距离, v 为地震动视波速.

对于空间随机过程 $y_j(t)$, 其互功率谱密度矩阵为复正定的中心对称矩阵, 对其进行 Cholesky 分解, 可得到如式 (9) 的形式.

$$S_y(\omega, t) = \mathbf{H}(\omega, t) \mathbf{H}^*(\omega, t) \quad (9)$$

式中: $\mathbf{H}^*(\omega, t)$ 为 $\mathbf{H}(\omega, t)$ 的转置, $\mathbf{H}(\omega, t)$ 为下三角矩阵, 如式 (10) 所示.

$$\mathbf{H}(\omega, t) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega, t) & 0 & \cdots & 0 \\ H_{21}(\omega, t) & H_{22}(\omega, t) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1}(\omega, t) & H_{m2}(\omega, t) & \cdots & H_{mm}(\omega, t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

于是, 空间随机过程 $y_j(t)$ 可利用下式来进行模拟

$$y_j(t) = 2 \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^N |H_{jk}(\omega_i, t)| \sqrt{\Delta\omega} \cos[\omega_i t - \theta_{jk}(\omega_i, t) + \varphi_{ki}] \quad (11)$$

$$j=1, 2, \dots, m$$

其中:

$$\theta_{jk}(\omega_i, t) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[H_{jk}(\omega_i, t)]}{\text{Re}[H_{jk}(\omega_i, t)]} \quad (12)$$

φ_{ki} 为 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布随机相位, $\omega_i = i\Delta\omega$,

$\Delta\omega = \omega_c / N$, ω_c 为截止频率, N 为频率分段点数.

特殊的, 对于单点非平稳随机过程, 公式 (11) 将退化为

$$y(t) = 2 \sum_{i=1}^N \sqrt{S(\omega_i, t) \Delta\omega} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (13)$$

式中: φ_i 为 $[0, 2\pi]$ 间均匀分布的随机相位, 其余参数同式 (11).

按照上述演变谱理论, 只要确定了空间各点地震动的时变功率谱函数 $S_{jj}(\omega, t)$ 及互功率谱函数

$S_{jk}(\omega, t)$, 就可模拟具备时频非平稳特性的多点地震动场. 作为地震动时变功率谱的理论模型, 公式

(3) 定义的地震动时变功率谱 $S_{jj}(\omega, t)$ 是平稳自功率谱函数 $S_x(\omega)$ 及调制函数 $A(\omega, t)$ 的乘积, 如果 $A(\omega, t)$ 在频域是完全时变的, 则利用 (3) 式计算的地震动功率谱是完全时变的, 如果将 $A(\omega, t)$ 简化为均匀调制函数 $A(t)$, 即将调制函数退化为时域的强度调制 (包络) 函数, 则得到的地震动功率谱将失去理论上的时变性, 从而导致模拟得到的地震动在频域上失去非平稳性. 为此, 寻找合适的非均匀调制模型是利用演变谱法实现时频非平稳地震动模拟的关键.

2 非均匀调制模型及其参数识别

2.1 非均匀调制函数模型

近年来, 我国林家浩^[15]提出了一个可具操作性非均匀调制函数模型, 其表达式为

$$A(\omega, t) = \beta(\omega, t)g(t) = e^{-\eta_0 \omega t / \omega_a t_a} g(t) \quad (14)$$

式中: $\beta(\omega, t)$ 为指数型衰减调制函数, $g(t)$ 为强度调制函数, η_0 为调频因子, 主要用于调节频率成份的衰减快慢, ω_a 与 t_a 是为了将 ω 与 t 无量纲化而引入的频率和时间参数, 原则上可任意选择, 也可取 ω_a 与土层特征频率 ω_g 相同, t_a 为强度调制函数平稳段起始时刻 t_1 与终了时刻 t_2 的均值.

胡灿阳等^[12]提出的模型与林家浩提出的模型基本一致, 只是在指数衰减函数选取上有所变化, 如下式所示

$$A(\omega, t) = I_0 \left[e^{-b_1 \omega t / \omega_a t_a} - e^{-b_2 \omega t / \omega_a t_a} \right] g(t) \quad (b_2 > b_1) \quad (15)$$

式中: I_0 为强度因子, b_1 、 b_2 为确定频率调制函数形状的参数. 其中, 常用的强度调制函数 $g(t)$ 可采取三段式模型, 如

$$g(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t_2 \leq t \end{cases} \quad (16)$$

上述两模型在本质上是—致的, 但由于胡灿阳给出的模型对模型化后的演变谱空间曲面调节更合理, 主要采取胡灿阳给出的模型来进行分析.

