

文章编号: 1000-4750(2008)03-0043-06

工程地震动随机功率谱模型的分析与改进

*李英民^{1,2}, 刘立平^{1,2,3}, 赖 明⁴

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

3. 重庆交通科研设计院结构动力所, 重庆 400067; 4. 建设部科技司, 北京 100835)

摘 要: 地震动模型的多样化增加了工程应用中地震动输入的选择机会, 同时也增大了选择的难度。首先对常用的地震动功率谱模型进行了系统综述, 提出地震动功率谱模型应满足地震动过程能量有限和零频含量为零的基本条件, 对比分析了 9 种常用随机功率谱模型的滤波特性和能量有界性, 结合地震动功率谱模型的基本要求, 给出了建议的地震动功率谱模型, 并对其合理性进行了分析。

关键词: 地震动; 功率谱; 模型化; 地震工程; 随机振动

中图分类号: O324 文献标识码: A

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF POWER RANDOM SPECTRA OF STRONG GROUND MOTIONS FOR ENGINEERING PURPOSE

*LI Ying-min^{1,2}, LIU Li-ping^{1,2,3}, LAI Ming⁴

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technique for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. Structural Dynamics Laboratory, Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067, China;

4. Department of Science and Technology, Ministry of Construction, Beijing 100835, China)

Abstract: There are lots of proposed analytical models for strong ground motions, but it is difficult to choose a befitting one. Therefore, in the view point of practical engineering, the power random spectra of strong ground motions are summarized. Then the consideration of two basic conditions (the energy of strong ground motions is finite and the power random spectrum is zero when the frequency is zero, which are necessary to power random spectra of strong ground motions) is taken. Based the two basic conditions and the analytical result of 9 power random spectrums, an improved power spectrum of strong ground motions model is putted forward, and the rationality of the improved power spectrum is analyzed.

Key words: strong ground motions; power spectrum; modeling; earthquake engineering; random vibration

地震动记录时程的分析、预测及模拟等需要借助一定的数学模型来完成。作为地震学和地震工程学的重要内容之一, 地震动的模型化研究在过去的几十年内取得了令人瞩目的进展, 有多种模型相继被提出和改进。多种多样的地震动模型增加了工程应用中地震动输入的选择机会, 同时也增大了选择模型的难度, 研究者需要根据所研究问题的目的和

性质对其要求的输入模型作出自己的判断。

本文综述了地震动功率谱模型的常用形式, 提出地震动功率谱模型应满足地震动过程能量有限和零频含量为零的基本条件, 对比分析了 9 种常用随机功率谱的滤波特性和能量有界性, 结合地震动功率谱模型的基本要求, 提出了改进的地震动功率谱模型, 并对其合理性进行了分析。

收稿日期: 2006-07-27; 修改日期: 2007-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50008017); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0765)

作者简介: *李英民(1968—), 男, 山东无棣人, 教授, 博士, 主要从事地震工程、结构抗震研究和城市防灾减灾研究(E-mail: liyingmin@cqu.edu.cn);

刘立平(1971—), 男, 安徽太湖人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震、结构工程研究(E-mail: zhhlip@163.com);

赖 明(1965—), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士, 主要从事风工程、地震工程研究(E-mail: cqlaiming@163.com).

1 地震动功率谱模型的若干形式

地震动通常被视为过滤噪声过程。许多学者在 Kanai 和 Tajimi 所奠定的 K-T 谱的基础上尝试使用不同形式的线性滤波器,用以改进地震动的功率谱模型。这些模型主要分为一次滤波形式和多重滤波形式两类^[1]。

一次滤波形式的功率谱模型将地震动过程视为线性滤波器对白噪声激励的输出,可以理解为具有固有频率 ω_g 和阻尼比 ξ_g 的 SDOF 线性振子(或质量-弹簧-阻尼器系统)在白噪声输入下以不同比例分别作用于弹簧和阻尼器的结果。著名的 K-T 谱即是在弹簧和阻尼器等同受迫时的结果,记为 $S_{K-T}(\omega)$:

$$S_{K-T}(\omega) = \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{(1 - (\omega/\omega_g)^2)^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} S_0 \quad (1)$$

