

文章编号:1000-1301(2010)02-0001-09

基于目标功率谱和包线的地震动合成

徐国栋¹, 史培军², 周锡元³

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 北京师范大学 减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京市工程抗震与结构诊治重点实验室, 北京工业大学, 北京 100022)

摘要:本文给出了以目标功率谱和目标包线函数为双目标函数的人工地震动合成方法,使人工地震动不仅符合目标功率谱,还基本符合目标包线函数,并对加速度基线进行了调整,使速度时程和位移时程更为合理。作者认为如果用反应谱作为目标谱,生成的人工地震动时程可能会弱化地震动的随机特性,用这样的人工地震动时程作为输入来分析建筑结构的非线性动力反应,不是理想的选择。对建筑结构进行非线性时程分析时,用基于功率谱的人工地震动作为输入,应当是一种更为合理的方法。作者认为平方和具有明确的物理意义,是随机信号的总能量参数,并通过理论分析和数值计算,对于一定持时的随机平稳信号样本,平方和(持时 \times 平方平均值)对振幅起重要控制作用。平方和、归一化功率谱、时域包线函数是基于功率谱模型的地震动三要素。

关键词:功率谱;平方和;包线;人工地震动

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

Artificial ground motion based on target power spectra and envelope

XU Guodong¹, SHI Peijun², ZHOU Xiyuan³

(1. Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Sanhe 065201, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: This article presents a method that takes the power spectrum and the enveloping curve as double target functions to synthesize the artificial ground motion. The method not only makes the spectrum of the artificial ground motion comply with the target spectrum, but also in the iterative process adjusts the ground motion wave-shape to conform to the goal enveloping curve function approximately, and eliminates the base-line shift in the acceleration time history, then makes the velocity and displacement time histories of ground motion more reasonable. The authors argue that the synthetic method based on the response spectrum may weaken the random characteristics of ground motion, and hence it may be imperfect to use the artificial ground motion based on response spectrum as an input to analyze the elastic-plastic structures. Using the artificial ground motion based the power spectrum model in elastic-plastic structure dynamic analysis may be one more reasonable alternative. The authors see that the sum of squares has the explicit physics significance, which is the total energy parameter of random signal. Through the theoretical analysis and the numerical calculation, the authors think that the sum of squares (Means of squares multiplied by duration) is an important control factor in the amplitude of a stochastic statistical signal sample with certain duration. Consequently, the sum of squares, the normalized power spectrum, and the enveloping curve function in

收稿日期:2008-10-14; 修订日期:2009-09-10

基金项目:国家科技支撑计划(2006BAD20B03);自然科学基金重大计划(90715038)

作者简介:徐国栋(1974-)男,博士,主要从事结构抗震减灾方面的研究。E-mail:gdxu@ires.cn

通讯作者:史培军(1959-)男,教授,主要从事灾害风险管理方面的研究。E-mail:spj@bnu.edu.cn

time domain are three essential factors of the ground motion based on the power spectrum model.

Key words: power spectrum; sum of squares; envelope; artificial ground motion

引言

目前对地震动随机特性的研究和描述,主要集中在地震动谱模型(包括反应谱、功率谱、时-频谱等)、相位模型及它们的统计特征方面。

基于反应谱理论的设计谱主要适用于建筑结构的弹性分析。中国抗震规范采用的地震动设计谱是分类统计的平均值,按照统计学的基本概念,从理论上讲,为确保安全,设计谱要取平均值加上一定倍数的标准差,但是目前除了特别重要的工程,一般都没有这样考虑。取反应谱的平均值来作为设计谱,对于建筑结构安全性保证的解释大体如下:真实地震动反应谱曲线随频率围绕平均反应谱上下波动的幅度较大,而结构的真实频率难以准确估计,如果结构在地震作用下开始有较大的反应,结构构件会屈服而产生塑性,由于非线性而产生变频效应,可以使结构地震反应变小,使结构在地震作用下的动力反应基本上符合平均谱。

对于结构在地震动作用下的非线性特性,则需要引入延性系数或等效阻尼的方法对弹性谱进行折减,来评估建筑结构非线性反应的大小(Anil K. Chopra, 1999; Peter Fajfar, 1999)^[1,2]。当对建筑结构进行非线性动力时程分析时,本文认为如果用基于结构弹性假设前提下的平均光滑的设计反应谱作为目标谱,生成的人工地震动时程可能会弱化地震动的随机特性,用这样的人工地震动时程作为输入来分析建筑结构的非线性动力反应,并不是很理想的。

对建筑结构进行非线性时程分析时,用基于功率谱的人工地震动作为输入,不会明显弱化地震动的随机特性,也不会因结构是否为弹性而发生变化,应当是一种更为合理的方法。直观说来,功率谱和相位谱才是地震动信号最本质最原始的特征,这是基于时域信号与傅里叶谱完全等价的观点,而傅里叶谱可分解为幅值谱和相位谱。基于这两个设计参数获得的地震动可以称之为设计地震动。相位谱不仅控制了地震动的频率非平稳性,还对地震动形状有明显影响。但是由于相位谱的复杂性,本文不直接使用相位谱,而是通过目标时域包线函数来间接控制相位谱。反应谱虽然也反映了地震动的特性,但是并不能充分反映地震动相位谱和功率谱这两个基本特征。