2.2 非均匀调制函数模型参数识别

将(15)式所示的非均匀调制函数模型代入式(3), 就可得到如下的表达式

$$A(\omega, t) = I_0 \left[e^{-\frac{b_1 \omega t}{\omega_a t_a}} - e^{-\frac{b_2 \omega t}{\omega_a t_a}} \right] g(t) = \sqrt{S(\omega, t) / S_x(\omega)} \quad (17)$$

公式中间部分为非均匀调制函数 $A(\omega, t)$ 的参数化

表达, 右边为通过计算得到的实际地震动非均匀调制函数估计值, 其中 $S(\omega, t)$ 为实际地震动的时变功率谱, $S_x(\omega)$ 为实际地震动平稳自功率谱.

利用式 (17), 若已知地震动时变功率谱和平稳功率谱, 则可以通过最小平方和误差的多元函数目标优化方法对非均匀调制模型参数进行识别, 其参数识别过程可按以下步骤实施:

(1) 通过实际地震动识别强度因子 I_0 和强度调制函数 $g(t)$ 的参数 t_1 、 t_2 、 c 的估计值. 参数估计过程中, 采用的目标函数为

$$f_{\min} = \sum [w(t) \times (h(t) - h_s(t))]^2 \quad (18)$$

式中: $w(t)$ 为权重系数, $h(t)$ 为实际地震动累积能量, $h_s(t)$ 地震动为强度包线函数 $I_0 g(t)$ 的累积能量;

(2) 估计实际地震动的时变功率谱 $S(\omega, t)$;

(3) 给定 ω_a 的值, 并采用如下的目标函数估计频率调制函数形状参数 b_1 、 b_2

$$f_{\min} = \sum [w(\omega, t) \times (B(\omega, t) - B_s(\omega, t))]^2 \quad (19)$$

式中: $w(\omega, t)$ 为权重系数, $B(\omega, t)$ 、 $B_s(\omega, t)$ 分别由 $\sqrt{S_i(\omega, t) / S_i(\omega)} / [I_0 g(t)]$ 、 $e^{-b_1 \omega t / \omega_a t_a} - e^{-b_2 \omega t / \omega_a t_a}$ 计算得出.

为说明上述参数识别方法的可靠性, 以集集地震动 CHY102 台站记录 NS 分量 (如图 1 所示) 为例进行参数识别. 在计算实际地震动的时变功率谱时, 采用了楼梦麟等^[13]基于 HHT 方法提出的正交化经验模式分解方法, 从图 2 所示的实际地震动时变功率谱图可以看出, 该地震动在时域与频域均是强非平稳的.

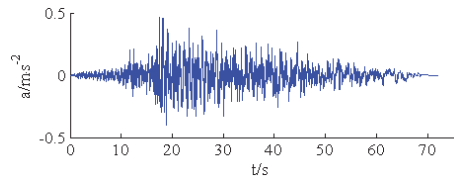


图1 集集地震加速度时程 (1999, CHY102 台站 NS 分量)

Fig.1 Ground motion record of CHI-CHI

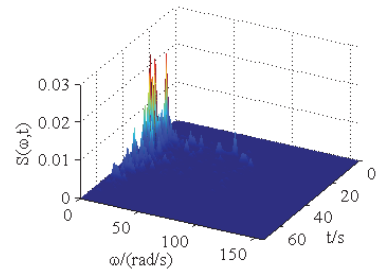


图2 集集地震CHY102台站记录功率谱

Fig.2 Power spectra of CHY102 station of the ground motion record CHI-CHI

图3给出了其强度调制函数与实际地震动以及其归一化累积能量的比较, 从图中可以看出, 其强度调制函数的拟合效果是十分理想的. 通过识别的

强度调制函数, 设定 $\omega_a = 2.4\pi \text{ rad/s}$, 以(19)式确定的目标函数进行优化分析, 可得到其调制函数形状参数 b_1 、 b_2 值分别为: 0.285 4、0.547 2。

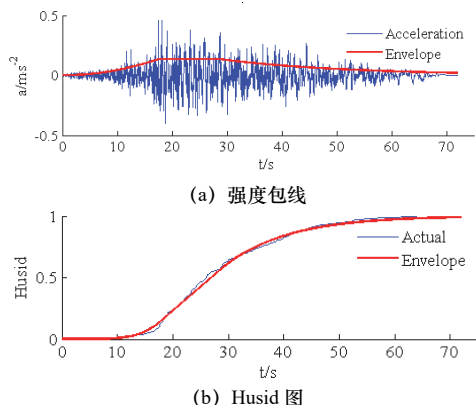


图3 集集地震 CHY102 台站记录强度包线及 Husid 图
Fig.3 Envelope and Husid diagram of CHY102 station of the ground motion record CHI-CHI