式中, S_0 为白噪声激励的功率谱。一般认为 K-T 谱可以较好地反映均匀地基对地震波的滤波作用。

常中仁^[2]把地震动看作由基岩和覆盖土层所组成的两自由度系统在白噪声激励下的输出,试图通过基岩和覆盖土层的耦合作用在一定程度上反映出地震波在传播过程中的折射、反射、透射等现象。可以推出^[3]:

$$S_x(\omega) = \frac{A^2 + B^2}{C^2 + D^2} S_0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} A = -4\omega^2 \xi_g \xi_r \omega_g \omega_r + \omega_g^2 \omega_r^2 \\ B = 2\omega_g \omega_r (\xi_g \omega_r + \xi_r \omega_g) \omega \\ C = \omega^4 - \omega^2 (\omega_g^2 + (1 + \mu) \omega_r^2) + A \\ D = -\omega^3 (2\xi_g \omega_g + 2(1 + \mu) \xi_r \omega_r) + B \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω_r 、 ξ_r 分别为基岩固有频率和阻尼比; μ 为覆盖土层与基岩的质量比。

一些研究者不满足于功率谱的一次滤波形式,在 K-T 谱的基础上提出了双重或多重滤波形式的地震动模型。这类模型又可以分为滤波器串联和滤波器并联两种。

滤波器串联将地震动过程视为输入依次通过各个滤波器的输出结果。研究最多的是双重过滤噪声模型,即在 K-T 谱的基础上进行再次过滤得到地震动过程:

$$S_x(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{K-T}(\omega) \quad (4)$$

其中滤波器 $H(\omega)$ 形式多样,比较具有代表性的如胡聿贤等^[4]采用的一阶高通滤波器:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{\omega^2}{\omega^2 + \omega_h^2} \quad (5)$$

式中, ω_h 为高通滤波器的高通下限频率,用以消除 K-T 谱含有零频分量的不合理现象。

Clough 等^[5]采用具有 SDOF 振子形式的二阶高通滤波器:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{(\omega/\omega_h)^4}{(1 - (\omega/\omega_h)^2)^2 + 4\xi_h^2(\omega/\omega_h)^2} \quad (6)$$

牛荻涛^[6]、欧进萍^[7]等考虑基岩地震动为 Markov 有色谱,用一阶低通滤波器修正 K-T 谱:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{\omega_l^2}{\omega_l^2 + \omega^2} \quad (7)$$

式中, ω_l 为低通滤波器的低通上限频率,用以反映基岩的滤波特性,并建议取 $\omega_l = 8\pi \text{ rad/s}$ 。

叶天义^[8]、赖明^[9]等则视基岩为固有频率 ω_r 、阻尼比 ξ_r 的 SDOF 振子更完整地考虑其滤波特性,则:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1 + 4\xi_r^2(\omega/\omega_r)^2}{(1 - (\omega/\omega_r)^2)^2 + 4\xi_r^2(\omega/\omega_r)^2} \quad (8)$$

洪峰等^[10]在式(5)的基础上提出了三阶高通滤波器,即:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{\omega^6}{\omega^6 + \omega_h^6} \quad (9)$$

杜修力^[11]等注意到地震学方法在处理长周期地震动方面的优势,通过对张敏政所提出的考虑传播途径和局部场地条件影响的地震动加速度傅氏谱的简化,提出用串联的低通和高通滤波器对 K-T 谱进行过滤,即:

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (D\omega)^2} \frac{\omega^2}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (10)$$

式中: D 为反映基岩特性的谱参数; ω_0 为低频拐角频率。实质上,式(10)为式(5)和式(7)的乘积。该模型中的高通滤波器与 Brune 震源剪切波加速度傅氏谱模型相一致,被认为是能够较好地体现工程学方法和地震学方法优点的模型之一。

另一类多重滤波形式的地震动模型把功率谱表示为各个滤波器响应的和,实质上是滤波器并联的结果,各滤波器通常采用相同的形式。例如, Yamada 等提出的多重过滤功率谱为多个二阶线性滤波器响应的和:

$$S_x(\omega) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \frac{\omega^2}{(\omega_j^2 + \beta_j^2 - \omega^2)^2 + 4\beta_j^2 \omega^2} S_0 \quad (11)$$

式中, α_j 为第 j 个滤波器的权重系数。而王广军^[12]曾提出采用多个 K-T 谱之和的想法。

除此之外, 有些研究者并不注重功率谱模型的物理意义而更侧重于模型与地震动记录数据之间的拟合程度。但这类形式的地震动模型目前较少采用。

2 地震动功率谱模型的基本要求

地震动功率谱模型应满足地震动过程能量有限和消除零频含量两个基本条件。能量有限是对高频的要求, 而消除零频含量是对低频的要求。

地震动功率谱的随机模型首先应满足能量有限的要求, 即地面加速度过程 $x(t)$ 的方差应为有限值:

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_x(\omega) d\omega < \infty \quad (12)$$

为此, $S_x(\omega)$ 随 ω 的衰减至少应比 ω^{-1} 更快。

定义随机过程的第 k 阶谱为:

$$\lambda_k = \int_0^\infty \omega^k S_x(\omega) d\omega, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

称 $\omega_c = \lambda_1 / \lambda_0$ 为谱中心频率, $\omega_r = (\lambda_2 / \lambda_0)^{1/2}$ 为谱关于原点回转半径, $\varepsilon = (1 - \lambda_1^2 / (\lambda_0 \lambda_2))^{1/2}$ 为谱带宽系数。过程的平均穿零率和平均峰值率可表示为 $\nu_0 = \omega / \pi_r$, $\nu_m = \omega_s / 2\pi$, 式中 $\omega_s = (\lambda_4 / \lambda_2)^{1/2}$ 。实际地震动过程的中心频率、回转半径及其平均穿零率和平均峰值率均不可能无穷大^[13-14]。要使上述参数存在, 则二阶和四阶谱矩均应有界, 即是说, 加速度过程的一阶导数过程和二阶导数过程的方差均应为有限值, 这就要求功率谱模型随 ω 的衰减至少应比 ω^{-4} 还要快。

当然, 地震动过程的能量应是分配在有限带宽的频率区间上, 因而过程方差及其一阶、二阶导数过程的方差均有界的要求较易得到满足。事实上, 功率谱在极高频区间上的取值对一般工程结构影响不大, 只是这样要求在理论上更为合理一些。

一个值得注意的事实是, 地震动过程不仅是强度非平稳过程, 其频率含量亦呈现出明显的非平稳特性^[1,15-18]。已有的不少研究表明, 地震动频率含量非平稳特性因“瞬时共振”现象的存在而对某些情况下的结构反应具有不可忽略的影响^[1,18]。频率非平稳过程的穿零率和峰值率随时间呈逐渐减小趋势, 基于均匀调制模型的地震动过程则为等穿零率和等峰值率, 适当改进地震动功率谱模型易于使其具有与实际地震动过程更接近的谱特性。

另一方面加速度过程的功率谱应随着频率的减小而趋于零。零频含量的存在意味着地震终了时均

方地面位移不趋于零, 或者说位移反应谱趋于无限。

由于地面速度过程 $v(t)$ 和地面位移过程 $d(t)$ 的功率谱为:

$$S_v(\omega) = \frac{1}{\omega^2} S_x(\omega), \quad S_d(\omega) = \frac{1}{\omega^4} S_x(\omega) \quad (14)$$

根据广义积分的收敛准则, 若式(12)满足, 只要 $S_v(0)$ 或 $S_d(0)$ 存在, 则地面速度或地面位移方差自然也有界, 即:

$$\sigma_v^2 = \int_0^\infty \frac{1}{\omega^2} S_x(\omega) d\omega < \infty, \quad \sigma_d^2 = \int_0^\infty \frac{1}{\omega^4} S_x(\omega) d\omega < \infty.$$

例如, 对于 K-T 谱, 据式(14)可知, 随着 ω 趋于零, 地面速度和地面位移将趋于无穷, 这显然是不切实际的。过去虽然认识到这一点, 但或者是出于零频结构无现实意义的考虑, 或者是顾虑到零频含量的消除可能过低地估计低频含量, 许多对 K-T 谱的修正没有进行零频含量的消除。事实上, 下文的分析表明, 对于零频含量的消除, 只是限制了零频附近的极低频区域的谱值, 一般不至于造成工程感兴趣的低频含量低估。

虽然功率谱极高频成分和零频分量对实际工程结构的影响很小, 但如果在所付出的代价不大时, 在地震动频率谱模型中使地震动过程能量有限和消除零频含量不仅会使模型在理论上更加合理, 而且据此产生的地震动过程更易于接近实际地震动。