功率谱模型是一种较早的地震动随机模型。早在1947年Housner就将地震动视为平稳随机过程,用白噪声来模拟地震动的频谱特性^[3]。Kanai于1957年进一步提出了一种过滤白噪声的平稳地震动模型,即Kanai谱^[4]。但是Kanai谱模型在低频段和高频段与地震动的真实情况有出入,尤其是夸大了低频段的能量,且零频分量不为零,这样就不能满足地震动的速度和位移是有限值的要求。为了改善和修正金井清功率谱模型对高频段和低频段能量的不合理夸大,一些研究人员引入了低频和高频修正项,对金井清谱进行了修正,如胡聿贤、周锡元引入低频减量来修正金井清谱密度函数^[5];Penzien提出的"双过滤"加速度功率谱模型^[6];欧进萍等在金井清谱的基础上引入高频修正项^[7];杜修力等引入低频和高频修正项^[8]。这些研究工作使地震动功率谱模型更为合理,而且给出了谱参数的确定方法,使之能方便地应用于结构的抗震分析。但是用目标功率谱生成的随机平稳地震动时程,需引入包线函数进行幅值非平稳化处理,这样会改变地震动的功率谱,使之偏离目标谱。

Ohsaki最早强调了地震加速度时程的相位谱在模拟强地震动时程时的重要性,分析了地震动时程相位谱和相位差谱的频数分布,认为地震动时域包线的形状与相位差谱的频数分布曲线在一定程度上是相似的;相位波与地震动时程曲线在强度包线上非常相似^[9]。胡聿贤等、朱昱等、金星等的研究工作进一步肯定了相位谱对地震动波形的控制作用,并认为相位差谱可近似视为对数正态分布的随机函数^[10-13]。但是由于相位谱(或相位差谱)太过复杂,本文则通过调整地震动波形(即时域包线函数),来间接控制地震动的相位谱或相位差谱。

地震动的时域包线函数描述了地震动在时域的振幅分布情况,是一个比较重要的物理量,霍俊荣等研究了地震动包线函数的控制量及衰减规律^[14]。人工合成地震动如果不仅符合目标谱,而且符合时域目标包线,人工地震动在频域和频域上的能量分布将会更合理一些。

目前地震动时-频谱模型是研究的一个热点。Priestley提出了渐近功率谱模型^[15,16];梁建文则直接由

渐进谱理论,导出了非平稳地震动过程模拟的一个谱表示方法^[17,18];张翠然等提出了一种以渐近谱为目标谱的生成幅值和频率非平稳地震加速度时程的迭代方法^[19]。这些方法建立在非平稳随机过程的渐进谱理论之上,引入了随时间变化的渐进功率谱来模拟非平稳地震动过程,比较好地解决了地震动过程模拟的幅值非平稳和频率非平稳问题。但是目前常用的时频谱模型在分析一些简单时频变人工信号的线性组合时,给出的时频谱图并不是十分理想^[20],对于复杂的地震动信号给出的时频谱图就更不理想^[21],用时频分析方法来准确描述地震动这种复杂信号的时频变化还有很多工作要做。

本文在传统的地震动功率谱模型基础上,对地震动的波形进行调整,使合成出的地震动不仅符合目标功率谱,还符合目标包线函数。建立合理的并被普遍接受的地震动功率谱模型及人工地震动合成方法,对于研究非线性结构体系的地震响应分布特性有比较重要的意义。

1 基于功率谱模型和包线函数的地震动三要素

地震动反应谱模型的主要物理量是地震动峰值 PGA 和放大系数 β 谱(频谱)。功率谱的地震动模型与反应谱模型有着明显不同,作者认为平方和、归一化功率谱或相应的归一化自相关函数、时域包线函数是功率谱模型的主要物理量^[22-24]。

在常用的功率谱模型中(白噪声谱、Kanai 谱、Penzien 谱等)常把基岩白噪声谱强度值 S_0 作为功率谱强度大小的参数。作者认为用 S_0 作为功率谱强度大小的参数并不合适,首先基岩谱为白噪声模型这一假设与真实地震动的震源谱有较大出入,另外白噪声谱模型的大小也应当用平方和来量度,而不是用谱强度值 S_0 。详细论述如下:

(1) 根据巴什瓦定理,如果信号 $x(t)$ 在 $-\infty \sim +\infty$ 平方可积:

$$SS = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) df = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t)]^2 dt$$

(1)

其中 f 为频率, $S(f) = |\int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi f i t} dt|^2$ 是信号 $x(t)$ 的功率谱, i 为虚数单位, SS 为平方和(sum of squares)。由此可以看出,平方和有明确的物理意义,是随机信号的总能量参数,功率谱与频率轴所围成的面积就是平方和。