为便于比较, 分两种情况给出了相应的模型化时变功率谱, 即采用相同的调制函数形状参数, 而强度调制函数则分别采用识别的强度调制函数及实际强度包线。通过比较可以看出, 基于实际强度包线得到的模型化时变功率谱与实际时变功率谱更为接近, 而基于识别的理论强度包线由于主要采用三段式平滑曲线反映地震动时域的幅值变化的主要特性, 其模型化时变功率谱较采用实际强度包线计算的时变功率谱要平滑。但从总体上看, 基于识别的理论强度包线参数及调制函数形状参数计算的完全模型化时变功率谱仍能准确对反映原始地震动的时变功率谱分布规律, 表明其模型化参数识别方法也是有效的。

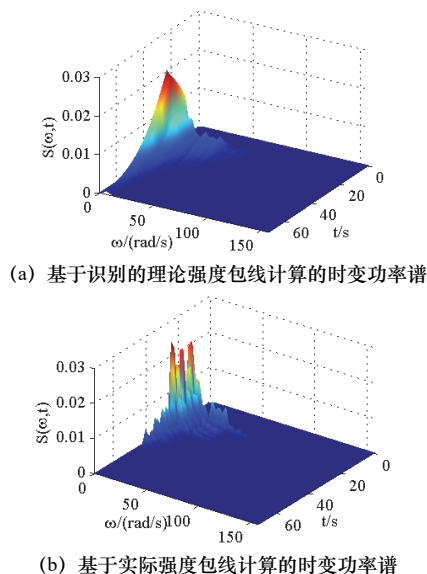


图4 集集地震 CHY102 台站记录的拟合时变功率谱
Fig.4 The fitted time-varying power spectra of CHY102 station of the ground motion record CHI-CHI

2.3 非均匀调制函数模型有效性验证

为验证本文采用的非均匀调制函数模型反映真实地震动时频非平稳特性的有效性, 通过图4(a)所示的模型化时变功率谱, 利用公式(13)进行单点地震动合成, 在合成过程中, 以原始地震动的反应谱为目标反应谱, 按频域修正方法进行反应谱拟合(拟合误差取10%), 比较合成地震动时频分布与原始地震动的时频分布特性一致性。从模拟的结果可以看出, 模拟地震动(见图5)与原始地震动较为一致, 而且与原始地震动的反应谱拟合较好(见图6(a))。图6(b)给出了通过正交化HHT方法计算的模拟地震动时变功率谱, 从图中可以看出, 其时变功率谱分布与原始地震动也较为一致, 体现了原始地震动的时频非平稳特性, 表明利用胡灿阳给出的非均匀调制函数模型是可以较好还原实际地震动时频非平稳分布特性的, 证明了利用该模型来表征真实地震动时频非平稳特性的有效性。

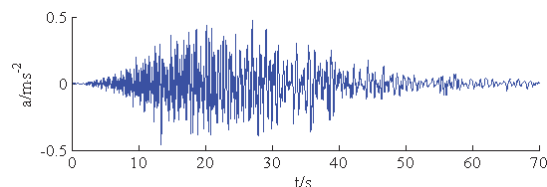
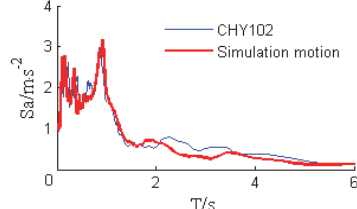
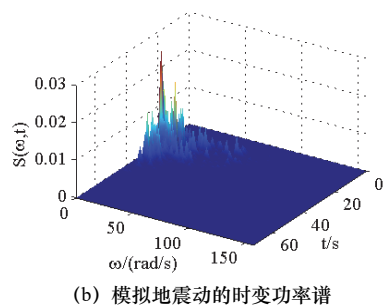


图5 模拟地震动

Fig.5 The simulation motion



(a) 模拟地震动与原始地震动反应谱对比



(b) 模拟地震动的时变功率谱

图6 模拟地震动与反应谱与时变功率谱
Fig.6 The response spectrum and time-varying power spectra of simulation motion

3 非均匀调制模型参数的空间变化特性分析

根据多点非平稳随机过程模拟的演变谱方法可知, 对空间任意非平稳地震动, 只要已知各点的时变功率谱, 即可拟合给定相干函数与波速条件下的空间地震动场。在实际的空间地震动场中, 因各

点的空间位置和工程场地条件差异, 空间各点的时变功率谱分布特性也将呈现不同程度的差异, 单纯采取各点一致的时变功率谱进行多点地震动模拟, 虽然可考虑地震动的空间相干效应和行波效应, 但并不能有效反映空间位置变化及场地条件对时频非平稳特性变化的影响. 若利用真实地震台阵记录对非均匀调制函数模型参数的变化特性进行分析, 则可较好的还原真实空间多点地震动时变功率谱的空间特性, 从而实现具备空间变化特性的完全非平稳地震动模拟.