3 地震动功率谱模型的对比分析

下面对前述 9 种地震动功率谱模型的滤波特性和能量有界性进行对比分析。

3.1 滤波特性的对比分析

表 1 给出 9 种功率谱模型滤波特性的对比。除 K-T 谱和常中仁谱外, 其余 7 种均为多重滤波模型。K-T 谱在 $(0, \omega_g)$ 频段内的值总大于 1, 在 ω_g 处达到峰值 $1+1/(2\xi_g)^2$, 自 ω_g 以后单调衰减, 因而它实质上可理解为一低通滤波器对白噪声激励的输出。

为了更清楚地说明各模型的滤波特性, 图 1 给出了 8 种模型与 K-T 模型的对比。可以看出: 1) K-T 谱、常中仁谱、牛荻涛-欧进萍谱和叶天义-赖明谱等四种模型均含有零频含量, 其余模型则由于高通滤波器的使用而消除了零频含量; 2) K-T 谱为单峰型功率谱, 在此基础上再施加一个低通滤波器(如牛荻涛-欧进萍谱和叶天义-赖明谱)不仅不能消除零频含量, 而且仍然难以达到某些情况下需要构造双峰功率谱的目的, 相反地, 施加一个高通滤波器不仅可以有效地消除零频含量, 而且还易于构造双峰

功率谱; 3) Yamada 谱最适于反映多层地基上可能表现出的多峰功率谱特性。当然, 实际的地震动功率谱通常极不规则, 很难判断多峰模拟与单峰模拟

孰优孰劣。但是, 只要计算仍然方便, 采用多峰型功率谱模型可能更富有适应性。

表 1 9 种地震动功率谱模型的对比

Table 1 Differences in nine power spectra of strong ground motions

序号	模型简称	公式	滤波特性	零频	积分过程的零频谱值		导数过程的方差	
				含量	速度 $S_d(0)$	位移 $S_d(0)$	一阶(λ_2)	二阶(λ_4)
1	K-T 谱	(1)	一个二阶低通滤波器	有	无穷	无穷	无穷	无穷
2	常中仁谱	(2)	一个四阶低通滤波器	有	无穷	无穷	有界	无穷
3	胡聿贤-周锡元谱	(4),(5)	一个二阶低通滤波器和一个一阶高通滤波器串联	无	有界	无穷*	无穷	无穷
4	Clough-Penzien 谱	(4),(6)	一个二阶低通滤波器和一个二阶高通滤波器串联	无	有界	有界	无穷	无穷
5	牛荻涛-欧进萍谱	(4),(7)	一个二阶低通滤波器和一个一阶低通滤波器串联	有	无穷	无穷	有界	无穷
6	叶天义-赖明谱	(4),(8)	两个二阶低通滤波器串联	有	无穷	无穷	有界	无穷
7	洪峰-江近仁谱	(4),(9)	一个二阶低通滤波器和一个三阶高通滤波器串联	无	有界	有界	无穷	无穷
8	杜修力-陈厚群谱	(4),(10)	一阶低通滤波器、二阶低通滤波器和一阶高通滤波器串联	无	有界	无穷	有界	无穷
9	Yamada 谱	(11)	多个二阶高通滤波器并联	无	有界	无穷	无穷	无穷