严格说来,平稳随机信号的平方和是无穷大的,应当用平方平均值(MS),即单位时间上的平方和。本文中所研究的有界有限持时非平稳信号(如地震动信号),直接用平方和作为信号能量参数;对于平稳随机信号,实际数值模拟中只能生成一定持时的信号样本,这时平方和则是指用平稳信号样本的持时乘以平方平均值(MS)。

(2) 自相关函数 $R(\tau)$ 的归一化是用 $R(0)$ 去除自相关函数 $R(\tau)$,而 $R(0)$ 在数值上就是平方和,即功率谱与频率轴所围面积的代数和。归一化自相关函数经傅氏变换后得到归一化的功率谱,这个归一化的功率谱与频率轴所围面积的代数和等于 1,也就是说功率谱除以平方和才得以归一化。考虑到功率谱归一化过程,也应当用平方和作为谱强度大小的量度。

(3) 对一定带宽的功率谱模型,只要平方和相同,不论功率谱形状如何,不论功率谱是平滑的还是锯齿状波动的,也不论功率谱在频域上频带的分布,如果辅以均匀分布的随机相位,合成平稳随机时程样本的振幅或振动强度基本相同。附录对这个结论给出了理论上的证明,下面本文将通过数值模拟来验证这个结论的合理性。

构造 6 个功率谱样本,4 个为有限带宽白噪声,2 个为 Penzine 谱模型,它们都有相同的平方和,与形状有关的参数如表 1 和表 2 所示:

表 1 有限带宽白噪声模型的参数值
Table 1 The parameter values of white noise with limited-band width

有限带宽白噪声	带 宽	频带范围/Hz	谱值大小(无量纲)	平方和(无量纲)
01#	5	1 ~ 6	15	75 × 2
02#	5	10 ~ 15	15	
03#	15	5 ~ 20	5	
04#	25	0 ~ 25	3	

表 2 Penzien 谱模型的参数值
Table 2 The parameter values of Penzien spectrum model

Penzien 谱	阻尼比 $\xi_g = \xi_f$	场地特征周期 ω_g	ω_f	平方和(无量纲)
01#	0.5	$2\pi \times 2 \text{ rad/s}$	$0.15\omega_g$	75×2
02#	0.1			

由于功率谱为偶函数,这里只画出频率大于 0 的部分,如图 1 所示。本文由功率谱获取幅值谱,再结合均匀分布的随机相位获取平稳地震动时程,如图 2 所示。

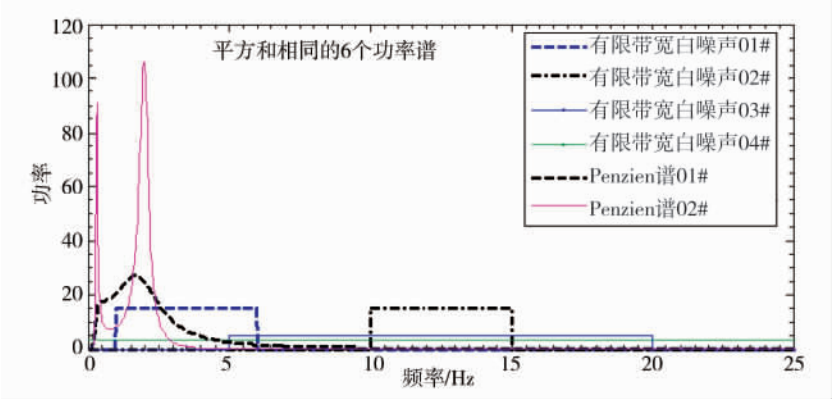


图 1 本节所用的 6 个功率谱模型

Fig. 1 Six power-spectrum models used by the section

这里采样时间间隔 $dt = 0.02 \text{ s}$,采样点数为 $N = 2\,048$ 。

图 2 比较了 6 个谱模型所对应的平稳随机样本,可以看出平稳随机样本的振动幅度相差不大。为定量地评价平稳随机样本的振动幅度,这里定义信号的平均振动幅度:

$$\bar{A} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| \, dt = \frac{1}{T} \sum [|x(t_j)| \Delta t] \tag{2}$$