3.1 空间台阵记录选取

为不失一般性, 选取台湾 SMART1-45 台阵记录作为研究对象, 来分析非均匀调制模型表述下的演变过程空间变化特性, 进而获得基于演变谱的多点地震动估计方法. 为保证计算可靠性和一致性, 统一采用美国太平洋地震工程中心(PEER)的校正记录作为分析对象. 为便于分析各台站记录点的局部坐标位置, 将震源与台阵中心点 C00 的连线定为

坐标轴, 离震源最近的台站在该坐标轴上的投影定为坐标原点 O , 各测点台站的坐标位置通过其与坐标原点 O 的距离 d 及与坐标轴的夹角 θ 来表示 (测点在坐标轴上的投影距离为 $|d \cos \theta|$), 如图 7 所示. 根据第 45 次地震动的震源坐标以及各台站坐标, 在本文选取的参与计算台站记录中, 可计算出 O06 为离震源最近的测点, 各测点与原点 O 的距离、夹角 θ 及投影距离见表 1, 各测点的土层厚度参见文献[14].

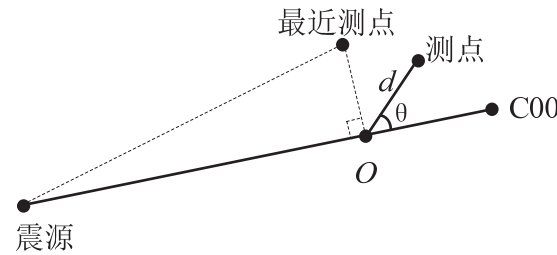


图7 局部场地测点的坐标位置
Fig.7 The coordinate of station in local site

表1 所采用的测点台站坐标
Tab.1 The coordinate of each used point stations

测点	C00	I01	I07	M01	M07	O01	O02	O04
d / m	1 966	2 151	1 773	2 889	1 069	4 003	3 631	2 076
$\theta / ^\circ$	0	1.53	1.89	5.70	19.28	8.49	24.34	46.13
$ d \cos \theta $	1 966	2 150	1 771	2 874	1 008	3 959	3 308	1 439

测点	O06	O07	O08	O10	O12	E01	E02
d / m	449	434	1 521	3 206	3 937	842.57	2 989.21
$\theta / ^\circ$	90	85.11	70.91	36.21	5.81	-17.70	-18.81
$ d \cos \theta $	0	37	497	2 587	3 917	802	2 876

3.2非均匀调制函数参数的统计分析

在对非均匀调制函数模型参数进行分析前, 首先根据SMART1-45台阵记录确定各点平稳自功率谱密度函数 $S_i(\omega)$ 的参数取值, 其中 $S_i(\omega)$ 采用修正后的K-T谱 (即C-P谱), 其表达式如式 (20) 所示.

$$S(\omega)=S_0 \frac{1+4\xi_g^2[\omega/\omega_g]^2}{[1-(\omega/\omega_g)^2]^2+4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \times \frac{(\omega/\omega_f)^4}{[1-(\omega/\omega_f)^2]^2+4\xi_f^2(\omega/\omega_f)^2} \quad (20)$$

式中: ω_f 和 ξ_f 分别为附加滤波器频率和阻尼系数.

本文自功率谱参数取值主要依据屈铁军等^[14]对SAMART1台阵记录自功率谱参数的研究成果, 同时为使问题简化, 将自功率谱谱参数的空间变化特性统一纳入到非均匀调制函数参数的空间变化特性中, 对自功率谱参数随距离和土层厚度的变化特性不予考虑, 假设各点的自功率谱密度函数均相同, 其参数取值均采用能量占地震70%总能量的

时间窗条件下得到的平均值, 其中 $\omega_g = 9.53 \text{ rad/s}$, $\xi_g = 0.463 4$, $S_0 = 37.1 \text{ cm}^2/\text{s}^3$. 按照本文2.2节提供的参数识别方法计算各台站测点地震动的非均匀调制函数参数, 图8给出了各参数随各测点投影距离和土层厚度的变化关系图, 从图中直观分析, 除 I_0 、 t_1 、 b_1 与投影距离表现出较为明显的线性关系外, 其他各参数与投影距离及土层厚度的关系似乎均难以利用单一线性规律表示. 为获得各测点非均匀调制函数参数与投影距离、测点土层厚度之间的定量关系, 采用多元线性回归的方式对各参数进行回归分析, 参照文献[15]局部场地上包线函数参数的拟合方法, 共取以下三种回归模型对各参数进行拟合试算分析, 如式 (21) 所示.