*注: 该谱在提出时通过调整 K-T 谱的其它参数也能使位移 $S_d(0)$ 有界。

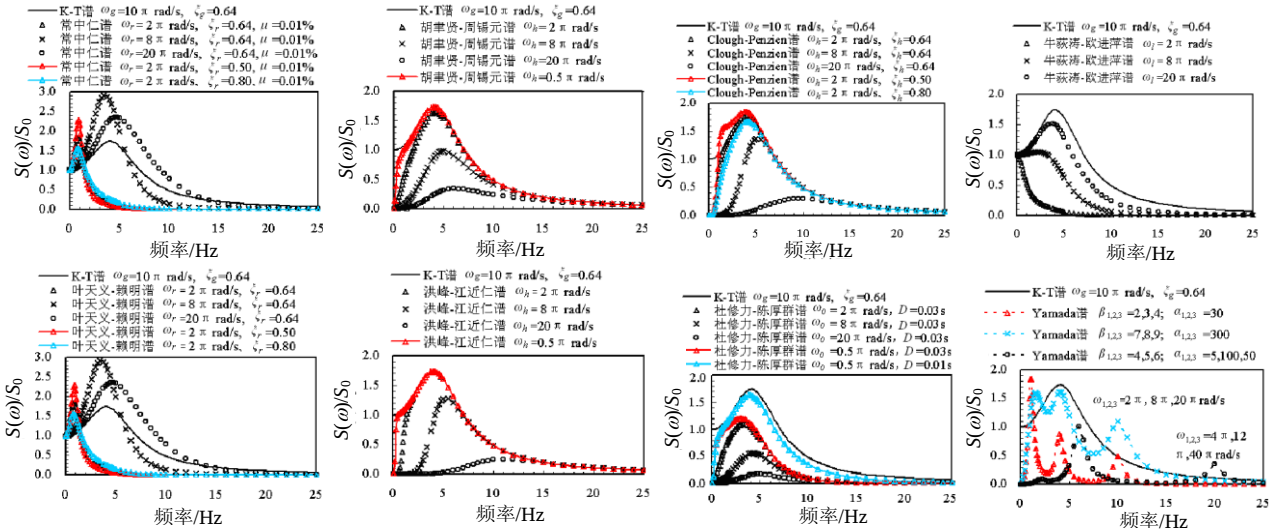


图 1 地震动功率谱模型的滤波特性

Fig.1 Filtering characteristic of the power spectra of strong ground motions

图 2 给出了 5 种双重过滤功率谱模型中所使用的单个滤波器对 K-T 谱的作用的对比。

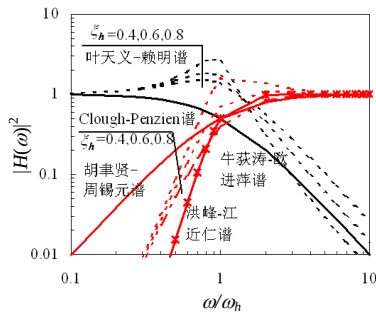


图 2 5 种双重过滤功率谱与 K-T 谱的对比

Fig.2 Ratios between the 5 power spectra to K-T spectrum

3.2 能量有界性的对比分析

由式(14)及各加速度功率谱模型表达式, 不难

得出速度和位移功率谱在零频处是否存在奇异点; 同时, 据广义积分的收敛准则可以判断加速度导数过程方差的有界性, 结果示于表 1, 可以发现一个令人遗憾的现象, 即过去关于 K-T 谱的若干改进几乎总是有些“顾此失彼”。附加一个高通滤波器有益于积分过程有界性的改善, 却无助于改善导数过程的有界性; 附加一个低通滤波器可以改善导数过程的有界性, 却无益于积分过程有界性的改善。同样, 单纯提高低通滤波器的阶数(如常中仁谱), 只能令导数过程有界, 其积分过程的功率谱仍然存在奇异点。杜修力-陈厚群谱可以说综合了低通和高通滤波器的特点, 是改进地震动 K-T 谱模型的一个值得肯定的方法, 只是需要评价其改进是否彻底。

4 建议的地震动功率谱模型和分析

4.1 建议的地震动功率谱模型

根据式(13), 要使一阶和二阶导数过程的方差有界, 则加速度过程的功率谱 $S_x(\omega)$ 中分母关于 ω 的阶次至少应比分子 ω 的阶次高于 4; 根据式(14), 要使一次和二次积分过程的功率谱在 $\omega=0$ 处不存在奇异点, 则加速度过程的功率谱 $S_x(\omega)$ 至少含有 ω^4 项。因此兼顾上述两方面要求的加速度功率谱模型可以考虑成白噪声经一个不低于二阶的高通滤波器、一个不低于二阶的低通滤波器和 SDOF 线性滤波器串联(次序可以互换)过滤的结果。最节俭的模型可由 Butterworth 滤波器修正得到:

$$S_x(\omega) = \frac{\omega^4}{\omega_h^4 + \omega^4} \times \frac{\omega_l^4}{\omega_l^4 + \omega^4} \times \frac{\omega_g^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} S_0 \quad (15)$$

若将 Clough-Penzien 谱模型再施加一个二阶 Butterworth 低通滤波器, 从而可得到另一建议模型:

$$S_x(\omega) = \frac{\omega_l^4}{\omega_l^4 + \omega^4} \times \frac{\omega^4}{(\omega_h^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_h \omega_h \omega)^2} \times \frac{\omega_g^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} S_0 \quad (16)$$