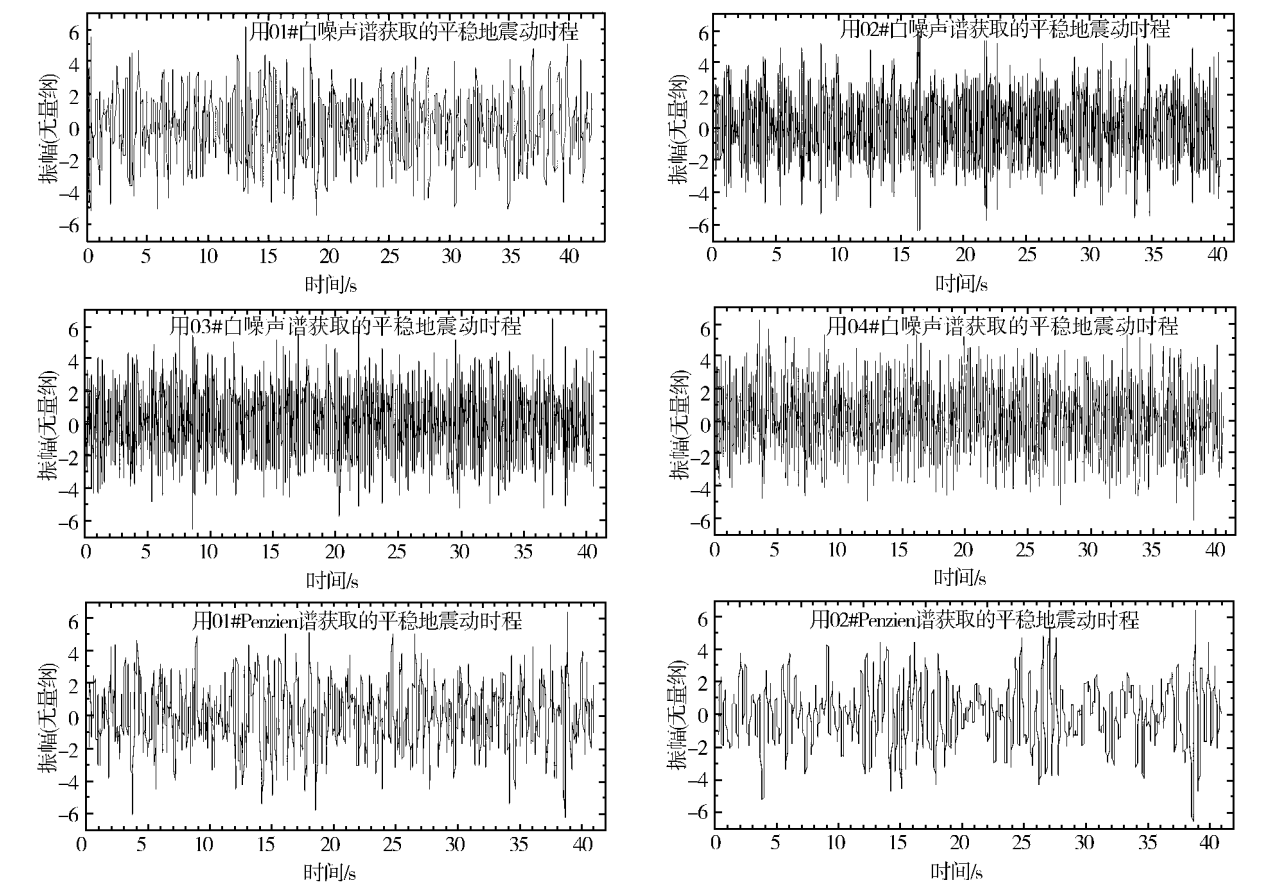


图 2 分别相应于 6 功率谱模型的 6 个平稳随机信号样本

Fig. 2 Six stationary-random signals corresponding to six power spectrum models respectively

这 6 个功率谱模型分别对应的 6 个平稳随机信号样本的平均振幅见表 3 所示。

表 3 6 个平稳随机信号样本的平均振幅
Table 3 The mean values of the amplitude of the six stationary – random signals

功率谱模型	不同随机相位下的平均振幅			
	随机相位 01	随机相位 02	随机相位 03	随机相位 04
01#白噪声模型	1.5301	1.5419	1.5571	1.5145
02#白噪声模型	1.5526	1.5307	1.5473	1.5204
03#白噪声模型	1.5502	1.5365	1.5324	1.5423
04#白噪声模型	1.5329	1.5238	1.5215	1.5273
01#Penzien 谱模型	1.5185	1.5055	1.5465	1.5088
02#Penzien 谱模型	1.5229	1.5073	1.5515	1.5179

由表 3 可以看出,在功率谱平方和相同的条件下,虽然功率谱的形状和频带(或主频)有明显不同,但获取的平稳随机样本有着基本相同的平均振动幅度。附录中的证明在理论上虽然不是很严格的,但数值试验的结果表明由一定带宽的功率谱模型获取的平稳随机样本,平方和不仅决定了随机平稳信号的总能量,而且对于随机平稳信号的振幅,也起了重要控制作用。

基于以上三个方面的分析,本文认为用平方和作为功率谱大小的量度是合理的。另外归一化功率谱是功率谱的形状函数,描述了平稳随机信号的能量在频域的分布特点;时域包线函数则描述了地震动幅值在时域上的大体分布情况,因此平方和、归一化功率谱和时域包线函数可视为功率谱模型的地震动三要素。

基于功率谱模型的地震动三要素与传统的基于反应谱理论的地震动三要素虽然并不矛盾,但是基于功率谱的地震动模型与基于反应谱的地震动模型无论是在特征物理量上、数值模拟方法上,还是适用范围上还是有比较大的差异。反应谱理论主要适用于线弹性结构,对于非线性结构,则需要引入延性系数或等效阻尼对弹性谱进行折减,或直接使用弹塑性反应谱。由此看来,较为合理完善的地震动功率谱模型更加适用于建筑结构的非线性时程分析。