I: $y = a_0 + a_1 \Delta \tilde{d} + \varepsilon$

II: $y = a_0 + a_1 \Delta \tilde{d} + a_2 \Delta h + \varepsilon$

III: $y = a_0 + a_1 \Delta \tilde{d} + a_2 \Delta h^2 + \varepsilon$

(21)

式中: y 代表参数 I_0 、 t_1 、 t_2 、 c 、 b_1 、 b_2 , 而 a_0 、 a_1 、 a_2 为回归系数, ε 为残差, $\Delta\tilde{d}$ 、 Δh 为各测点与离震源最近点的投影距离和土层厚度之差。

从表2给出的各参数按模型I、II、III试算回归得到的F值和对应的概率 p 可以看出, 参数 I_0 、 t_1 、 c 、 b_1 利用模型I回归具有较高的可信度, 而参数 t_2 及 b_2 采用模型III具有较高的可信度. 分别利用较高

可信度模型对调制函数参数进行统计回归, 可得到如表3所示的回归系数. 其回归系数由两部分组成, 一部分是代表空间地震动各参数的初始取值, 即系数 a_0 ; 另一部分是代表各参数随地理位置和土层厚度的空间变化效应, 即系数 a_1 、 a_2 所表示的乘项部分. 利用上述回归模型, 可以对与SMART1-45地震波相类似场地条件下空间地震动场进行模拟.

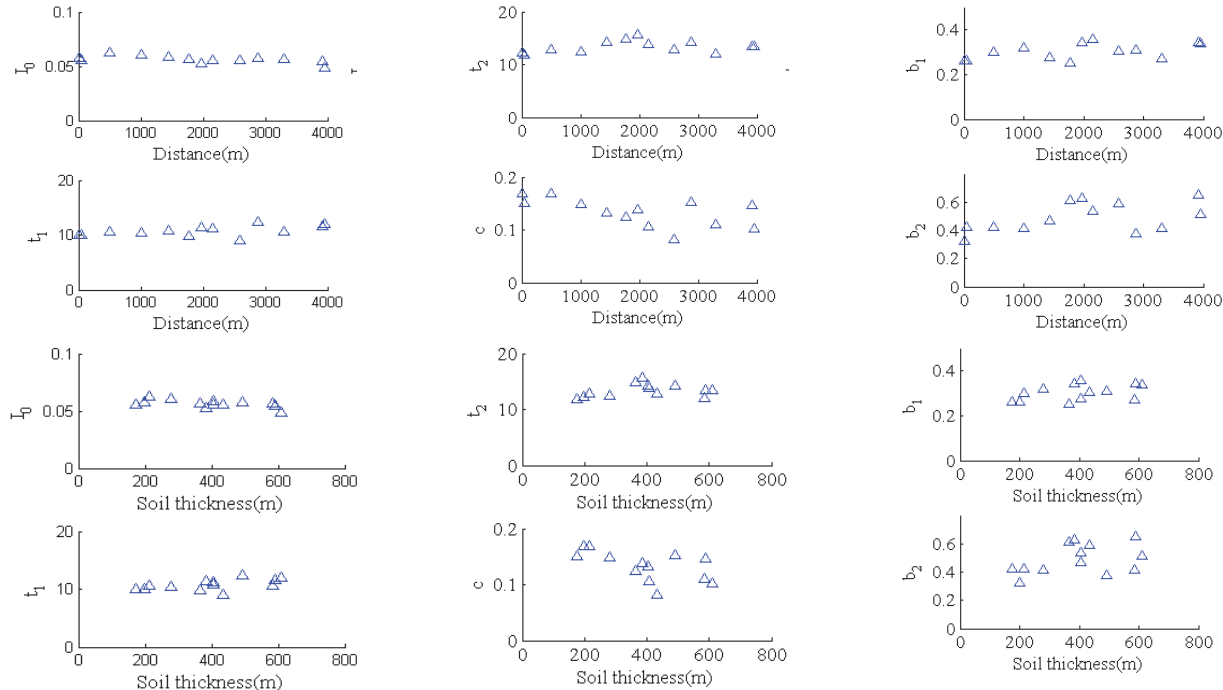


图 8 各参数随投影距离及土层厚度变化散点图
Fig.8 The scatter plot of the parameters with the change of the station projection distance and soil thickness