可更便于模拟双峰功率谱, 以增强模型的适应性。

式(15)和式(16)所表示的地震动加速度功率谱模型均为三重过滤模型, 各需 5 个和 6 个模型参数, 即 S_0 、 ω_g 、 ω_h 、 ω_l 、 ξ_g 和 ξ_h 。通常, $\omega_h \leq 0.1\omega_l$, $\omega_h \leq \omega_g \leq \omega_l$ 。对于频率通常处于 0.1Hz—25Hz 的大多数工程结构而言, ω_h 宜小于 0.2π rad/s, 而 ω_l 宜大于 50π rad/s。

4.2 建议模型的分析

式(15)与式(16)建议的两种地震动功率谱模型(分别称为建议谱 1 和建议谱 2)与式(10)的杜修力-陈厚群谱(称为杜-陈谱)形式类似, 但滤波器组成不同: 建议谱由一个二阶高通滤波器、一个二阶低通滤波器和 SDOF 线性滤波器组成; 而杜-陈谱由一个一阶高通滤波器、一个一阶低通滤波器和 SDOF 线性滤波器组成。将建议谱、杜-陈谱及 K-T 谱对比如图 3 所示, 谱中参数取值分别为: $\omega_g=10\pi$, $\xi_g=0.64$, $\omega_h=2\pi$, $\omega_l=8\pi$, $\xi_h=0.2$, $D=0.03$ 。由图 3 可见, 建议谱与杜-陈谱相比, 带宽窄、功率谱的幅值大、对高频和低频的滤波效应明显; 建议谱 1 和杜-陈谱均表现为明显的单峰形状, 建议谱 2 可反映双峰特

性。体现出建议谱有更强的适应性。

下面考查建议谱与杜-陈谱对结构弹性反应的影响。单自由度弹性结构在地震动加速度激励 $S_x(\omega)$ 下的相对位移反应功率谱可写成:

$$S_y(\omega) = |H_y(\omega)|^2 S_x(\omega) \quad (17)$$

其中 $|H_y(\omega)|$ 为传递函数:

$$|H_y(\omega)|^2 = 1/((\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_s^2 \omega_s^2 \omega^2) \quad (18)$$

式中: ω_s 为结构无阻尼自振频率; ξ_s 为阻尼比。

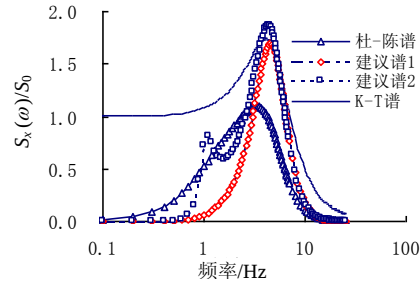
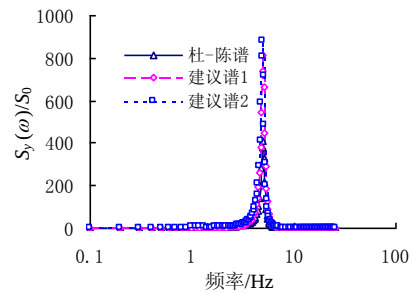


图 3 建议谱与杜-陈谱的滤波特性

Fig.3 Filtering Characteristic of the presented power spectra and the Du-Chen spectrum

取 $S_x(\omega)$ 谱参数同图 3, 得到 $S_y(\omega)$, 如图 4。

建议谱和杜-陈谱输入时单自由度弹性结构相对位移反应的功率谱如图 4 所示。 $\xi_s=0.05$, ω_s 分别取为 10π 、 20π 和 40π 。由图可见, 当结构自振频率 ω_s 和输入功率谱的固有频率 ω_g 相同时(图 4(a)), 建议谱和杜-陈谱输入时结构反应的功率谱相接近, 峰值反应均位于 10π , 而其余频率处的反应很小; 当结构自振频率界于高通下限频率和低通上限频率之间时(图 4(b)), 建议谱和杜-陈谱输入时结构反应的功率谱相近, 在 ω_s 和 ω_g 处均有峰值, 峰值最大值在结构自振频率处, 但建议谱的反应比杜-陈谱的反应大; 当结构的自振频率高于低通上限频率时(图 4(c)), 建议谱引起的结构反应带宽比杜-陈谱的反应带宽窄、幅值大; 低通上限频率处反应功率谱虽均有峰值, 但建议谱的滤波比杜-陈谱的明显。