2 以功率谱和包线函数为双目标函数的地震动合成

基于功率谱的人工地震动合成是由幅值谱辅以 $0 \sim 2\pi$ 的均匀分布的相位,首先生成平稳地震动时程,再乘以时域包线进行非平稳化,如下式所示:

$$X_s(t) = f(t)X(t) \tag{3}$$

其中 $X(t)$ 是平稳地震动时程,而 $f(t)$ 是表示幅值非平稳的时间函数,即时域包络线函数, $X_s(t)$ 为非平稳地震动时程。时域包线函数的确定详见文献[31]。

但是这样做会使非平稳地震动时程的功率谱与目标谱不一致。本文对基于功率谱的人工地震动合成方法进行了一些改进:(1)用多次峰点法计算包线^[31],并采用多次迭代,使人工地震动时程的功率谱不仅与目标功率谱完全相同,而且地震动时程的波形基本符合目标包线;(2)对加速度时程的基线进行调整,使速度时程和位移时程更为合理。另基线调整对地震动功率谱零频外的部分影响很小。

以功率谱和包线函数为双目标函数人工地震动合成方法的具体算法如图 3 所示。

在下面的算例中本文采用 Penzien(1975 年)提出的“双过滤”加速度功率谱模型:

$$S(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}}{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_g^2})^2 + 4\xi_g^2 \frac{\omega^2}{\omega_g^2}} \frac{\frac{\omega^4}{\omega_f^4}}{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_f^2})^2 + 4\xi_f^2 \frac{\omega^2}{\omega_f^2}} S_0 \tag{4}$$

其中 ω_f 和 ξ_f 分别为考虑低频滤波效应的频率和阻尼参数,一般取 $\omega_f = 0.1 \sim 0.2 \times \omega_g$, $\xi_f = \xi_g$ 。这里取 $\omega_g = 4\pi \text{ rad/s}$, $\omega_f = 0.15\omega_g$, $\xi_f = \xi_g = 0.5$,得到的目标功率谱如图 4 所示。

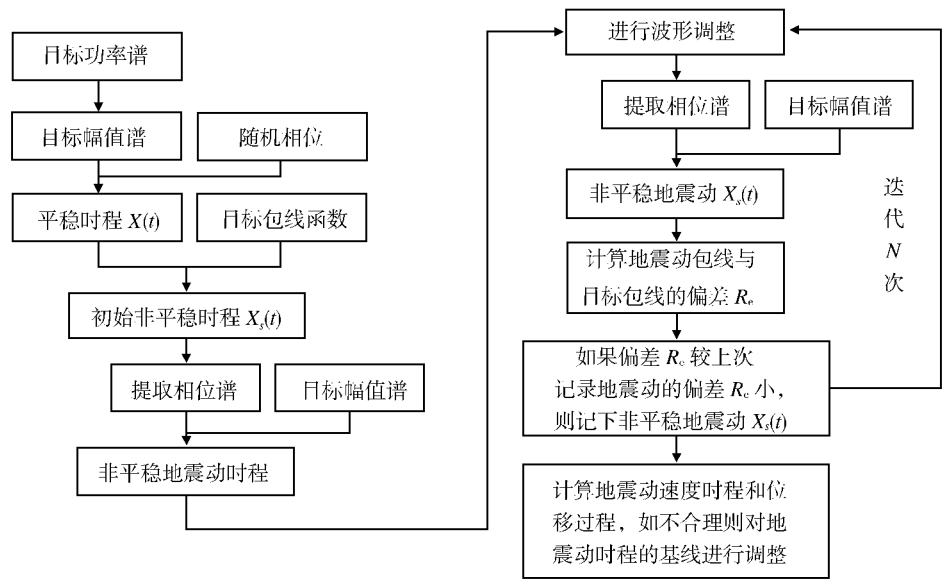


图 3 以功率谱和包线函数为双目标函数的人工地震动合成方法

Fig. 3 The synthesis method of ground motion with double target functions: the power spectra and time-domain envelope function

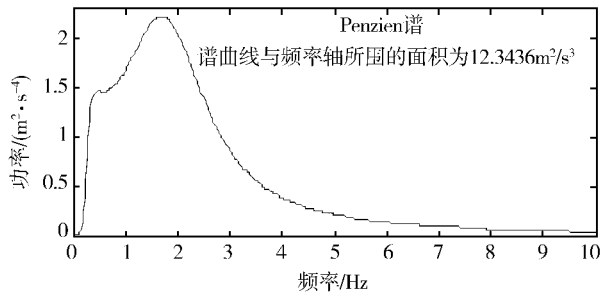


图 4 以 Penzien 谱作为目标功率谱

Fig. 4 The Penzien spectra as the target power spectra

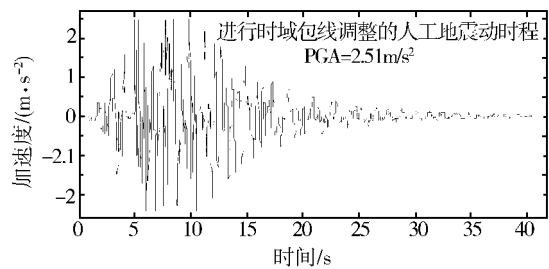


图 5 以 Penzien 谱和标准包线为双目标函数的人工地震动

Fig. 5 The manmade ground motion with double target functions: Penzien spectra and standard envelope