表 2 各参数试算回归模型的 F 值及失效概率 p
Tab.2 The F statistic and its p value of each parameter regression model

回归模型	I_0	t_1	t_2	c	b_1	b_2
模型 I	6.176 3	3.855 3	0.898 9	5.640 2	3.995 2	3.629 7
	(0.030 3)	(0.075 4)	(0.363 5)	(0.036 8)	(0.070 9)	(0.083 2)
模型 II	2.8990	1.835 5	0.411 7	2.564 7	3.738 9	3.106 5
	(0.101 6)	(0.209 4)	(0.673 3)	(0.126 2)	(0.061 3)	(0.089 3)
模型 III	3.108 6	1.993 0	3.463 1	3.387 1	3.058 4	5.031 3
	(0.089 1)	(0.186 9)	(0.072 0)	(0.075 3)	(0.092 0)	(0.030 8)

注: 括号外的数据为 F 值, 括号内的数据为 F 值对应的失效概率 p .

表 3 各参数回归模型的回归系数取值
Tab.3 The egression coefficient value of each parameter

参数	a_0	a_1	a_2	模型类别
I_0	0.059 3	-0.000 0015	/	模型 I
t_1	10.057 4	0.000 36	/	模型 I
t_2	12.178 2	0.001 5	-0.000 003	模型 III
c	0.155 6	-0.000 011	/	模型 I
b_1	0.276 6	0.000 013	/	模型 I
b_2	0.358 4	0.000 15	-0.000 002 3	模型 III

4 基于非均匀调制模型的空间完全非平稳多点地震动模拟

4.1 模拟步骤

为使模拟得到的多点地震动场即保持给定的时频非平稳变化特性, 又保持与规范反应谱或目标反应谱的一致性, 本文在具体的多点合成过程中通过引入反应谱拟合技术, 从而保证模拟方法具有更为广泛的工程推广应用价值. 包含反应谱拟合迭代过程的完全非平稳多点地震动模拟步骤如下:

(1)给定初始地震动,或给定各点地震动的平稳功率谱密度函数 $S_i(\omega)$ 地震动功率谱模型以及初始非均匀调制函数 $A(\omega, t)$ 参数取值;

(2)根据初始非均匀调制函数参数取值,利用其参数空间变化回归模型计算各点的非均匀调制函数 $A_i(\omega, t)$;

(3)利用式(6)及式(7)计算互功率谱矩阵,对互功率谱矩阵进行 Cholesky 分解;利用式(11)计算空间各点地震动;

(4)利用目标反应谱对模拟得到的地震动反应谱进行修正,对 $S_i(\omega, t)$ 乘以反应谱调整系数(调整系数为反应谱比值的平方),并转到第3步;

(5)对(3)-(4)步进行迭代,直至满足规范反应谱的拟合精度要求。

4.2算例分析

为说明上述空间非平稳多点地震动模拟方法的有效性,选择了一个具有4个点的空间地震动场进行分析,计算目的是根据给定的调制函数参数等信息,生成满足规范反应谱要求的完全非平稳多点地震动场。已知的空间4点如图9所示,各点工程场址均为II类,1、2、3、4点的土层厚度分别为80 m、90 m、110 m、140 m,地震动传播方向为1点到4点,设防烈度为VIII度,潜在震源的震中距为100 km,可能的震级为7级,给定点1的非均匀调制函数初始参数取值为: $I_0 = 0.35$, $b_1 = 0.36$, $b_2 = 0.58$, $t_1 = 3.8$, $t_2 = 14.5$, $c = 0.1$ 。要求模拟满足《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)反应谱的1、2、3、4点水平地震动加速度时程。

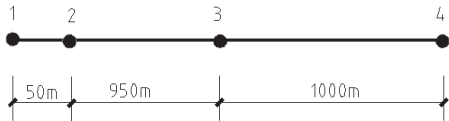


图9 场地模拟点的空间位置

Fig.9 Positions of simulated site point

计算中,地震动平稳自功率谱采用C-P谱模型,按文献[16]的建议,对II类场地取 $\xi_f = \xi_g = 0.85$, $S_0 = 184.5 \text{ cm}^2 / \text{s}^3$, $\omega_f = 0.1 \omega_g = 0.24 \pi \text{ rad} / \text{s}$, 地震动相干函数模型按式(22)选用,其模型各参数取值为: $A = 0.736$, $a = 0.147$, $k = 5210$, $\omega_0 = 6.85$, $b = 2.78$, 设定地震动传播的视波速 $v = 1000 \text{ m} / \text{s}$ 。

$$|\gamma(\omega, d)| = A \exp[-2|d|(1 - A + aA) / (a\theta(\omega))] + (1 - A) \exp[-2|d|(1 - A + aA) / \theta(\omega)] \quad (22)$$