(a) $\omega_s = 10\pi$

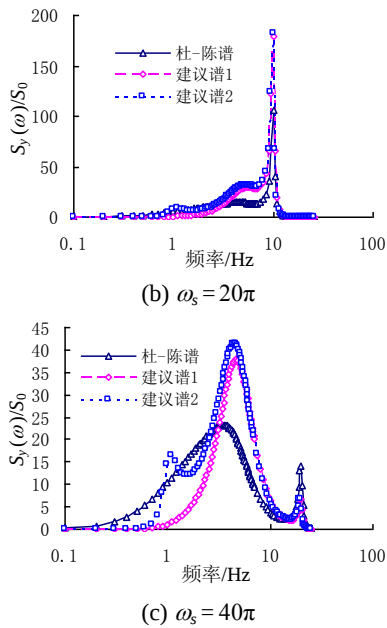


图 4 单自度结构位移反应的功率谱

Fig.4 Power spectra of displacement of SDOF structures

以上分析表明: 建议的随机地震功率谱模型参数没有增加, 但理论上更为合理, 适用性更强; 建议谱引起的结构反应也与其它谱引起的反应存在差异, 由此计算的结构随机地震反应量也将有所不同。

5 结语

(1) 从理论上提出了随机地震功率谱应满足地震过程能量有限和消除零频含量的基本要求;

(2) 对比分析了 9 种常用随机地震功率谱滤波特性和能量有界性, 指出常用模型存在的局限性;

(3) 根据随机模型的基本要求, 给出了建议的三重滤波形式的两种地震功率谱模型, 算例分析表明建议模型具有较强的适应性。

参考文献:

- [1] 李英民. 工程地震动的模型化研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 2000.
Li Yingmin. Modeling of strong ground motions for engineering purpose [D]. Chongqing: Chongqing Jianzhu University, 2000. (in Chinese)
- [2] 常中仁. 两自由度地震动模型在结构抗震设计中的应用[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1995.
Chang Zhongren. Application of two-degree-of freedom model of strong ground motions for seismic design of buildings [D]. Chongqing: Chongqing Jianzhu University, 1995. (in Chinese)
- [3] 俞载道, 曹国敖. 随机振动理论及其应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.

Yu Zaidao, Cao Guoao. Theory of random vibration and application [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1988. (in Chinese)

- [4] 胡聿贤, 周锡元. 弹性体系在平稳和平稳化地面运动下的反应[M]. 中国科学院土木建筑研究所地震工程研究报告集(第 1 集). 北京: 科学出版社, 1962: 33—50.
Hu Yuxian, Zhou Xiyuan. The response of the elastic system under the stationary and nonstationary ground motions [M]. Earthquake Engineering Research Report (No.1) by the Institute of Civil Engineering, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1962: 33—55. (in Chinese)
- [5] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1975.
- [6] 牛荻涛. 基于弹塑性随机动力分析的抗震结构概率设计理论与方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1991.
Niu Ditao. Theory and method of structure earthquake-resistant probability design based on elastoplastic random dynamic analysis [D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1991. (in Chinese)
- [7] 欧进萍, 牛荻涛, 杜修力. 设计用随机地震动的模型及其参数确定[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 45—54.
Ou Jinping, Niu Ditao, Du Xiuli. Model and parameters of random ground motion to design [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(3): 45—54. (in Chinese)
- [8] 叶天义. 结构抗震的随机振动理论及应用研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1993.
Ye Tianyi. Theory and application of random vibration in structure earthquake-resistant analysis [D]. Chongqing: Chongqing Jianzhu University, 1993. (in Chinese)
- [9] 赖明, 叶天义, 李英民. 地震动的双重过滤白噪声模型[J]. 土木工程学报, 1995, 28(6): 60—66.
Lai Ming, Ye Tianyi, Li Yingmin. Bi-filtered white noise model of earthquake ground motion [J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(6): 60—66. (in Chinese)
- [10] 洪峰, 江近仁, 李玉亭. 地震地面运动的功率谱模型及其参数的确定[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(2): 46—52.
Hong Feng, Jiang Jinren, Li Yuting. Power spectral models of earthquake ground motions and evaluation of its parameters [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(2): 46—52. (in Chinese)
- [11] 杜修力, 陈厚群. 地震随机模拟及其参数确定方法[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(4): 1—5.
Du Xiuli, Chen Houqun. Random simulation and its parameter determination method of earthquake ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(4): 1—5. (in Chinese)

(参考文献[12]—[18]转第 57 页)