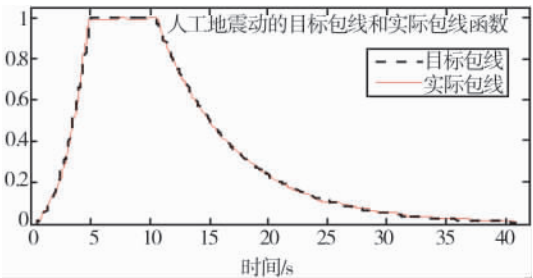


图 6 人工地震动三级包线和目标包线

Fig. 6 The third-order envelopes of the manmade ground motion and the target envelope

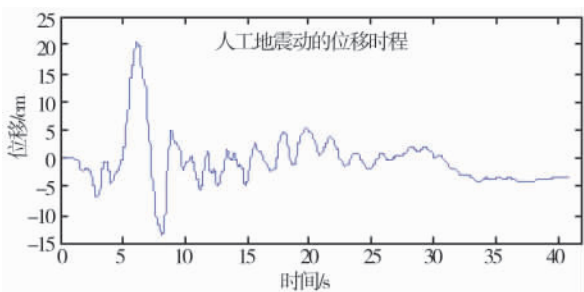
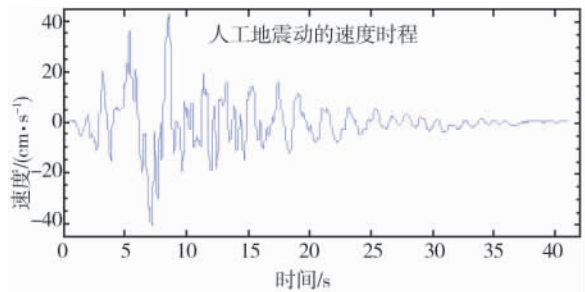


图 7 人工地震动相应的速度时程和位移时程

Fig. 7 The corresponding velocity and displacement time histories of the manmade ground motion

图 5 是以 Penzien 谱和标准包线函数为双目标函数的人工地震动时程, 它的功率谱与目标谱完全相同, 它的三级包线和目标包线见图 6 所示, 可以看出实际包线与目标包线比较符合。图 7 则是相应的速度时程和位移时程。

图 8 则是以 El Centro 波 S00E 分量的功率谱和三级包线函数为双目标函数的人工地震动时程^[31], 它的功率谱就是 El Centro 波 S00E 分量的功率谱, 它的目标包线是 El Centro 波 S00E 分量的三级包线, 由图 9 可以看出人工地震动的实际包线与目标包线比较符合。图 10 则是相应的速度时程和位移时程。由图 8 ~ 图 10 可以看出, 人工地震动时程与真实地震动时程非常相似, 而且有比较合理的速度时程和位移时程。

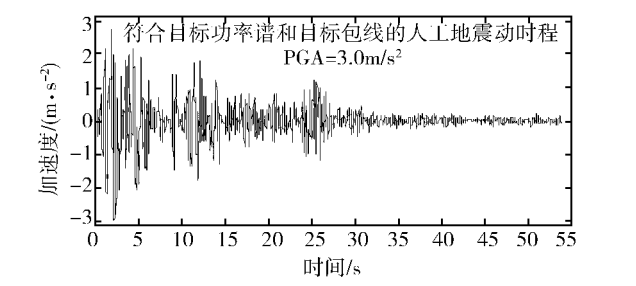


图 8 以 El Centro 波 S00E 分量的功率谱和三级包线为双目标函数的人工地震动
Fig. 8 The manmade ground motion with double target functions: the power spectra and third-order envelope of the S00E component of El Centro

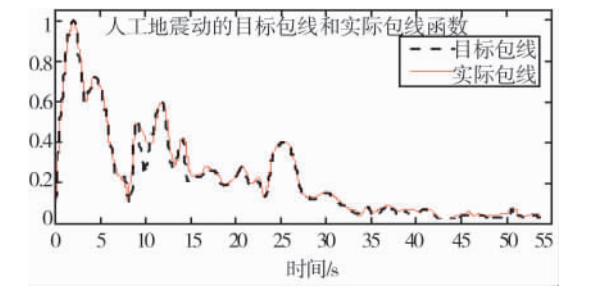


图 9 人工地震动三次包线和目标包线
Fig. 9 The third-order envelopes of manmade ground motion and the target envelope