式中: $\theta(\omega) = k[1 + (\omega / \omega_0)^b]^{-1/2}$ 。

图10给出了经迭代计算得到的各点地震动加速度时程图,其中拟合反应谱与目标反应谱的误差控制在10%以内,进行的迭代计算次数为12次,表明该方法的计算效率是较高的。图11给出了各模拟地震动的反应谱与目标反应谱的对比,从图中可以看出,模拟地震动反应谱与目标反应谱较为吻合。图12给出了各模拟地震动的时频分布图,从图中可以看出,各点保持了其整体时频分布的相似性和非平稳特性,这与工程尺度范围内多点地震动时频特性细微变化的规律是较为一致的,表明利用本文提出的方法模拟以设计反应谱为匹配目标的完全非平稳多点地震动场是完全可行的。

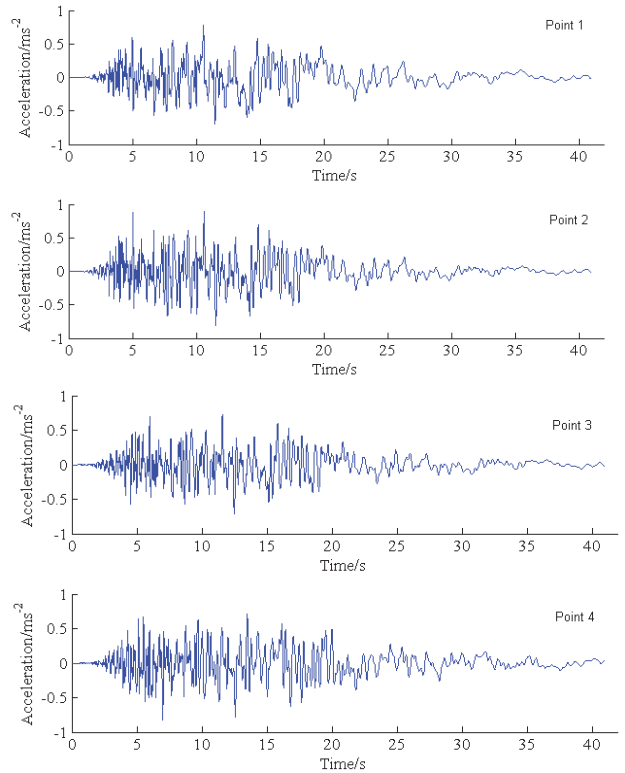


图10 各点的模拟地震动加速度时程

Fig.10 Simulated ground motion acceleration of each point

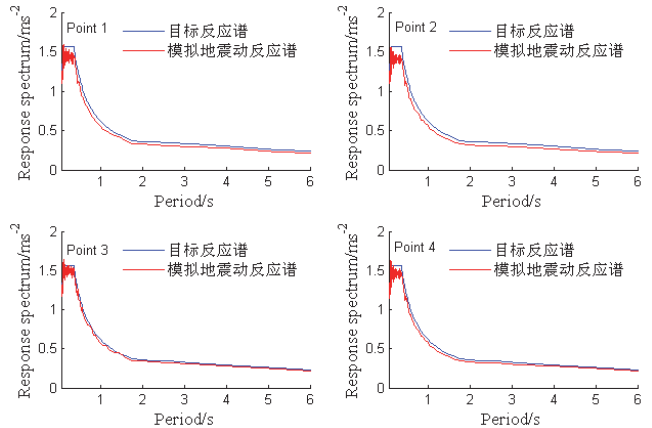


图11 各点模拟地震动的反应谱与目标反应谱对比

Fig.11 The response spectrum comparison of code and simulation ground motion of each point

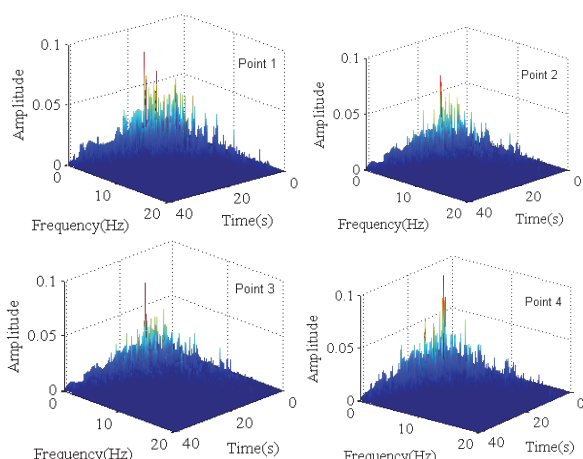


图12 各点模拟地震动的时频分布图

Fig.12 Time-Frequency distribution of simulation ground motion

5 结论

(1)利用胡灿阳提出的非均匀调制函数模型,可较好实现地震动时变功率谱的模型化,其模型参数可用来定量描述多点地震动非平稳特性参数之间的细微变化关系。

(2)以SMART1台阵记录为例,通过对非均匀调制函数模型参数的空间分布特性的分析来表征空间多点时变功率谱随空间位置和场地特征变化的规律,探索建立了基于非均匀调制函数模型的空间多点非平稳地震动模拟方法。该方法以演变谱法为理论基础,避免了传统多点地震动模拟过程中对时变功率谱理论模型进行简化带来的不足

(3)算例表明,应用本文方法模拟的多点地震波,可同时满足空间地震动的相干效应、行波效应以及给定时频分布特性的要求,而且对目标反应谱也具有较好的拟合精度,在实际工程中具有较强的推广应用价值。

(4)由于地震台阵数据来源的限制,本文仅对SMART1-45地震记录非均匀调制函数模型参数空间变化特性进行了分析,其适用范围也随之局限于与SMART1-45地震记录场地条件类似的空间地震动场,若需获得更为普适的非均匀调制函数参数空间变化特性,还依赖于对更多不同类型场地的密集台阵地震的分析。

参考文献 References

[1] PRIESTLEY M B. Evolutionary spectra and non-stationary processes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1967, 6(1):86-97.
[2] DEODATIS G. Non-stationary stochastic vector processes: seismic ground motion applications[J]. Probabilistic Engineering Mechanics. 1996,11:149-168.

[3] SHINOZUKA M, DEODATIS G. Stochastic process models for earthquake ground motion[J]. Probabilistic Engineering Mechanics. 1988, 3(3): 114-123.
[4] Shinozuka M. Digital simulation of random processes and its applications[J]. Journal of Sound and Vibration 1972, 25(1), 111-128.
[5] YANG J N. Simulation of random envelope processes[J]. Sound and Vibration. 1972,25:73-85.
[6] Yamazaki F, Shinozuka M. Digital generation of non-Gaussian stochastic fields[J]. Journal of Engineering Mechanics. 1988,114:1183-97.
[7] Conte J P ,Peng B F. Fully nonstationary analytical earthquake ground motion model[J]. Journal of Engineering Mechanics. 1997,123:15-24.
[8] 钟菊芳. 重大工程场地地震动输入参数研究[D]. 南京: 河海大学博士学位论文, 2006.
ZHONG Jufang. Study of ground motion input parameters for vital engineering project [D]. Nanjing: University of Hohai, 2006.
[9] KAMEDA H. Evolutionary spectra of seismogram by multifilter[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1975, 101 (6): 787 - 801.
[10] DEODATIS G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes. Journal of Engineering Mechanics. 1996.122, 778-787.
[11] 林家浩, 张亚辉, 孙东科, 等. 受非均匀调制演变随机激励结构响应快速精确计算[J]. 计算力学学报, 1997, 14(1): 2-8.
LIN Jiahao, ZHANG Yahui, SUN Dongke, et al. Fast and precise computation of structural responses to non-uniformly modulated evolutionary random excitations[J]. Chinese Journal of Computational, 1997, 14(1): 2-8.
[12] 胡灿阳, 陈清军. 非平稳地震动的双调制模型研究[J]. 力学季刊, 2008, 29(4): 530-536.
HU Canyang, CHEN Qingjun. Research on double modulation model for non-stationary earthquake motion[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008, 29(4): 530-536.
[13] 楼梦麟, 黄天立. 正交化经验模式分解方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 293-298.
LOU Menglin, HUANG Tianli. The orthogonal empirical mode decomposition[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(3): 293-298.
[14] 屈铁军, 王前信. SMART—1 台阵记录的自功率谱特性研究[J]. 世界地震工程, 1995, (1): 35-43.
QU Tiejun, WANG Qianxin. Study on character of power spectra of ground motion recorded at SMART1 array[J]. World Earthquake Engineering, 1995, (1): 35-43.
[15] 屈铁军, 王君杰, 王前信. 局部场地上地震动强度包线函数的特性研究[J]. 地震动与工程振动, 1994, 14(3): 68-80.
QU Tiejun, WANG Junjie, WANG Qianxin. Study on characteristics of envelope function of ground motion in local site[J]. Earthquake Engineering Vibration, 1994, 14(3): 68-80.
[16] HINDY A, NOVAK M. Pipeline response to random ground motion[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division. 1980, 106(2): 339-360.

(编辑 吴海西)