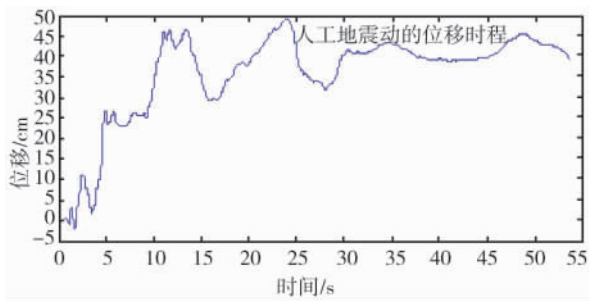
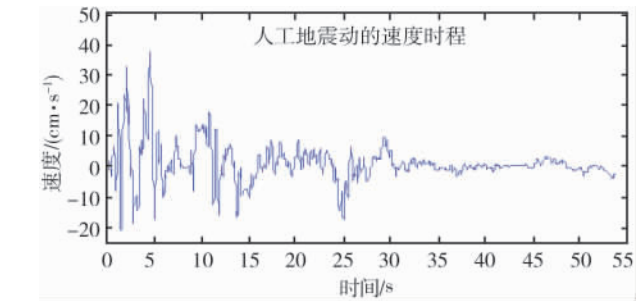


图 10 人工地震动相应的速度时程和位移时程
Fig. 10 The corresponding velocity and displacement time histories of the manmade ground motion

3 结语

本文给出了以目标功率谱和目标包线为双目标函数的人工地震动合成方法。

传统的基于功率谱的人工地震动合成是由幅值谱辅以 $0 \sim 2\pi$ 的均匀分布的相位, 首先生成平稳地震动时程, 再乘以时域包线进行非平稳化。但是这样会使获取的非平稳地震动时程的功率谱偏离目标谱。为此本文给出了以目标功率谱和目标包线为双目标函数的人工地震动合成方法, 通过多次迭代使人工地震动波形基本符合目标包线函数, 最后对加速度基线进行调整, 使速度时程和位移时程更为合理。

当对建筑结构进行非线性动力时程分析时, 本文认为如果用基于弹性反应谱的平滑化设计谱作为目标谱, 生成的人工地震动时程可能会弱化地震动的随机特性, 用这样的人工地震动时程作为输入来分析评估建筑结构的非线性动力反应, 可能不是很理想的。由于采用基于功率谱的人工地震动作为输入不会明显的弱化地震动的随机特性, 也不会因为结构是否为弹性而有所影响, 应当是一种更为合理的选择。基于时域信号与傅里叶谱完全等价的观点, 单一的功率谱不能全面反映地震动的特性, 功率谱和相位谱才是地震动信号的基本特征。而傅里叶谱可分解为功率谱和相位谱。基于这两种参数获得的地震动才可以称之为设计地震动。

本文认为平方和具有明确的物理意义, 是随机信号的总能量参数, 并通过理论分析和数值计算, 认为对一定带宽的功率谱模型, 只要平方和相同, 不论功率谱形状如何, 不论功率谱是平滑的还是锯齿状波动的, 也

不论功率谱在频域上频带的分布,如果辅以均匀分布的随机相位,合成平稳随机信号样本的振幅特性基本相同。平方和不仅决定了随机平稳信号的总能量,而且对于随机平稳信号的振幅也能起到重要控制作用,是一个不错的物理量。本文详细论述了平方和是功率谱大小和地震动能量的量度,认为平方和、归一化功率谱、包线函数应该成为地震功率谱模型的主要物理量。

附录

对于某一窄带过程(双边谱),它的中心频率为 f_0 ,带宽为 Δf ,功率谱值为 P ,平方和 $S_s = 2P\Delta f$,则信号样本 $x(t)$ 为:

$$\begin{aligned} x(t) &= 2\sqrt{P} \times \Delta f \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) = 2\sqrt{P} \times \Delta f \sqrt{\Delta f} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \\ &= 2\sqrt{\frac{S_s}{2}} \sqrt{\Delta f} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (A1)$$

其中 φ_0 为随机相位。

一定带宽(双边谱)的平稳随机信号是由 N 个窄带信号叠加而成,设每个窄带信号的带宽为 Δf ,中心频率为 f_j ,功率谱值 $P(f_j)$ 是频率 f 的偶函数,每个窄带的平方和 $S_s(f_j) = 2 \times P(f_j) \times \Delta f$,相位 φ_j 是频率 f 的奇函数,且在 $0 \sim 2\pi$ 内均匀分布,则一定带宽的平稳随机信号 $y(t)$ 可写为:

$$y(t) = 2 \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{S_s(f_j)}{2}} \sqrt{\Delta f} \cos(2\pi f_j t + \varphi_j) \quad (A2)$$

平稳随机信号样本 $y(t)$ 的具体数值由相位 φ_j 、谱值 $P(f_j)$ 等确定,但是我们关注的是信号样本 $y(t)$ 振幅或振动强度的估计值,如果信号 $y(t)$ 振幅或强度的估计值取为所有窄带信号振幅的平方和开平方:

$$\bar{A}_{x(t)} = 2 \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\sqrt{\frac{S_s(f_j)}{2}} \sqrt{\Delta f} \right)^2} = 2 \sqrt{\frac{SS}{2}} \times \sqrt{\Delta f} \quad (A3)$$

其中平方和 $SS = \sum_{j=1}^N S_s(f_j)$ 。注意到每个窄带信号的带宽 Δf 由时域信号的采样间隔 Δt 和采样总点数 N 确定,即

$$\Delta f = \frac{1}{N \times \Delta t} = \frac{1}{T_{\text{duration}}} \quad (A4)$$

其中 T_{duration} 是信号样本的持时。由此可以看出,在信号样本的持时 T_{duration} 确定的情况下,平稳随机过程 $Y(t)$ 的信号样本 $y(t)$ 的振幅或强度的依概率估计值只与平方和 SS 有关,与功率谱的形状和频带分布无关。

参考文献:

- [1] Chopra A K, Goel R K. Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, 1999.
- [2] Fajfar P. Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28: 979 - 993.
- [3] Housner G W. Characteristics of strong motion of earthquakes [J]. BSSA, 1947, 37(1): 19 - 31.
- [4] Kanai K. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of ground motion [M]. Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo University, 1957, 35: 306 - 325.
- [5] 胡聿贤,周锡元. 弹性体系在平稳和非平稳化地面运动下的反应[C]//地震工程研究报告集第一集. 北京:科学出版社, 1962:33 - 50.
- [6] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. New York: Mc Graw - Hill, 1993.
- [7] 欧进萍,牛荻涛,杜修力. 设计用随机地震动模型及其参数的确定[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 45 - 54.
- [8] 杜修力,胡晓,陈厚群. 强震地运动随机过程模拟[J]. 地震学报, 1995, 17(1): 103 - 109.
- [9] Ohsaki Y. On the significance of phase content in earthquake ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1979, 7(5): 427 - 439.

[10] 胡聿贤,何训. 考虑相位谱的人造地震动反应谱的拟合[J]. 地震工程与工程震动, 1986, 6(2):37-51.

[11] 朱昱,冯启民. 相位差谱的分布特征和人造地震动[J]. 地震工程与工程震动, 1992, 12(1):37-44.

[12] 金星,廖振鹏. 地震动强度包线函数的理论研究[J]. 地震学报, 1994, 16(4):519-525.

[13] 金星,廖振鹏. 强地震动相位特征的统计规律性[J]. 地震学报, 1994, 16(1):106-110.

[14] 霍俊荣,胡聿贤,冯启民. 地面运动时程强度包线函数的研究[J]. 地震工程与工程震动, 1991, 11(1):1-12.

[15] Priestley M B. Evolutionary spectra and non-stationary random process[J]. Statst. J, R, Soc. Ser. B, 1965, 28(2):204-230.

[16] Priestley M B, Power spectral analysis of non-stationary processes[J]. J Sound Vibra., 1967, 6(1):86-97.

[17] 梁建文. 非平稳地震动过程模拟方法(I) [J]. 地震学报, 2005, 27(2):213-228.

[18] 梁建文. 非平稳地震动过程模拟方法(II) [J]. 地震学报, 2005, 27(3):346-351.

[19] 张翠然,陈厚群,李敏. 根据渐近谱的统计规律生成地震动加速度时程[J]. 地震学报, 2007, 29(4):409-418.

[20] 徐国栋,周锡元,郭明珠,等. 典型振动信号时-频分析方法研究[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2):26-36.

[21] 徐国栋. 强震地面运动超随机特性的若干研究[D]. 北京:北京工业大学, 2006.

[22] 徐国栋,周锡元,董娣,等. 强震地面运动的超随机特性研究[J]. 地震工程与工程震动, 2005, 25(2):1-9.

[23] 徐国栋,周锡元,闫维明,等. 考虑超随机特性的人工地震动合成[J]. 地震工程与工程震动, 2005, 25(4):11-17.

[24] 徐国栋,周锡元,闫维明. 强震地面运动超随机特性的几点注记[J]. 地震工程与工程震动, 2007, 27(1):7-15.

[25] Boore D M. Simulation of ground motion using the stochastic method [J]. Pure Appl. Geophys, 2003(160):635-676.

[26] Wang Guoquan, Boore D M, Igel H. Some observations on colocated and closely-spaced strong ground motion records of the 1999, Chi-Chi Taiwan Earthquake[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 2003, 93:674-693.

[27] Trifunac M D. A method for synthesizing realistic strong ground motion[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1971, 61:1739-1753.

[28] Wong H L, Trifunac M D. Generation of artificial strong motion accelerograms[J]. Earthq. Eng. Struct. Dyn., 1979, 7:509-528.

[29] 蔡长青,沈建文. 人造地震动的时域叠加法和反应谱整体逼近技术[J]. 地震学报, 1997, 19(1):71-78.

[30] 赵凤新,张郁山. 拟合峰值速度与目标反应谱的人造地震动[J]. 地震学报, 2006, 28(4):429-437.

[31] 徐国栋,史培军,周锡元. 基于目标反应谱和包线的地震动合成[J]. 地震工程与工程震动, 2010, 30(1):1-7.